

ISSN 2500-0632 (ON-LINE)



# MINING SCIENCE AND TECHNOLOGY

TOM 5, №3  
VOL. 5, №3  
2020

(RUSSIA)

GORNYE NAUKI I TEKHNologii  
ГОРНЫЕ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСИС»  
NATIONAL UNIVERSITY OF SCIENCE  
AND TECHNOLOGY MISIS

# СОДЕРЖАНИЕ

## ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

### ОБОГАЩЕНИЕ, ПЕРЕРАБОТКА МИНЕРАЛЬНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

- Повышение эффективности флотации медно-молибденовых руд с использованием измерения поглоти-тельной способности пульпы .....** 188  
 В. В. Морозов, Жаргалсайхан Эрдэнэзуул, И. В. Пестряк

### ГОРНЫЕ МАШИНЫ, ТРАНСПОРТ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

- Влияние неопределенности базирования штока гидростойки на размерный износ его базовых поверхностей.....** 201  
 Ван Туан Нго

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

- Оценка экологической опасности накопленных отходов переработки минерального сырья закрытых горных предприятий в Приамурье и Приморье.....** 208  
 Л. Т. Крупская, А. М. Орлов, Д. А. Голубев, К. А. Колобанов, М. А. Филатова

### ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

- Оценка использования геофизического метода VLF для определения мощности торфяного месторождения.....** 224  
 Т. Б. Яконовская, А. И. Жигульская, П. А. Яконовский

### РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

- Формирование устойчивости бортов при ведении взрывных работ на карьерах Кызылкумского региона .....** 235  
 Ш. Ш. Заиров, Ш. Р. Уринов, Р. У. Номдоров

### ЭНЕРГЕТИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

- Вопросы динамики многодвигательного электропривода на примере механизма наклона конвертера .....** 253  
 В. Ф. Борисенко, В. А. Сидоров, А. И. Землянский

### ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ В ГОРНОПРОМЫШЛЕННОМ СЕКТОРЕ ЭКОНОМИКИ

- Методы идентификации системных задач стратегического управления и повышения эффективности геологоразведочных работ на предприятии.....** 266  
 Д. Н. Молдаши

# CONTENTS

## ORIGINAL PAPERS

### BENEFICIATION AND PROCESSING OF NATURAL AND TECHNOGENIC RAW MATERIALS

- Increasing efficiency of copper-molybdenum ore flotation using measurement of pulp absorption capacity** ..... 188  
 V. V. Morozov, Jargalsaikhan Erdenezul, I. V. Pestryak

### MINING MACHINERY, TRANSPORT, AND MECHANICAL ENGINEERING

- Effect of uncertainty in basing hydraulic prop rod on dimensional wear of its basic surfaces**.... 201  
 Van Tuan Ngo

### SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

- Assessment of environmental hazard of accumulated mineral processing waste of closed mining enterprises in the Amur river region and Primorye**..... 208  
 L. T. Krupskaya, A. M. Orlov, D. A. Golubev, K. A. Kolobanov, M. A. Filatova

### GEOLOGY OF MINERAL DEPOSITS

- Assessment of applying VLF geophysical method to determine the peat deposit thickness**..... 224  
 T. B. Yakonovskaya, A. I. Zhigulskaya, P. A. Yakonovsky

### MINERAL RESOURCES EXPLOITATION

- Ensuring wall stability in the course of blasting at open pits of Kyzyl Kum region**..... 235  
 Sh. Sh. Zairov, Sh. R. Urinov, R. U. Nomdorov

### POWER ENGINEERING, AUTOMATION, AND ENERGY PERFORMANCE

- Issues of multi-motor electric drive dynamics through the example of converter tilting mechanism**..... 253  
 V. F. Borisenko, V. A. Sidorov, A. I. Zemlyansky

### EXPERIENCE OF MINING PROJECT IMPLEMENTATION

- Methods for identifying system tasks of strategic management and improving efficiency of exploration enterprise**..... 266  
 D. N. Moldashi

## ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

DOI: 10.17073/2500-0632-2020-3-188-200

**Повышение эффективности флотации медно-молибденовых руд с использованием измерения поглотительной способности пульпы****В. В. Морозов<sup>1</sup>, Эрденэзуул Жаргалсайхан<sup>1,2</sup>, И. В. Пестряк<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Россия, [✉ dchmggu@mail.ru](mailto:dchmggu@mail.ru)<sup>2</sup>ГОК «Эрдэнэт», Монголия

**Аннотация:** Перспективным направлением разработки систем автоматического управления расходами реагентов является применение данных измерения концентрации собирателя в водной фазе пульпы. Для решения задачи применения данных о концентрации неионогенного собирателя – аллилового эфира амылксантогеновой кислоты – в процессе флотации были проведены исследования и разработана методика анализа его остаточной концентрации в жидкой фазе флотационной пульпы. Разработанная спектральная методика измерения концентрации аллилового эфира амылксантогеновой кислоты в водной фазе пульпы показала стабильные результаты в интервале температур 10–25 °С, интервале pH от 8,5 до 11,0, что позволило применить ее для измерения остаточной концентрации собирателя AeroMX-5140 в операции коллективной сульфидной флотации при обогащении медно-молибденовых руд. В результате проведения лабораторных исследований была установлена связь показателей остаточной концентрации с основными показателями медно-молибденовой флотации. Проведенными исследованиями установлено, что повышение остаточной концентрации неионогенного собирателя происходит при увеличении его расхода и pH водной фазы пульпы. Показано, что существенный рост извлечений металлов наблюдается при близких остаточных концентрациях собирателя: для меди в интервале от 0,25 до 0,5 мг/л, а для молибдена и пиритного железа – при концентрации от 0,25 до 1 мг/л. Обоснована возможность использования остаточной концентрации неионогенного собирателя в качестве информационного параметра флотационного процесса. Предложено использовать поглотительную способность руды по отношению к используемому собирателю в качестве параметра сортности руды. Показано, что включение данного параметра снижает относительную дисперсию для зависимостей выходов отдельных типов руды и увеличивает точность определения состава перерабатываемой руды как смеси типовых сортов руд. Разработан и проверен в условиях обогащательной фабрики ГОКа «Эрдэнэт» (Монголия) алгоритм автоматизированного управления расходами флотационных реагентов на основе опережающего контроля элементного и минерального состава перерабатываемой руды с расчетом величины поглотительной способности пульпы по отношению к неионогенному собирателю, включающий определение параметров процессов обогащения с использованием экономико-ориентированного критерия оптимизации. Ожидаемый экономический эффект от снижения потерь составил 145 тыс. долларов США.

**Ключевые слова:** медно-молибденовые руды, флотация, концентрация собирателя, УФ-спектрофотометрия, поглотительная способность, регулирование, оптимизация

**Для цитирования:** Морозов В. В., Жаргалсайхан Эрденэзуул, Пестряк И. В. Повышение эффективности флотации медно-молибденовых руд с использованием измерения поглотительной способности пульпы *Горные науки и технологии*. 2020;5(3):188-200. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-3-188-200

**Increasing Efficiency of Copper-Molybdenum Ore Flotation using Measurement of Pulp Absorption Capacity****V. V. Morozov<sup>1</sup>, Erdenezul Jargalsaikhan<sup>1,2</sup>, I. V. Pestryak<sup>1</sup>**<sup>1</sup> National University of Science and Technology MISiS (NUST MISiS), Moscow, Russia, [✉ dchmggu@mail.ru](mailto:dchmggu@mail.ru)<sup>2</sup>"ERDENET" GOK, Mongolia

**Abstract:** A promising line in development of reagent consumption automatic control systems is applying data on measuring collector concentration in the pulp aqueous phase. For effective using data on the concentration of the nonionic collector – allyl ester of amylxanthogenic acid – in the process of flotation, the studies were carried out and the method for analyzing its residual concentration in the flotation pulp liquid phase was developed. The developed spectral technique for measuring the



concentration of amylxanthogenic acid allyl ester in the pulp aqueous phase showed stable results in the temperature range of 10 to 25 °C, pH range of 8.5 to 11.0. This allowed applying the technique to measuring residual concentration of AeroMX-5140 collector in the operation of bulk sulphide flotation in copper-molybdenum ore beneficiation. The laboratory tests allowed determining connection between the indicators of residual concentration with the main indicators of copper-molybdenum flotation. The studies showed that increasing the residual concentration of the non-ionic collector occurs with increasing its consumption and pH of the pulp aqueous phase. It is shown that significant increase in metal recoveries is observed at similar residual collector concentrations: for copper, in the range of 0.25 to 0.5 mg/l, and for molybdenum and pyrite iron, at the concentrations from 0.25 to 1 mg/l. The possibility of using the nonionic collector residual concentration as the informational indicator of the flotation process has been substantiated. It is proposed to use the ore absorption capacity in relation to the collector applied as an indicator of the ore grade. It is shown that using this indicator reduces relative variance for the dependences of the yields of individual ore types and increases the accuracy of determining the composition of the processed ore as a mixture of typical ore grades. An algorithm for automated control of the consumption of flotation reagents based on the advanced control of the processed ore elemental and mineral composition was developed and tested at Erdenet GOK processing plant, with the calculation of the pulp absorption capacity in relation to the nonionic collector, including the beneficiation process indicators determination using an economically-oriented optimization criterion. The expected economic effect from the reduction of metal losses amounted to USD 145 thous.

**Keywords:** copper-molybdenum ores, flotation, collector concentration, UV spectrophotometry, absorption capacity, regulation, optimization

**For citation:** Morozov V. V., Jargalsaikhan Erdenezul, Pestryak I. V. Increasing efficiency of copper-molybdenum ore flotation using measurement of pulp absorption capacity. *Gornyye nauki i tekhnologii = Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(3):188-200. (In Russ.) DOI: 10.17073/2500-0632-2020-3-188-200

## Введение

Перспективным направлением разработки систем автоматического управления расходами реагентов является применение данных измерения концентрации собирателя в водной фазе пульпы [1, 2]. Для ионогенных собирателей типа ксантогенатов и аэрофлотов были разработаны и применяются методики, предполагающие прямую УФ-спектрофотометрию реагентов в фильтратах жидкой фазы флотационной пульпы [3–5]. Сложнее происходит процесс флотации с применением неионогенных собирателей, определение которых прямым спектрофотометрическим анализом затруднительно [6].

На обогатительной фабрике ГОКа «Эрдэнэт» (Монголия) применяются неионогенные собиратели класса аллиловых эфиров алкилксантогеновых кислот [7, 8]. Для данного класса веществ ранее была разработана методика УФ-спектрального анализа, предполагающая экстракцию эфиров алкилксантогеновых кислот в ацетон и измерение оптической плотности полученного раствора при длине волны 355...358 нм [9]. Однако эта методика не нашла практического применения

вследствие невысокой точности анализа. Поэтому разработка методики измерения концентрации в водной фазе пульпы аллиловых эфиров алкилксантогеновых кислот, являющихся основой собирателя AeroMX-5140, эффективно применяемого при флотации медно-молибденовых руд, является весьма актуальной научно-практической задачей.

## Методика и результаты спектральных исследований

Для решения задачи применения данных о концентрации неионогенного собирателя – аллилового эфира амилксантогеновой кислоты – в процессе флотации были проведены исследования и разработана методика анализа его остаточной концентрации в жидкой фазе флотационной пульпы. При проведении спектрального анализа использовали спектрофотометр ПЭ-5400 УФ. Применялась базовая методика снятия спектров, предполагающая вычитание из спектра поглощения пробы анализируемого раствора аналогичного спектра контрольной пробы и автоматизированный расчет концентрации вещества по разности поглощений на УФ-излучения при фиксированных длинах волн [10].

Спектрально-активная фракция собирателя AeroMX-5140 характеризуется тремя ярко и отчетливо выраженными пиками поглощения: при 220, 255 и 273 нм, которые обусловлены электронными переходами в эфирах алкилксантогеновых кислот. Для измерений была применена экстракционная методика, включающая операции отбора и очистки жидкой фазы, экстракцию неионогенных компонентов раствора в органический экстрагент, получение и анализ УФ-спектров экстрагента с экстрагируемыми веществами.

Важным этапом исследований являлся выбор экстрагента, обеспечивающего наиболее полное извлечение аллилового эфира амилксантогеновой кислоты из водной среды флотационной пульпы без извлечения в нее других органических веществ. В качестве предполагаемых экстрагентов были изучены аполярные и полярные растворители н-гексан, гептан, ацетон и пиридин. В результате проведенных сравнительных опытов в качестве экстрагента был выбран н-гексан. Сопоставление результатов измерений показало, что при соотношении экстрагент / аликвота пробы в интервале от 1:10 до 1:1 использование н-гексана обеспечивает практически полный переход собирателя из водной фазы (на 94...96 %). Анализ ИК-спектров установил, что при этом не наблюдается извлечение других органиче-

ских соединений, в частности спиртов, составляющих основу используемого вспенивателя – метилизобутилкарбинола [11].

Анализ калибровочных графиков показывает, что в интервале концентраций от 0 до 1,5 мг/л наблюдается близкая к линейной зависимость оптической плотности пробы при длинах волн 220 и 270 нм от концентрации собирателя (рис. 1). Диапазон остаточной концентрации собирателя при его достоверном анализе составляет от 0,2 до 1,5 мг/л. В данном диапазоне значений погрешность измерений составляет 2,5...7,5 %. При варьировании соотношения экстрагент / аликвота от 1:1 до 1:20 достоверно определяемые концентрации собирателя в анализируемой водной фазе находятся в диапазоне от 0,1 до 15 мг/л, что вполне соответствует концентрациям собирателя в коллективной и селективной флотации.

Разработанная методика была проверена на промышленных пульпах коллективной медно-молибденовой и селективной молибденовой флотации. Было подтверждено, что разработанная методика обеспечивает достоверное измерение в интервале температур 10...25 °С при рН от 8,5 до 11,0. Полученные результаты позволили рекомендовать эту методику для измерения остаточной концентрации собирателя в различных операциях флотации при обогащении медно-молибденовых руд.

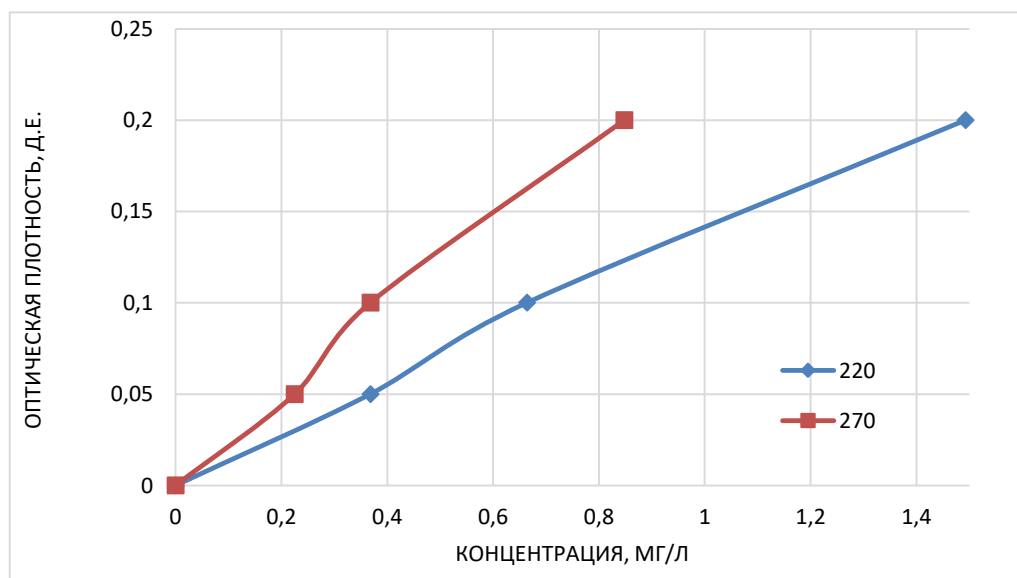


Рис. 1. Градуировочная характеристика собирателя AeroMX-5140 при длине волны 220 и 270 нм

### Методика и результаты флотационных исследований

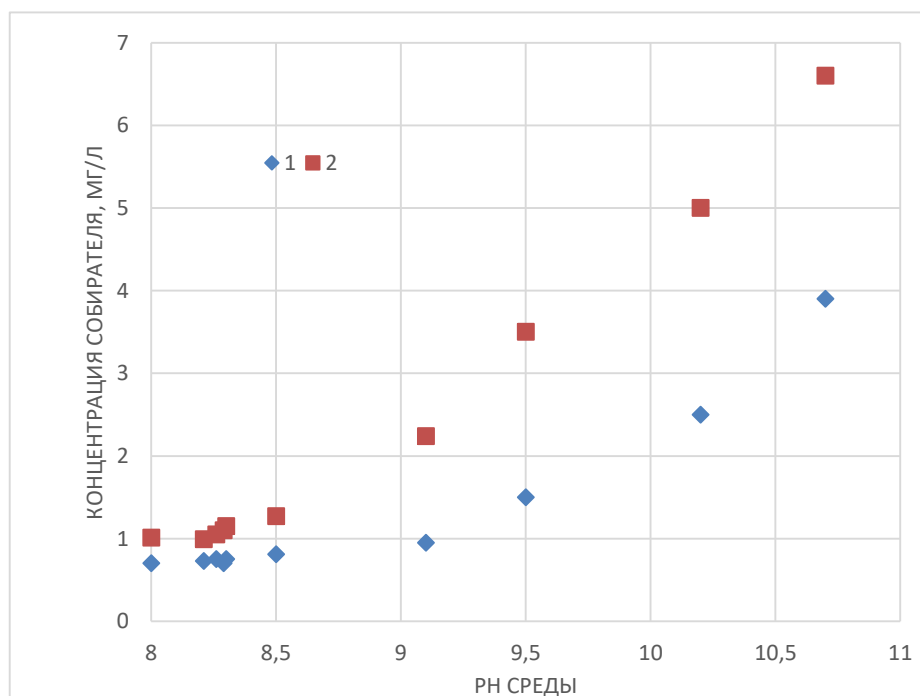
По разработанной методике анализа концентрации собирателя были проведены опыты флотации медно-молибденовых руд в условиях варьирования pH среды и расхода собирателя, которые являются основными параметрами реагентного режима коллективной медно-молибденовой флотации [12].

Схема подготовки руды включала мелкое дробление пробы руды до крупности –2,5 мм, измельчение руды в стержневой и шаровой мельнице до крупности 45...75 % класса –65 мкм. Измельченная руда подавалась на коллективную флотацию, проводимую в режиме, используемом на действующей обогатительной фабрике ГОКа «Эрдэнэт». В операцию коллективной флотации добавляли метилизобутилкарбинол (в качестве вспенивателя) и реагент AeroMX 5140 в качестве собирателя. В качестве регулятора pH среды использовалась каустическая сода. Коллективную флотацию

сульфидов проводили в течение 5 мин в механической флотомашине с объемом камеры 1 л. Из камерного продукта отбирали пробу жидкой фазы, измеряли pH среды и концентрацию собирателя.

Полученные результаты показали, что при увеличении pH водной фазы пульпы наблюдается рост остаточной концентрации аллилового эфира амилксантогеновой кислоты, которая является основной фракцией используемого собирателя (рис. 2).

Полученная в результате поставленных опытов зависимость извлечения ценных компонентов от концентрации собирателя близка по форме зависимостям, полученным при использовании ионогенного собирателя – ксантогената [12]. Увеличение концентрации собирателя в водной фазе пульпы при повышении pH среды обусловлено действием гидроксильных ионов на поверхность минералов, а также окислением и гидрофилизацией их поверхности [1, 2, 5].



**Рис. 2. Изменение остаточной концентрации собирателя в водной фазе пульпы при варьировании pH жидкой фазы пульпы:**

1 – при расходе AeroMX-5140 10 г/т; 2 – при расходе AeroMX-5140 15 г/т

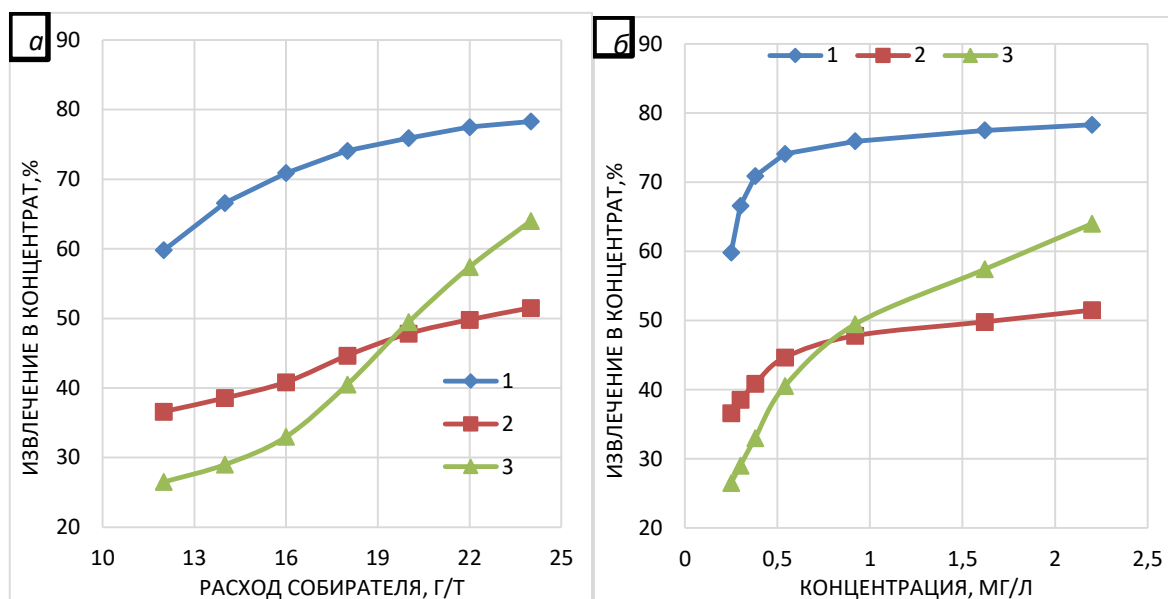


Рис. 3. Графические экспериментальные зависимости извлечения сульфидов меди (1), молибдена (2) и пирита (3) от расхода (а) и концентрации (б) собирателя AeroMX-5140 (pH 10,3)

Такой результат обосновывает возможность и целесообразность использования измеренной остаточной концентрации неионогенного собирателя в качестве параметра флотационного процесса при его оптимизации или автоматическом регулировании реагентного режима.

Данный вывод подтверждается результатами опытов, в которых варьировался расход собирателя во флотацию. Флотационные опыты проводились при постоянной крупности измельчения 63 % – 74 мкм и pH 8,5. Полученные результаты показали, что увеличение извлечения минералов меди имеет место при остаточной концентрации собирателя от 0,25 до 0,5 мг/л, а минералов молибдена и пирита – от 0,25 до 1 мг/л (рис. 3).

Характер полученных зависимостей флотуемости минералов от остаточной концентрации принципиально отличается от аналогичных зависимостей, полученных при использовании ионогенных собирателей [1, 12]. По данным зарубежных и отечественных исследователей, концентрация ксантогената, необходимая для полной флотации сульфидных минералов меди и железа в щелочной среде, отличается в 10 и более раз [2, 13]. Отмечаемый на рис. 3 схожий вид зависимостей «извлечение металлов –

концентрация собирателя» для рассматриваемых сульфидных минералов позволяет заключить, что наиболее вероятным механизмом закрепления неионогенного собирателя типа аллилового эфира амылксантогеновой кислоты является взаимодействие с неокисленной сульфидной поверхностью [13].

Согласно полученным экспериментальным данным в жидкой фазе флотационной пульпы в операции коллективной медно-молибденовой флотации целесообразно поддерживать концентрацию собирателя не ниже 0,2...0,25 мг/л. При этом следует обратить внимание, что существенный рост остаточной концентрации собирателя может быть обусловлен неудовлетворительными условиями для взаимодействия собирателя с поверхностью флотируемых минералов. В этом случае остаточная концентрация неионогенного собирателя будет определяться совокупностью факторов и не может быть применена в качестве основного критерия при регулировании расхода или pH среды. Поэтому для создания эффективных систем и алгоритмов управления реагентным режимом флотации требуется проведение дополнительных исследований.



Другим, более эффективным подходом является управление процессом флотации на основе оперативного контроля возмущающих факторов процесса флотации. В нашем исследовании измеренная величина остаточной концентрации собирателя была использована в алгоритмах управления процессом флотации на основе контроля сортности перерабатываемой руды.

#### **Определение оптимальных условий флотации с использованием критерия поглотительной способности пульпы**

Наличие связей флотируемости минералов с остаточной концентрацией неионогенного собирателя может быть использовано для корректировки алгоритмов оптимизации параметров режима флотации, например, расхода собирателя. Хорошо известным подходом к управлению расходом собирателя является расчет и использование критерия поглотительной способности твердой фазы пульпы (ПС), рассчитываемого как частное от деления количества поглощенного собирателя ( $\Delta q$ ) на массу твердого в пульпе ( $Q$ ) по уравнению [14]:

$$ПС = \Delta q / Q. \quad (1)$$

Поглотительная способность пульпы по отношению к собирателю при флотации гипергенно измененных сульфидных порфировых руд в большей степени связана с минеральным составом вмещающих пород чем с составом

рудных минералов. Для установления причин возрастания поглощающей способности пульпы были поставлены опыты по взаимодействию собирателя с основными порообразующими минералами медно-молибденовых руд. Как видно из табл. 1, наибольшей поглотительной способностью по отношению к собирателю обладает серицит, являющийся основным минералом гипергенного замещения (процесса серитизации). Наименьшей поглотительной способностью характеризуются неизмененные порфировые минералы – грансиениты и грандиориты. Такое различие в способности к поглощению собирателя впервые было отмечено в диссертационной работе Э. Жаргалсайхан [15].

Анализ данных табл. 1 также показал влияние pH пульпы на поглотительную способность порообразующих минералов. Увеличение pH с 10,1 до 10,35 снижает поглотительную способность порообразующих минералов на 7...12 %.

Использование поглотительной способности пульпы в качестве критерия флотационного процесса обусловлено объективными причинами, которые заключаются в существенно различающихся значениях для выделенных групп первичных и вторичных минералов. Такие отличия дают основания для использования поглотительной способности пульпы в качестве критерия при распознавании сортности перерабатываемой руды.

**Таблица 1**

**Поглотительная способность порообразующих минералов по отношению к собирателю AeroMX 5140 при исходной концентрации 10 мг/л [15]**

| Минералы и породы         | pH    | Поглощение собирателя, мг/кг |
|---------------------------|-------|------------------------------|
| Грансиениты и грандиориты | 10,1  | 0,45                         |
|                           | 10,35 | 0,41                         |
| Кварцит                   | 10,1  | 0,55                         |
|                           | 10,35 | 0,50                         |
| Метаморфизованный кварц   | 10,1  | 1,77                         |
|                           | 10,35 | 1,52                         |
| Серицит                   | 10,1  | 4,42                         |
|                           | 10,35 | 4,10                         |

### Совершенствование алгоритма автоматизированного управления процессом флотации с использованием параметра поглотительной способности пульпы

Наилучшие результаты при автоматизированном управлении процессами флотации достигаются при использовании модель-ориентированных систем и алгоритмов управления, применяющих результаты определения состава и качества перерабатываемой руды. Повышение эффективности систем автоматизированного управления реагентными режимами флотации возможно на основе разработки и применения экономико-ориентированных комбинированных критериев, в частности, путем включения в алгоритм управления критериев оптимизации [16]. Данный подход может быть улучшен за счет расширения номенклатуры измеряемых параметров процесса флотации, в том числе включения в них

концентрации собирателя и поглотительной способности твердой фазы флотационной пульпы по отношению к применяемому собирателю.

Этапы автоматизированного управления процессами измельчения и флотации, представленные на рис. 4, включают операции оценки сортности перерабатываемых руд и экономико-ориентированной оптимизации [17].

Управление процессом флотации осуществляется на двух уровнях. Расчет оптимальных параметров процессов измельчения и флотации происходит на основе данных о сортности руд, причем определение параметров реагентного режима производится с применением экономико-ориентированных критериев оптимизации [16].

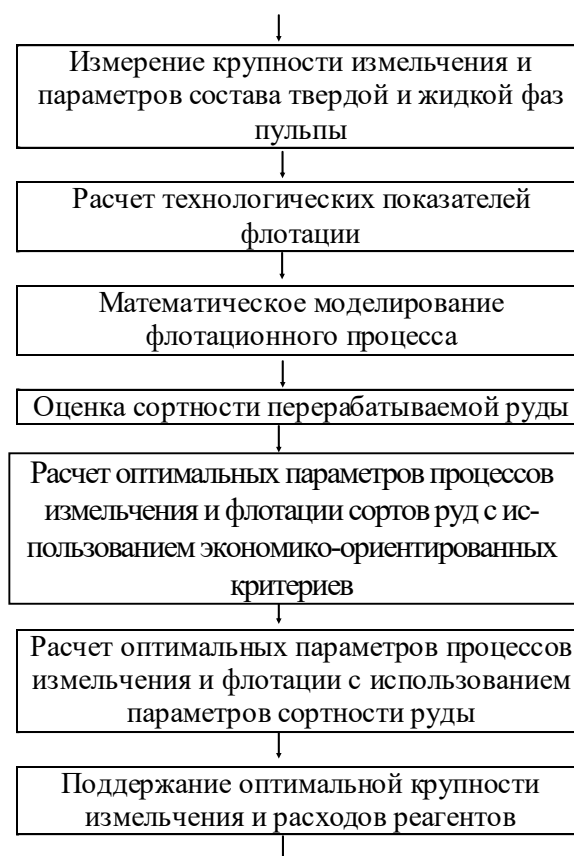


Рис. 4. Этапы автоматизированного управления процессом флотации на основе оценки сортности руд

Препозиционной задачей алгоритма является выбор оптимальных режимов для переработки типовых руд. Данный этап проводится на представительных пробах различных сортов руд, вовлекаемых в переработку. Оптимальный режим переработки текущей руды определяется с учетом опережающей оценки ее сортности. Данный метод разработан и освоен на ГОКа «Эрдэнэт», где для определения свойств руды используются данные рентгенофлюоресцентного и визиометрического анализа [16, 17].

Алгоритм определения сортности руды подробно изложен в работах [15, 18] и предполагает определение ее схожести с основными технологическими типами руд. Конечная задача определения сортности руды формируется как задача определения в ней доли основных технологических типов руд.

Расчет сортности руды осуществлялся с применением многокритериального метода расчета принадлежности [15, 17]. Область нахождения решения в задаче представлена образами пяти типовых руд. Математическая часть системы обеспечивает расчет сортности поступившей руды по восьми или более значимым параметрам руды (содержанию меди, молибдена и железа в руде, массовой доле окисленных, вторичных сульфидных минералов меди в руде, первичных минералов меди, пирита и серицита).

В соответствии с проведенными исследованиями в качестве дополнительного параметра сортности руды было предложено использовать

поглотительную способность руды по отношению к используемому собирателю AeroMX-5140, определяемую с применением базового уравнения (1) или его аналогов, учитывающих влияние pH среды и крупности руды. Для определения поглотительной способности основных выделенных типов руд использовались результаты замера остаточной концентрации собирателя в жидкой фазе пульпы в лабораторных условиях (полученных при флотации данных типов руд). При проведении исследований и испытаний проба, отобранная из операции основной коллективной флотации, фильтровалась и в жидкой фазе пробы с использованием разработанной и описанной в разд. 1 данной методики определялась концентрация спектрально-активной фазы реагента AeroMX-5140. Для вычисления поглотительной способности проводились опыты с узким интервалом значений pH (10,3...10,4) и расхода собирателя (12...18 г/т).

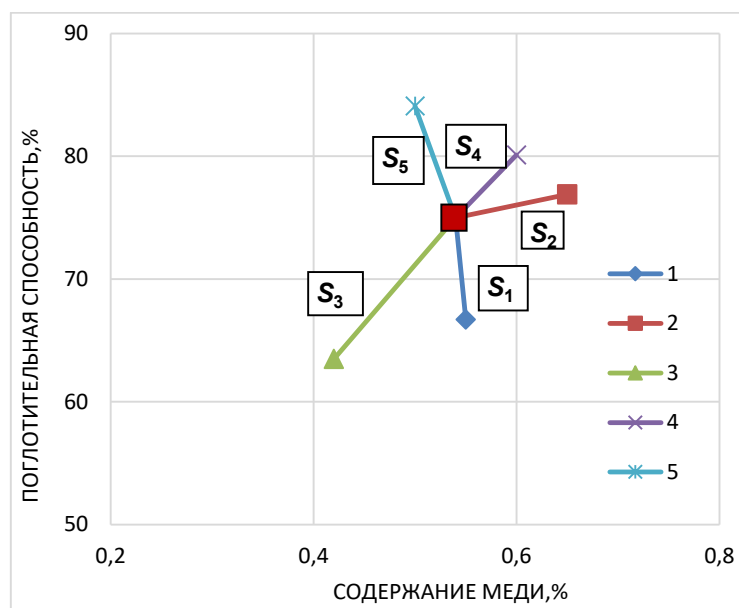
Проведенными нами исследованиями было подтверждено, что базовые типы руд, перерабатываемых на обогатительной фабрике ГОКа «Эрдэнэт», характеризуются неодинаковой поглотительной способностью в отношении собирателя. Анализ результатов исследований операции коллективной медно-молибденовой флотации, проводимой с использованием собирателя AeroMX 5140, показал, что наибольшую склонность к поглощению проявляют смешанные окисленные и смешанные серитизированные руды (табл. 2).

Таблица 2

**Средняя концентрация собирателя и поглотительная способность пульпы  
в операции коллективной флотации для типовых руд**

| Тип обогащаемой руды | Параметры флотации |                              |                                  |            |                                          |
|----------------------|--------------------|------------------------------|----------------------------------|------------|------------------------------------------|
|                      | pH<br>среды        | Расход<br>собирателя,<br>г/т | Концентрация собирателя,<br>мг/л |            | Поглотительная<br>способность (ПС),<br>% |
|                      |                    |                              | начальная                        | остаточная |                                          |
| 1. МПР               | 10,35              | 15,0                         | 7,8                              | 2,6        | 66,7                                     |
| 2. СВСП              | 10,35              | 15,0                         | 7,8                              | 1,8        | 76,9                                     |
| 3. БПР               | 10,35              | 15,0                         | 7,8                              | 3,0        | 63,5                                     |
| 4. СОР               | 10,35              | 15,0                         | 7,8                              | 1,5        | 80,1                                     |
| 5. ССП               | 10,35              | 15,0                         | 7,8                              | 1,4        | 84,1                                     |

*Примечание.* МПР – массивные первичные руды; СВСП – смешанные вторичные сульфидизированные руды; БПР – бедные пиритизированные руды; СОР – смешанные окисленные руды; ССП – смешанные серитизированные руды.



**Рис. 5. Пример оценки компонентного состава руды в двумерном пространстве  
«Содержание меди – поглотительная способность пульпы»:**

1 – массивные первичные руды; 2 – смешанные вторичные сульфидизированные руды; 3 – бедные пиритизированные руды; 4 – смешанные окисленные руды; 5 – смешанные серитизированные руды; 6 (■) – руда текущей добычи;  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $S_4$ ,  $S_5$  – отклонения параметров руды текущей добычи от параметров типовых руд

Применяемая методика расчета сортности руды основана на определении степени ее «сходства» каждому из пяти типов руды. Пропорционально этому сходству устанавливаются относительные доли этих пяти типов руды в руде, поступившей на переработку [18]. В алгоритме расчета первоначально определяется удаленность от точки, координаты которой соответствуют параметрам перерабатываемой руды, до каждой из точек, координаты которых соответствуют базовым типам руд. Чем ближе точка, соответствующая входящей руде (шестой тип) к какой-либо из точек, отвечающих параметрам определенного типа руды (1–5) на диаграмме, тем выше относительная доля выделенного сорта (1–5) в руде текущей добычи.

В результате проведенных исследований, показавших значимость параметра поглотительная способность пульпы для процесса флотации, было предложено применение данного параметра для определения сортности руды. Алгоритм распознавания сортности руды пояснен на примере двухпараметрической системы «Содержание меди – Поглотительная способность пульпы по отношению к собирателю», изобра-

женной на рис. 5. Необходимо отметить, что параметр «Поглотительная способность пульпы по отношению к собирателю» является вполне независимым параметром, о чем свидетельствует независимая пространственная распределенность характеристик типов руд в выбранной системе координат.

Как видно из рис. 5 руда, поступающая на переработку, отчетливо распознается как смесь выделенных типов руд уже в двухпараметрической системе. На практике использовалась система из 8 параметров: содержаний металлов, минералов, соотношений минералов и минеральных групп, что делало задачу определения сортности корректно решаемой с высокой степенью определенности. При оснащении системы датчиком концентрации собирателя и расчете поглотительной способности пульпы по отношению к собирателю система распознавания сортности руды (девяти параметрическая) становится еще более точной.

При определении сортности руды кроме поглотительной способности используются параметры типовых руд, представленные в табл. 3 [15, 19].



Таблица 3

Параметры типовых руд, используемые при определении сортности текущей руды [15, 19]

| Параметр                                                         | Типы руды |       |       |      |       |
|------------------------------------------------------------------|-----------|-------|-------|------|-------|
|                                                                  | МПР       | СВСП  | БПР   | СОР  | ССР   |
| Соотношение массовых долей первичных и вторичных сульфидов меди  | 2,1       | 0,50  | 0,45  | 0,75 | 0,57  |
| Соотношение массовых долей первичных и окисленных минералов меди | 18,5      | 15,4  | 21,4  | 10,4 | 17,6  |
| Соотношение массовых долей халькопирита и пирита                 | 0,77      | 1,5   | 0,45  | 0,86 | 0,67  |
| Массовая доля меди в руде, %                                     | 0,53      | 0,57  | 0,39  | 0,55 | 0,52  |
| Массовая доля молибдена в руде, %                                | 0,015     | 0,028 | 0,013 | 0,02 | 0,025 |
| Массовая доля железа в руде, %                                   | 1,50      | 1,09  | 1,15  | 1,22 | 1,30  |
| Массовая доля серицита в руде                                    | 0,12      | 0,15  | 0,1   | 0,17 | 0,34  |
| Массовая доля порфириновых минералов, %                          | 0,45      | 0,40  | 0,48  | 0,39 | 0,22  |
| Поглотительная способность к собирателю, %                       | 66,7      | 76,9  | 63,5  | 80,1 | 84,1  |

Таблица 4

Статистические характеристики зависимостей долей отдельных сортов в общей перерабатываемой руде

| Тип руды | Показатель детерминированности $R^2$ |                                  | Остаточная дисперсия              |                                  |
|----------|--------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
|          | без учета концентрации собирателя    | с учетом концентрации собирателя | без учета концентрации собирателя | с учетом концентрации собирателя |
| МПР      | 0,77                                 | 0,81                             | 0,26                              | 0,22                             |
| СВСП     | 0,74                                 | 0,78                             | 0,28                              | 0,23                             |
| БПР      | 0,71                                 | 0,76                             | 0,26                              | 0,21                             |
| СОР      | 0,75                                 | 0,79                             | 0,27                              | 0,22                             |
| ССР      | 0,77                                 | 0,82                             | 0,26                              | 0,21                             |

Согласно используемому алгоритму после нормирования и оценки значимости параметров определяются значения относительных долей типовых руд в перерабатываемой руде [18].

Первоначально рассчитывается нормированная величина отклонения ( $S_i$ ) параметров смеси руд ( $Z_n$ ) от параметров типовых руд ( $Z_{ni}$ ) по формуле

$$S_i = (|Z_n - Z_{ni}|) / Z_{ni}, \text{ при } i = 1 \dots 5.$$

Затем рассчитываются нормированные величины схожести параметров смеси руд  $S_i$  с параметрами типовых руд по формуле

$$D_i = 1 / S_i, \text{ при } i = 1 \dots 5.$$

Значение относительной доли каждого типа руды ( $\gamma_i$ ) рассчитывается по формуле

$$\gamma_i = kD_i / \sum(kD_i), \text{ при } i = 1 \dots 5,$$

где  $k$  - коэффициенты значимости отдельных параметров руды.

Для подтверждения целесообразности и возможности использования в качестве дополнительного параметра сортности руды поглотительную способность ПС был использован расчет и анализ остаточной дисперсии исходного массива данных относительно результирующей функции при определении сортности входящей руды. Такая оценка основана на возможности снижения случайных колебаний и, соответственно накопленной относительной дисперсии за счет использования дополнительного устойчивого и адекватного параметра. Результаты расчетов показали, что включение ПС снижает относительную дисперсию при определении зависимостей долей отдельных сортов с 0,26...0,28 до 0,21...0,23 (табл. 4). Полученный результат свидетельствует о повышении адекватности модели и

точности определения сортности перерабатываемой руды.

Разработанный алгоритм был апробирован в АСУТП процессов измельчения и коллективной флотации обогатительной фабрики ГОКа «Эрдэнэт». Алгоритм автоматизированного регулирования предусматривает регулирование расходов реагентов с учетом вещественного состава и сортности руды и показателей обогащения [17].

Оценка сортности руды проводилась по данным анализа элементного состава измельченной руды, получаемого от установленного на сливе гидроциклонов погружного рентгенофлюоресцентного анализатора Amdel-ISA, визиометрического анализатора сортности руды,

подающего мелкодробленую руду в мельницу МШЦ-1А отделения измельчения–флотации. Измерение остаточной концентрации собирателя проводили в жидкой фазе пробы хвостов контрольной коллективной флотации, отбираемой пробоотборником системы ПРО-1 прободоставки анализатора АР-31. Экстракция собирателя из пробы проводилась в н-гексан. Анализ концентрации собирателя осуществлялся УФ-спектральным методом.

Результаты анализа сортности перерабатываемой руды, представляемые в виде графиков изменения относительной доли отдельных сортов руд, изображенных на рис. 6, использовались при расчете параметров процессов измельчения и коллективной флотации.

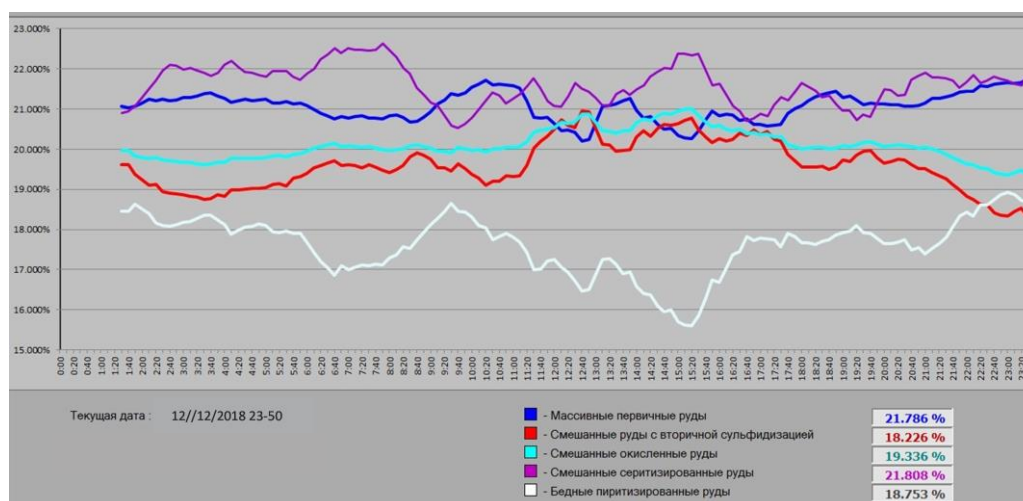


Рис. 6. График изменения сортности руды на конвейере питания мельницы МШЦ-1А

Результаты проверки показали, что применение разработанного алгоритма управления, включающего использование экономико-ориентированных критериев оптимизации, позволяет повысить эффективность обогащения перерабатываемых медно-молибденовых руд. Оценка экономического эффекта от использования системы и обновленного алгоритма производилась путем расчета снижения приведенных потерь ценных компонентов с 1 т руды, составившего 9 центов на 1 т руды. В пересчете на производительность секции и с учетом увеличения затрат на реагенты экономический эффект составит 145 тыс. долларов США.

## Заключение

С использованием спектральной методики измерения остаточной концентрации спектрально активной фракции неионогенного собирателя AeroMX 5140 – аллилового эфира амилксантогеновой кислоты – в водной фазе установлены зависимости остаточной концентрации неионогенного собирателя от расхода собирателя и pH водной фазы пульпы коллективной медно-молибденовой флотации. Установлена возможность использования остаточной концентрации неионогенного собирателя в качестве параметра–флотационного процесса.

В качестве параметра сортности перерабатываемой руды предложено применять соотношение приведенной поглотительной способности руды по отношению к используемому собирателю, рассчитываемую как отношение разности расчетной и измеренной концентрации собирателя, к расчетной. Показано, что включение поглотительной способности твердой фазы пульпы в качестве параметра снижает относительную дисперсию для зависимостей выходов отдельных типов руды с 0,26...0,28 до 0,21...0,23. Такой результат позволяет под-

твердить вывод о повышении адекватности модели и точности определения сортности перерабатываемой руды при использовании в качестве дополнительного параметра поглотительную способность пульпы. Разработан и проверен в действующей АСУТП обогатительной фабрики алгоритм автоматизированного регулирования расходов реагентов с учетом элементного и минерального состава руды, поглотительной способности пульпы по отношению к применяемому собирателю. Экономический эффект от снижения потерь меди и молибдена в товарные концентраты составил 145 тыс. долларов США.

### Библиографический список

1. Авдохин В. М. *Основы обогащения полезных ископаемых*. Т. 1. Обогачительные процессы. М.: Горная книга; 2008. 417 с.
2. Абрамов А. А. *Теоретические основы создания инновационных технологий флотации*. Ч. 2. Теоретические основы физико-химического моделирования процессов селективной флотации руд цветных металлов. *Цв. металлы*. 2013;(3):11–15.
3. *Анализатор жидкости фотометрический АЖФ-6*. Режим доступа: <http://ptk-kip.ru/publics/item/4205>.
4. Hao F., Davey K. J., Bruckard W. J., Woodcock J. T. Online analysis for xanthate in laboratory flotation pulps with a UV monitor. *International Journal of Mineral Processing*. 2008;89(1-4):71–75.
5. Lalla B., Knights B. D. H. & Steenkamp C. J. H. Online Measurement of Xanthate in Flotation Circuits by Means of UV Spectrophotometry. In: *Proceedings of 48th Annual Conference of Metallurgists COM*. Sudbury, Canada; 2009. P. 46–48.
6. Bulatovic Srdjan M. *Handbook of Flotation Reagents Chemistry, Theory and Practice: Flotation of Sulfide Ores*. Elsevier Science & Technology Books; 2007. 446 p.
7. Технологическая инструкция по обогащению медно-молибденовых руд на обогатительной фабрике совместного Монголо-Российского предприятия «Эрдэнэт». Эрдэнэт, Монголия; 2014. 194 с.
8. Morozov V., Davaasambuu D., Ganbaatar Z., etc. Modern systems of automatic control of processes of grinding and flotation of copper-molybdenum ore. In: *16th IFAC Symposium on Control, Optimization and Automation in Mining, Minerals and Metal Processing*. 2013;15(1):166–171.
9. Сивкова Р. И., Воронина Л. В., Молодцова В. И. Пат. 726472 СССР. *Способ количественного определения эфиров ксантогеновых кислот*. Оpubл. 05.04.1980. Бюл. № 7.
10. Fleming I, Williams D. H. *Spectroscopic Methods in Organic Chemistry*. 6<sup>th</sup> Ed.; 2007. 304 p.
11. Морозов В. В., Пестряк И. В., Эрдэнэзул Ж. Влияние концентрации неионогенного собирателя – аллилового эфира амилксантогеновой кислоты на флотацию медно-молибденовых руд. *Цв. металлы*. 2018;(11):14–20.
12. Sun X., Forsling W. The degradation kinetics of ethyl-xanthate as a function of pH in aqueous solution. *Minerals Engineering*. 1997;10(4):400–412. DOI: [10.1016/S0892-6875\(97\)00016-2](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(97)00016-2)
13. Leja J. *Surface chemistry of froth flotation*. Plenum Press; 1982. 329 p.
14. Сорокер Л. В., Швиденко А. А. *Управление параметрами флотации*. М: Недра; 1979. 232 с.
15. Жаргалсайхан Эрдэнэзул. Оптимизация технологии обогащения медно-молибденовых руд на основе комплексной системы технологических и экономических критериев: Дисс. ... канд. техн. наук. М.; 2019. 133 с.
16. Erdenezul Jargalsaikhan, Khurelchuluun Ishgen. Process optimization of grinding and flotation of copper-molybdenum ores with the use of model-based criteria. In: *Proceedings of 22-nd International Conference on Environment and Mineral Processing*. Technical university of Ostrava; 2018. P. 152–154.
17. Ганбаатар З., Морозов В.В., Дэлгэрбат Л., Дуда А. М. Управление процессами обогащения медно-молибденовых руд с использованием опережающего контроля качества. *Горные науки и технологии*. 2017;(1):40–48. DOI: [10.17073/2500-0632-2017-1-40-48](https://doi.org/10.17073/2500-0632-2017-1-40-48)



18. Morozov V. V., Zorigt G., Lodoy D., Morozov Y. P. Modern method and systems of optical ore grade analysis by processing of copper-molybdenum ores. In: *Conference Paper IMPC 2018. 29th International Mineral Processing Congress*. Moscow; 2019. P. 52–60.

19. Морозов В.В., Пестряк И.В., Эрдэнэзуул Жаргалсайхан. Анализ концентрации неионогенного собирателя при флотации медно-молибденовых руд. Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья. *Матер. XXV Междунар. науч.-техн. конф. в рамках XVIII Уральской горнопромышленной декады*. Екатеринбург; 2020. С. 6–10.

## References

1. Avdokhin V. M. *Fundamentals of mineral processing*. Part. 1. Beneficiation processes. Moscow: Gornaya Kniga Publ.; 2008. 417 p. (In Russ.)
2. Abramov A. A. Theoretical basics for creating innovative flotation techniques. Part 2. Theoretical basics of physical and chemical modeling of selective flotation of nonferrous metal ores. *Tsvetnye Metally [Nonferrous Metals]*. 2013;(3):11–15. (In Russ.)
3. AZhF-6 photometric liquid analyzer. Available from: <http://ptk-kip.ru/publics/item/4205> (In Russ.)
4. Hao F., Davey K. J., Bruckard W. J., Woodcock J. T. Online analysis for xanthate in laboratory flotation pulps with a UV monitor. *International Journal of Mineral Processing*. 2008;89(1-4):71–75.
5. Lalla B., Knights B. D. H. & Steenkamp C. J. H. Online Measurement of Xanthate in Flotation Circuits by Means of UV Spectrophotometry. In: *Proceedings of 48th Annual Conference of Metallurgists COM*. Sudbury, Canada; 2009. P. 46–48.
6. Bulatovic Srdjan M. *Handbook of Flotation Reagents Chemistry, Theory and Practice: Flotation of Sulfide Ores*. Elsevier Science & Technology Books; 2007. 446 p.
7. *Technological instruction for beneficiation of copper-molybdenum ores at the processing plant of the "Erdenet" Mongolian-Russian joint venture*. Erdenet, Mongolia; 2014. 194 c. (In Russ.)
8. Morozov V., Davaasambuu D., Ganbaatar Z., etc. Modern systems of automatic control of processes of grinding and flotation of copper-molybdenum ore. In: *16th IFAC Symposium on Control, Optimization and Automation in Mining, Minerals and Metal Processing*. 2013;15(1):166–171.
9. Sivkova P. I., Voronin L. V., Molodtsova V. I. *Method for quantitative determination of xanthogenic acid ester*. Patent No.726472 USSR. Publ. 05.04.1980. Bul. No. 7. (In Russ.)
10. Fleming I, Williams D. H. *Spectroscopic Methods in Organic Chemistry*. 6<sup>th</sup> Ed.; 2007. 304 p.
11. Morozov, V.V., Pestryak, I.V., and Erdenezuul, J. Effect of the concentration of nonionic collector, allyl ester of amyloxanthogenic acid, on flotation of copper-molybdenum ores. *Tsvetnye Metally [Nonferrous Metals]*, 2018;(11):14–20. (In Russ.)
12. Sun X., Forsling W. The degradation kinetics of ethyl-xanthate as a function of pH in aqueous solution. *Minerals Engineering*. 1997;10(4):400–412. DOI: [10.1016/S0892-6875\(97\)00016-2](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(97)00016-2)
13. Leja J. *Surface chemistry of froth flotation*. Plenum Press; 1982. 329 p.
14. Soroker L. V., Shvidenko A. A. *Control of flotation parameters*. M., Nedra Publ.; 1979. 232 p. (In Russ.)
15. Erdenezul Jargalsaikhan. Optimization of the processing technology for copper-molybdenum ores based on a complex system of technological and economic criteria. Ph.D. thesis in Engineering Science. Moscow; 2019. 133 p. (In Russ.)
16. Erdenezul Jargalsaikhan, Khurelchuluun Ishgen. Process optimization of grinding and flotation of copper-molybdenum ores with the use of model-based criteria. In: *Proceedings of 22-nd International Conference on Environment and Mineral Processing*. Technical university of Ostrava; 2018. P. 152–154.
17. Ganbaatar Z., Morozov V. V., Delgerbat L., Duda A. M. Control of copper-molybdenum ore beneficiation processes with applying advanced quality control. *Gornye nauki i tekhnologii = Mining Science and Technology (Russia)*. 2017;(1):40–48. DOI: [10.17073/2500-0632-2017-1-40-48](https://doi.org/10.17073/2500-0632-2017-1-40-48) (In Russ.)
18. Morozov V. V., Zorigt G., Lodoy D., Morozov Y. P. Modern method and systems of optical ore grade analysis by processing of copper-molybdenum ores. In: *Conference Paper IMPC 2018. 29th International Mineral Processing Congress*. Moscow; 2019. P. 52–60.
19. Morozov V. V., Pestryak I. V., Erdenezuul Zhargalsaykhan. Analysis of concentration of a nonionic collector during flotation of copper-molybdenum ores. Scientific fundamentals and practice of processing of ores and technogenic raw materials. In: *Proceedings of XXV Int. scientific and technical conf. within the framework of the XVIII Ural Mining Decade*. Yekaterinburg; 2020. P. 6–10. (In Russ.)



## ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

DOI: 10.17073/2500-0632-2020-3-201-207

**Влияние неопределенности базирования штока гидростойки  
на размерный износ его базовых поверхностей**Ван Туан Нго 

Вьетнамский государственный технический университет имени Ле Куи Дона, Ханой, Вьетнам,

✉ [ngotuanctm@gmail.com](mailto:ngotuanctm@gmail.com)

**Аннотация:** Силовые гидроцилиндры являются основными несущими элементами механизированных комплексов горнодобывающих предприятий, с помощью которых обеспечивается надежная фиксация кровли в требуемом рабочем положении, а также осуществляется продвижение шахтной крепи в забое. Для обеспечения надежности и эффективности эксплуатации в забоях механизированных крепей необходимо обеспечить стабильный ресурс работы входящих в их состав гидростоек, который главным образом зависит от качества изготовления сопряженных поверхностей и точности сборки функциональных соединений. Требуемая точность соединений гидростоек достигается селективной сборкой, что позволяет обеспечить заданные технические требования и ресурс соединений. Вместе с тем наряду с вопросами обеспечения точности сборки данных узлов для гарантии должной безопасности работы в забоях чрезвычайно важными являются выявление и анализ причин размерного износа ответственных деталей соединений, приводящих к уменьшению ресурса гидростоек в процессе эксплуатации. В статье при помощи методов аналитической теории баз выявлены и описаны причины формирования позиционных отклонений деталей соединений гидростойки механизированной крепи в процессе сборки и эксплуатации узла. Установлено, что возникновение перекосов и образование на цилиндрах, поршнях и штоках локальных напряженных зон, характеризующихся интенсивным износом, происходит вследствие неопределенности базирования штока и поршня в гидроцилиндре. Получены зависимости, позволяющие рассчитать отклонение оси штока от требуемого положения с учетом исходного зазора в соединениях и принятых конструктивных параметров гидроцилиндра.

**Ключевые слова:** механизированная крепь, гидростойка, точность сборки, износ, неопределенность базирования, смена баз, позиционные отклонения

**Для цитирования:** Нго Ван Туан. Влияние неопределенности базирования штока гидростойки на размерный износ его базовых поверхностей. *Горные науки и технологии*. 2020;5(3):201-207. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-3-201-207

**Effect of Uncertainty in Basing Hydraulic Prop Rod  
on Dimensional Wear of its Basic Surfaces**Van Tuan Ngo 

Vietnamese State Technical University named after Le Kui Dong, Hanoi, Vietnam,

✉ [ngotuanctm@gmail.com](mailto:ngotuanctm@gmail.com)

**Abstract:** Hydraulic power cylinders are the main bearing elements of powered supports at mining enterprises, ensuring reliable fixation of the roof in the required working position, as well as providing advancement of the support in the face. Thus, hydraulic power cylinders ensure stowing safety, so strict requirements are imposed on them both in terms of workmanship and operational reliability. To ensure reliability and efficiency of powered support operation in faces, it is necessary to ensure stable service life of their hydraulic props, which mainly depends on the quality of manufacturing of mating surfaces and the accuracy of assembling functional joints. The required accuracy of hydraulic prop joints is achieved by selective assembly, which allows ensuring the specified technical requirements and service life of the joints. At the same time, along with the issues of ensuring the accuracy of assembling the props to provide proper safety of the face operation, it is extremely important to identify and analyze the causes of dimensional wear of critical parts of the joints, leading to decreasing service life of the hydraulic props in the course of exploitation. In the paper, using the methods of the analytical theory of bases, the reasons for formation of positional variations of the parts of the powered support hydraulic prop joints in the course of assembling and

operation of the unit are identified and described. It was found that arising mismatches and formation of local stress zones on the cylinders, pistons and rods, characterized by intense wear, occurs due to the uncertainty of basing (positioning) of rod and piston in hydraulic cylinder. The dependencies allowing calculating deviation of the rod axis from the required position, taking into account the initial clearance gap in the joints and the adopted design parameters of the hydraulic cylinder, have been obtained.

**Keywords:** powered support, hydraulic prop, assembling accuracy, wear, location uncertainty, base change, positional variations

**For citation:** Ngo Van Tuan. Effect of uncertainty in basing hydraulic prop rod on dimensional wear of its basic surfaces. *Gornye nauki i tekhnologii = Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(3):201-207. (In Russ.) DOI: 10.17073/2500-0632-2020-3-201-207

Силовые гидроцилиндры являются основными несущими элементами механизированных комплексов горнодобывающих предприятий, с помощью которых обеспечивается надежная фиксация кровли в требуемом рабочем положении, а также осуществляется продвижение шахтной крепи в забое. Таким образом, силовые гидроцилиндры обеспечивают безопасность выполнения очистных работ, в связи с чем к ним предъявляют жесткие требования и по качеству изготовления, и по эксплуатационной надежности. При этом состояние рабочих поверхностей элементов гидроцилиндров играет решающую роль в обеспечении должного ресурса ответственных соединений. Общие технические требования к изготовлению гидростоек в механизированных крепях и основные параметры регламентируются стандартами [1–3].

Как показывает производственная статистика, основные отказы шахтных крепей в большинстве случаев обусловлены нарушением герметичности соединений гидроцилиндров из-за износа сопряженных поверхностей, что вызывает утечку рабочей жидкости и соответственно потерю работоспособности несущего узла. Последнее может стать причиной обрушения кровли, вызвать аварийную ситуацию и даже привести к человеческим жертвам. Все это требует проведения систематического мониторинга состояния уплотнительных элементов, своевременной замены вышедших из строя гидроцилиндров на новые или отремонтированные [4–6].

Известно, что восстановительный ремонт силовых гидроцилиндров в условиях специализированных ремонтных мастерских – процесс достаточно трудоемкий и дорогостоящий. При этом качество восстановленных поверхностей, к примеру, зеркала цилиндра, рабочих поверхностей штока, не должно уступать соответствующим показателям новых деталей, поскольку эти поверхности и определяют должные ресурс и несущую способность соединений. Требуемая точность соединений гидростоек достигается селективной сборкой методами групповой и межгрупповой взаимозаменяемости. Данная технология сборки позволяет обеспечить соответствие заданным техническим требованиям и ресурс соединений [7–12]. Вместе с тем наряду с вопросами обеспечения точности сборки для обеспечения должной безопасности работы в забоях чрезвычайно важным является анализ причин изменения относительного положения деталей соединений гидростойки в процессе эксплуатации, их позиционных отклонений от требуемого положения, появления перекосов под нагрузкой, оказывающих значительное влияние на напряженное состояние, процесс износа деталей и ресурс соединений [13, 14].

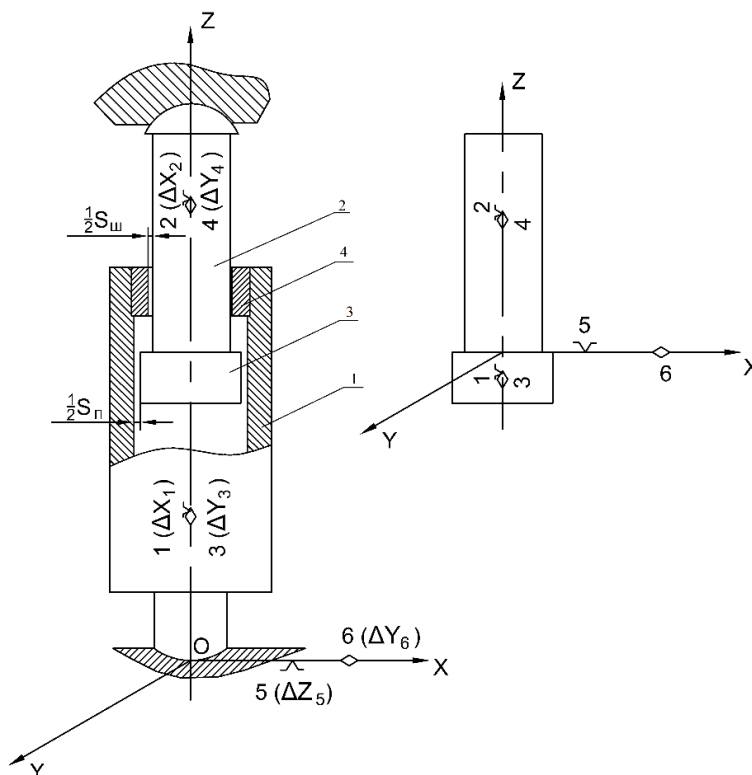
Вследствие наличия зазора в подвижных соединениях гидроцилиндра отклонения положения штока гидростойки проявляются как неопределенность его базирования, которая происходит по причине неорганизованной смены баз, возникающей в результате упругих перемещений и деформаций в гидростойке под действием нагрузки на ее рабочих поверхностях.

Для выявления и однозначного математического описания схем базирования деталей и узлов используем метод идентификации и моделирования баз [11, 12, 15, 16].

Координаты положения опорных точек детали или узла можно разделить на две группы: плановые координаты ( $X_i, Y_i, Z_i$ ), определяющие расположение опорных точек на трех базирующих поверхностях (вид в плане на базирующую поверхность), и нормальные координаты ( $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i$ ), определяющие отклонения опорных точек в перпендикулярном к базирующим поверхностям направлении.

Если нормальные координаты опорных точек сгруппировать по базам и записать в последовательности уменьшения точек на базах, то получим матрицу-столбец  $T$  нормальных координат, которая однозначно определяет схему базирования и расположение точек на координатных плоскостях.

Основными базами гидростойки, определяющими ее положение в механизированной крепи, являются две полусферы (рис. 1), что позволяет стойке самоустанавливаться под действием внешней нагрузки, обеспечивая таким образом требуемую кинематическую гибкость.



**Рис. 1. Схемы базирования элементов гидростойки:**

1 – цилиндр; 2 – шток; 3 – поршень; 4 – грундбукса

Это означает, что стойка базируется по схеме с использованием двойной направляющей базы (см. рис. 1), которая описывается строчной матрицей:

$$T = (\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta y_3, \Delta y_4, \Delta z_5, \Delta y_6). \quad (1)$$

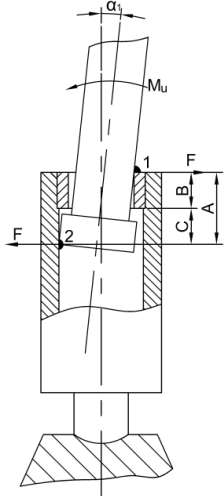
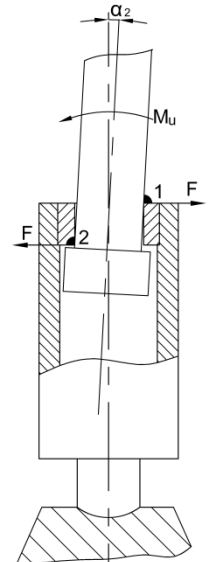
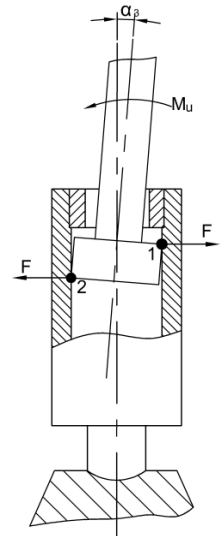
Согласно (1) составляющие ( $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta y_3, \Delta y_4$ ) являются нормальными координатами опорных точек двойной направляющей

базы, роль которой выполняет ось  $OZ$ , а составляющие  $\Delta z_5, \Delta y_6$  являются нормальными координатами опорных точек опорных баз, которыми являются плоскости  $XOY$  ( $\Delta z_5$ ) и  $XOZ$  ( $\Delta y_6$ ).

Самоустановку стойки по основанию обеспечивают опорные точки ( $\Delta x_1, \Delta y_3$ ), а самоустановку по перекрытию – опорные точки ( $\Delta x_2, \Delta y_4$ ).

Таблица 1

Схемы положения и расчетные формулы, определяющие отклонения штока и поршня в гидростойке

| №<br>схемы | Схема положения в цилиндре поршня и штока при смене баз                             | Описание неорганизованной смены баз матрицами нормальных координат                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1          |    | <p>Схема базирования:<br/> <math>T = (\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta y_3, \Delta y_4, \Delta z_5, \Delta y_6)</math>;<br/>           значения нормальных координат:<br/> <math>\Delta x_1 = 0,5S_{\Pi}</math>; <math>\Delta y_3 = 0,5S_{\Pi}</math>;<br/> <math>\Delta x_2 = 0,5S_{\text{ш}}</math>; <math>\Delta y_4 = 0,5S_{\text{ш}}</math>;<br/>           угол отклонения оси штока:<br/> <math display="block">\alpha_1 = \frac{1}{2A} \cdot (S_{\Pi} + S_{\text{ш}} + S_{\text{вт}})</math></p> |
| 2          |   | <p>Схема базирования:<br/> <math>T = (\Delta x_1^*, \Delta x_2^*, \Delta y_3^*, \Delta y_4^*, \Delta z_5, \Delta y_6)</math>;<br/>           значения нормальных координат:<br/> <math>\Delta x_1^* = S_{\text{ш}}</math>; <math>\Delta y_3^* = S_{\text{ш}}</math>;<br/> <math>\Delta x_2^* = S_{\text{ш}}</math>; <math>\Delta y_4^* = S_{\text{ш}}</math>;<br/>           угол отклонения оси штока:<br/> <math display="block">\alpha_2 = \frac{S_{\text{ш}}}{B}</math></p>                        |
| 3          |  | <p>Схема базирования:<br/> <math>T' = (\Delta x_1', \Delta x_2', \Delta y_3', \Delta y_4', \Delta z_5, \Delta y_6)</math>;<br/>           значения нормальных координат:<br/> <math>\Delta x_1' = S_{\text{вт}}</math>; <math>\Delta y_3' = S_{\text{вт}}</math>;<br/> <math>\Delta x_2' = S_{\text{вт}}</math>; <math>\Delta y_4' = S_{\text{вт}}</math>;<br/>           угол отклонения оси штока:<br/> <math display="block">\alpha_3 = \frac{S_{\Pi}}{C}</math></p>                                |

Примечание.  $M_u$  – изгибающий момент, действующий на шток;  $F$  – нормальная нагрузка на детали соединений, возрастающая в результате перекоса штока; 1, 2 – опорные точки – зоны критического нагружения на деталях соединений.



В свою очередь, базирование поршня и штока в гидроцилиндре также осуществляется с использованием двойной направляющей базы (табл. 1):

$$T = (\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta y_3, \Delta y_4, \Delta z_5, \Delta y_6), \quad (2)$$

где  $(\Delta x_1, \Delta y_3)$  – нормальные координаты опорных точек, определяющих положение (центрирование) поршня в цилиндре;  $(\Delta x_2, \Delta y_4)$  – нормальные координаты опорных точек, определяющих положение (центрирование) штока в грундбуксе.

При правильном базировании (см. рис. 1) каждый элемент  $(\Delta x_1, \Delta y_3)$  равен половине диаметрального зазора  $S_{\text{п}}$  между поршнем и цилиндром:

$$\Delta x_1 = 0,5S_{\text{п}}; \Delta y_3 = 0,5S_{\text{п}}, \quad (3)$$

а элементы  $(\Delta x_2, \Delta y_4)$  равны половине диаметрального зазора  $S_{\text{ш}}$  между штоком и грундбуксой:

$$\Delta x_2 = 0,5S_{\text{ш}}; \Delta y_4 = 0,5S_{\text{ш}}. \quad (4)$$

Однако под действием переменной нагрузки имеет место неорганизованная смена баз поршня и штока, которую можно представить тремя схемами, представленными в табл. 1.

Согласно схеме № 1 неорганизованная смена баз приводит к одностороннему контакту поршня и штока, при котором зазор выбирается с одной стороны и имеют место равенства:

$$\Delta x_1 = S_{\text{п}}; \Delta y_3 = S_{\text{п}}; \quad (5)$$

$$\Delta x_2 = S_{\text{ш}}; \Delta y_4 = S_{\text{ш}}. \quad (6)$$

Согласно схеме № 2 неорганизованная смена баз приводит к тому, что базирование штока и поршня происходит только по грундбуксе (точки 1 и 2):

$$T^* = (\Delta x_1^*, \Delta x_2^*, \Delta y_3^*, \Delta y_4, \Delta z_5, \Delta y_6), \quad (7)$$

при одностороннем контакте штока с поверхностью грундбуксы:

$$\Delta x_1^* = S_{\text{ш}}; \Delta y_3^* = S_{\text{ш}}; \quad (8)$$

### Библиографический список

1. ГОСТ 15852–82. *Крепи механизированные гидравлические поддерживающие для лав: основные параметры и размеры*. М.: Стандарты; 1985. 5 с.

$$\Delta x_2^* = S_{\text{ш}}; \Delta y_4^* = S_{\text{ш}}. \quad (9)$$

Верхний символ «\*» означает, что элементы матрицы (7) определяют базирование по грундбуксе (точки 1 и 2).

Согласно схеме № 3 неорганизованная смена баз приводит к тому, что базирование штока и поршня происходит только по внутренней поверхности цилиндра:

$$T' = (\Delta x_1', \Delta x_2', \Delta y_3', \Delta y_4, \Delta z_5, \Delta y_6), \quad (10)$$

при одностороннем контакте поршня с поверхностью цилиндра:

$$\Delta x_1' = S_{\text{вт}}; \Delta y_3' = S_{\text{вт}}; \quad (11)$$

$$\Delta x_2' = S_{\text{вт}}; \Delta y_4' = S_{\text{вт}}, \quad (12)$$

где  $S_{\text{вт}}$  – диаметральный зазор «карман цилиндра – внешняя поверхность грундбуксы» («карман цилиндра – грундбукса»).

С учетом численных значений параметров конструкции А, Б, С отклонения оси штока от вертикали  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ , обусловленные неорганизованной сменной баз, можно рассчитать по формулам, приведенным в табл. 1.

### Выводы

Установлено, что наличие зазоров в соединениях «цилиндр – поршень» и «грундбукса – шток» приводит к неопределенности базирования поршня и штока. Использование аналитической теории баз позволяет определить численные значения возникающих при этом угловых и линейных отклонений деталей соединения в зависимости от принятых конструктивных параметров А, Б, С.

При неорганизованной смене баз действующая в гидростойке нагрузка передается не по рабочим поверхностям деталей соединения, а через малые по площади опорные точки, вызывая в местах контакта повышенные напряжения и, как следствие, локальный интенсивный износ, что приводит к снижению ресурса гидростойки.

2. ГОСТ 18585–82. *Крепи механизированные гидравлические для лав: общие технические требования*. М.: Стандарты; 1985. 4 с.
3. ГОСТ 12.44.245–83. *Крепи механизированные. Стойки и домкраты. Расчет на прочность. Методика проверочного расчета на статическую прочность и устойчивость*. М.: Гипроуглемаш; 1984. 76 с.
4. Демкин Н. Б., Рыжов Э. В. *Качество поверхности и контакт деталей машин*. М.: Машиностроение; 1981. 24 с.
5. Шубина Н. Б., Грязнов Б. П., Шахтин И. М., Морозов В. И., Березкин В. Г. *Предупреждение разрушения деталей забойного оборудования*. М.: Недра; 1985. 215 с.
6. Скляр Н. С. *Оценка и повышение качества капитально ремонтируемых механизированных крепей угледобывающих комплексов*: Дис. ... канд. техн. наук. М.: МГИ; 1982. 261 с.
7. Набатников Ю. Ф. Обеспечение заданного ресурса соединений деталей машин. *Сборка в машиностроении и приборостроении*. 2011;(4):3-8.
8. Набатников Ю. Ф. Повышение ресурса деталей машин. Семинар «Современные технологии в горном машиностроении». *Неделя горняка 2011*: Сб. науч. тр. М.: МГГУ; 2011. С.110–117.
9. Wiederhold M. *Clustering of Similar Features for the Application of Statistical Process Control in Small Batch and Job Production*. Ergebnisse aus der Produktionstechnik 20/2017. Eds.: Brecher, C.; Klocke, F.; Schmitt, R.; Schuh, G. Aachen. Apprimus Verlag; 2017.
10. Wenking M, Benninghaus C, Groggert S. *Die Zukunft von Manufacturing Data Analytics: Implikationen für eine erfolgreiche Datennutzung im produzierenden Umfeld*. Industrie 40 Management. 2017;33(4):33-37.
11. Баранчукова И. М., Гусев А. А., Краморенко Ю. Б. и др. *Проектирование технологий автоматизированного машиностроения*: Учебник для вузов. М.: Высш. шк.; 1999. 415 с.
12. Тимирязев В. А., Новиков В. Ю., Схиртладзе А. Г. *Основы технологии машиностроения*: Учебник для вузов. М.: МГТУ «Станкин»; 2019. 393 с.
13. Набатникова Т. Ю., Набатников Ю. Ф. Моделирование схем перекоса плунжера в заделке гидростойки. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2001;(12):182–183.
14. Белянкина О. В. Влияние перекоса штока в цилиндре на напряженное состояние гидростойки механизированной крепи. *Образование, наука, производство и управление*: Сб. тр. науч.-практ. конф. Т. 5. Старый Оскол: СТИ НИТУ «МИСиС»; 2008. С. 20–27.
15. Elser H., Heutmann T., Lindemann M., Schmitt R. Hellsehen in vier Schritten. Data Analytics für das digitale Qualitätsmanagement. *Qualität und Zuverlässigkeit*. 2018;63(2):31–33.
16. Schmitt R., Göppert A., Hüttemann G., Lettmann P., Rook-Weiler K., Schönstein D., Schreiber A., Serbest E., Steffens M., Tomys-Brummerloh A. Frei verkettete wandlungsfähige Montage. Internet of production für agile Unternehmen. *AWK Aachener Werkzeugmaschinen Kolloquium* 18. bis 19. Mai 2017. Hrsg.: Schuh, G.; Brecher, C.; Klocke, F.; Schmitt, R. Apprimus Verlag Aachen; 2017. P. 339–368.

## References

1. GOST 15852–82. *Powered hydraulic supports for longwalls: basic parameters and dimensions. Mechanized hydraulic supports for longwalls*. Moscow: Standarty Publ.; 1985. 5 p. (In Russ.)
2. GOST 18585–82. *Powered hydraulic supports for longwalls: general technical requirements*. Moscow: Standarty Publ.; 1985. 4 p. (In Russ.)
3. GOST 12.44.245–83. *Powered supports. Props and jacks. Strength calculation. Method of verification calculation for static strength and stability*. Moscow: Giprouglemash; 1984. 76 p. (In Russ.)
4. Demkin N. B., Ryzhov E. V. Surface quality and contact of machine parts. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1981. 24 p. (In Russ.)
5. Shubina N. B., Gryaznov B. P., Shakhtin I. M., Morozov V. I., Berezkin V. G. Prevention of face equipment parts breakdown. Moscow: Nedra Publ.; 1985. 215 p. (In Russ.)
6. Sklyarov N.S. Assessment and improvement of the quality of overhauled powered roof supports of longwall sets of equipment. Ph.D. thesis in Engineering Science. Moscow: MGI; 1982. 261 p. (In Russ.)
7. Nabatnikov Yu.F. Providing preset service life of joints of machine parts. *Assembly in mechanical engineering and instrument-making*. 2011;(4):3-8. (In Russ.)
8. Nabatnikov Yu.F. Increasing service life of machine parts. In: *Seminar "Modern technologies in mining engineering". Miner's Week 2011: Proceedings*. Moscow: MGGU Publishing House; 2011. P. 110–117. (In Russ.)
9. Wiederhold M. *Clustering of Similar Features for the Application of Statistical Process Control in Small Batch and Job Production*. Ergebnisse aus der Produktionstechnik 20/2017. Eds.: Brecher, C.; Klocke, F.; Schmitt, R.; Schuh, G. Aachen. Apprimus Verlag; 2017.
10. Wenking M, Benninghaus C, Groggert S. *Die Zukunft von Manufacturing Data Analytics: Implikationen für eine erfolgreiche Datennutzung im produzierenden Umfeld*. Industrie 40 Management. 2017;33(4):33-37.

11. Baranchukova I. M., Gusev A. A., Kramorenko Yu. B. et al. *Designing of Automated Engineering Techniques*: College Textbook. Moscow: Vysshaya Shkola Publ.; 1999. 415 p. (In Russ.)
12. Timiryazev V. A., Novikov V. Yu., Skhirtladze A. G. *Fundamentals of mechanical-engineering technology*. College Textbook. Moscow: MSTU Stankin" Publ.; 2019. 393 p. (In Russ.)
13. Nabatnikova T. Yu., Nabatnikov Yu. F. Simulation of plunger tilt distortion in hydraulic prop. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2001;(12):182–183. (In Russ.)
14. Belyankina O. V. Influence of rod distortion in cylinder on stress condition of powered support hydraulic prop. *Obrazovanie, nauka, proizvodstvo i upravlenie*. In: *Education, science, production and management. Proceedings of Scientific-Practical conference*. V. 5. Stary Oskol: STI NITU MISiS; 2008. P. 20–27. (In Russ.)
15. Elser H., Heutmann T., Lindemann M., Schmitt R. Hellsehen in vier Schritten. Data Analytics für das digitale Qualitätsmanagement. *Qualität und Zuverlässigkeit*. 2018;63(2):31–33.
16. Schmitt R., Göppert A., Hüttemann G., Lettmann P., Rook-Weiler K., Schönstein D., Schreiber A., Serbest E., Steffens M., Tomys-Brummerloh A. Frei verkettete wandlungsfähige Montage. Internet of production für agile Unternehmen. *AWK Aachener Werkzeugmaschinen Kolloquium* 18. bis 19. Mai 2017. Hrsg.: Schuh, G.; Brecher, C.; Klocke, F.; Schmitt, R. Apprimus Verlag Aachen; 2017. P. 339–368.

## ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

DOI: 10.17073/2500-0632-2020-3-208-223

**Оценка экологической опасности накопленных отходов  
переработки минерального сырья закрытых горных предприятий  
в Приамурье и Приморье****Л. Т. Крупская<sup>1,2</sup>  , А. М. Орлов<sup>1</sup>, Д. А. Голубев<sup>1,2</sup>, К. А. Колобанов<sup>1,2</sup>, М. А. Филатова<sup>1,2</sup>**<sup>1</sup>Дальневосточный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, г. Хабаровск, Россия, [ecologiya2010@yandex.ru](mailto:ecologiya2010@yandex.ru)<sup>2</sup>Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия

**Аннотация:** Объектом исследования явились сформированные в прошлом веке деятельностью ныне закрытых горных предприятий природно-горнопромышленные техногенные системы в Приамурье и Приморье Дальневосточного федерального округа Российской Федерации. Экспериментальные исследования позволили установить, что складированные в хвостохранилища сульфидизированные токсичные отходы переработки минерального сырья, накопленные в прошлом веке в большом количестве, негативно влияют на окружающую среду. Выявлено, что их консервация и рекультивация не были проведены. Однако они представляют огромную угрозу не только для окружающей среды, но и для здоровья населения. В связи с этим цель исследования состояла в оценке экологической опасности накопленных токсичных отходов и обосновании возможности снижения их отрицательного влияния на компоненты биосферы и здоровье человека. Исходя из цели исследования, определены следующие задачи: 1) анализ и обобщение существующего опыта изучения проблемы в России и за рубежом; 2) выявление основных источников создания кризисных ситуаций на закрытых горных предприятиях, показатели и критерии оценки экологической опасности накопленных отходов переработки минерального сырья; 3) оценка экологической опасности накопленных отходов переработки минерального сырья; 4) разработка принципов и мероприятий, направленных на обеспечение экологической безопасности хвостохранилищ с токсичными отходами. Использованы следующие методы: физико-химические, биологические, а также математического моделирования, ГИС-технологий и др. В статье на основе изучения современного состояния хвостохранилищ, оценки уровня техногенного загрязнения объектов окружающей среды и патентного поиска обоснована необходимость эффективного решения названной проблемы. Установлено, что отходы относятся ко второму классу (высокоопасные). Выявлено превышение регионально фоновых показателей от 4 до 46 раз, а ПДК – более чем 200 раз. Доказано, что поверхность хвостохранилищ естественным путем не зарастает в течение 30 лет. Патентный поиск и собственные экспериментальные исследования позволили разработать мероприятия по обеспечению экологической безопасности сульфидизированных отходов переработки оловорудного сырья, новизна которых подтверждена патентами РФ.

**Ключевые слова:** токсичные сульфидизированные отходы переработки оловорудного сырья, хвостохранилища, потенциал биологических систем, закрытые горные предприятия, рекультивация, кризисные ситуации

**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) в рамках научного проекта № 20-35-90021 и Государственного задания № 075-03-2020-121/4

**Для цитирования:** Крупская Л. Т., Орлов А. М., Голубев Д. А., Колобанов К. А., Филатова М. А. Оценка экологической опасности накопленных отходов переработки минерального сырья закрытых горных предприятий в Приамурье и Приморье. *Горные науки и технологии*. 2020;5(3):208-223. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-3-208-223



## Assessment of environmental hazard of accumulated mineral processing waste of closed mining enterprises in the Amur river region and Primorye

L. T. Krupskaya<sup>1,2</sup>  , A. M. Orlov<sup>1</sup>, D. A. Golubev<sup>1,2</sup>, K. A. Kolobanov<sup>1,2</sup>, M. A. Filatova<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Far Eastern Scientific Research Institute of Forestry, Khabarovsk, Russia,  [ecologiya2010@yandex.ru](mailto:ecologiya2010@yandex.ru)

<sup>2</sup>Pacific State University, Khabarovsk, Russia

**Abstract:** The subject of research was technogenic waste systems formed in the last century due to the activities of presently closed mining enterprises in the Amur River Region and Primorye of the Far Eastern Federal District of the Russian Federation. Experimental studies allowed to establish that toxic sulphidized mineral processing waste accumulated for the 20th century in tailings storage facilities (TSF) in large quantities produce negative impact on the environment. It was revealed that their conservation and reclamation were not carried out. However, they pose huge threat not only to the environment, but also to public health. In this regard, the research goal was to assess environmental hazard of the accumulated toxic waste and substantiate the possibility of mitigating their negative impact on biosphere components and human health. Based on the research goal, the following tasks were set: 1) analysis and generalization of the existing experience of studying the problem in Russia and abroad; 2) identification of the main sources of crisis situations at closed mining enterprises, indicators and criteria for assessing the environmental hazard of the accumulated mineral processing waste; 3) assessment of the environmental hazard of the accumulated mineral processing waste; 4) development of principles and measures aimed at ensuring environmental safety of TSF comprising toxic waste. The following methods were used: physical-chemical, biological, as well as mathematical modeling, GIS technologies, etc. Based on the study of the TSF current state, assessment of the level of technogenic environment pollution, and patent search, the authors substantiate the need for effective solution to this problem. It was found that the waste belongs to the second hazard class (highly hazardous). The excess of 4 to 46 times above the regional background indicators (metal concentrations), and more than 200 times above MPC was revealed. It has been proven that the TSF surface does not naturally run wild for 30 years. Patent search and our own experimental research allowed developing measures to ensure environmental safety of sulfidized tin ore processing waste, novelty of which was confirmed by patents of the Russian Federation.

**Keywords:** toxic sulphidized waste of tin ore processing, tailings storage facilities, potential of biological systems, closed mining enterprises, reclamation, crisis situations

**Acknowledgments:** The study was carried out with financial support of the Russian Foundation of Fundamental Research (RFFR) in the framework of scientific project No. 20-35-90021 and state assignment No. 075-03-2020-121/4

**For citation:** Krupskaya L. T., Orlov A. M., Golubev D. A., Kolobanov K. A., Filatova M. A. Assessment of environmental hazard of accumulated mineral processing waste of closed mining enterprises in the Amur river region and Primorye. *Gornyye nauki i tekhnologii = Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(3):208-223. (In Russ.) DOI: 10.17073/2500-0632-2020-3-208-223

### Введение

Происшедшие в прошлом веке в оловодобывающей промышленности события, а также социально-экономические процессы в России [1] не могли не отразиться на экологической безопасности горного производства в Дальневосточном федеральном округе (ДФО). В этой сфере сложились и устойчиво проявляются определенные негативные тенденции [2]. Накопленный ущерб в виде хвостохранилищ, содержащих большое количество токсичных загрязняющих веществ, полученных в результате прошлой деятельности ныне закрытых оловорудных предприятий, требует срочной организации работ по

оценке и поэтапной ликвидации его экологических последствий [3]. Данная задача является одним из условий достижения цели Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации до 2020 г. по улучшению качества окружающей среды и экологических условий жизни человека [4].

Анализ и обобщение отечественного и зарубежного опыта решения названных задач свидетельствует о том, что проблема устранения последствий накопленного ущерба в прошлом веке уже в течение последних двадцати с лишним лет стоит на повестке дня. Это связано с

массовым и зачастую неконтролируемым закрытием горнопромышленных предприятий и других опасных объектов как у нас в России, так и за границей. В статье, например, Гегиева К.А. с соавт. [5] рассматривается современное состояние Тырныаузского хвостохранилища закрытого Тырныаузского вольфрамо-молибденового комбината (ТВМК, Кабардино-Балкария), вызывающее в настоящее время большие опасения. Здесь идет активное развитие эрозийно-оползневых процессов с формированием селевых потоков по руслу р. Гижгит.

Ивановой О.А. с соавт. [6] проанализировано состояние самой неблагоприятной части Байкальской природной территории, а именно Закаменского района республики Бурятия, где добывались вольфрамовые руды и в прошлом веке накоплены большие объемы отходов их переработки. Экологическая ситуация здесь тяжелая и даже критическая. Загрязнены все природные компоненты. Окисление сульфидных минералов рудного поля с образованием серной кислоты и выносом опасных для окружающей среды химических элементов с отвалов шахтными, карьерными и инфильтрационными водами привело к загрязнению ряда водотоков бассейна р. Джиды, являющихся наиболее загрязненными в бассейне озера Байкал. Авторы считают, что существенным пробелом является отсутствие в Российской Федерации такой документации, которая строго предписывала бы несение ответственности за прошлый экологический ущерб.

В статье Пашкевич М.А. и др. [7] изложены результаты исследования и оценки ландшафтно-геохимической обстановки в районе размещения хвостового хозяйства апатит-нефелиновой обогатительной фабрики (АНОФ-2, Апатиты). Выявлены нарушения в границах воздействия изучаемого производственного объекта. Сделан вывод о том, что в условиях сложившейся на рассматриваемой территории тяжелой экологической обстановки и при необходимости снижения техногенной нагрузки особую актуальность приобретает вопрос о возможности разработки сба-

лансированной стратегии управления экологической безопасностью функционирования хвостового хозяйства АНОФ-2.

Гурбановым А.Г. с соавт. [8, 9] на территории деятельности Тырныаузского вольфрамо-молибденового комбината (ТВМК, Кабардино-Балкария) и Садонского свинцово-цинкового комбината (Республика Северная Осетия – Алания) проведен комплекс геохимических исследований, включающий всесторонний анализ современными аналитическими и приборными методами различных поверхностных вод, почв сельхозугодий и естественных пастбищ, захороненных промышленных отходов ТВМК, отвалов карьеров. В результате обобщения полученных данных с учетом геолого-геохимических и физико-географических особенностей этого района установлены основные источники загрязнения природной среды, представленные двумя группами – техногенной и природной. Исследователями доказано, что для снижения степени риска людских потерь, минимизации возможного материального ущерба от природных и техногенных катастроф, снижения негативной нагрузки на экологическую обстановку в регионе и на здоровье населения необходима полная утилизация промышленных отходов, накопленных в хвостохранилищах ТВМК, с обязательным предварительным извлечением из них экономически ценных металлов и элементов-токсикантов. В качестве первоочередных мер по снижению негативной нагрузки на окружающую среду в районе деятельности ТВМК и прилегающих территорий предложено создание комплексной технологии переработки техногенных отходов с постепенной их утилизацией, а также строительство водозаборов ручьев, в первую очередь дренирующих Мукуланский карьер, с серией очистных фильтров в виде ионообменных колонок различного типа.

По мнению Гурбанова А.Г. с соавт. [9], первоочередной задачей для Садонского свинцово-цинкового комбината (ССЦК) является

временная изоляция вод, прежде всего сливаемых по трубе из хвостохранилища в р. Ардон, а также р. Архондон, являющихся основными поставщиками элементов-токсикантов в р. Ардон (с извлечением из них комплекса элементов, имеющих концентрацию выше ПДК для питьевой воды). Такая мера позволит значительно снизить поступление этих элементов в основную водную артерию и улучшить экологическую обстановку в районе деятельности ССЦК и на прилегающих территориях. Кроме того, в процессе извлечения комплекса элементов вполне реально попутное получение чистых оксидов ряда ценных металлов (Pb, Zn, Cd, Sb, Bi и т. д.), что существенно повысит экономическую привлекательность этого мероприятия.

Чигоевой Д.Н. и др. [10] изучено состояние р. Ардон ниже сброса с хвостохранилища Садонского свинцово-цинкового комбината (ССЦК). Выявлено, что длительная история разработки месторождений свинцово-цинковых руд Садонского горнорудного района привела к образованию обширных ореолов химического загрязнения поверхностных водотоков, что соответствует категории «экологическое бедствие». Обоснована необходимость организации их мониторинга в границах влияния хвостохранилища.

Качор О.Л. и др. [11] на основе геоэкологического и геохимического мониторинга выявлены масштабы загрязнения трех промзон горного производства, расположенных в Иркутской области и Забайкальском крае. Показана целесообразность использования золы шлам-лигнинов (отходов Байкальского ЦБК) для нейтрализации токсичных почвенных смесей. Выявлена возможность сорбции остаточных (после обработки реагентом) содержаний подвижных форм мышьяка с использованием модифицированных угольных сорбентов для наиболее полного извлечения опасного токсиканта до показателей ПДК вредных веществ. Полученные результаты имеют большое практическое значение для реализации способа химической иммобилизации подвижных ионных

форм As в зоне техногенеза. Такие же выводы получены зарубежными учеными [12–14].

Статья А. Romero и др. [15] посвящена оценке риска рассеивания частиц и загрязнения микроэлементами от отвалов отходов шахты Riotinto (на юго-западе Испании). В этом исследовании разработана модель для разграничения зон риска, на которые влияет атмосферное рассеивание частиц из отвалов шахтных отходов, для оценки их воздействия на почву и население в соответствии с концентрацией соединений токсичных химических элементов в них [16].

Zhigang H. с соавт. [17] изучено распределение соединений тяжелых металлов и выполнена оценка загрязнения почв в границах влияния свинцово-цинкового рудника, расположенного во Внутренней Монголии (Китай). При этом использованы индекс Немерова и индекс потенциального экологического риска, позволившие выявить высокий уровень техногенного загрязнения.

Исследованиями Sung-Min Kim и др. [18] доказано, что наибольший риск опасности представляют закрытые шахты в Корее. О том, что шахтные хвосты интенсивно воздействуют на загрязнения почв в границах заброшенного рудника Моника (Bustarviejo) в Автономном районе Мадрида (Центральная Испания) и в юго-западной Нигерии, свидетельствуют исследования Rosario García-Giménez и др. [19] и Gbadebo A.M. и др. [20].

Большой интерес представляют исследования Мауга Реña-Ortega с соавт. [21], посвященные экологической оценке и расчету эрозии почв заброшенных шахтных хвостохранилищ полусухой зоны северо-западной Мексики. Изучение проблемы проведено с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в сочетании с геохимическими данными для оценки эрозионных процессов и с учетом показателей загрязнения и опасности хвостохранилищ, содержащих соединения токсичных тяжелых металлов и мышьяка.

### **Цели и задачи**

Цель исследований состояла в оценке экологической опасности накопленных токсичных



отходов и обосновании возможности снижения их отрицательного влияния на компоненты биосферы и здоровье человека. Исходя из цели исследования, определены следующие задачи: 1) анализ и обобщение существующего опыта изучения проблемы в России и за рубежом; 2) выявление основных источников создания кризисных ситуаций на закрытых горных предприятиях, показатели и критерии оценки экологической опасности накопленных отходов переработки минерального сырья; 3) оценка экологической опасности накопленных отходов переработки минерального сырья; 4) разработка принципов и мероприятий, направленных на обеспечение экологической безопасности хвостохранилищ с токсичными отходами.

### Район работ и методы исследования

Экспедиционные полевые исследования в границах влияния отходов закрытого горного предприятия проведены в течение 2010–2018 гг. Объектом исследования явились природно-горнопромышленные техногенные системы, сформированные в прошлом веке деятельностью ныне закрытых горных предприятий, расположенных в бассейне биосферного значения р. Амур (Солнечный ГОК (Хабаровский край), Хинганский ГОК (Еврейская автономная область), Хрустальненский ГОК (Приморский край)). К числу составных его частей относятся атмосферный воздух, воды, почвы, растительные и животные организмы, микроорганизмы и человек, а также отходы горного производства, объекты техники и технология.

При проведении исследований использованы общепринятые физико-химические, химические, биологические и математико-статистические методы.

Оценка потенциальных рисков загрязнения почв соединениями тяжелых металлов от хвостохранилища по однофакторному индексу загрязнения ( $PI$ ) и индексу нагрузки загрязнения ( $HPI$ ) выполнена с использованием уравнений (1) и (2) (согласно методикам, изложенным в статье Mari Luz García-Lorenzo и др. [22]):

$$PI = \frac{C_{soil}}{C_{background}}; \quad (1)$$

$$PLI = (PI_{Co} + PI_{Cu} + PI_{Zn} + PI_{As} + PI_{Mo} + PI_{Sn} + PI_{Hg} + PI_{Pb})^{1/n}, \quad (2)$$

где  $PI$  – единственный фактор, индекс загрязнения каждого металла:  $PI < 1$  – не загрязнен;  $1 \leq PI < 2$  – слегка загрязненный;  $2 \leq PI < 3$  – умеренно загрязненный;  $PI \geq 3$  сильно загрязнен;  $C_{soil}$  и  $C_{background}$  – концентрации металла в пробе почвы и фона соответственно ( $mg/kg^{-1}$ ).  $PLI$  – индекс нагрузки загрязнения, а  $n$  – количество оцененных загрязнителей (восемь в нашем исследовании:  $PLI < 2$  – от умеренного до незагрязненного;  $2 \leq PLI < 4$  – умеренно загрязненный;  $4 \leq PLI < 6$  – сильно загрязненный;  $PLI > 6$  – очень сильно загрязнен;  $PI$  – единичный фактор загрязнения каждого металла.

Кроме того, для оценки мобилизации потенциально токсичных элементов (ПТЭ) в воде также рассчитаны показатели  $PI$  и  $PLI$ . Естественная подвижность ПТЭ изучена методом водной экстракции, представляющей растворимую фракцию. Показатели естественной подвижности для соединений хрома ( $NMI_{Cr}$ ), никеля ( $NMI_{Ni}$ ), меди ( $NMI_{Cu}$ ), цинка ( $NMI_{Zn}$ ), стронция ( $NMI_{Sr}$ ), олова ( $NMI_{Sn}$ ), ртути ( $NMI_{Hg}$ ) и свинца ( $NMI_{Pb}$ ) рассчитаны как отношение между концентрациями ПТЭ и его фоновыми значениями:

$$NMI_n = \frac{C_{sample\ after\ water\ extraction}}{C_{background\ after\ water\ extraction}}. \quad (3)$$

Индекс естественной мобильности ( $NMI$ ) определен как  $n$ -й корень произведения из  $n$  индикаторов естественной мобильности. В нашем случае

$$NMI = (NMI_{Cr} \cdot NMI_{Ni} \cdot NMI_{Cu} \cdot MI_{Zn} \cdot NMI_{Sr} \cdot NMI_{Sn} \cdot MI_{Hg} \cdot MI_{Pb})^{1/8} \quad (4)$$

Результаты исследования представлены в таблице, где значения индикатора ниже 2 баллов означают низкую мобильность; значения от



2 до 4 – умеренную подвижность; с 4 до 6 – значительную подвижность; выше 6 свидетельствуют об очень высокой мобильности.

Рассчитан индекс геоаккумуляции в почвах (согласно статье Jiang F. и др. [23]), предложенный Мюллером [24], по формуле

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{1,5 \cdot BE_n}, \quad (5)$$

где  $C_n$  – измеренная концентрация соединений тяжелых металлов в образце;  $BE_n$  – среднее геохимическое фоновое значение измеряемых элементов.

Результаты расчета индекса геоаккумуляции ( $I_{geo}$ ) будут показаны в таблице с выделением уровней: от менее 0 до более 5, указывающие на степень загрязнения от практически незагрязненного до сильно загрязненного.

Результаты исследований были обработаны в программе MS Excel, рисунки – с помощью программы Photoshop, MS Office Picture Manager, Paint, MS Visio.

### Результаты и обсуждение

Анализ рисков в исследуемом районе имеет важное значение как процесс определения отдельных источников опасности и прогнозирования их возможного негативного влияния на экосферу с целью ориентирования Дальневосточного федерального округа на устойчивое развитие.

Результаты наших исследований позволили выявить следующие основные факторы, обуславливающие кризисные явления, приводящие к экологическим рискам хранения накопленных отходов переработки минерального сырья в условиях закрытых горных предприятий Солнечный ГОК и Хрустальненский ГОК: 1) наличие токсичных отходов как источников интенсивного негативного воздействия на экосферу; 2) экологическая напряженность территории и особенности Orographических и биоклиматических условий, а также экологическая емкость; 3) степень освоенности территории; 4) количество населения,

проживающего в границах влияния хвостохранилищ; 5) несовершенство природоохранного законодательства и отсутствие горно-экологического мониторинга изменения объектов окружающей среды в границах влияния токсичных отходов.

Изучение факторов позволило предложить следующую классификацию кризисных экологических ситуаций: 1) техногенно-экологические, связанные с накоплением экологического ущерба; 2) техногенного воздействия, способствующего интенсивному загрязнению экосферы; 3) социально-экологические, сопряженные с проживанием населения на техногенно загрязненной территории.

Воздействие перечисленных выше негативных факторов может привести в ближайшее время к дальнейшему обострению экологической обстановки в исследуемых Солнечном (Хабаровского края) и Кавалеровском оловорудных районах (Приморского края) в ДФО, если в ближайшие годы не будут приняты экстренные и эффективные меры по их преодолению. Любой из этих рисков может повлечь за собой следующие эколого-экономические проблемы первостепенной важности:

- 1) снижение качества среды обитания человека и биоты;
- 2) отсутствие ответственности:
  - за качество среды обитания;
  - охрану здоровья населения, проживающего в горняцком поселке;
  - соблюдение техники безопасности (например, требования компенсации);
- 3) затраты на ликвидацию техногенных загрязнений и его последствий;
- 4) несоответствие природоохранным нормам применявшихся в прошлом веке технологических решений;
- 5) некорректное решение экологических проблем и недовольство общественности;
- 6) несоответствие международным стандартам.

Ниже рассмотрены экологические риски на закрытых горных предприятиях ДФО.

*1. Техногенно-экологические риски, связанные с накопленным экологический ущербом.*

Среди экологических причин выделены следующие: во-первых, размещение объектов, экологически не совместимых с природным комплексом, во-вторых, ошибочная оценка или недооценка экологических последствий преобразования природных ландшафтов в процессе освоения в прошлом веке полезных ископаемых.

Интенсивное освоение минерального сырья в Дальневосточном федеральном округе России привело к накоплению большого количества токсичных сульфидизированных отходов переработки полезных ископаемых, оказывающих мощное негативное влияние на окружающую среду и здоровье человека. Они были в прошлом веке складированы в хвостохранилища, которые в настоящее время остались бесконтрольными и рассматриваются нами как экологический ущерб. К их числу относятся: Солнечный ГОК (Солнечный район, Хабаровский край), Хрустальненский ГОК (Кавалеровский район, Приморский край), Хинганский ГОК (Облученский район, Еврейская автономная область), Карамкенский ГОК (Хасынский район, Магаданская область) и др.

Оловосульфидные месторождения здесь разрабатывались открытым и закрытым способами. Горнорудная промышленность в Солнечном районе функционировала с 1957 по 2005 г. В районе имелось две фабрики и три хвостохранилища, занимающие площадь 80,8 га, с объемом отходов обогащения 41,5 млн т. Их вещественный состав представлен (%): жильным кварцем – 37,5, роговиково-осадочными породами – 45, турмалином – 12,1, и сульфидами (галенит и сфалерит, пирит, пирротин, арсенопирит, халькопирит) – 3,8. Они характеризуются содержанием следующих полезных компонентов (г/т): Sn – 0,46, As – 0,629, Ag – 1,227, Pb – 0,123, Zn – 0,094, Bi – 0,03.

В Кавалеровском районе с 1941 по 2001 г. существовали шесть рудников и четыре обогатительные фабрики. В районе находится пять

хвостохранилищ общей площадью 17,7 га, где накоплено 37,72 млн т хвостов обогащения. В их составе пирит, пирротин, галенит, сфалерит, арсенопирит, халькопирит, кварц, флюорит, турмалин, хлорит и другие минералы. Количественный и полуколичественный спектральный анализы образцов показали, что содержание рудных элементов в них изменяется в следующих пределах (%): Sn – 0,04–0,10; Cu – 0,0062–0,2600; Pb – 0,0039–0,0760; Zn – 0,08–1,00; As – 0,01–0,05; N – 0,0014–0,0033; Co – 0,0002–0,0009; V – 0,0043–0,0100; Ag – 0,0003–0,0030; Ga – 0,0011–0,0016; B – 0,01–0,05; Bi – 0,0001–0,0003; Sr – до 0,01; Ca – до 0,1 [25].

Установлено, что в аварийном состоянии оказались исследуемые хвостохранилища, здесь уровень безопасности – опасный. Выявлены нарушения положений федеральных законов «О безопасности ГТС», «Об охране атмосферного воздуха», «Об отходах производства и потребления», «Об охране окружающей среды», а также требования Правил безопасности ГТС накопителей жидких и промышленных отходов, нормативных и инструктивных документов Госгортехнадзора России, Водного и Земельного кодексов Российской Федерации. Так, не разработаны мероприятия по обеспечению промышленной безопасности, охране недр и окружающей среды и безопасности гидротехнического сооружения (ГТС) на срок приостановки работ на опасных производственных объектах. На закрытых горных предприятиях не выполнялись предписания надзорных органов по устранению нарушений требований технологической и экологической безопасности. Ограждающая дамба хвостохранилищ разрушена, их ремонт не проводится. Пульповоды, водоводы оборотной воды и оборудование станции оборотной воды демонтированы, происходят самопроизвольный сток и смыв загрязняющих веществ в речную сеть. Отсутствует мониторинг безопасности хвостохранилища в соответствии с нормативными требованиями. Происходит интенсивное пылевое загрязнение среды обитания, потому что не

выполняются меры по снижению пыления поверхности хвостохранилища и загрязнения атмосферного воздуха путем рекультивации поверхности хвостохранилища. При специфических местных метеорологических условиях поверхность хвостохранилищ за прошедшие годы подверглись ветровой и водной эрозии и становятся интенсивными источниками пылевого загрязнения экосистем, так как в них содержатся частицы менее 2 мм с высоким содержанием токсичных компонентов. Здесь в прудковой и промежуточной зонах, например, закрытого горного предприятия Солнечный ГОК, выявлена густая сеть эрозионных рытин и промоин глубиной свыше 1 м и шириной от 0,3 до 1,2 м, переходящих в овраги. Это результат развития экстремальных природных процессов в последние годы, а именно: интенсивное обильное выпадение атмосферных осадков в осенний период 2008 г. и в течение июня – июля 2009 г., обусловленное муссонным характером климата в исследуемом регионе. Не менее важным фактором оказалось наличие уклона поверхности хвостохранилища более 3° от пляжной зоны к прудковой. Кроме того, подвержены эрозионным процессам также откосы дамбы.

## *2. Риски техногенного воздействия, способствующего интенсивному загрязнению экосферы.*

Условиями возникновения экологического риска от техногенного загрязнения, например, атмосферного воздуха является наличие источника риска, в том числе характеризующегося вредной для населения и биоты концентрацией загрязняющего вещества [26]. Кроме того, важное значение имеет пребывание их в зоне влияния и наличие путей передачи вредного воздействия от источника к живому организму. Главным фактором при этом является выделение приоритетных объектов источников риска возникновения кризисных ситуаций, обуславливающих интенсивное техногенное загрязнение окружающей среды. На основе собранной информации о негативном влиянии на экосистемы отходов

переработки минерального сырья, складированных в хвостохранилища, закрытых горных предприятий Солнечный ГОК и Хрустальненский ГОК сделан вывод о том, что к числу основных источников создания кризисных ситуаций относятся:

1) хвостохранилища, обогатительные фабрики и отстойники, брошенные на произвол судьбы в результате банкротства горных предприятий;

2) физический износ и ненадежность основного используемого в прошлом веке технологического оборудования и природоохранных объектов, а также сушильных установок и аспирационных систем обогатительных фабрик, вентиляционных систем и плавильных цехов;

3) низкий уровень экологизации процессов, например при выпуске шахтных вод и жидких отходов, отходов обогащения и отходов окислительных пород, когда в водные объекты сбрасывались недостаточно очищенные стоки;

4) применение устаревших технологий и технологических процессов;

5) со стороны руководителей и служб охраны природы функционировавших в прошлом веке горных предприятий выявлено ослабление внимания к охране окружающей среды, снижению объемов и эффективности природоохранных работ;

6) несовершенство природоохранного законодательства и действующей системы платежей за загрязнение окружающей природной среды;

7) большой вопрос – невостребованность имеющихся научно-технических разработок, отсутствие стимулов внедрения и применения их в горном производстве.

Таким образом, вышесказанное свидетельствует о том, что горнопромышленная деятельность потенциально опасна [27, 28] и всегда существует вероятность возникновения рисков, в том числе негативного техногенного воздействия, приводящего к интенсивному за-

грязнению объектов окружающей среды отходами хвостохранилищ и увеличению заболеваемости населения. Так, мелкодисперсная токсичная пыль, поднимаясь с поверхности в воздух, образует вихревые потоки, а затем осаждаются на почвы. К тому же установлено, что атмосферные осадки, растворяя в себе большое количество токсических веществ, образуют техногенные потоки [29, 30], являющиеся негативным фактором для почвенно-растительного покрова.

Проблема осложняется тем, что в результате все большего осадения твердых отходов на почву ее свойства и состав ухудшаются все более быстрыми темпами. Полученные результаты свидетельствуют о том, что содержание тяжелых металлов в исследуемых почвах и водах в десятки раз превышает фоновые показатели и ПДК. Техногенные почвы, расположенные вблизи хвостохранилищ, характеризуются чрезвычайно высокими концентрациями ТМ и Ас (от 31 до 300 мг/кг), превышающими, например, ПДК от 1,5 до 15 и более раз.

Высшая растительность в границах влияния исследуемых хвостохранилищ аккумулирует значительные количества загрязняющих веществ (Zn, Cu, Pb и др.). Выявлено техногенное загрязнение соединениями тяжелых металлов и мышьяка в почвах и растительности даже на большом расстоянии от места складирования техногенных образований (отходов хвостохранилищ), превышающие регионально фоновые показатели от 2 до 6 раз и выше.

В таблицах 1 и 2 приведены расчеты уровня загрязнения соединениями тяжелых металлов почв по однофакторному индексу загрязнения (*PI*) и индекса нагрузки загрязнения (*PLI*), рассчитанных по методике [22], в границах влияния отходов закрытых Солнечного ГОКа и Хрустальненского ГОКа.

Рассчитанный в почвах индекс геоаккумуляции по Мюллеру [24] представлен на рис. 1. Этот показатель отражает значительную его величину для таких токсичных соединений, как мышьяк, медь, сурьма и свинец в границах влияния хвостохранилищ исследуемых закрытых горных предприятий.

Таблица 1

**Расчет уровня загрязнения по однофакторному индексу загрязнения и индекса нагрузки загрязнения почв в границах влияния отходов закрытого горного предприятия Солнечный ГОК**

| Наименование объекта            | Однофакторный индекс загрязнения ( <i>PI</i> ) |       |      |      |      |          |       |       | Индекс нагрузки загрязнения ( <i>PLI</i> ) |
|---------------------------------|------------------------------------------------|-------|------|------|------|----------|-------|-------|--------------------------------------------|
|                                 | Co                                             | Cu    | Zn   | As   | Mo   | Sn       | Hg    | Pb    |                                            |
| Хвостохранилище Солнечного ГОКа | 13,5                                           | 187,1 | 16,2 | 59,0 | 11,8 | 12 631,9 | 343,9 | 330,1 | 119,2                                      |
| 1 км от хвостохранилища         | 2,2                                            | 10,0  | 5,6  | 7,9  | 5,1  | 2008,9   | 231,4 | 45,8  | 22,6                                       |
| 2 км от хвостохранилища         | 2,3                                            | 28,6  | 8,2  | 5,3  | 4,0  | 2135,0   | 116,8 | 43,9  | 21,8                                       |
| 3 км от хвостохранилища         | 1,4                                            | 15,8  | 7,6  | 2,0  | 3,2  | 1216,3   | 30,9  | 74,3  | 14,8                                       |

Таблица 2

**Расчет уровня загрязнения по однофакторному индексу загрязнения и индекса нагрузки загрязнения в границах влияния отходов закрытого горного предприятия Хрустальненский ГОК**

| Наименование объекта                  | Однофакторный индекс загрязнения ( <i>PI</i> ) |     |     |      |     |       |      |      | Индекс нагрузки загрязнения ( <i>PLI</i> ) |
|---------------------------------------|------------------------------------------------|-----|-----|------|-----|-------|------|------|--------------------------------------------|
|                                       | Cr                                             | Co  | Ni  | Cu   | Zn  | As    | Sb   | Pb   |                                            |
| Хвостохранилище Хрустальненского ГОКа | 2,5                                            | 1,9 | 2,7 | 45,7 | 6,0 | 159   | 56,4 | 10,4 | 11,6                                       |
| 1 км от хвостохранилища               | 2,0                                            | 1,9 | 2,4 | 44,5 | 5,3 | 133,8 | 42,8 | 10,0 | 10,3                                       |
| 2 км от хвостохранилища               | 1,7                                            | 1,4 | 2,1 | 16,8 | 2,8 | 15,9  | 8,4  | 5,9  | 4,3                                        |
| 3 км от хвостохранилища               | 1,2                                            | 0,6 | 1,7 | 5,9  | 1,2 | 5,0   | 3,3  | 2,8  | 2,1                                        |



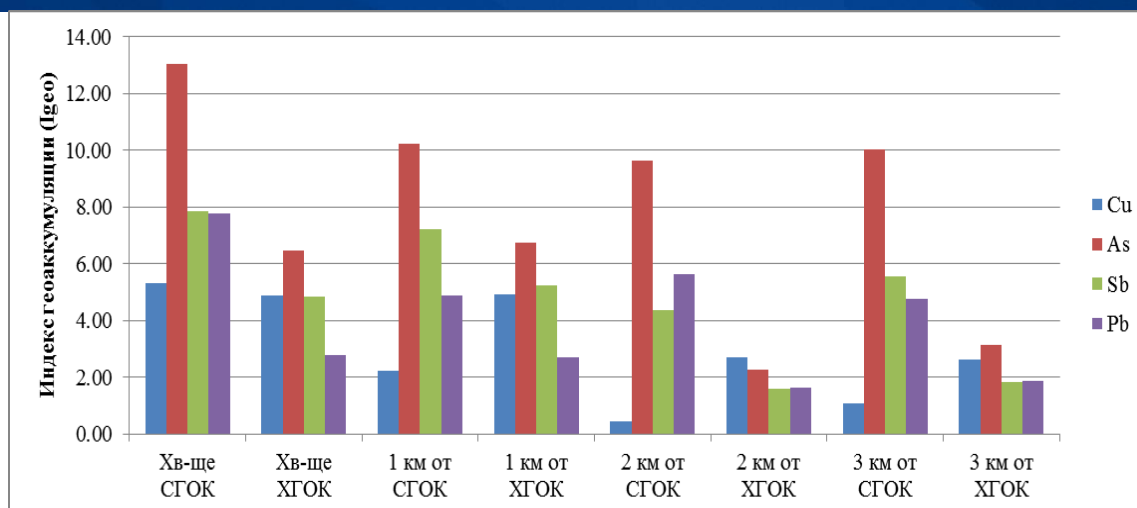


Рис. 1. Расчет индекса геоаккумуляции в почвах в границах влияния отходов закрытых горных предприятий Хрустальненский ГОК (ХГОК) и Солнечный ГОК (СГОК)

Таблица 3

Расчет индекса естественной мобильности

| Наименование объекта                          | Показатель естественной мобильности (NMI <sub>n</sub> ) |       |       |      |     |       |     |          | Индекс естественной мобильности (NMI) |
|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------|-------|------|-----|-------|-----|----------|---------------------------------------|
|                                               | Cr                                                      | Ni    | Cu    | Zn   | Sr  | Sn    | Hg  | Pb       |                                       |
| 3-е хвостохранилище Хрустальненского ГОКа     | 500,3                                                   | 463,2 | 217,4 | 42,7 | 3,4 | 0,1   | 0,1 | 1,0      | 8,7                                   |
| Хвостохранилище Солнечного ЦОФ                | 5,4                                                     | 13,3  | 631,2 | 12,9 | 1,3 | 248,6 | 1,0 | 67 389,6 | 43,3                                  |
| п. Горный, 3-е хвостохранилище, шламовые воды | 2,5                                                     | 7,8   | 488,3 | 8,1  | 1,0 | 1,0   | 1,0 | 53 657,5 | 16,0                                  |

По индексу нагрузки загрязнения (*PLI*) к очень сильно загрязненным можно отнести почвы исследуемой территории вблизи хвостохранилищ Солнечного ГОКа и Хрустальненского ГОКа (1–3 км). Самые высокие показатели у соединений мышьяка, особенно вблизи Солнечного ГОКа.

В табл. 3 представлены результаты расчета индекса естественной мобильности (*NMI*).

Согласно расчетам (табл. 3) оценка подвижности соединений тяжелых металлов в водных источниках вблизи хвостохранилищ очень высокая, особенно возле хвостохранилища Солнечного ГОКа, где протекает р. Холдоми, впадающая в р. Силинку, несущую свои воды в р. Амур биосферного значения.

3. Социально-экологические риски, сопряженные с проживанием населения на техногенно загрязненной территории.

Принятый в 1997 г. Закон Российской Федерации «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [31] (в редакции от 29.07.2018) предусматривает, что предприятие, являющееся источником повышенной опасности, обязано обеспечить меры по защите населения и окружающей среды от опасных воздействий. В связи с этим возникает необходимость оценки социально-экологических рисков, предполагающих не только их выявление, прогнозирование наступления неблагоприятных последствий, определение причиненного вреда здоровью населения, компонентам окружающей среды, но и устранение. Кроме того, предусматривается также получение количественных и качественных показателей кризисных ситуаций, а также предупреждение аварий.

Оценка социально-экологических рисков включает следующие этапы:

1) выявление аварийных ситуаций, связанных с техногенным загрязнением окружающей

среды, и определение экологического ущерба здоровью человека;

2) оценка стоимости работ по полному устранению экологически значимых последствий, вызванных кризисной ситуацией.

Исследования, проведенные нами [32–34], свидетельствуют о том, что население горняцких поселков проживает в условиях постоянного превышения нормативных показателей загрязняющих веществ в атмосферном воздухе в границах влияния отходов переработки минерального сырья, складированных в хвостохранилищах. Результатом действия на него является ответная реакция в виде появления физиологических сдвигов и развития эколого-обусловленных заболеваний. Особого внимания требует детское население, поскольку дети наиболее уязвимы и чувствительны к действию химических агентов вообще [35].

Полученные данные об экологическом состоянии окружающей среды на основе рассчитанных коэффициентов опасности ( $HQ$ ) и индекса опасности ( $HI$ ) для загрязняющих веществ (диоксид серы и соединения тяжелых металлов) показывают рост числа заболеваемости с увеличением уровня техногенного загрязнения экосферы. Выявлена связь между уровнем загрязнения канцерогенными веществами среды обитания и возникновением злокачественных новообразований (ЗНО). Коэффициент опасности ( $HQ$ ), рассчитанный по формуле [35] для групп веществ, действующих на нервную систему (Pb, Mn и Co), соответственно равен 80,7; 3,6 и 3,9, что свидетельствует о высоком уровне загрязнения среды обитания. Расчет индекса опасности ( $HI$ ) для веществ, негативно влияющих на органы дыхания (взвешенные частицы, диоксид серы, а также соединения меди, хрома) показывает, что в районе исследования его значение достигает значительной величины ( $HI = 71,88$ ). Второе место по риску воздействия занимают соединения свинца, марганца и кобальта, индекс опасности которых составляет 5,94. Установлена тесная корреляционная связь между пока-

зателем содержания канцерогенных соединений, например Sb, и заболеванием органов дыхания, а также возникновением новообразований [32–34].

Сложившаяся при освоении рудных месторождений в ДФО ситуация предопределяет необходимость разработки принципов обеспечения экологической безопасности хвостохранилищ, содержащих токсичные отходы переработки оловорудного сырья. Проведенные исследования позволили предложить следующие принципы нормального функционирования техногенных объектов в границах влияния закрытых горных предприятий Солнечный ГОК и Хрустальненский ГОК.

1. Рациональная безопасность как необходимость максимально возможного экономически оправданного снижения вероятности возникновения чрезвычайных экологических ситуаций и масштабов их последствий в условиях закрытых горных предприятий.

2. Сохранение важнейшего элемента качества жизни – благоприятной окружающей среды для биоты и здоровья населения горняцкого поселка в условиях закрытых горных предприятий.

3. Учет различных естественных опасностей и техногенного воздействия на экосферу хвостохранилищ (принцип сбалансированного риска).

4. Анализ соотношений «затраты – риск», «выгода – риск», «затраты – выгода» (принцип приемлемого риска). В международной практике этот принцип известен как принцип ALARA (As Low Reasonable Achievable) – т.е. настолько низко, насколько это достижимо в разумных пределах.

На основе данных принципов предложены следующие мероприятия по обеспечению экологической безопасности хвостохранилищ, содержащих токсичные отходы переработки оловорудного сырья, в границах их влияния в условиях закрытых горных предприятий Солнечный ГОК и Хрустальненский ГОК.

1. Создание экономического механизма снижения риска возникновения экологического ущерба от чрезвычайных ситуаций.

2. Создание новой технологии рекультивации поверхности хвостохранилищ с использованием инновационного подхода (биоремедиации), новизна которых подтверждена патентами РФ (2018 и др.) [36], и ее реализация для снижения негативного воздействия на среду обитания.

3. Разработка системы горно-экологического мониторинга состояния компонентов окружающей среды в границах влияния хвостохранилищ закрытых горных предприятий.

4. Создание лесозащитной полосы вокруг хвостохранилища и максимальное озеленение территории горняцких поселков с целью предотвращения техногенного загрязнения экосферы.

5. Проведение медико-экологического обследования населения для его оздоровления в связи с формированием здесь экологически обусловленных заболеваний.

### Заключение

1. Установлена высокая экологическая токсичность отходов закрытых горных предприятий Солнечный ГОК и Хрустальненский

ГОК, которая, несомненно, способствует интенсивному загрязнению объектов окружающей среды и повышению заболеваемости населения горняцких поселков в ДФО.

2. Выявлены индикаторы и факторы, ставшие причиной кризисных явлений, приводящих к экологическим рискам хранения накопленных отходов переработки минерального сырья в результате прошлой деятельности закрытых горных предприятий.

3. Дана оценка уровня загрязнения соединениями тяжелых металлов почв по однофакторному индексу загрязнения ( $PI$ ) и индексу нагрузки загрязнения ( $PLI$ ), а также индексу естественной мобильности и геоаккумуляции.

4. Разработаны принципы и мероприятия по обеспечению экологической безопасности хвостохранилищ, содержащих токсичные отходы переработки оловорудного сырья. Созданы новые технологии рекультивации поверхности хвостохранилищ, содержащих токсичные отходы переработки минерального сырья, новизна которых подтверждена патентами РФ.

### Библиографический список

1. Свинобоева О. Н., Ноговицын Р. Р. Перспективы возрождения оловянной промышленности в Республике Саха (Якутия). *Проблемы современной экономики*. 2017;3(63):183-186.
2. Куликова Е. Ю., Сергеева Ю. А. Концептуальная модель минимизации риска загрязнения водных ресурсов Кемеровской области. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2020;6(1):107-118.
3. Пинаев В. Е., Чернышев Д. А. *Ликвидация накопленного экологического ущерба – организационные и правовые аспекты*: Монография. М.: Мир науки; 2017. 136 с.
4. Распоряжение Правительства РФ от 17.11.2008 № 1662-р (ред. от 28.09.2018) «О Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года» (вместе с «Концепцией долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года»). Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_82134/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_82134/)
5. Гегиев К. А., Шерхов А. Х., Гергокова З. Ж., Анахаев К. К. Экологические проблемы Тырныаузского хвостохранилища на реке Гижигит. *Вестник МГСУ*. 2018;13(11):1386–1394. DOI: [10.22227/1997-0935.2018.11.1386-1394](https://doi.org/10.22227/1997-0935.2018.11.1386-1394)
6. Иванова О. А., Куклина Т. С. Экологические последствия добычи вольфрамовых руд (на примере закамского района Республики Бурятия). *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН*. 2016;3(56):95-101.
7. Пашкевич М. А., Стриженов А. В. Оценка антропогенной нагрузки в районе расположения хранилища отходов обогащения апатит-нефелиновых руд. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2012;(2):35-41.
8. Gurbanov A. G., Bogatkov O. A., Gazeev V. M., Leksin A. B., et al. Geochemical evaluation of environmental conditions in the area of activity of the tyrnauz tungsten–molybdenum plant (Kabardino-Balkaria, North Caucasus): sources of environment contamination, impact upon neighboring areas, and ways for recovery. *Doklady Earth Sciences*. 2015;464(1):967-971.



9. Vinokurov S. F., Gurbanov A. G., Bogatkov O. A., Gazeev V. M., et al. Contents, seasonal variations, and forms of migration of major and minor elements in surface waters in the area of the Tyrnauz Tungsten–Molybdenum combine (TTMC) and adjacent areas (Kabardino-Balkarian republic, Russian Federation) and actions for recovery of the ecological environment. *Doklady Earth Sciences*. 2016.;467(2):346-349.

10. Чигоева Д. Н., Каманина И. З., Каплина С. П. Содержание тяжелых металлов в водотоках в районе Унальского хвостохранилища и реки Ардон. *Юг России: экология, развитие*. 2018;13(2):113-122. DOI: [10.18470/1992-1098-2018-2-113-122](https://doi.org/10.18470/1992-1098-2018-2-113-122)

11. Качор О. Л., Сарапулова Г. И., Богданов А. В. Поиск способа обезвреживания техногенных отходов горного производства, загрязненных мышьяком. Новейшие исследования в современной науке: опыт, традиции, инновации. Сб. науч. ст. по материалам IX Международной научной конференции. 2019. С. 14-17.

12. Salas-Luévano M. A., Mauricio-Castillo J. A., González-Rivera M. L., et al. Accumulation and phytostabilization of As, Pb and Cd in plants growing inside mine tailings reforested in Zacatecas, Mexico. *Environ Earth Sci*, 2017;76:806. DOI: [10.1007/s12665-017-7139-y](https://doi.org/10.1007/s12665-017-7139-y)

13. Soltani N., Keshavarzi B., Moore F., et al. Distribution of potentially toxic elements (PTEs) in tailings, soils, and plants around Gol-E-Gohar iron mine, a case study in Iran. *Environ Sci Pollut Res*. 2017;24:18798-18816. DOI: [10.1007/s11356-017-9342-5](https://doi.org/10.1007/s11356-017-9342-5)

14. Azharia Abdellah El, Rhoujjatia Ali, El Hachimi Moulay Laârabî, Ambrosi Jean-paul. Pollution and ecological risk assessment of heavy metals in the soil-plant system and the sediment-water column around a former Pb/Zn-mining area in NE Morocco. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2017;144:464-474. DOI: [10.1016/j.ecoenv.2017.06.051](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.06.051)

15. Romero Antonio, González Isabel, Martín José María, Vázquez María Auxiliadora, Ortiz Pilar. Risk assessment of particle dispersion and trace element contamination from mine-waste dumps. *Environmental Geochemistry and Health*. 2015;37:273-286. DOI: [10.1007/s10653-014-9645-0](https://doi.org/10.1007/s10653-014-9645-0)

16. May I. V., Kleyn S. V., Vekovshinina S. A. Assessment of impact of accumulated environmental damage to the quality of soil, surface and groundwater, agricultural products resulted from the mining enterprise. In: *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. International scientific conference «Agritech-2019: agribusiness, environmental engineering and biotechnologies»*. Krasnoyarsk; 2019. P. 062024.

17. Zhigang Hu, Chensheng Wang, Keqing Li & Xinyou Zhu. Distribution characteristics and pollution assessment of soil heavy metals over a typical nonferrous metal mine area in Chifeng, Inner Mongolia, China. *Environmental Earth Sciences* 2018;77:638.

18. Sung-Min Kim, Jangwon Suh, Sungchan Oh, Jin Son, Chang-Uk Hyun, Hyeong-Dong Park, Seung-Han Shin, Yosoon Choi. Assessing and prioritizing environmental hazards associated with abandoned mines in Gangwon-do, South Korea: the Total Mine Hazards Index. *Environmental Earth Sciences*. 2016;75(5):369.

19. Rosario García-Giménez & Raimundo Jiménez-Ballesta. Mine tailings influencing soil contamination by potentially toxic elements. *Environmental Earth Sciences*. 2017;76:51. DOI: [10.1007/s12665-016-6376-9](https://doi.org/10.1007/s12665-016-6376-9)

20. Gbadebo A. M. & Ekwue Y. A. Heavy metal contamination in tailings and rock samples from an abandoned goldmine in southwestern Nigeria. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2014;186:165-174.

21. Peña-Ortega Mayra, Del Rio-Salas Rafael, Valencia-Sauceda Javier, Mendivil-Quijada Héctor, Minjarez-Osorio Christian, Molina-Freaner Francisco, de la O-Villanueva Margarita & Moreno-Rodríguez Verónica. Environmental assessment and historic erosion calculation of abandoned mine tailings from a semi-arid zone of northwestern Mexico: insights from geochemistry and unmanned aerial vehicles. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019;26:26203-26215.

22. García-Lorenzo Mari Luz, Crespo-Feo Elena, Esbrí Jose María, Higuera Pablo, Grau Patricia, Crespo Isabel, Sánchez-Donoso Ramón. Assessment of Potentially Toxic Elements in Technosols by Tailings Derived from Pb–Zn–Ag Mining Activities at San Quintín (Ciudad Real, Spain): Some Insights into the Importance of Integral Studies to Evaluate Metal Contamination Pollution Hazards. *Minerals*. 2019;9(6):346. DOI: [10.3390/min9060346](https://doi.org/10.3390/min9060346)

23. Jiang, F., Ren, B., Hursthouse, A. et al. Distribution, source identification, and ecological-health risks of potentially toxic elements (PTEs) in soil of thallium mine area (southwestern Guizhou, China). *Environ Sci Pollut Res*. 2019;26:16556-16567.

24. Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine river. *GeoJournal*. 1969;2:108-118.

25. Зверева В. П. Техногенные воды оловорудных месторождений Дальнего Востока. *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2007;(1):51-56.

26. Мамаев Ю. А., Крупская Л. Т., Грехнев Н. И. и др. Обеспечение экологической безопасности источников риска возникновения кризисных ситуаций от горных предприятий в Приамурье. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2008:252-259.

27. Беляев А. М. Оценка эколого-геохимической опасности месторождений полезных ископаемых. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*. 2011;3:43-48.



28. García-Giménez R., Jiménez-Ballesta R. Mine tailings influencing soil contamination by potentially toxic elements. *Environ Earth Sci.* 2017;76:51.
29. Цыдыпов В. В., Жамсуева Г. С., Заяханов А. С. и др. Влияние техногенных песков хвостохранилищ Джидинского вольфрам-молибденового комбината на содержание мелкодисперсной и субмикронной фракции аэрозоля в атмосфере города Закаменска. *Успехи современного естествознания.* 2019;4:81-86.
30. Dragana Randelović, Jelena Mutić, Prvoslav Marjanović, Tamara Đorđević, Milica Kašanin-Grubin. Geochemical distribution of selected elements in flotation tailings and soils/sediments from the dam spill at the abandoned antimony mine Stolice, Serbia. *Environmental Science and Pollution Research.* 2020;27:6253-6268.
31. Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ (ред. от 29.07.2018) «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».
32. Раганина Н. К., Крупская Л.Т. О роли экологических факторов в изучении здоровья населения горняцких поселков на юге Дальнего Востока. *Экология и промышленность России.* 2008;12:56-57.
33. Зверева В. П. Оценка воздействия техногенных вод Кавалеровского и Дальнегорского горнорудных районов на гидросферу Приморского края. *Экологическая химия.* 2019;28(4):199-210.
34. Раганина Н.К., Кузнецова А.А. Элементный статус биологического материала детей, проживающих в границах влияния закрытых оловорудных предприятий ДФО. В сборнике: *философия современного природопользования в бассейне реки Амур. Материалы VIII международной научно-практической конференции.* Ответственный редактор П.Б. Рябухин. 2019:116-118.
35. Куролап С. А., Мамчик Н. П., Клепиков О. В. *Оценка риска для здоровья населения при техногенном загрязнении городской среды.* Воронеж: Воронежский гос. ун-т; 2006.
36. Крупская Л. Т., Ищенко Е. А., Голубев Д. А. и др. Патент РФ № 2707030 от 21.11.2019. *Состав для снижения пылевой нагрузки на экосферу и рекультивации поверхности хвостохранилища.* Заявка № 2019114495 от 13.05.2019

## References

1. Svinoboeva O.N., Nogovitsyn R.R. Prospects for revival of tin industry in the Republic of Sakha (Yakutia). *Problemy sovremennoy ekonomiki [Problems of modern economics].* 2017;3(63):183-186. (In Russ.)
2. Kulikova E. Yu., Sergeeva Yu. A. Conceptual model for minimizing the risk of water pollution in the Kemerovo region. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal).* 2020;6(1):107-118. (In Russ.)
3. Pinaev V.E., Chernyshev D.A. *Elimination of accumulated environmental damage – organizational and legal aspects.* Monograph, Moscow: Mir Nauki Publ.; 2017. 136 p. (In Russ.)
4. Order of the Government of the Russian Federation of November 17, 2008 No. 1662-р (as amended on September 28, 2018) "On the Concept of long-term socio-economic development of the Russian Federation for the period up to 2020" (together with the "Concept of long-term socio-economic development of the Russian Federation for the period up to 2020"). Available from: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_82134/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_82134/) (In Russ.)
5. Gegiev K. A., Sherkhov A. Kh., Gergokov Z. Zh., Anakhaev K. K. Ecological problems of Tyrnauz tailings storage facility near the Gizhgut River. *Vestnik MGSU [Bulletin of MSBU].* 2018;13(11):1386-1394. DOI: [10.22227/1997-0935.2018.11.1386-1394](https://doi.org/10.22227/1997-0935.2018.11.1386-1394) (In Russ.)
6. Ivanova O. A., Kuklina T. S. Environmental consequences of mining tungsten ores (as exemplified by Zakamensk district of the Republic of Buryatia). *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektii nauk o Zemle RAEN [Bulletin of the Siberian Branch of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences].* 2016;3(56):95-101. (In Russ.)
7. Pashkevich M.A., Strizhenok A.V. Assessment of the anthropogenic load in the vicinity of the apatite-nepheline ore processing tailings storage facility. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle [Bulletin of Tula State University. Earth Sciences].* 2012;(2):35-41. (In Russ.)
8. Gurbanov A. G., Bogatkov O. A., Gazeev V. M., Leksin A. B., et al. Geochemical evaluation of environmental conditions in the area of activity of the tyrnauz tungsten–molybdenum plant (Kabardino-Balkaria, North Caucasus): sources of environment contamination, impact upon neighboring areas, and ways for recovery. *Doklady Earth Sciences.* 2015;464(1):967-971.
9. Vinokurov S. F., Gurbanov A. G., Bogatkov O. A., Gazeev V. M., et al. Contents, seasonal variations, and forms of migration of major and minor elements in surface waters in the area of the Tyrnauz Tungsten–Molybdenum combine (TTMC) and adjacent areas (Kabardino-Balkarian republic, Russian Federation) and actions for recovery of the ecological environment. *Doklady Earth Sciences.* 2016.;467(2):346-349.
10. Chigoeva D. N., Kamanin I. Z., Kaplina S. P. Contents of heavy metals in watercourses in the area of Unalsky TSF and Ardon river. *South of Russia: ecology, development.* 2018;13(2):113-122. DOI: [10.18470/1992-1098-2018-2-113-122](https://doi.org/10.18470/1992-1098-2018-2-113-122) (In Russ.)

11. Kachor O. L., Sarapulova G. I., Bogdanov A. V. Selection of method for detoxication of man-made mining waste, polluted with arsenic. Latest research in modern science: experience, traditions, innovations. In: *Proceedings of the IX International Scientific Conference*. 2019. P. 14-17. (In Russ.)
12. Salas-Luévano M. A., Mauricio-Castillo J. A., González-Rivera M. L., et al. Accumulation and phytostabilization of As, Pb and Cd in plants growing inside mine tailings reforested in Zacatecas, Mexico. *Environ Earth Sci*, 2017;76:806. DOI: [10.1007/s12665-017-7139-y](https://doi.org/10.1007/s12665-017-7139-y)
13. Soltani N., Keshavarzi B., Moore F., et al. Distribution of potentially toxic elements (PTEs) in tailings, soils, and plants around Gol-E-Gohar iron mine, a case study in Iran. *Environ Sci Pollut Res*. 2017;24:18798-18816. DOI: [10.1007/s11356-017-9342-5](https://doi.org/10.1007/s11356-017-9342-5)
14. Azharia Abdellah El, Rhoujjatia Ali, El Hachimi Moulay Laârab, Ambrosi Jean-paul. Pollution and ecological risk assessment of heavy metals in the soil-plant system and the sediment-water column around a former Pb/Zn-mining area in NE Morocco. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2017;144:464-474. DOI: [10.1016/j.ecoenv.2017.06.051](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.06.051)
15. Romero Antonio, González Isabel, Martín José María, Vázquez María Auxiliadora, Ortiz Pilar. Risk assessment of particle dispersion and trace element contamination from mine-waste dumps. *Environmental Geochemistry and Health*. 2015;37:273-286. DOI: [10.1007/s10653-014-9645-0](https://doi.org/10.1007/s10653-014-9645-0)
16. May I. V., Kley S. V., Vekovshina S. A. Assessment of impact of accumulated environmental damage to the quality of soil, surface and groundwater, agricultural products resulted from the mining enterprise. In: *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. International scientific conference «Agritech-2019: agribusiness, environmental engineering and biotechnologies»*. Krasnoyarsk; 2019. P. 062024.
17. Zhigang Hu, Chensheng Wang, Keqing Li & Xinyou Zhu. Distribution characteristics and pollution assessment of soil heavy metals over a typical nonferrous metal mine area in Chifeng, Inner Mongolia, China. *Environmental Earth Sciences* 2018;77:638.
18. Sung-Min Kim, Jangwon Suh, Sungchan Oh, Jin Son, Chang-Uk Hyun, Hyeong-Dong Park, Seung-Han Shin, Yosoon Choi. Assessing and prioritizing environmental hazards associated with abandoned mines in Gangwon-do, South Korea: the Total Mine Hazards Index. *Environmental Earth Sciences*. 2016;75(5):369.
19. Rosario García-Giménez & Raimundo Jiménez-Ballesta. Mine tailings influencing soil contamination by potentially toxic elements. *Environmental Earth Sciences*. 2017;76:51. DOI: [10.1007/s12665-016-6376-9](https://doi.org/10.1007/s12665-016-6376-9)
20. Gbadebo A. M. & Ekwue Y. A. Heavy metal contamination in tailings and rock samples from an abandoned goldmine in southwestern Nigeria. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2014;186:165-174.
21. Peña-Ortega Mayra, Del Rio-Salas Rafael, Valencia-Sauceda Javier, Mendiivil-Quijada Héctor, Minjarez-Osorio Christian, Molina-Freaner Francisco, de la O-Villanueva Margarita & Moreno-Rodríguez Verónica. Environmental assessment and historic erosion calculation of abandoned mine tailings from a semi-arid zone of northwestern Mexico: insights from geochemistry and unmanned aerial vehicles. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019;26:26203-26215.
22. García-Lorenzo Mari Luz, Crespo-Feo Elena, Esbrí Jose María, Higuera Pablo, Grau Patricia, Crespo Isabel, Sánchez-Donoso Ramón. Assessment of Potentially Toxic Elements in Technosols by Tailings Derived from Pb–Zn–Ag Mining Activities at San Quintín (Ciudad Real, Spain): Some Insights into the Importance of Integral Studies to Evaluate Metal Contamination Pollution Hazards. *Minerals*. 2019;9(6):346. DOI: [10.3390/min9060346](https://doi.org/10.3390/min9060346)
23. Jiang, F., Ren, B., Hursthouse, A. et al. Distribution, source identification, and ecological-health risks of potentially toxic elements (PTEs) in soil of thallium mine area (southwestern Guizhou, China). *Environ Sci Pollut Res*. 2019;26:16556-16567.
24. Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine river. *GeoJournal*. 1969;2:108-118.
25. Zvereva V. P. Technogenic waters of tin ore deposits in the Far East. Environmental geology. *Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*. 2007;(1):51-56. (In Russ.)
26. Mamaev Yu. A., Krupskaya L. T., Grekhnev N.I., Morin V.A., Krupsky A.V. Ensuring environmental safety of potential sources of emergency at mining enterprises in the Amur River Region. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)] 2008:252–259. (In Russ.)
27. Belyaev A.M. Assessment of ecological-and-geochemical hazard of mineral deposits. *Bulletin of St. Petersburg University. Earth Sciences*. 2011;3:43-48. (In Russ.)
28. García-Giménez R., Jiménez-Ballesta R. Mine tailings influencing soil contamination by potentially toxic elements. *Environ Earth Sci*. 2017;76:51.
29. Tsydygov V.V., Zhamsueva G.S., Zayakhanov A.S., et al. Impact of technogenic sands of the Dzhidatungsten-molybdenum combine TFS on the content of fine and submicron aerosol fractions in the air in Zakamensk city. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Successes of modern natural science]. 2019;4:81-86.

30. Dragana Randelović, Jelena Mutić, Prvoslav Marjanović, Tamara Đorđević, Milica Kašanin-Grubin. Geochemical distribution of selected elements in flotation tailings and soils/sediments from the dam spill at the abandoned antimony mine Stolice, Serbia. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020;27:6253-6268.

31. Federal Law No. 116-FZ dated July 21, 1997 (as amended on July 29, 2018) "On Industrial Safety of Hazardous Industrial Facilities". (In Russ.)

32. Rastanina N. K., Krupskaya L. T. On the role of environmental factors in the health of the population of miners' settlements in the south of the Far East. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii [Ecology and Industry of Russia]*. 2008;12:56-57. (In Russ.)

33. Zvereva V. P. Assessment of the impact of technogenic waters of the Kavalerovsky and Dalnegorsky mining regions on the hydrosphere of the Primorsky Territory. *Ekologicheskaya khimiya [Environmental chemistry]*. 2019;28(4):199-210. (In Russ.)

34. Rastanina N. K., Kuznetsova A. A. Elemental status of biological material of children living within the influence of closed tin ore enterprises of the Far Eastern Federal District. In the collection: *philosophy of modern nature management in the Amur river basin. Materials of the VIII International Scientific and Practical Conference*. Executive editor P. B. Ryabukhin. 2019:116-118. (In Russ.)

35. Kurolap S. A., Mamchik N. P., Klepikov O. V. *Assessment of the risk to public health in case of technogenic pollution of urban environment*. Voronezh: Voronezh State University Publ.; 2006. (In Russ.)

36. Krupskaya L.T., Ishchenko D.A., Golubev D.A., et al. *Composition for reducing dust load on ecosphere and reclamation of TSF surface*. Patent RF No. 2707030 dated 21.11.2019. (In Russ.)



## ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

DOI: 10.17073/2500-0632-2020-3-224-234

**Оценка использования геофизического метода VLF  
для определения мощности торфяного месторождения****Т. Б. Яконовская<sup>1</sup> , А. И. Жигульская<sup>1</sup> , П. А. Яконовский<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия, ✉ [tby81@yandex.ru](mailto:tby81@yandex.ru)<sup>2</sup>«TGT Oil and Gas Services», г. Казань, Россия

**Аннотация:** Торфяные месторождения аккумулируют большие запасы углерода и играют важную роль в формировании глобального климата, биосферы и гидрологии. Высокая степень изученности торфяных запасов является одной из предпосылок научно обоснованного и экономически целесообразного управления водно-болотными угодьями. Для экономически эффективной хозяйственной деятельности предприятие, разрабатывающее торфяную залежь должно быть уверено в наличии достаточного и качественного объема промышленных запасов торфа. Поэтому тематика исследования мощности торфяных месторождений является достаточно актуальной. В статье анализируется опыт использования геофизического метода, называемого VLF («очень низкая частота»), для исследования мощности торфяных месторождений. Метод заключался в использовании приемника VLF для измерения свойств VLF, излучаемых торфяным месторождением и подстилающим минеральным грунтом. Исследование было проведено на месторождении торфа «Озеро Белое» Тукаевского района Татарстана на трех разных по глубине участках торфа: глубокозалежного (свыше 3 м), среднезалежного (1,5–3 м) и мелкозалежного (до 1,5 м). Глубина была подтверждена прямым измерением по скважинам. Низкочастотное измерение VLF проводилось вдоль геофизических трасс на каждом участке торфяной залежи. Данные были обработаны с использованием метода NAMEMD (эмпирическая декомпозиция шумовых сигналов) и преобразованы в значение и глубину удельного сопротивления с использованием специализированного программного обеспечения. Исследование показало, что удельное сопротивление значительно отличается по участкам глубокозалежного и мелкозалежного торфа. Удельное сопротивление изменяется в зависимости от толщины торфа и мощности горизонтов погребенной древесины. В горизонтах глубокозалежного торфа на величину удельного сопротивления оказывают сильное влияние степень разложения торфа, его естественная плотность и влажность. Наличие пиков и их высота на графиках интерпретации данных характеризуют количество и толщину горизонтов погребенной древесины в торфяном месторождении. С ростом глубины торфа сопротивление значительно растет. Однако на мелкозалежных участках оно не проявляет различий, как в области глубокозалежного торфа. Это доказывает, что метод VLF правильно работает в слоях торфа и способен указывать толщину торфа, количество и мощность горизонтов погребенной древесины.

**Ключевые слова:** мощность торфа, горизонты торфозалежи, геофизический способ, проводимость, метод VLF, удельное сопротивление, метод ANOVA, тест HSD Тьюки

**Для цитирования:** Яконовская Т. Б., Жигульская А. И., Яконовский П. А. Оценка использования геофизического метода VLF для определения мощности торфяного месторождения. *Горные науки и технологии*. 2020;5(3):224-234. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-3-224-234

**Assessment of applying VLF geophysical method  
to determine the peat deposit thickness****T. B. Yakonovskaya<sup>1</sup> , A. I. Zhigulskaya<sup>1</sup> , P. A. Yakonovsky<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Tver State Technical University, Tver, Russia, ✉ [tby81@yandex.ru](mailto:tby81@yandex.ru)<sup>2</sup>TGT Oil and Gas Services, Kazan, Russia

**Abstract:** Peat deposits accumulate large reserves of carbon and play an important role in formation of global climate, biosphere, and hydrological conditions. High degree of knowledge of peat reserves is one of the prerequisites for scientifically based and economically viable wetland management. For economically efficient commercial activity, an enterprise developing a peat deposit must be confident in the availability of sufficient and high-quality commercial peat reserves. Therefore, the topic of studying the thickness of peat deposits is quite relevant.





The paper analyzes the experience of using the geophysical method called VLF ("very low frequency") to study the thickness of peat deposits. The method consisted of using a VLF receiver to measure the properties of VLF emitted by the peat deposit and the underlying mineral ground. The study was carried out at the Beloe Lake peat deposit in the Tukayevsky district of Tatarstan, at three peat areas of different depths: deep-lying (over 3 m), intermediate (1.5 – 3 m), and shallow (up to 1.5 m). The depth was confirmed by direct measurements in the wells. Low-frequency (VLF) measurements were carried out along the geophysical paths at each area of the peat deposit. The data were processed using the NAMEMD (Noise Empirical Decomposition) method and converted to resistivity and depth values using the specialized software. The study showed that the resistivity differs significantly between the areas of deep-lying and shallow peat. The resistivity varies depending on the peat thickness and the thickness of the buried wood horizons. In the horizons of deep-lying peat, the resistivity is strongly influenced by the degree of peat decomposition, its natural density and moisture. The presence of peaks and their height on the data interpretation plots characterizes the number and thickness of the horizons of buried wood in the peat deposit. With increasing depth of peat occurrence, the resistivity increases significantly. However, in the shallow areas, it does not show differences, being characteristic for the deep-lying peat area. This proves that the VLF method works correctly in peat layers and is capable to indicate the peat thickness, the number and thickness of the buried wood horizons.

**Keywords:** peat thickness, peat horizons, geophysical method, conductivity, VLF method, resistivity, ANOVA method, Tukey's HSD test

**For citation:** Yakonovskaya T. B., Zhigul'skaya A. I., Yakonovsky P. A. Assessment of applying VLF geophysical method to determine the peat deposit thickness. *Gornyye nauki i tekhnologii = Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(3):224-234. (In Russ.) DOI: 10.17073/2500-0632-2020-3-224-234

## Введение

Торфяники являются распространенным элементом минерально-сырьевой базы регионов России. Однако многие субъекты РФ отличаются разной степенью изученности торфяного фонда. Торфяные месторождения аккумулируют большие запасы углерода и играют важную роль в формировании глобального климата, биосферы и гидрологии. Высокая степень изученности торфяных запасов является одной из предпосылок научно обоснованного и экономически целесообразного управления водно-болотными угодьями. Для экономически эффективной хозяйственной деятельности предприятие, разрабатывающее торфяную залежь, должно быть уверено в наличии достаточного и качественного объема промышленных запасов торфа [1].

Интенсивная геологическая разведка торфяных месторождений проводилась лишь в советский период, в настоящий момент такие исследования не проводятся ввиду их высокой стоимости и трудоемкости. Проектные организации при подготовке технического проекта разработки торфяного месторожде-

ния используют устаревшую информационную базу торфяных фондов 1952, 1989 и 2000 гг. Большим недостатком содержащейся в торфяных фондах информации является отсутствие данных о мощности конкретной залежи (глубине торфа), ее пнистости (количестве и толщине горизонтов погребенной древесины) и виде минерального подстилающего грунта. По этой причине знания о количестве, масштабах и мощности торфяников, их пространственной изменчивости в российских регионах сильно различаются. Это также, вероятно, связано с различными стандартами, инструментами и методами измерения.

Степень изученности торфяного фонда Татарстана составляет 78%. Цифры по общей площади и количеству торфяников в Татарстане различны. Например, в торфяном фонде 1952 г. площадь предполагаемого фонда торфяных запасов составляла 20 тыс. га, а количество месторождений 608 ед. Данные торфяного фонда 1989 г. сообщают о площади 20,6 тыс. га, а по информации торфяного фонда 2000 г. уже 30 тыс. га и 900 ед. месторождений [1, 2]. Тем не менее толщина и другие характеристики тор-

фяных залежей сильно различаются, а у некоторых месторождений сообщаются не полностью. Кроме того, многие торфяные залежи в Татарстане граничат с месторождениями углеводородных ресурсов.

В данной работе авторы при исследовании торфяного месторождения предлагают использовать геофизический метод, который позволяет определить мощность торфяной залежи с высокой точностью результата. Геофизический метод основан на использовании электромагнитной волны очень низкой частоты, поэтому он еще называется методом VLF-EM, или VLF. Метод VLF-EM изначально был разработан для подводной навигации. Тем не менее он также используется для геофизической разведки месторождений благодаря своей способности проникновения сквозь поверхность земли и распространения на очень большое расстояние.

Распространение VLF-EM в пределах земли может вызвать любой подземный проводник, производящий вторичное электромагнитное поле, которое может быть обнаружено с помощью приемника VLF. Метод VLF фактически использует оборудование, которое имеет возможность приема и измерения разницы между первичным и вторичным электромагнитным излучением с точки зрения фазы или поляризации. Измеряемая электромагнитная энергия, излучаемая подземным проводником, зависит от его проводимости и удельного сопротивления. Торфяной, минеральный подстилающий грунт и слой погребенной древесины имеют разную проводимость и, следовательно, будут иметь разную поляризацию [3].

Цель данного исследования заключалась в оценке возможности использования метода VLF для исследования изменчивости глубины торфа и определения пнистости торфяного месторождения.

#### **Методика проведения исследования**

Исследование проводилось на торфянике «Озеро Белое», расположенном в Тукаевском районе Татарстана. Это одно из крупных по объему запасов месторождение, участки

которого отличаются по глубине торфа, то есть А – очень глубокий торф (свыше 3 м), В – глубокий торф (1,5 – 3 м) и С – мелкий торф (0–1,5 м) (рис. 1). «Озеро Белое» – типичное для условий Татарстана высокозольное месторождение низинного вида травяной группы, озерного типа образования. Это единственное разрабатываемое с 2009 г. месторождение торфа, используемого для сельскохозяйственных нужд.

Применяемые в исследовании инструменты: торфяной шнек, карта торфяной залежи, GPS, приемник VLF-EM и компьютер с установленным программным обеспечением Inv2DVLF [4–6]. Основными собранными данными являлись: глубина торфа и данные VLF. Данные VLF состояли из синфазной и квадратурной составляющих сигнала [7]. Синфазная составляющая сигнала – это величина поляризованного угла вторичной обмотки поля к вертикальному первичному полю. В свою очередь, квадратурная составляющая сигнала – это отношение эллиптических осей к плоскости поляризации [6, 8]. Измерения VLF соответствовали общему методу геофизической разведки ОНЧ. Измерение было проведено в 16 линиях в трех направлениях исследований. На каждом участке торфяной залежи (А, В) было 5 линий, на участке С – 6 линий. Длина трассы геофизического исследования составляла от 200 до 500 м, в то время как интервалы между линиями были от 10 до 20 м. Глубина торфа измерялась прямым методом по скважинам, которые были расположены на каждые 80 м во всех трассах геофизического исследования. В некоторых местах, где изменчивость глубины торфа резко увеличивалась, пространство между скважинами было уменьшено (рис. 1). Собранные данные VLF были проанализированы с использованием метода NAMEMD для устранения эффекта шума в наблюдениях [9, 10]. Очищенные от шумового фона данные были затем инвертированы с использованием Inv2DVLF [6, 11], для того чтобы получить оценку 2D удельного сопро-

тивления вдоль линий каждого участка торфяной залежи.

### Обсуждение полученных результатов

Программное обеспечение Inv2DVLF оценивает значения синфазности и квадратур и предсказывает вертикальные последовательные удельные сопротивления вдоль каждой трассы геофизического исследования. Предсказанный информационный массив удельного сопротивления состоит из 8 вертикальных z-позиций на глубину: 0,5 м, 1,1 м, 1,52 м,

2,2 м, 2,58 м, 3,15 м, 3,6 м и 4,72, м. Эти глубины могут незначительно отличаться в зависимости от частот, используемых в методе VLF, и начальных удельных сопротивлений. В процессе исследования начальное удельное сопротивление по методу VLF составляло 15 Ом-м. На рис. 2 показано положение предсказанных удельных сопротивлений по Inv2DVLF.

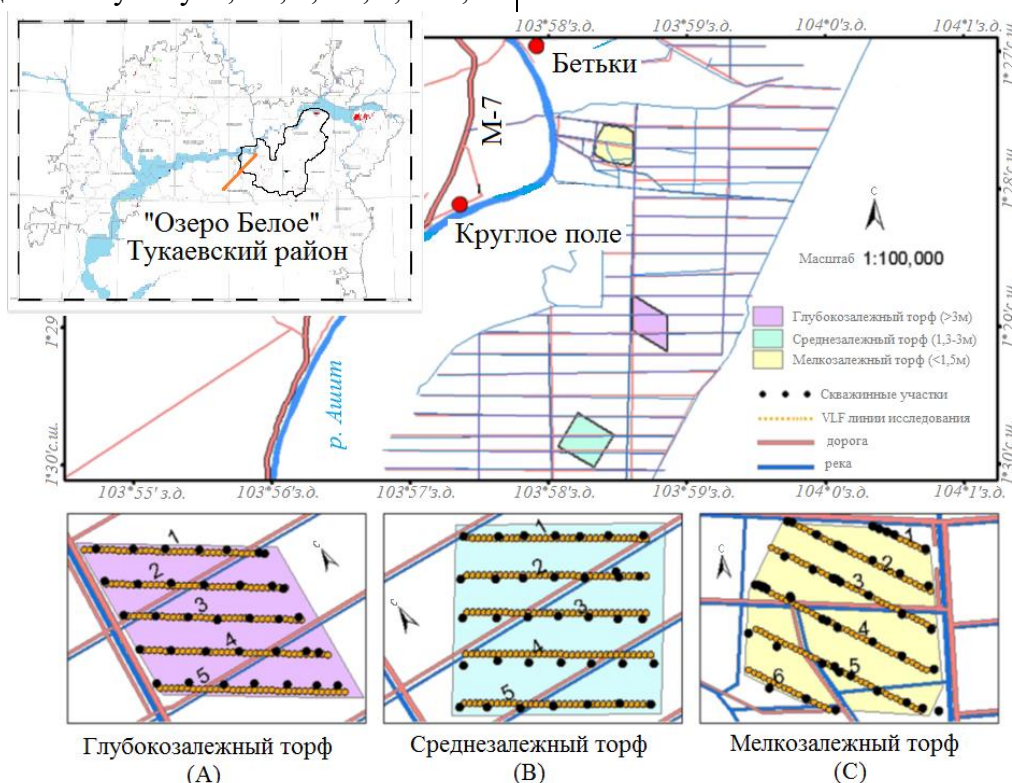


Рис. 1. Карта района исследования и места отбора проб

Прогнозируемые удельные сопротивления по каждой линии трассы геофизического исследования были интерполированы по вертикали с использованием геостатистического программного обеспечения для создания 2D вертикальных плоскостей. Результат интерполяции в виде удельного сопротивления представлен на рис. 3, а толщина торфа отображается линией на каждом графике. Имеющиеся на линии пики (зеленый цвет) показывают количество и толщину горизонтов погребенной древесины. Торфяная залежь в естественном состоянии представляет собой пористую, насыщенную влагой, разную по плотности с различными включениями (пни, камни, линзы воды, песка, глин и т.д.)

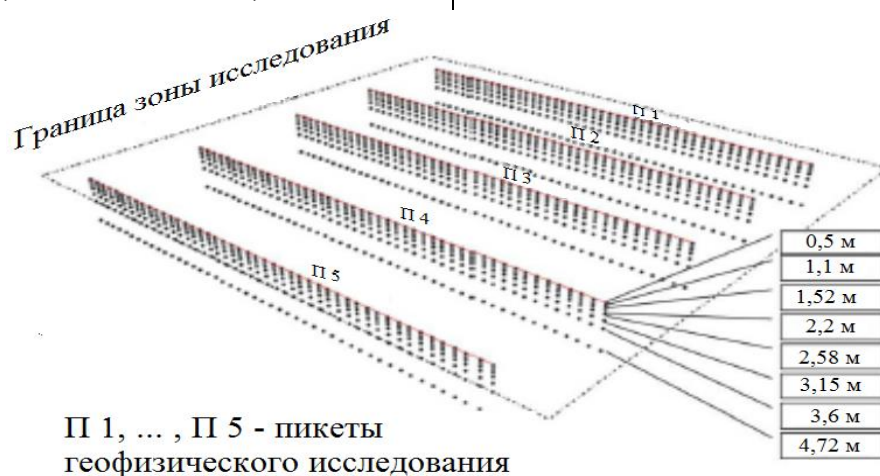
осадочную породу, в которой наблюдается весьма большая изменчивость электропроводности [3]. Соответственно, электропроводность торфа, различных включений и подстилающего грунта будет отличаться [11–14]. Так, например, древесина в сухом состоянии обладает высоким электрическим сопротивлением и является диэлектриком, а находясь в торфяной залежи, древесина пропитывается водой и теряет свои диэлектрические свойства. Кроме того, сопротивление разных пород дерева также различно. Так, например, сопротивление сосны при влажности 20% составляет  $3 \cdot 10^8$  Ом/см, а березы –  $4,2 \cdot 10^{10}$  Ом/см, при влажности 100% сосна –  $1,8 \cdot 10^5$  Ом/см, а береза –  $2 \cdot 10^7$  Ом/см.



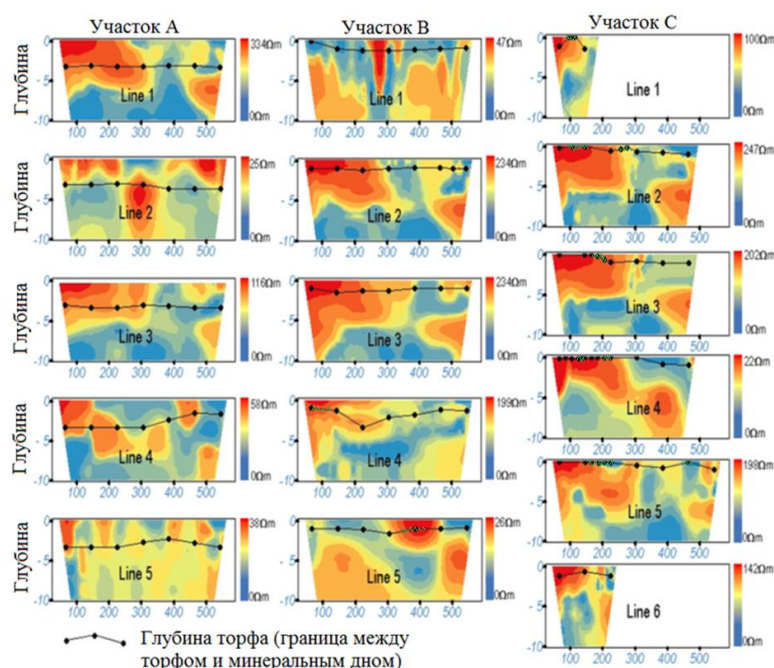
Чем больше влажность залежи (80–90 %), тем ниже сопротивление и выше электропроводимость [11]. Таким образом, удельная электропроводимость торфа имеет сильную корреляцию с его свойствами (влажность, степень разложения, пнистость, ботанический и агрохимический состав, зольность и т.д.). Ввиду выше-сказанного возникает резонный вопрос: «Как различить электропроводимость торфа, погребенной древесины и подстилающего минерального дна?» [15–17]. При исследовании торфяной залежи методом VLF при интерпретации полученных сопротивлений на графиках, представленных на рис. 3, появляются пики, по высоте

которых можно определить мощность горизонтов погребенной древесины. Визуально достаточно трудно распознать корреляцию между толщиной торфа и удельным сопротивлением по методу VLF (рис. 3).

В основном большинство графиков указывают на то, что удельное сопротивление уменьшается с ростом глубины торфяной залежи. Однако это не соотносится с толщиной торфа. При этом ни один из графиков не показывает прямой корреляции между мощностью торфяных слоев и удельным сопротивлением.



**Рис. 2.** Расположение мест измерения удельных сопротивлений вдоль поперечников, генерируемых программным обеспечением Inv2DVLF (каждая точка измерения методом VLF дает 8 точек расчетного удельного сопротивления торфяного массива (эти глубины несущественно различаются в зависимости от частоты используемой в VLF и начального удельного сопротивления, определенного перед обработкой))



**Рис. 3.** Вертикальные плоскости удельного сопротивления по участкам торфяной залежи



Изменения удельного сопротивления очень различны по всем трем участкам торфяной залежи. На участке А высокое удельное сопротивление (красный цвет) больше сконцентрировано в верхнем слое, а в других слоях оно слабее. Кроме того, на большинстве графиков показано высокое удельное сопротивление в начале линий. На линиях с 1-й по 5-ю участка С зеленым цветом выделены пики в областях скачков высокого сопротивления, что позволяет утверждать наличие «островков» погребенной древесины средней мощностью 0,5 м. На 4-й и 5-й линиях участка В также имеются пиковые значения удельного сопротивления, которые показывают, что слой погребенной древесины незначительный (по сравнению с участком С). Здесь следует отметить, что лесом покрыто 19% территории Татарстана, а на торфяных месторождениях участки древесной растительности встречаются «островками». Ввиду этого торфяные месторождения Татарстана обладают низкой пнистостью. Высокая пнистость встречается на мелкозалежных месторождениях или «островками» в поверхностных горизонтах торфяной залежи, как, например, на исследуемом месторождении «Озеро Белое». Торф на месторождении «Озеро Белое» имеет озерное происхождение, и самая большая глубина определена прямым методом по скважине в центре месторождения – 5м. Участок А с глубиной до 4,72 м расположен в границах реликтового озера, поэтому горизонты погребенной

древесины там отсутствуют. Объяснение данных по удельному сопротивлению и толщине торфа, а также статистическое описание и оценка представлены в табл. 1. Для статистического анализа использовались метод ANOVA и тест HSD Тьюки [18–20] (критерий подлинной значимости), который отслеживает частоту ложноположительных результатов с поправкой на эффект множественных сравнений. Это означает, что если производится проверка на уровне 0,05, то при выполнении всех парных сравнений вероятность получения одного или нескольких ложноположительных результатов составляет 0,05.

В целом среднее удельное сопротивление имеет тенденцию уменьшаться по мере роста толщины слоя торфа. Это показывают данные в табл. 1. Линейный график на рис. 4, а показывает тенденцию снижения удельного сопротивления с глубиной, представляющей три участка и среднее из общих данных. Полные строки показывают похожую тенденцию снижения, которую можно интерпретировать по уравнению:

участок А:

$$y = -4,849 \ln x + 35,709, R^2 = 0,8421; \quad (1)$$

участок В:

$$y = -6,305 \ln x + 40,915, R^2 = 0,9453; \quad (2)$$

участок С:

$$y = -7,255 \ln x + 43,428, R^2 = 0,9318; \quad (3)$$

среднее значение:

$$y = -6,136 \ln x + 40,017, R^2 = 0,919, \quad (4)$$

где  $y$  – удельное сопротивление;  $x$  – толщина торфяного горизонта, м.

Таблица 1

Прогнозируемое удельное сопротивление по исследуемым участкам торфяного месторождения «Озеро Белое»

| Глубина | Участок А  |                        | Участок В  |                        | Участок С  |                        |
|---------|------------|------------------------|------------|------------------------|------------|------------------------|
|         | Значимость | Стандартное отклонение | Значимость | Стандартное отклонение | Значимость | Стандартное отклонение |
| 0,5     | 33,72      | 50,92                  | 39,94      | 49,56                  | 41,98      | 48,98                  |
| 1,1     | 33,97      | 44,41                  | 37,49      | 43,56                  | 40,26      | 41,88                  |
| 1,52    | 30,75      | 33,95                  | 32,82      | 33,44                  | 35,28      | 32,57                  |
| 2,2     | 26,01      | 22,11                  | 28,60      | 23,10                  | 28,01      | 22,24                  |
| 2,58    | 25,06      | 23,96                  | 25,48      | 21,24                  | 24,97      | 18,22                  |
| 3,15    | 21,57      | 18,42                  | 22,93      | 22,75                  | 21,92      | 16,27                  |
| 3,6     | 14,81      | 9,85                   | 16,90      | 11,16                  | 16,61      | 9,09                   |
| 4,72    | 18,58      | 6,57                   | 17,58      | 6,81                   | 16,89      | 5,43                   |

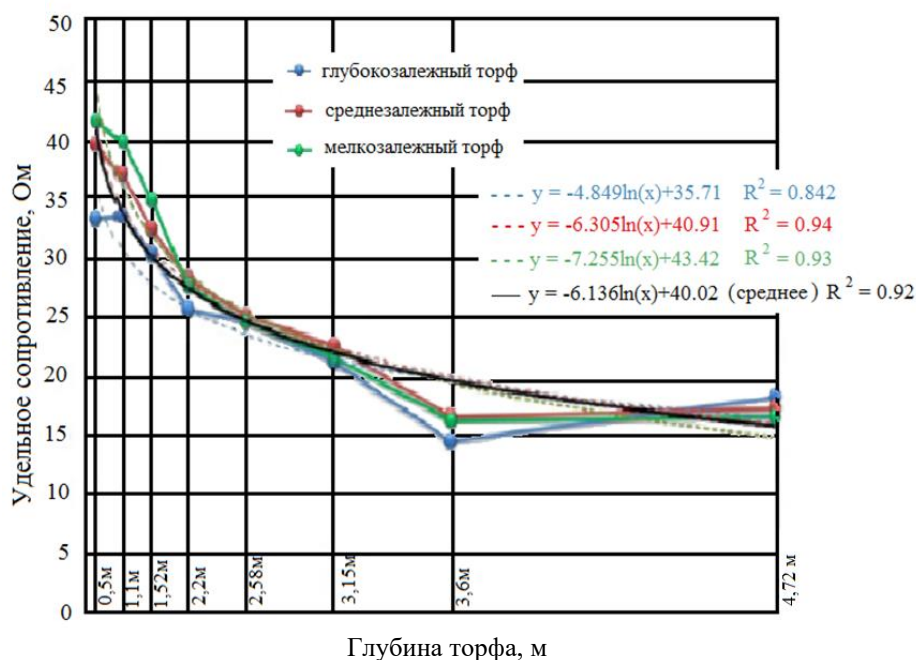


Рис. 4. Глубина торфа и удельное сопротивление торфа

График показывает, что чем глубже от поверхности, тем ниже удельное сопротивление. Это означает, что удельное сопротивление глубокого горизонта торфа ниже, чем у мелкого горизонта. Объясняется это плотностью материала, потому что глубокий горизонт торфа в основном состоит из плотного с высокой степенью разложения торфа и подстилающего грунта. Чем больше плотность торфа, тем легче проходит электрический ток.

Таким образом, чем выше проводимость, тем ниже удельное сопротивление. Изменчивость толщины торфа на трех участках торфяной залежи (А, В, С) представлена на рис. 4, б.

Сравнив среднее значение удельного сопротивления между глубинами торфа (табл. 2) по статистическому методу ANOVA, получили статистически значимую разницу в удельном сопротивлении.

Таблица 2

ANOVA среднего сравнения по удельному сопротивлению по участкам торфа

| Сравнение                           | Сумма квадратов | df    | Среднеквадратическое отклонение | F    |
|-------------------------------------|-----------------|-------|---------------------------------|------|
| Между границами торфяных участков   | 8387,9          | 2     | 4193,9                          | 4,53 |
| В пределах границ торфяных участков | 5854862,5       | 6,323 | 926,8                           |      |
| Общее                               | 5863250,4       | 6,324 |                                 |      |

Таблица 3

HSD Тьюки среднего сравнения по удельному сопротивлению по участкам торфа

| Сравнение между участками торфа |   | Средняя разница | Стандартная ошибка | 95%-ная вероятность |                 |
|---------------------------------|---|-----------------|--------------------|---------------------|-----------------|
|                                 |   |                 |                    | нижняя граница      | верхняя граница |
| А                               | В | -2,16           | 0,97               | -4,44               | 0,12            |
|                                 | С | -2,68*          | 0,93               | -4,85               | -0,51           |
| В                               | А | 2,16            | 0,97               | -0,12               | 4,44            |
|                                 | С | -0,52           | 0,93               | -2,7                | 1,65            |
| С                               | А | 2,68*           | 0,93               | 0,51                | 4,85            |
|                                 | В | 0,52            | 0,93               | -1,65               | 2,7             |

Примечание: каждое значение, сопровождаемое звездочкой, указывает на значительную разницу в разбросе глубины торфа и тенденции отличия удельного сопротивления с глубиной.

Таблица 4

ANOVA среднего сравнения по удельному сопротивлению по глубине на каждом участке торфа

| Участок торфа | Сравнение               | Сумма квадратов | df    | Среднеквадратическое отклонение | F    |
|---------------|-------------------------|-----------------|-------|---------------------------------|------|
| А             | Между глубинами торфа   | 84481,2         | 7     | 12068,7                         | 13,3 |
|               | В пределах глубин торфа | 1771570,5       | 1,952 | 907,6                           |      |
|               | Общее                   | 1856051,7       | 1,959 |                                 |      |
| В             | Между глубинами торфа   | 127238,2        | 7     | 18176,9                         | 20,3 |
|               | В пределах глубин торфа | 1743355,2       | 1,952 | 893,1                           |      |
|               | Общее                   | 1870593,4       | 1,959 |                                 |      |
| С             | Между глубинами торфа   | 160056,2        | 7     | 22865,2                         | 23,7 |
|               | В пределах глубин торфа | 1880673,3       | 1,952 | 963,5                           |      |
|               | Общее                   | 2040729,5       | 1,959 |                                 |      |

Таблица 5

Среднее удельное сопротивление по глубине и результат HSD Тьюки для каждого участка торфа

| Глубина, м | Участок А | Участок В | Участок С |
|------------|-----------|-----------|-----------|
| 0,5        | 33,7      | 39,9      | 41,9      |
| 1,1        | 33,9      | 37,5      | 40,3      |
| 1,52       | 30,7      | 32,8      | 35,3      |
| 2,2        | 26,0      | 28,6      | 28,0      |
| 2,58       | 25,1      | 25,5      | 24,9      |
| 3,15       | 21,6      | 22,9      | 21,9      |
| 3,6        | 14,8      | 16,9      | 16,6      |
| 4,72       | 18,6      | 1,6       | 16,8      |

Тест HSD (табл. 3) проводили между участком А (глубокозалежный торф) и участком С (мелкозалежный торф). Однако не отмечается разница между участком А (глубокозалежный торф) и участком В (среднезалежный торф), а также между участком С (мелкозалежный торф) и участком В (среднезалежный торф). Сравнение трех линий показывает, что линия, представляющая глубокозалежный участок (синяя линия) является самой низкой среди других, затем следуют линии среднезалежного участка и линии мелкозалежного участка соответственно. Эта разница объясняется тесной связью с наличием воды в торфе и кислотностью. Толщина торфа сопоставима с его влажностью и кислотностью. Торфяной участок А обводнен больше, чем торфяной участок С. Кроме того, торф на участке А обладает большей кислотностью, и чем больше

содержание воды в торфе, тем меньше удельное сопротивление.

Важнейшим результатом являются данные сравнения между глубинами торфа [21]. Когда удельное сопротивление сравнивается между глубинами торфа (табл. 4), также наблюдается статистическая значимость. Разница в удельном сопротивлении между глубинами торфа ( $p < 0,05$ ) по всем участкам определена с использованием теста Тьюки, результат которого представлен в табл. 5. Результат теста подробно показывает, насколько сильно удельное сопротивление начинает различаться. То есть удельное сопротивление верхнего слоя торфа начинает уменьшаться со значительной разницей по глубине (граница между торфом и подстилающим минеральным грунтом). Таблица показывает, что на участке А удельное сопротивление

на глубинах 0,5 м, 1,1 м, 1,52 м, статистически не различается, но оно значительно отличается от глубин свыше 4 м. На участке В удельное сопротивление статистически одинаково на глубинах 0,5 м, 1,52 м и 2,58 м и начинает значительно отличаться, когда глубина свыше 3 м. Разница, как показано в статистическом результате теста, тесно связана с характеристиками торфяных участков.

Участок А (глубокозалежный торф) имеет толщину торфа от 3 до 4,72 м – это граница между торфом и минеральным дном. В свою очередь, глубина торфа на участке В (среднезалежный торф) колеблется между 1,5–3 м, поэтому среднее удельное сопротивление имеет тенденцию уменьшаться и существенно различается на уровне 2,8 м. На участке С (мелкозалежный торф) уменьшение удельного сопротивления также происходит на глубине торфяной границы с минеральным дном.

Эти факты указывают на то, что удельное сопротивление измеренное методом VLF, соответствует диапазону торфяных глубин, а значит оно коррелирует с глубиной торфа. Высота удельного сопротивления в верхнем слое (близ-

кой к поверхности) по сравнению с глубиной, лежащей дальше от поверхности, очевидна. Обилие содержащейся в торфе органики и наличие воды делают торф более пористым и легким по плотности, чем минеральный грунт. Следовательно, торф имеет тенденцию к снижению проводимости.

### Заключение

Метод VLF применим в геофизическом исследовании торфяных месторождений и показывает изменчивость сопротивления торфа по глубинам. Однако более информативно, с точки зрения авторов, было бы использование в качестве дополнения к VLF метода георадиолокации [22, 23]. Удельное сопротивление на основе метода VLF имеет тенденцию уменьшаться по мере роста глубины торфяной залежи. Среднее удельное сопротивление более глубоких горизонтов торфяной залежи значительно ниже, чем поверхностных горизонтов залежи. Вертикальное удельное сопротивление торфа в области глубокозалежного торфа (свыше 3 м) и среднезалежного торфа (1,5–3 м) остается статистически неизменным до глубины, на которой торф превращается в подстилающий минеральный грунт (дно).

### Библиографический список

1. Mikhailov A., Zhigulskaya A., Yakonovskaya T. Strip mining of peat deposit. In: *Proceeding of the 26th International Symposium*. Ed. by Behzad Ghodrati, Uday Kumar, Håkan Schunnesson. 2017. P. 497-501.
2. Яконовская Т. Б., Жигульская А. И., Яконовский П. А., Оганесян А. С. Новый геофизический привод для скважинных приборов. *Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Тр. XVIII междунар. науч.-техн. конф. «Чтения памяти В. Р. Кубачека»*. Екатеринбург; 2020. С. 213-215.
3. Яконовский П. А., Яконовская Т. Б., Жигульская А. И., Оганесян С. А. и др. *Привод скважинных приборов*. Патент на полезную модель RU 146847 U1, 20.10.2014. Заявка № 2014121877/03 от 29.05.2014.
4. Boothroyd Richard J., Warburton Jeff. Spatial organisation and physical characteristics of large peat blocks in an upland fluvial peatland ecosystem. *Geomorphology*. 2020;370:107-397. DOI: [10.1016/j.geomorph.2020.107397](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107397)
5. Bin Haji Suhip M. A. A., Gödeke S. H., Cobb A. R., Sukri R. S. Seismic refraction study, single well test and physical core analysis of anthropogenic degraded Peat at the Badas Peat Dome, Brunei Darussalam. *Engineering Geology*. 2020;243:452-472. DOI: [10.1016/j.enggeo.2020.105689](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105689)
6. Boaga J., Viezzoli A., Cassiani G., Deidda G. P., Silvestri S. Resolving the thickness of peat deposits with contact-less electromagnetic methods: A case study in the Venice coastland. *Science of The Total Environment*. 2020;747:139-361. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.139361](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139361)
7. Özcan N. T., Ulusay R., Işık N. S. Geo-engineering characterization and an approach to estimate the in-situ long-term settlement of a peat deposit at an industrial district. *Engineering Geology*. 2020;246. DOI: [10.1016/j.enggeo.2019.105329](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105329)
8. Comas X., Comas L., Slater A. Reeve. Geophysical evidence for peat basin morphology and stratigraphic controls on vegetation observed in a Northern Peatland. *Journal of Hydrology*. 2004;295:173-184. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2004.03.008](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.03.008)



9. Walter J., Hamann G., Lück E., Klingenfuss C., Zeitz J. Stratigraphy and soil properties of fens: Geophysical case studies from northeastern Germany. *CATENA*. 2016;142:112-125. DOI: [10.1016/j.catena.2016.02.028](https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.02.028).
10. Ponziani M., Slob E. C., Ngan-Tillard D. J. M. Experimental validation of a model relating water content to the electrical conductivity of peat. *Engineering Geology*. 2012;129-130:48-55. DOI: [10.1016/j.enggeo.2012.01.011](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.01.011)
11. Электрические свойства древесины. Электропроводность древесины. Режим доступа: <http://www.drevesinas.ru/woodstructura/electrical/1.html> [Дата обращения 25.07.2020 г.]
12. Руководство по электроконтактному динамическому зондированию грунтов. М.; 1983. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294815/4294815088> [Дата обращения 25.07.2020 г.]
13. McLachlan P. J., Chambers J. E., Uhlemann S. S., Binley A. Geophysical characterisation of the ground-water-surface water interface. *Advances in Water Resources*. 2017;109:302-319. DOI: [10.1016/j.advwatres.2017.09.016](https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.09.016)
14. Altdorff D., Bechtold M., Van der Kruk J., Vereecken H., Huisman J.A. Mapping peat layer properties with multi-coil offset electromagnetic induction and laser scanning elevation data. *Geoderma*. 2016;261:178-189. DOI: [10.1016/j.geoderma.2015.07.015](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.015)
15. Jiang Z., Schrank C., Mariethoz G., Cox M. Permeability estimation conditioned to geophysical downhole log data in sandstones of the northern Galilee Basin, Queensland: Methods and application. *Journal of Applied Geophysics*. 2013;93:43-51. Режим доступа: [10.1016/j.jappgeo.2013.03.008](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.03.008)
16. Ekwue E. I., Bartholomew J. Electrical conductivity of some soils in Trinidad as affected by density, water and peat content. *Biosystems Engineering*. 2011;108:95-103. DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2010.11.002](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.11.002)
17. Zajícová K., Chuman T. Application of ground penetrating radar methods in soil studies: A review. *Geoderma*. 2019;343:116-129. DOI: [10.1016/j.geoderma.2019.02.024](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.024)
18. Remke L. Van Dam. Landform characterization using geophysics – Recent advances, applications, and emerging tools. *Geomorphology*. 2012;137(1):57-73. DOI: [10.1016/j.geomorph.2010.09.005](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.09.005)
19. Poggio L., Gimona A., Aalders I., Morrice J., Hough R. Legacy data for 3D modelling of peat properties with uncertainty estimation in Dava bog – Scotland. *Geoderma Regional*. 2020;22. DOI: [10.1016/j.geodrs.2020.e00288](https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00288)
20. Prinds C., Petersen R.J., Greve M.H., Iversen B.V. Three-dimensional voxel geological model of a riparian lowland and surrounding catchment using a multi-geophysical approach. *Journal of Applied Geophysics*. 2020;174:54-65. DOI: [10.1016/j.jappgeo.2020.103965](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.103965)
21. Kearney A., McKinley J., Graham C., Robinson M., Ruffell A. Spatial statistics to estimate peat thickness using airborne radiometric data. *Spatial Statistics*. 2013;5:3-24. DOI: [10.1016/j.spasta.2013.05.003](https://doi.org/10.1016/j.spasta.2013.05.003)
22. Зимин Ю. В. Радиолокационный метод исследований отложений торфа и сапропеля: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: Изд-во Моск. ун-та; 1987. 18 с.
23. Бричева С. С., Матасов В. М., Шилов П. М. Георадар в геоэкологических исследованиях при искусственном обводнении торфяников. *Геоэкология. Инженерная геология. Гидроэкология. Геокриология*. 2017;(2):84-92.

## References

1. Mikhailov A., Zhigulskaya A., Yakonovskaya T. Strip mining of peat deposit. In: *Proceeding of the 26th International Symposium*. Ed. by Behzad Ghodrati, Uday Kumar, Håkan Schunnesson. 2017. P. 497-501.
2. Yakonovskaya T. B., Zhigulskaya A. I., Yakonovsky P. A., Oganessian A. S. New geophysical drive for downhole tools. In: *Technological equipment for the mining and oil and gas industry. Proceedings of the XVIII International Scientific and Technical Conference "Readings in Memory of V.R. Kubachek"*. Yekaterinburg; 2020. P. 213-215. (In Russ.)
3. Yakonovskiy P. A., Yakonovskaya T. B., Zhigulskaya A. I., Oganessian S. A., et al. *Downhole tool drive*. Utility model Patent RU 146847 U1, 20.10.2014. Application No. 2014121877/03 dated 29.05.2014. (In Russ.)
4. Boothroyd Richard J., Warburton Jeff. Spatial organisation and physical characteristics of large peat blocks in an upland fluvial peatland ecosystem. *Geomorphology*. 2020;370:107-397. DOI: [10.1016/j.geomorph.2020.107397](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107397)
5. Bin Haji Suhip M. A. A., Gödeke S. H., Cobb A. R., Sukri R. S. Seismic refraction study, single well test and physical core analysis of anthropogenic degraded Peat at the Badas Peat Dome, Brunei Darussalam. *Engineering Geology*. 2020;243:452-472. DOI: [10.1016/j.enggeo.2020.105689](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105689)
6. Boaga J., Viezzoli A., Cassiani G., Deidda G. P., Silvestri S. Resolving the thickness of peat deposits with contact-less electromagnetic methods: A case study in the Venice coastland. *Science of The Total Environment*. 2020;747:139-361. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.139361](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139361)

7. Özcan N. T., Ulusay R., Işık N. S. Geo-engineering characterization and an approach to estimate the in-situ long-term settlement of a peat deposit at an industrial district. *Engineering Geology*. 2020;246. DOI: [10.1016/j.enggeo.2019.105329](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105329)
8. Comas X., Comas L., Slater A. Reeve. Geophysical evidence for peat basin morphology and stratigraphic controls on vegetation observed in a Northern Peatland. *Journal of Hydrology*. 2004;295:173-184. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2004.03.008](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.03.008)
9. Walter J., Hamann G., Lück E., Klingenfuss C., Zeitz J. Stratigraphy and soil properties of fens: Geophysical case studies from northeastern Germany. *CATENA*. 2016;142:112-125. DOI: [10.1016/j.catena.2016.02.028](https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.02.028)
10. Ponziani M., Slob E. C., Ngan-Tillard D. J. M. Experimental validation of a model relating water content to the electrical conductivity of peat. *Engineering Geology*. 2012;129-130:48-55. DOI: [10.1016/j.enggeo.2012.01.011](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.01.011)
11. *Electrical properties of wood. Electrical conductivity of wood*. Available from: <http://www.drevesi-nas.ru/woodstructura/electrical/1.html> [Accessed July 25, 2020]. (In Russ.)
12. *Guidance on electrocontact dynamic sounding of soils*. Moscow; 1983. Available from: <https://files.stroy-inf.ru/Data2/1/4294815/4294815088> [Accessed July 25, 2020]. (In Russ.)
13. McLachlan P. J., Chambers J. E., Uhlemann S. S., Binley A. Geophysical characterisation of the ground-water-surface water interface. *Advances in Water Resources*. 2017;109:302-319. DOI: [10.1016/j.advwatres.2017.09.016](https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.09.016)
14. Altdorff D., Bechtold M., Van der Kruk J., Vereecken H., Huisman J.A. Mapping peat layer properties with multi-coil offset electromagnetic induction and laser scanning elevation data. *Geoderma*. 2016;261:178-189. DOI: [10.1016/j.geoderma.2015.07.015](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.015)
15. Jiang Z., Schrank C., Mariethoz G., Cox M. Permeability estimation conditioned to geophysical downhole log data in sandstones of the northern Galilee Basin, Queensland: Methods and application. *Journal of Applied Geophysics*. 2013;93:43-51. Режим доступа: [10.1016/j.jappgeo.2013.03.008](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.03.008)
16. Ekwue E. I., Bartholomew J. Electrical conductivity of some soils in Trinidad as affected by density, water and peat content. *Biosystems Engineering*. 2011;108:95-103. DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2010.11.002](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.11.002)
17. Zajíčová K., Chuman T. Application of ground penetrating radar methods in soil studies: A review. *Geoderma*. 2019;343:116-129. DOI: [10.1016/j.geoderma.2019.02.024](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.024)
18. Remke L., Van Dam. Landform characterization using geophysics – Recent advances, applications, and emerging tools. *Geomorphology*. 2012;137(1):57-73. DOI: [10.1016/j.geomorph.2010.09.005](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.09.005)
19. Poggio L., Gimona A., Aalders I., Morrice J., Hough R. Legacy data for 3D modelling of peat properties with uncertainty estimation in Dava bog – Scotland. *Geoderma Regional*. 2020;22. DOI: [10.1016/j.geodrs.2020.e00288](https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00288)
20. Prinds C., Petersen R.J., Greve M.H., Iversen B.V. Three-dimensional voxel geological model of a riparian lowland and surrounding catchment using a multi-geophysical approach. *Journal of Applied Geophysics*. 2020;174:54-65. DOI: [10.1016/j.jappgeo.2020.103965](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.103965)
21. Keaney A., McKinley J., Graham C., Robinson M., Ruffell A. Spatial statistics to estimate peat thickness using airborne radiometric data. *Spatial Statistics*. 2013;5:3-24. DOI: [10.1016/j.spasta.2013.05.003](https://doi.org/10.1016/j.spasta.2013.05.003)
22. Zimin Yu. V. *Radar method for studying peat and sapropel deposits*. Abstract of Ph. D. Thesis in Geol.-Min. Science. MSU Publishing House;1987, 18 p. (In Russ.)
23. Bricheva S. S., Matasov V. M., Shilov P. M. Georadar in geoecological studies when artificial watering of peatlands. *Geoecology. Engineering Geology. Hydroecology. Geocryology*. 2017;(2):84-92. (In Russ.)

## ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

DOI: 10.17073/2500-0632-2020-3-235-252

**Формирование устойчивости бортов  
при ведении взрывных работ на карьерах Кызылкумского региона****Ш. Ш. Заиров<sup>1</sup> , Ш. Р. Уринов<sup>1</sup>, Р. У. Номдоров<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Навоийский государственный горный институт, г. Навои, Республика Узбекистан, ✉ [sher-z@mail.ru](mailto:sher-z@mail.ru)<sup>2</sup>Каршинский инженерно-экономический институт, г. Карши, Республика Узбекистан

**Аннотация:** Вовлечение в разработку глубокозалегающих месторождений предопределило тенденцию развития открытого способа добычи в направлении увеличения глубины карьеров. Основным ограничением, налагаемым на ведение буровзрывных работ (БВР) в приконтурной зоне карьера, является необходимость предохранения бортов карьера и инженерных сооружений на бортах от сейсмического воздействия массовых взрывов. Как показывает практика, наиболее эффективным и опробованным методом защиты бортов карьера является применение контурного взрывания, создание экранирующей щели и экранирующего слоя взорванной горной массы, т.е. проведение заоткоски бортов карьера, предшествующей массовому взрыву. Поэтому исследования напряженно-деформированного состояния пород приконтурного массива, определение параметров взрывных скважин при предварительном щелеобразовании на карьерах является актуальной задачей. Проведенный анализ конструкции бортов и напряженно-деформированного состояния пород месторождения Кокпатас Навоийского горно-металлургического комбината позволил определить модель, а также метод расчета напряженно-деформированного состояния массива горных пород. При оценке устойчивости бортов карьера использован подход, известный как метод перемещений. Использование метода граничных интегральных уравнений позволило разработать алгоритм расчета напряжений в массиве для условий месторождения Кокпатас. Разработана методика проведения экспериментальных исследований взрывов контурных скважинных зарядов на моделях, позволяющая исследовать трещинообразование на объемных моделях и волновое взаимодействие методом высокоскоростной видеорегистрации процесса взрыва в прозрачных моделях, а также определить параметры волн напряжений при взрыве в образцах реальных горных пород. Разработаны и внедрены в промышленность способ формирования устойчивых откосов бортов карьера, экскаваторный способ заоткоски уступов на предельном контуре карьера и способ инициирования скважинных зарядов взрывчатых веществ в приконтурной зоне карьера.

**Ключевые слова:** взрывные работы, устойчивость бортов карьера, контур карьера, заоткоска уступов карьера, контурное взрывание, зона остаточных деформаций, методика расчета эффективных параметров, скважинные заряды, взрывчатые вещества

**Для цитирования:** Заиров Ш. Ш., Уринов Ш. Р., Номдоров Р. У. Формирование устойчивости бортов при ведении взрывных работ на карьерах Кызылкумского региона. *Горные науки и технологии*. 2020;5(3):235-252. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-3-235-252

**Ensuring Wall Stability in the Course of Blasting  
at Open Pits of Kyzyl Kum Region****Sh. Sh. Zairov<sup>1</sup> , Sh. R. Urinov<sup>1</sup>, R. U. Nomdorov<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Navoi State Mining Institute, Navoi, Republic of Uzbekistan, ✉ [sher-z@mail.ru](mailto:sher-z@mail.ru)<sup>2</sup>Karshi Engineering and Economic Institute, Karshi, Republic of Uzbekistan

**Abstract:** Involvement of deep deposits in mining predetermined the trend of development of open pit mining towards increasing the depth of open pits. The main limitation imposed on drilling and blasting in the near-contour zone of an open pit is the need to protect the pit walls and engineering structures on the walls from seismic effects of huge blasts. As practice shows, the most effective and proven method of protecting pit walls is the use of blasting by presplitting method, creation of a shielding gap and a shielding layer of blasted rock mass, i.e. pre-splitting of the pit walls, preceding the huge blast. Therefore, the study of stress-strain state of the near-contour rock mass, determination of the parameters of blastholes for edge pre-splitting (preliminary shielding gap formation) in open



pits is an urgent task. The analysis of the pit wall design and stress-strain state of rock mass at Kokpatas deposit exploited by Navoi Mining and Metallurgical Combine allowed to determine the model, as well as the method for calculating stress-strain state of the rock mass. When assessing stability of the pit walls, an approach known as the displacement method was used. Applying the boundary integral equations method allowed to develop an algorithm for calculating stresses in the rock mass for the conditions of Kokpatas deposit. A technique has been developed for experimental studies of blasting contour blasthole charges (blasting by pre-splitting method) using models, allowing to study fracturing on volumetric models and wave interaction by the method of high-speed video recording of the blasting process in transparent models, as well as to determine the parameters of stress waves during blasting in samples of real rocks. A method for formation of stable pit wall slopes, an excavator method for bench pre-splitting on ultimate envelope (contour) of a pit, and a method for initiating blasthole charges in the near-contour zone of a pit have been developed and implemented in the industry.

**Keywords:** blasting, pit wall stability, pit envelope, pit wall control, blasting by presplitting method, zone of residual deformation, method for calculating effective parameters, blasthole charges, explosives

**For citation:** Zairov Sh. Sh., Urinov Sh. R., Nomdorov R. U. Ensuring wall stability in the course of blasting at open pits of Kyzyl Kum region. *Gornyye nauki i tekhnologii = Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(3):235-252. (In Russ.) DOI: 10.17073/2500-0632-2020-3-235-252

## Введение

Вовлечение в разработку глубокозалегающих месторождений предопределило тенденцию развития открытого способа добычи в направлении увеличения глубины карьеров. Как известно, в глубоких карьерах разработка полезных ископаемых ведется в сложных горно-геологических условиях, когда необходимо надежное обеспечение устойчивости эффективных конструкций бортов и их элементов.

При ведении взрывных работ в результате нарушения законтурного массива происходит разупрочнение горных пород вследствие изменения трещиноватости, появления остаточных деформаций, снижения прочностных характеристик по контактам структурных блоков. Основным ограничением, налагаемым на ведение буровзрывных работ (БВР) в приконтурной зоне карьера, является необходимость предохранения бортов карьера и инженерных сооружений на бортах от сейсмического воздействия массовых взрывов. Как показывает практика, наиболее эффективным и опробованным методом защиты бортов карьера является применение контурного взрывания, создание экранирующей щели и экранирующего слоя взорванной горной массы, т.е. проведение заоткоски бортов карьера, предшествующей массовому взрыву.

На сегодняшний день достигнут значительный прогресс в области применения контурного взрывания при заоткоске уступов на карьерах, однако не решен ряд ключевых вопросов по прогнозной оценке и выбору рациональной технологии заоткоски уступов, а также совершенствованию параметров скважинных зарядов взрывчатых веществ (ВВ) при контурном взрывании. В то же время необходимо продолжать исследовать напряженно-деформированное состояние пород приконтурного массива, совершенствовать параметры взрывных скважин при предварительном щелеобразовании на карьерах и разработать методику экспериментальной оценки метода контурного взрывания при оформлении откосов.

Месторождения Кызылкумского региона характеризуются сложным строением рудных тел, высокой изменчивостью содержания полезных компонентов, крутыми углами падения и невыдержанной мощностью рудных тел [1–3]. Такая изменчивость существенно влияет на эффективность добычи полезных ископаемых, значительно усложняя выбор технологических параметров БВР.

В условиях Кызылкумского региона формирование бортов карьеров с углами откосов до 70° возможно только в случае, когда их параметры обусловлены только конструктивными



элементами, а не устойчивостью массива горных пород. Изменение конструктивных параметров углов откосов бортов карьеров выполняется за счет сдваивания, страивания высоты уступов с углами откосов 80–90° и шириной площадок между ними 10–15 м [4–8].

В результате проведенных исследований разработаны модель и метод расчета напряженно-деформированного состояния массива горных пород для условий месторождения Кокпатас Навоийского горно-металлургического комбината.

### Модели и алгоритмы для оценки устойчивости бортов карьеров

При оценке устойчивости бортов карьера использован подход, известный как метод перемещений. Метод эквивалентен минимизации полной потенциальной энергии борта карьера, выраженной через поле перемещений, он обусловил приведенную ниже последовательность при проведении расчетов по определению напряженно-деформированного состояния и оценке устойчивости уступов с помощью метода конечных элементов:

- разбиение сечения борта карьера на конечные элементы и назначение узлов, в которых определяются перемещения;
- определение зависимости между усилиями и перемещениями в узлах элемента;
- сопоставление системы алгебраических уравнений равновесия;
- решение системы уравнений;
- определение перемещений и компонентов напряженно-деформированного состояния борта карьера и оценка его устойчивости.

Считается, что наиболее удобным методом расчета поля напряжений для областей со сложным контуром является метод интегральных уравнений, включающий решение системы интегральных уравнений Фредгольма, к положительным качествам которого относятся:

- уменьшение размерности задачи;
- дискретизирование только границы области  $S$ , в отличие от метода конечных элементов.

Рассмотрим метод граничных интегральных уравнений и алгоритм вычисления напряжений в массиве для условий месторождения Кокпатас. В методе граничных интегральных уравнений рассматривается пространство (полупространство), в котором граница контура разбивается дискретно на конечное число участков. На рис. 1 представлена расчетная схема, а на рис. 2 – расчетная блок-схема обозначения определяемых граничных условий и объемных сил.

Интенсивность нагрузок на каждом заданном участке постоянна. Напряжения внутри области  $S$  можно представить в виде

$$\bar{\sigma}_{ij}(t) = \int_{ds} \bar{k}_{ij,l}(t, \tau) P_l dS, \\ (i, j \equiv x, y); \quad t \in S; \tau \in \partial S \quad (1)$$

где  $\bar{k}_{ij,l}(t, \tau)$  – фундаментальное решение для действия сосредоточенной силы в однородную и изотропную полуплоскость;  $P_l$  – фиктивные составляющие поверхностных сил вдоль  $\partial S$  в  $l$ -м направлении;  $t$  – внутренние точки области  $S$ ;  $\tau$  – граничные точки  $\partial S$ .

При решении задачи теории упругости условия на границе определяются так:

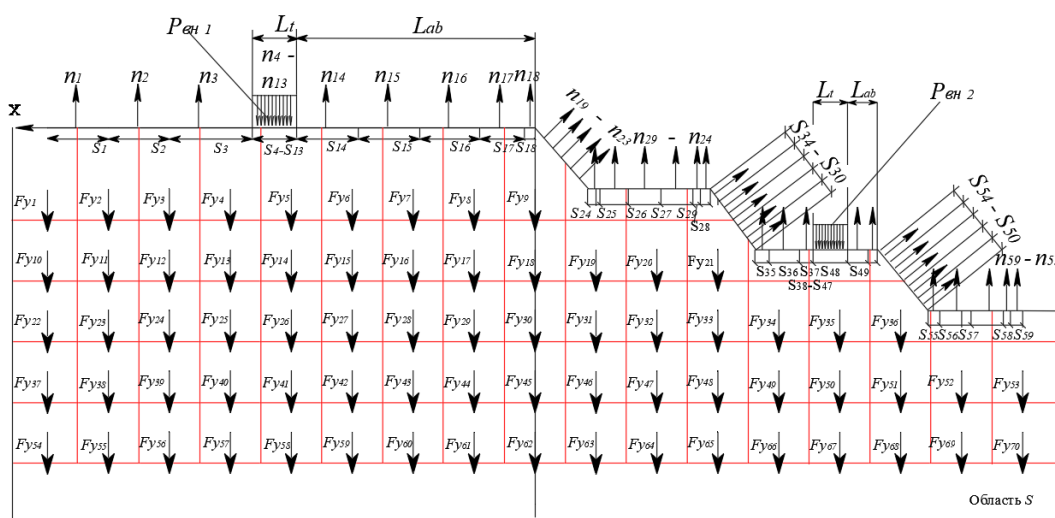
$$\int_{\partial S} \bar{k}_{ij,l}(\Omega, \tau) P_l \cdot n_j(\Omega) dS(\tau) = \sigma_i^0(\Omega); \quad \Omega, \tau \in \partial S, \quad (2)$$

где  $n_j$  – конус угла между нормалью к участку границы и осями координат;  $\sigma_i^0(\Omega)$  – заданные нагрузки на  $\partial S$ .

Напряжения в области  $S$ , вызванные действием сосредоточенных на контуре  $\partial S$  усилий в бесконечной полуплоскости, представим в виде

$$k_{xx,l} \cdot P_l^S = - \frac{p_x^S r_x (b_1 r_x^2 + b_2 r_y^2) + p_y^S r_y (b_3 r_x^2 + b_2 r_y^2)}{4\pi r^4}; \\ k_{yy,l} \cdot P_l^S = - \frac{p_x^S r_x (b_3 r_y^2 + b_2 r_x^2) + p_y^S r_y (b_1 r_y^2 + b_2 r_x^2)}{4\pi r^4}; \quad (3) \\ k_{xy,l} \cdot P_l^S = - \frac{p_x^S r_y (b_1 r_x^2 + b_2 r_y^2) + p_y^S r_x (b_2 r_x^2 + b_1 r_y^2)}{4\pi r^4},$$

где  $p_x^S, p_y^S$  – составляющие фиктивных нагрузок внутри области  $S$ ;  $r_x, r_y$ , –  $x, y$  компоненты радиуса вектора, проведенного от точки на  $\partial S$  к точке в  $S$ :



**Рис. 1. Расчетная схема конструкции бортов и вычисления напряжений в массиве горных пород карьера Кокпатас:**

$n_1, n_2, \dots, n_j$  – нормали к границе области  $\partial S$ ;  $S_1, S_2, \dots, S_i$  – длина отрезка границы  $\partial S$ ;  $P_{вн1}, P_{вн2}, \dots, P_{внi}$  – внешние нагрузки от отвалов и оборудования, приложенные на длине  $L_t$  на расстоянии  $L_{ab}$  от края уступа;  $F_{y1}, F_{y2}, \dots, F_{yi}$  – составляющие силы тяжести в  $i$ -й точке области  $S$

$$b_1 = 3 + \frac{v}{1-v}; \quad b_2 = 2 - \frac{1}{1-v}; \quad b_3 = 1 + \frac{3v}{1-v},$$

где  $v$  – коэффициент Пуассона.

При  $\tau \rightarrow \Omega$  выражение (2) имеет особенность, для выделения которой используется подход, заключающийся в рассмотрении нового контура, обходящего точку границы, где  $\tau = \Omega$ . При этом

$$\begin{aligned} & \int_{\partial S} k_{ij,l}(\Omega, \tau) P_l \cdot n_j(\Omega) dS(\tau) = \\ & = \lim_{\substack{\Delta \partial S \rightarrow 0 \\ a \rightarrow 0}} \left[ \int_{\partial S - \Delta \partial S} k_{ij,l}(\Omega, \tau) P_l \cdot n_j(\Omega) dS(\tau) + \right. \\ & \quad \left. + \left( \int_{\Delta \partial S} k_{ij,l}(\Omega, \tau) P_l \cdot n_j(\Omega) dS(\tau) \right) \right]. \quad (4) \end{aligned}$$

В работе [9] показано, что

$$\lim_{a \rightarrow 0} \int_{\Delta \partial S} k_{ij,l}(\Omega, \tau) P_l \cdot n_j(\Omega) dS(\tau) \rightarrow P_x^S / 2, P_y^S / 2. \quad (5)$$

Тогда на основании соотношения (5) уравнение (2) имеет окончательный вид

$$P_i^S / 2 + \int_{\partial S} k_{ij,l}(\Omega, \tau) P_l \cdot n_j(\Omega) dS(\tau) = \sigma_i^0(\Omega), \quad i = x, y. \quad (6)$$

Для численной реализации метода границу области  $\partial S$  разбиваем на  $N$  отрезков произвольной длины  $\partial S_i$ . Затем в средних точках каждого отрезка  $\partial S_i$  определяем результирующие граничные значения

$$\begin{aligned} P_{xi}^S &= \int_{\Delta S_i} p_x^S dS; \quad P_{yi}^S = \int_{\Delta S_i} p_y^S dS; \quad P_{xi}^{\partial S} = \int_{\Delta S_i} p_x^{\partial S} dS; \\ P_{yi}^{\partial S} &= \int_{\Delta S_i} p_y^{\partial S} dS, \quad (7) \end{aligned}$$

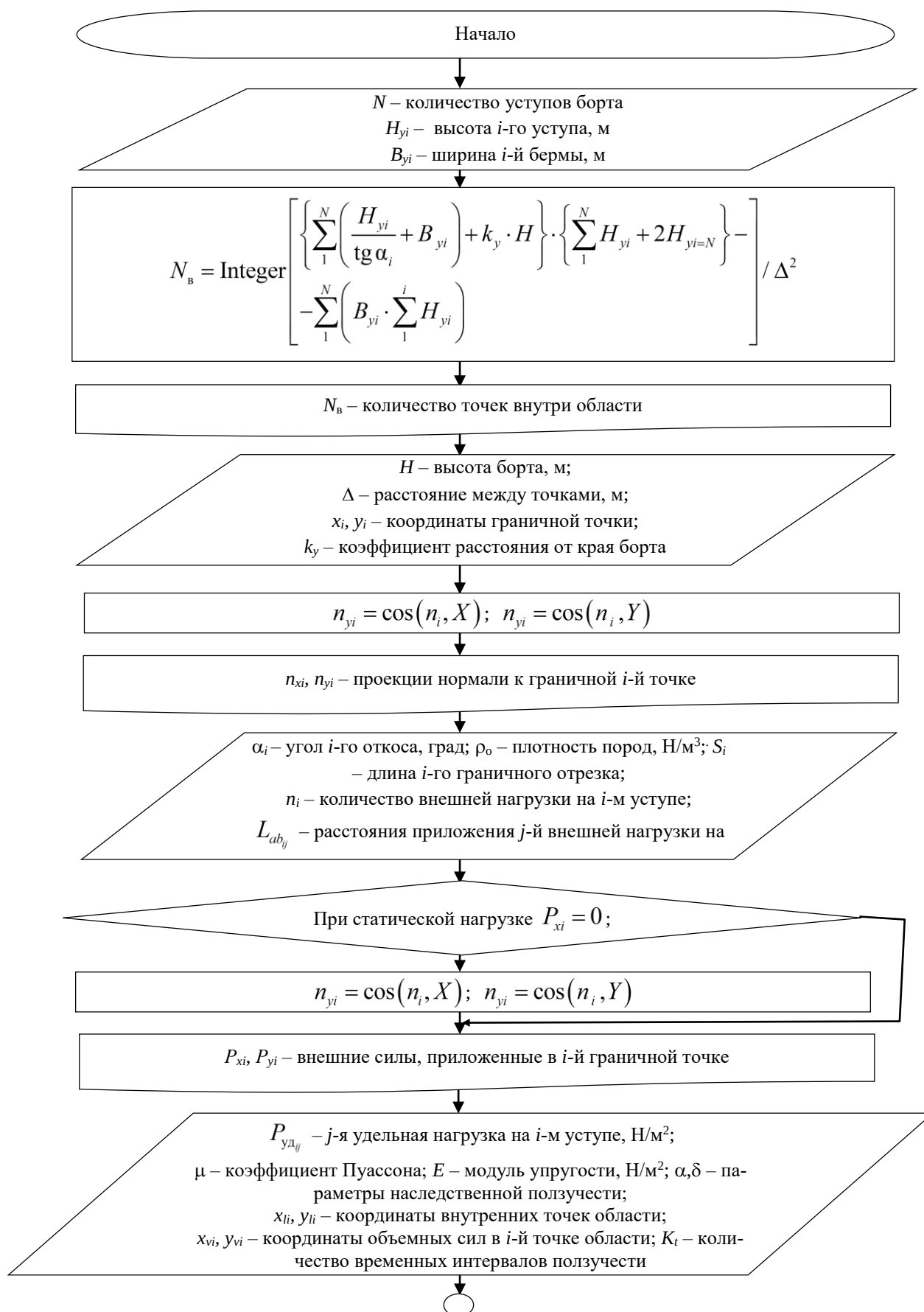
где  $\Delta S_i$  – составляющие фиктивных нагрузок на границе области  $\partial S$ .

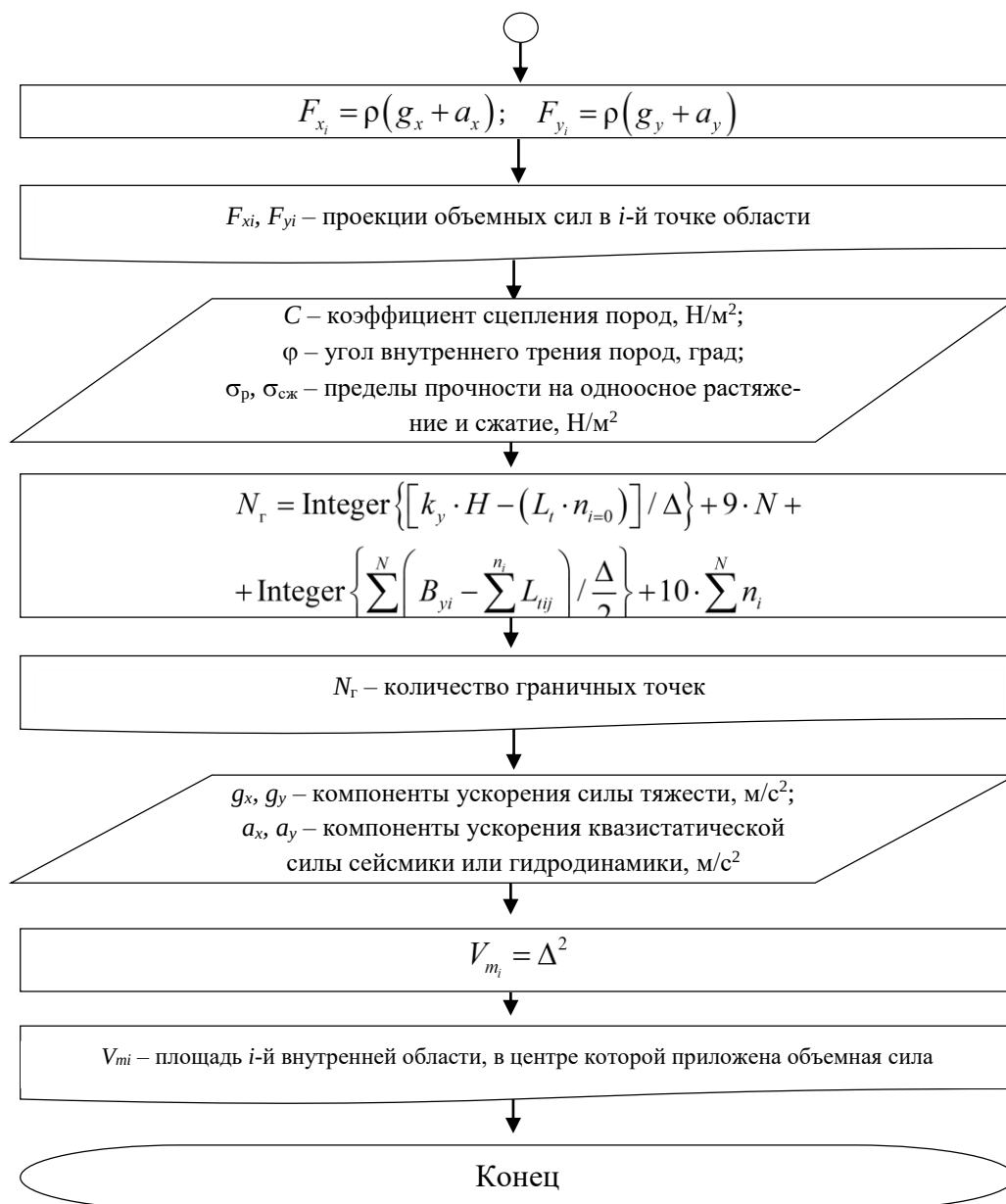
Используя численный метод трапеции вычисления интеграла и формулы (7), можно численно аппроксимировать выражения (6):

$$P_{xi}^S / 2 - 1/(4\pi) \sum_{j=1, j \neq i}^N \left[ \left( b_1 r_{xij}^3 n_{xi} + b_2 r_{xij}^2 r_{yij} n_{xi} + b_1 r_{xij}^2 r_{yij} n_{yi} + b_2 r_{xij}^3 n_{yi} \right) P_{xj}^S + \right. \\ \left. + \left( b_3 r_{xij}^2 r_{yij} n_{xi} - b_2 r_{xij}^3 n_{xi} + b_2 r_{xij}^3 n_{yi} + b_1 r_{xij}^2 r_{yij} n_{yi} \right) \cdot P_{yj}^S \right] \Delta S_i \left( r_{xij}^2 + r_{yij}^2 \right)^{-2} = P_{xi}^{\partial S}; \quad (8)$$

$$P_{yi}^S / 2 - 1/(4\pi) \sum_{j=1, j \neq i}^N \left[ \left( b_1 r_{xij}^2 r_{yij} n_{xi} + b_2 r_{xij}^3 n_{xi} + b_3 r_{xij}^2 r_{yij} n_{yi} - b_2 r_{xij}^3 n_{yi} \right) P_{xj}^S + \right. \\ \left. + \left( b_2 r_{xij}^2 n_{xi} + b_1 r_{xij}^2 r_{yij} n_{xi} + b_1 r_{xij}^3 n_{yi} + b_2 r_{xij}^2 r_{yij} n_{yi} \right) \cdot P_{yj}^S \right] \Delta S_i \left( r_{xij}^2 + r_{yij}^2 \right)^{-2} = P_{yi}^{\partial S}. \quad (9)$$

Исходные данные для расчета и формируемые граничные условия





**Рис. 2. Блок-схема расчета параметров конструкции бортов  
и вычисления напряжений в массиве горных пород карьера Кокпатаас**

После вычисления фиктивных нагрузок  $P_{xj}^S$  и  $P_{yj}^S (j = \overline{1, N})$  компоненты напряжений в области  $S$  находятся из следующих соотношений:

$$\sigma_{xi} = -1/(4\pi) \sum_{j=1}^N \left[ P_{xj}^S r_{xij} (b_1 r_{xij}^2 + b_2 r_{yij}^2) + P_{yj}^S r_{yij} (b_3 r_{xij}^2 - b_2 r_{yij}^2) \right] \cdot (r_{xij}^2 + r_{yij}^2)^{-2}; \quad (10)$$

$$\tau_{xi} = -1/(4\pi) \sum_{j=1}^N \left[ P_{xj}^S r_{yij} (b_1 r_{xij}^2 + b_2 r_{yij}^2) + P_{yj}^S r_{xij} (b_2 r_{xij}^2 + b_1 r_{yij}^2) \right] \cdot (r_{xij}^2 + r_{yij}^2)^{-2}. \quad (11)$$



Используя выражения (10) и (11), можно определить напряжения во всех точках массива, что особенно важно при исследовании областей его разупрочнения.

При исследовании напряженного состояния приборного горного массива и его деформирования данная область моделируется полуплоскостью, по границе которой действуют нагрузки, а внутри полуплоскость имеет блочную структуру.

На первом этапе граница области разбивается на участки, количество которых зависит от конфигурации границы (полноты информативности) и количества мест приложения внешней нагрузки на контуре. Участки, на которые разбита граница, могут сгущаться и иметь произвольную длину.

Для построения изолиний компонент напряжений внутренняя область разбивается координатной сеткой, относящейся к системе координат, в которой описывается граница области.

После формализации границы области и ее внутренней части при наличии внешних сил на границах области они также описываются в виде распределенной или точечной нагрузки в аналитическом виде.

Затем на основании выражений (8) и (9) граничные интегральные уравнения формируются в виде матриц

$$a_{ij} = \begin{pmatrix} a_{11} \dots a_{1n} b_{11} \dots b_{1n} \\ a_{n1} \dots a_{nn} b_{1n} \dots b_{nn} \\ c_{11} \dots c_{1n} d_{11} \dots d_{1n} \\ c_{n1} \dots c_{nn} d_{n1} \dots d_{nn} \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Правые части уравнений (8) и (9) представляют собой граничные условия на отрезках  $\partial S_i$ . В соответствии с [10] для учета гравитационного поля и возникающих внутри массива нагрузок (например, взрывное или сейсмическое воздействие) правая часть уравнений дополняется интегралами, описывающими эти воздействия. Тогда выражение (6) будет иметь вид

$$P_i^S / 2 + \int_{\partial S} k_{ij,l}(\Omega, \tau) P_l \cdot n_j(\Omega) dS(\tau) =$$

$$= \sigma_i^0(\Omega) + \int_V K_{ij}(t) \cdot P_i(t) dv, \quad i = x, y, \quad (13)$$

где  $K_{ij}(\tau, t)$  – функция Грина;  $P_i(t)$  – усилия, возникающие в  $i$ -й точке области  $S$ .

Для решения полученной системы линейных уравнений используется итерация по методу Гаусса или Зейделя [11].

После вычисления по выражениям (10)–(12) компонентов тензора напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и  $\tau_{xy}$  определяются главные напряжения по известным выражениям:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= (\sigma_x + \sigma_y) / 2 + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 / 4 + \tau_{xy}^2}; \\ \sigma_2 &= (\sigma_x + \sigma_y) / 2 - \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 / 4 + \tau_{xy}^2}; \\ \tau_{\max} &= (\sigma_1 - \sigma_2) / 2. \end{aligned} \quad (14)$$

### Обоснование технологических схем и параметров взрывных работ на карьере

Анализ данных по деформации горных пород за контуром массива при производстве массовых взрывов позволил сделать вывод о том, что при подходе к предельному контуру карьера необходимо менять технологию производства БВР [12–15]. Одним из критериев определения количества одновременно взрываваемого ВВ явилось значение меры сейсмической опасности, при котором остаточные деформации пород, слагающих уступы и борта карьера, практически были исключены.

Расчет количества одновременно взрываваемого ВВ рекомендовано вести с учетом коэффициента  $K_c$ , числовые значения которого зависят от критерия по виду смещения, месту расположения охраняемого объекта, типа пород и характера трещиноватости (табл. 1).

Количество одновременно взрываваемого ВВ при подходе взрывных работ к предельному контуру карьера рекомендуется определять по формуле

$$Q = (r_0 / K_c)^3, \quad \text{кг}, \quad (15)$$

где  $r_0$  – безопасное расстояние для контурных уступов от места взрыва до охраняемого объекта, м;  $K_c$  – усредненное значение коэффициента.

Таблица 1

Значения коэффициента  $K_c$  для различных условий

| Место расположения охраняемого объекта   | Средний размер ребра элементарного блока, м | $K_c$ |
|------------------------------------------|---------------------------------------------|-------|
| На горизонте взрываемого уступа          | До 0,1                                      | 8,7   |
|                                          | 0,1–0,3                                     | 6,2   |
|                                          | 0,3–0,6                                     | 3,76  |
|                                          | 0,6–2,0                                     | 3,02  |
|                                          | 2,0                                         | 2,8   |
| На горизонте выше взрываемого уступа     | До 0,1                                      | 8,22  |
|                                          | 0,1–0,3                                     | 5,87  |
|                                          | 0,3–0,6                                     | 3,56  |
|                                          | 0,6–2,0                                     | 2,85  |
|                                          | 2,0                                         | 2,65  |
| На два горизонта выше взрываемого уступа | До 0,1                                      | 7,89  |
|                                          | 0,1–0,3                                     | 5,61  |
|                                          | 0,3–0,6                                     | 3,42  |
|                                          | 0,6–2,0                                     | 2,74  |
|                                          | 2,0                                         | 2,54  |

Закономерности изменения зоны остаточной деформации в зависимости от количества одновременно взрываемого ВВ приведены на рис. 3.

Таким образом, данные табл. 1 позволяют установить количество одновременно взрываемого ВВ в зависимости от структуры массива и схемы отстройки нерабочих уступов в предельном контуре борта карьера.

Исходя из необходимости обеспечения минимальной зоны интенсивной деформации определены оптимальные удельный расход и количество ВВ на 1 м фронта работ. По установленному оптимальному расходу ВВ, исключаяющему законтурную деформацию массива, определена ширина приконтурной зоны  $R_{п.з.}$ , представляющая собой расстояние от верхней бровки отрабатываемого уступа до точек в сторону стационарного борта:

$$R = A \cdot (w + (n - 1)b)^{1/3}, \text{ м}, \quad (16)$$

где  $A$  – эмпирический коэффициент ( $A = 11,5\text{--}18,0$ );  $w$  – ширина отрабатываемой ленты в зависимости от линии сопротивления по подошве, м;  $n$  – количество рядов скважин, шт.;  $b$  – расстояние между рядами скважин, м.

Выражение (16) позволяет при заданном расстоянии от места взрыва до предельного контура борта карьера определить размеры взрываемого блока по фронту работ (рис. 4).

Таким образом, рекомендованы решения для снижения ширины зоны остаточных деформаций, установлены параметры оконтуривающих зарядов для создания экранирующей щели с повышенной защитной способностью и выбраны параметры взрывания в приконтурной зоне, обеспечивающие создание экранирующей щели с повышенной защитной способностью и соответствующее ограничение напряжений в падающей волне сжатия.

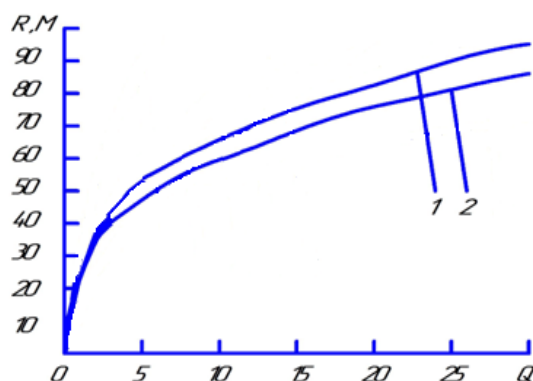
Разработана методика расчета эффективных параметров БВР при контурном взрывании с учетом физико-механических и горно-технологических свойств массива [16–18].

Диаметр заряда контурной скважины рекомендуется определять по формуле

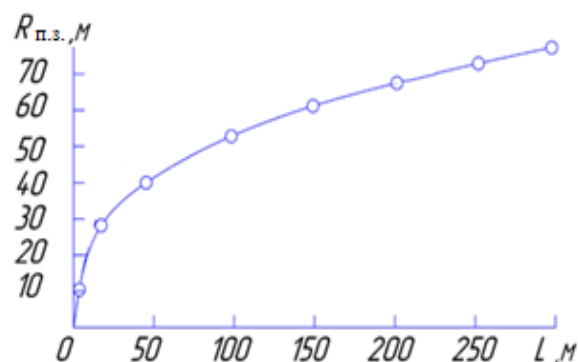
$$d_3 = 0,55 \frac{(\rho_0 c^2)^{7/12}}{(\rho_{ВВ} D^2)^{1/3} \sigma_{сж}^{1/4}} d_c, \text{ мм}, \quad (17)$$

где  $\rho_0$  – плотность породы, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – скорость продольной волны в породе, м/с;  $\rho_{ВВ}$  – плотность ВВ, кг/м<sup>3</sup>;  $D$  – скорость детонации ВВ, м/с;  $\sigma_{сж}$  – предел прочности на сжатие, Па;  $d_c$  – диаметр скважины, мм.

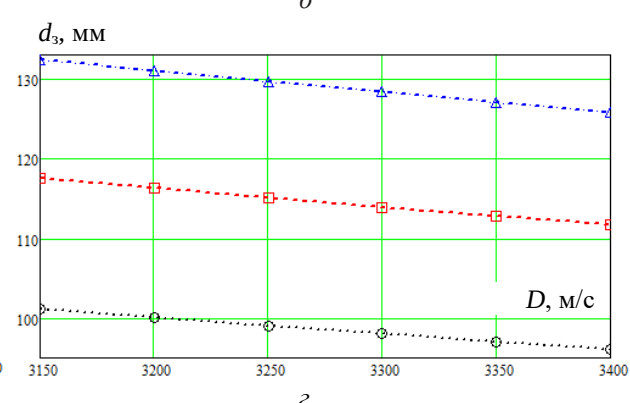
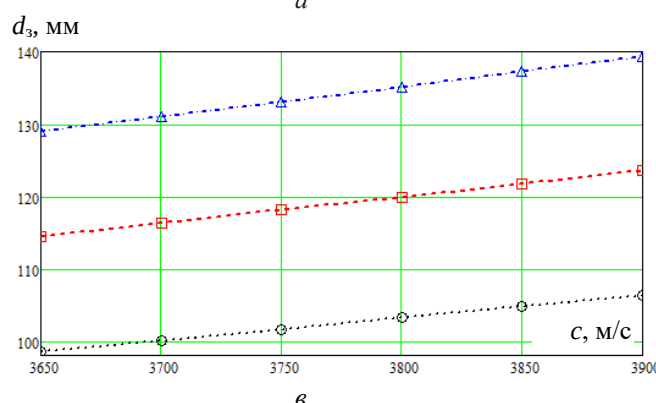
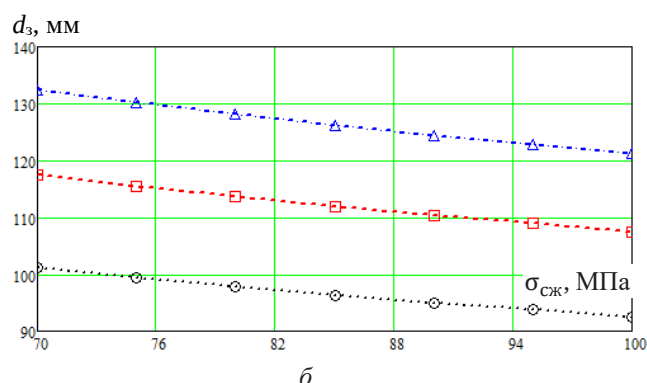
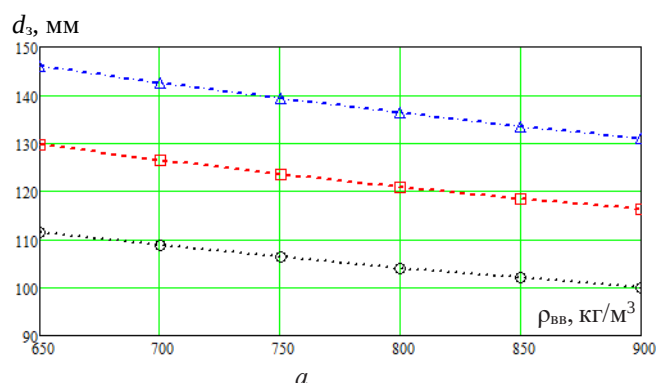
Установлено изменение диаметра контурной скважины в зависимости от плотности заряда ВВ, плотности горных пород, предела прочности горных пород на сжатие, скорости продольной волны во взрываемой горной породе и скорости детонации промышленных ВВ (рис. 5).



**Рис. 3. Зависимость изменения зоны остаточной деформации  $R$  от количества одновременно взрываваемого ВВ  $Q$ :**  
 1 – вертикальные смещения; 2 – горизонтальные смещения



**Рис. 4. Зависимость изменения ширины приконтурной зоны  $R_{п.з.}$  от длины взрываемого уступа по фронту  $L$**



**Рис. 5. Зависимости изменения диаметра контурного заряда  $d_3$  от плотности ВВ  $\rho_{ВВ}$  (а), предела прочности горных пород на сжатие  $\sigma_{сж}$  (б), скорости продольной волны  $c$  (в) и скорости детонации ВВ  $D$  (г) в различных горных породах:**

о – мягкие породы; □ – породы средней крепости; Δ – крепкие горные породы

Линейную массу заряда контурной скважины рекомендуется определять по формуле

$$\rho = 3,8 \cdot 10^{-5} \frac{(\rho_0 c^2)^{7/6}}{(\rho_{ВВ})^{1/3} D^{4/3} (\sigma_{сж})^{1/2}} r_c^2, \quad (18)$$

где  $r_c$  – радиус скважины, мм.

Установлено изменение линейной массы заряда контурной скважины в зависимости от плотности взрываваемой горной породы, скорости

продольной волны во взрываваемой горной породе, плотности и скорости детонации ВВ, предела прочности горных пород на сжатие и радиуса контурной скважины в различных горных породах (рис. 6).

Расстояние между контурными скважинами при предварительном щелеобразовании рекомендуется определять по формуле

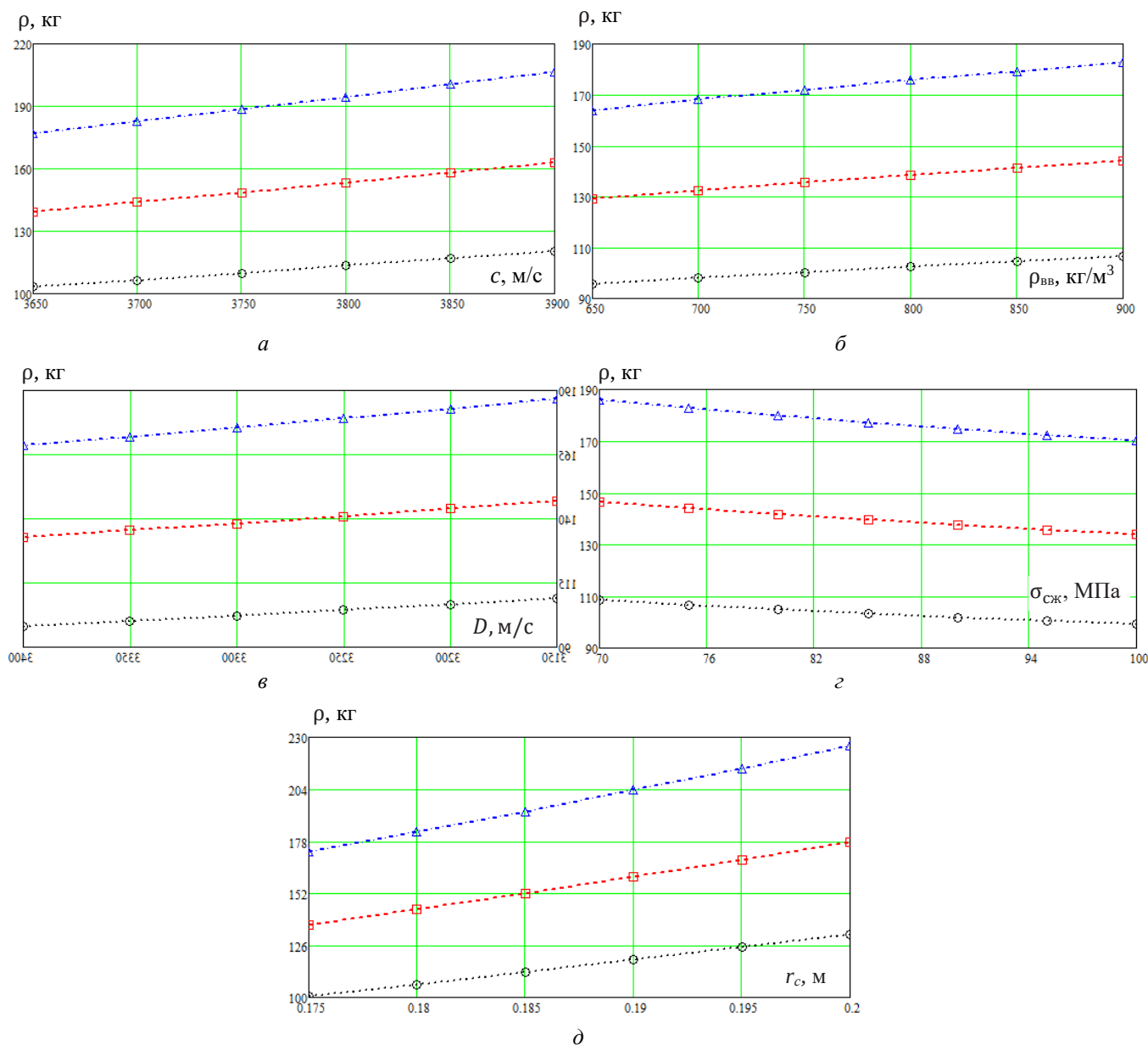
$$a = 0,064 d_c \left( \frac{\rho_0 c^2 \sigma_{сж}^3}{5 \sigma_p^3} \right)^{1/8}, \text{ м}, \quad (5)$$

где  $\sigma_p$  – предел прочности горных пород на растяжение, Па.

Установлено изменение расстояния между контурными скважинами в зависимости от скорости продольной волны в горных породах, предела прочности горных пород на сжатие

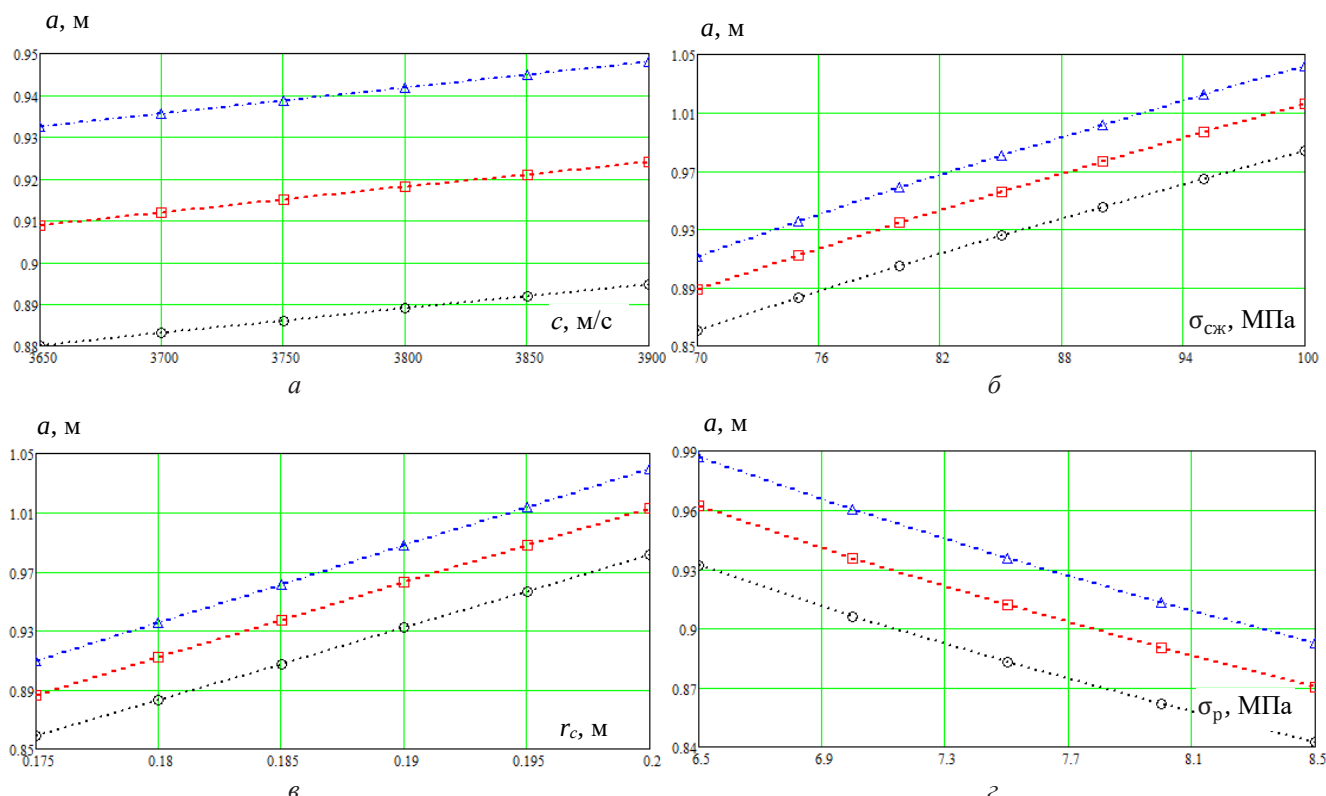
и растяжение, а также радиуса контурных скважин в различных горных породах (рис. 7).

Таким образом, установлено действие взрыва оконтуривающих скважинных зарядов ВВ в приконтурной зоне карьеров путем определения эффективных параметров БВР с учетом физико-механических и горно-технологических свойств массива.



**Рис. 6. Зависимости изменения линейной массы заряда контурной скважины  $\rho$  от скорости продольной волны в горной породе  $c$  (а), плотности ВВ  $\rho_{вв}$  (б), скорости детонации промышленных ВВ  $D$  (в), предела прочности горных пород на сжатие  $\sigma_{сж}$  (г) и радиуса контурной скважины  $r_c$  (д) в различных горных породах:**  
 о – мягкие породы; □ – породы средней крепости; △ – крепкие горные породы





**Рис. 7. Зависимости изменения расстояния между контурными скважинами  $a$  от скорости продольной волны  $c$  (а), предела прочности горных пород на сжатие  $\sigma_{сж}$  (б), радиуса скважины  $r_c$  (в) и предела прочности горных пород на растяжение  $\sigma_p$  (г) в различных горных породах: о – мягкие породы; □ – породы средней крепости; △ – крепкие горные породы**

В результате исследований различных технологических схем формирования откосов в предельном контуре бортов карьера установлено, что наилучшие результаты достигаются при применении метода предварительного щелеобразования.

Исследованиями механизма разрушения законтурного массива пород при конструкции заряда с заполнением его части инертной забойкой установлено, что при взрыве происходит асимметричное разрушение массива и снижается воздействие взрыва в сторону охраняемого массива за счет поглощения энергии при использовании инертной забойки.

#### Экспериментальные исследования

В результате проведенных теоретических исследований разработана методика проведения экспериментальных исследований взрывов контурных скважинных зарядов. Лабораторные исследования проведены в научной лаборатории Навоийского государственного горного института.

Экспериментальные исследования действия волн напряжений выполнены с использованием высокоскоростной видеокамеры марки Olympus i-SPEED 2 в прозрачных телах и дальнейшим осциллографированием в горных породах с применением цифрового осциллографа марки Rohde & Schwarz RTO1004.

В исследованиях также использовалась сейсмостанция марки ZETLAB ZET 048-С. Скоростная видеосъемка позволила одновременно фиксировать распространение волн и трещин в зоне пластических и упругих деформаций без ограничения амплитуды давления в волне. Также зафиксированы скорость распространения волны и длительность импульса.

Инструментальные замеры с помощью датчиков марки СВ-10Ц и осциллографа позволили определить долю энергии, которая идет на разрушение горных пород. Характер трещинообразования, т.е. наличие заколов вглубь массива или в сторону свободной поверхности, устанавливался путем линейных измерений.

Методикой было предусмотрено три направления проведения экспериментов на моделях:

- исследование трещинообразования на объемных моделях;
- исследование волнового взаимодействия методом высокоскоростной видеорегистрации процесса взрыва в прозрачных моделях;
- определение параметров волн напряжений при взрыве в образцах реальных горных пород.

Изучение трещинообразования проводилось на объемных моделях, изготовленных из мрамора и песчаника. Заряд размещали в отверстиях, просверленных в породе. Расстояние между зарядами смоделировали с учетом геометрического подобия.

Расстояние между зарядами изменяли до тех пор, пока не определялось оптимальное для данного диаметра зарядов и данной породы. За критерии оценки оптимального расстояния принимали качество образованной щели, степень дробления испытываемых образцов и наличие заколов.

Волновое взаимодействие изучали по данным видеосъемки высокоскоростной камерой Olympus i-SPEED 2, позволившей синхронизировать начало изучаемого процесса с началом регистрации.

В качестве первого приближения допускалось, что модель и горный массив ведут себя как упругие тела вплоть до момента разрушения.

Съемка осуществлялась с частотой 2000 кадров в секунду. Процесс разрушения породы в зависимости от акустической жесткости среды в значительной степени определялся параметрами падающих и отраженных волн напряжений. Для замера параметров волн напряжений взаимодействующих зарядов в моделях применяли датчики типа СВ-10Ц с записью на запоминающем цифровом осциллографе Rohde & Schwarz RTO1004.

При расшифровке осциллограмм использовали паспортные данные датчиков.

При моделировании требовалось определить оптимальные расстояния между зарядами, которые позволяют получить качественную

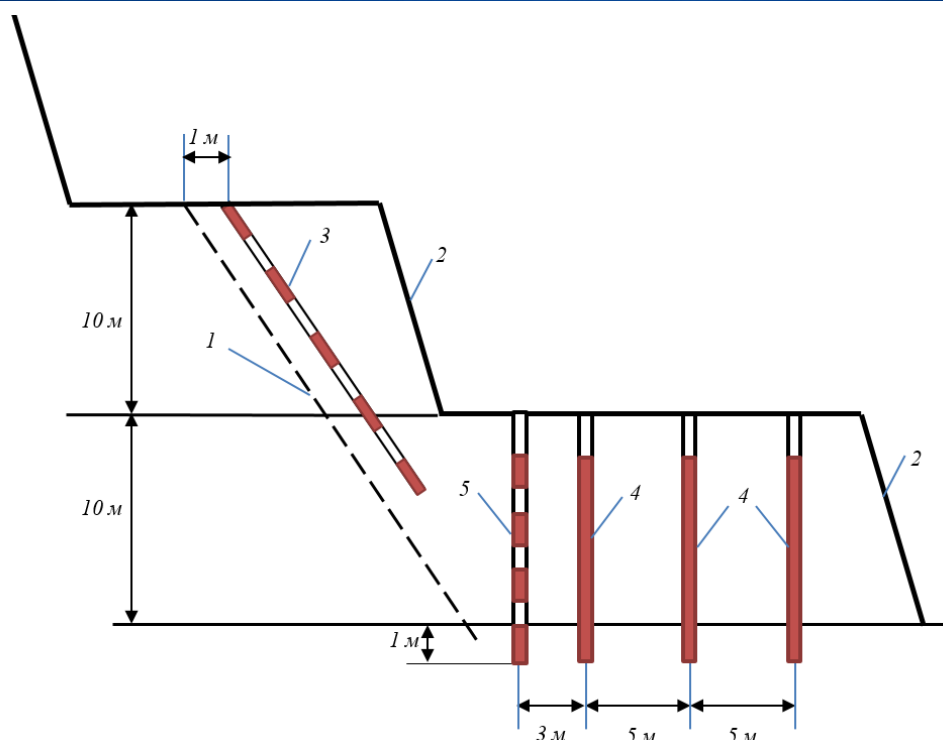
щель при минимальном разрушении испытываемых образцов. Минимально возможный диаметр заряда в моделях составил 2,0–2,5 мм.

Для уменьшения степени разрушения образцов были смоделированы рассредоточенные заряды. С помощью стеклянных трубочек заряд рассредоточивался по всей глубине шпура на четыре части с тремя воздушными промежутками. Расстояние между шпурами менялось в пределах от 6,5 до 35 диаметров заряда.

Таким образом, разработана методика проведения экспериментальных исследований взрывов контурных скважинных зарядов на моделях, позволяющая исследовать трещинообразование на объемных моделях и волновое взаимодействие методом высокоскоростной видеорегистрации процесса взрыва в прозрачных моделях, а также определить параметры волн напряжений при взрыве в образцах реальных горных пород.

В результате проведенных исследований разработан способ заоткоски уступов в приконтурной зоне карьера, обеспечивающий снижение нарушений массива и трещинообразования, а также уменьшение осыпобразования и оползания (рис. 8). Согласно данному способу при приближении горных работ к конечному контуру карьера 1 уступы 2 высотой 10 м сдваиваются. На верхнем уступе на расстоянии 1 м от проектного контура карьера бурится ряд наклонных скважин 3 диаметром 190 мм буровым станком марки Driltex-D25KS или УРБ-2А-2Б с перебором 2 м. Расстояние в ряду между контурными наклонными скважинами составляет 2 м.

В нижнем уступе бурится три ряда вертикальных отбойных скважин 4 буровыми станками СБШ-250МН диаметром 250 мм по рабочей сетке 5×5 м с перебором 1 м. На расстоянии 3 м от третьего ряда отбойных вертикальных скважин бурится ряд дополнительных барьерных скважин 5 диаметром 190 мм до проектного контура карьера буровым станком марки Driltex-D25KS или УРБ-2А-2Б. Расстояние в ряду между вертикальными барьерными контурными скважинами составляет 2 м.



**Рис. 8. Схема заоткоски уступов в приконтурной зоне карьера:**

1 – конечный контур карьера; 2 – рабочий уступ карьера; 3 – наклонная контурная скважина;  
 4 – отбойная вертикальная скважина; 5 – вертикальная барьерная контурная скважина

Заряды в контурных скважинах верхнего уступа и вертикальных барьерных скважинах на нижнем уступе формируют в виде гирлянд из промежуточных детонаторов марки нобелит-216Z диаметром 70 мм, массой 2 кг и детонирующего шнура марки ДШЭ-12 с удельным расходом 2 кг/п.м.

Отбойные вертикальные скважины нижнего уступа заполняются сплошным зарядом из промышленных взрывчатых веществ с удельным расходом 0,4–0,6 кг/м<sup>3</sup>.

Первыми взрываются заряды в скважинах контурного ряда верхнего уступа, а затем заряды нижнего уступа с использованием короткозамедленного последовательного взрывания через 35 мс от обнаженной поверхности уступа к проектному контуру.

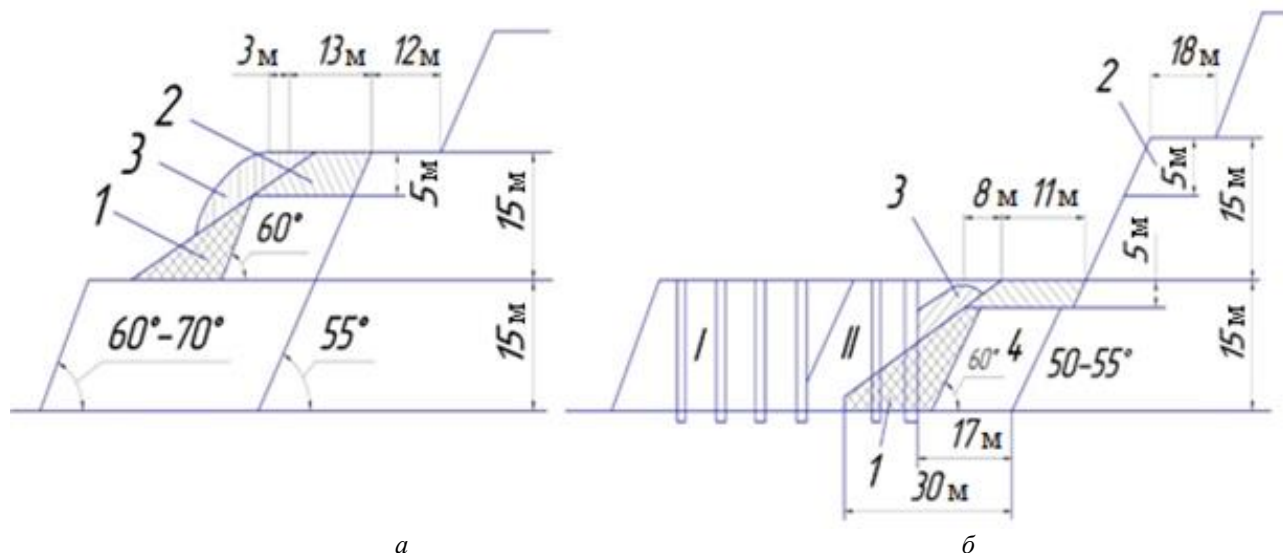
В любых горнотехнических условиях, независимо от крепости массива в приконтурной зоне, угла установки уступа и его высоты, уступ, установленный под любым углом, превышающим угол естественного откоса, со временем, разрушаясь, будет стремиться принять угол естественного откоса. Использование

природных условий для естественной заоткоски уступов явилось основой для разработки способа заоткоски бортов карьера с использованием механического разрушения массива горных пород (рис. 9), позволяющего обеспечить устойчивость массива в проектном контуре карьера и надежность управления параметрами заоткоски на планируемый период проведения горных работ, снизить объем вскрышных пород, сохранить прочность за-контурного массива и обеспечить безопасность ведения горных работ.

Согласно данному способу при постановке верхнего уступа высотой 15 м и с углом откоса 60° в предельный контур последний ряд вертикальных скважин бурят на расстоянии 1,5–2,5 м от проектного положения нижней бровки данного уступа. При этом ширина бермы составляет 17 м. При взрыве двух рядов вертикальных скважинных зарядов в приконтурной зоне образуется горная масса 1. Отгрузка взорванной массы и оформление откоса ведется двумя экскаваторами в следующем порядке: нижний экскаватор отгружает

первую заходку 1, верхний экскаватор обрабатывает верхнюю часть уступа высотой 5 м с перевалкой породы на подошву уступа 2; нижний экскаватор отгружает переваленную породу с верхнего подступа 3, а затем третью заходку, оформляя при этом нижнюю часть верхнего подступа 4.

Рекомендуется способ инициирования скважинных зарядов ВВ в приконтурной зоне карьера (рис. 10), позволяющий обеспечить снижение уровня сейсмических колебаний и повысить сохранность прибортовых массивов и инженерных сооружений в карьерах от сейсмических воздействий взрыва [19–21].



**Рис. 9. Схема оформления уступов в предельном контуре карьера экскаваторами:**

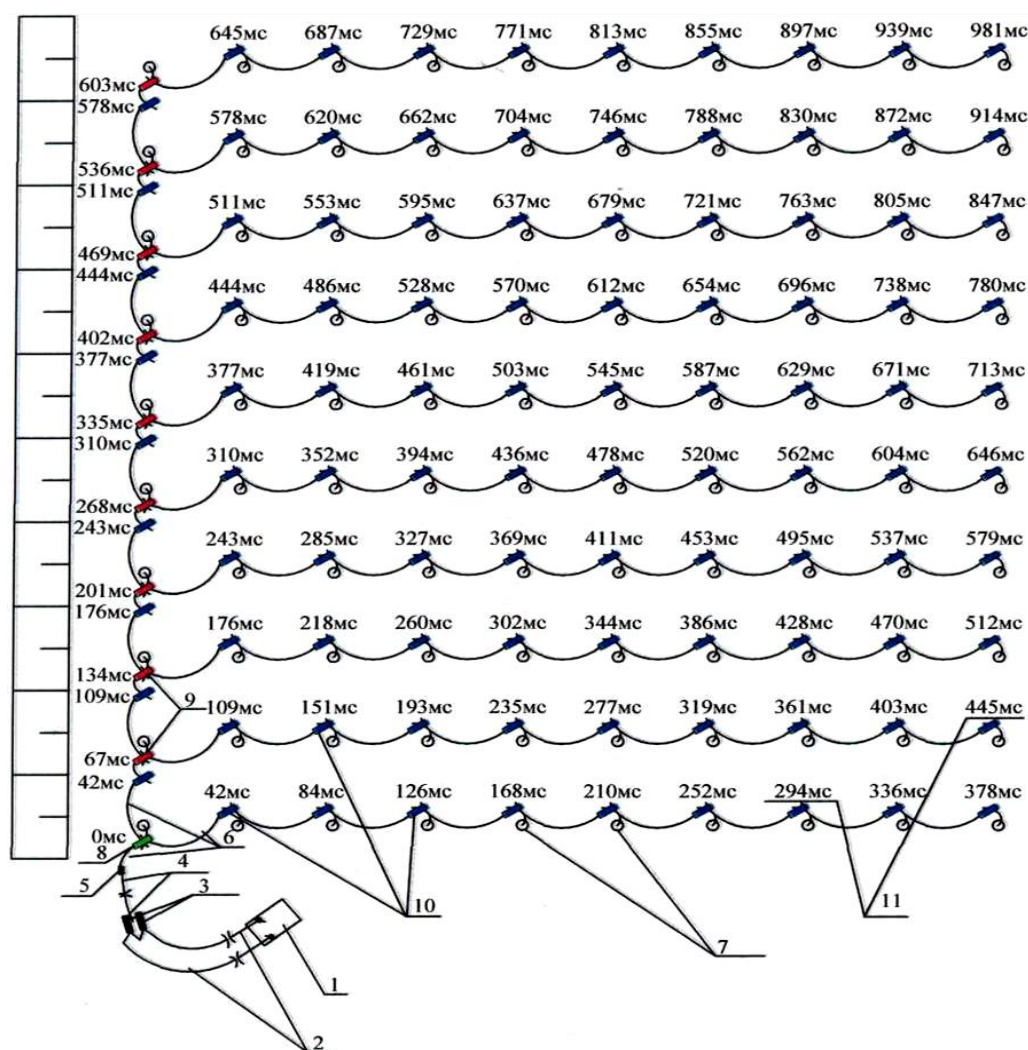
*а* – промежуточная экскаваторная заоткоска; *б* – заоткоска проектного контура; 1 – горная масса при первой заходке экскаватора; 2 – горная масса при перевалке породы на подошву уступа; 3 – переваленная горная порода с верхнего подступа; 4 – нижняя часть верхнего подступа; I – ряды вертикальных скважинных зарядов дробления; II – ряды вертикальных скважинных зарядов в приконтурной зоне

Согласно данному способу в приконтурной зоне карьера в блоке, где необходимо произвести дробление горных пород, бурятся 10 рядов скважин буровым станком СБШ-250МН диаметром 252 мм и сеткой скважин 5×5 м. При высоте уступа 15 м длина скважины составляет 17 м, длина забойка принимается 5 м, длина заряда – 12 м, нижняя половина скважины заполняется промышленным ВВ марки нобелан 2080 с плотностью заряжения 1,25 г/см<sup>3</sup>, а верхняя половина – промышленным ВВ марки игданит с плотностью заряжения 0,85 г/см<sup>3</sup>. Масса каждого скважинного заряда составляет 618 кг. Внутрискважинные капсули-детонаторы устанавливаются в нижней части скважин (одна скважина – один детонатор). Интервалы замедления между рядами скважин принимается 67 мс, а

между скважинами в ряду – 42 мс. Последовательность взрывания – от обнаженной поверхности уступа к проектному контуру. Иницирование зарядов в системе СИНВ производится электродетонаторами ЭД-8Ж и магистральной нитью детонирующего шнура ДШЭ-12. Источником взрывного импульса для неэлектрической системы инициирования СИНВ является СИНВ-СТАРТ.

Разработанные способы формирования устойчивых откосов бортов карьера внедрены на месторождении Кокпатас. Использование способов, рекомендуемой последовательности и параметров отстройки уступов обеспечило качество заоткоски уступа, полную сохранность законтурного массива и безопасность ведения горных работ.





**Рис. 10. Схема взрывания в способе инициирования скважинных зарядов ВВ в приконтурной зоне карьера:**  
 1 – взрывная машинка; 2 – электропровода; 3 – электродетонаторы мгновенного действия; 4 – магистральная нить детонирующего шнура; 5 – соединение детонирующего шнура с трубкой-волноводом; 6 – трубка-волновод; 7 – вертикальные скважины в плане; 8 – поверхностный соединительный блок, внутри которого находится капсуль-детонатор с замедлением 0 мс; 9 – то же, с замедлением 25 мс; 10 – то же, с замедлением 42 мс; 11 – время срабатывания поверхностных соединительных блоков без учета прохода волны по трубкам-волноводам, мс

## Выводы

1. В различных горно-геологических, горнотехнических и климатических условиях имеется возможность формирования борта карьера с углом откоса до  $70^\circ$ . Устойчивость уступов в скальных породах определяется физико-механическими свойствами пород, протяженностью и ориентацией трещин относительно откоса, а также сцеплением, углом внутреннего трения по контакту, неровностью поверхности трещин и свойствами заполнителя.

2. Исследованы конструкции бортов и напряженно-деформированного состояния пород месторождения Кокпатас, в результате

разработаны модель и метод расчета напряженно-деформированного состояния массива горных пород.

3. Установлено изменение диаметра контурной скважины в зависимости от плотности заряда ВВ, плотности горных пород, предела прочности горных пород на сжатие, скорости продольной волны во взрывающей горной породе и скорости детонации промышленных ВВ. При увеличении плотности ВВ, предела прочности горных пород на сжатие и скорости продольной волны во взрывающей горной породе – увеличивается.

4. Установлены зависимости изменения линейной массы контурного заряда от скорости продольной волны в горной породе, плотности ВВ, радиуса контурной скважины, скорости детонации промышленных ВВ и предела прочности горных пород на сжатие. При увеличении скорости продольной волны в горной породе, плотности ВВ и радиуса контурной скважины линейная масса заряда контурной скважины увеличивается, а при увеличении скорости детонации промышленных ВВ и предела прочности горных пород на сжатие – уменьшается.

5. Установлены зависимости изменения расстояния между контурными скважинами от скорости продольной волны в породе, плотности ВВ, предела прочности горных пород на сжатие и растяжение, а также радиуса контурных скважин. При увеличении скорости продольной волны в породе, предела прочности горных пород на сжатие и радиуса контурных скважин расстояние между контурными скважинами увеличивается, а при увеличении предела прочности горных пород на растяжение – уменьшается.

6. Разработана методика проведения экспериментальных исследований взрывов контурных скважинных зарядов на моделях, позволяющая исследовать трещинообразование

на объемных моделях и волновое взаимодействие методом высокоскоростной видеорегистрации процесса взрыва в прозрачных моделях, а также определить параметры волн напряжений при взрыве в образцах реальных горных пород.

7. Разработан и промышленно внедрен способ формирования устойчивых откосов бортов карьера, позволяющий обеспечить высокое качество заоткоски уступа, полную сохранность законтурного массива и безопасность ведения горных работ.

8. Разработан и промышленно внедрен экскаваторный способ заоткоски уступов на предельном контуре карьера, позволивший увеличить угол откоса уступа с 60 до 65°, снизить объем вскрышных пород, сохранить прочность законтурного массива и обеспечить безопасность ведения горных работ.

9. Разработан и промышленно внедрен способ инициирования скважинных зарядов взрывчатых веществ в приконтурной зоне карьера, позволивший обеспечить допустимую сейсмическую нагрузку на борта карьера и инженерные сооружения без снижения эффекта породоразрушения и обеспечения заданного среднего куска взорванной горной массы.

### Библиографический список

1. Шеметов П. А., Бибики И. П., Исаков М. М. Современное состояние и проблемы буровзрывных работ в глубоких рудных карьерах Узбекистана. *Горный вестник Узбекистана*. 2010;(4):12-19.
2. Кучерский Н. И., Лукьянов А. Н., Демич Л. М. и др. *Совершенствование процессов открытой разработки сложноструктурных месторождений эндогенного происхождения*. Ташкент: ФАН; 1998. 254 с.
3. Шеметов П. А. *Повышение эффективности использования георесурсного потенциала при разработке месторождений*. Ташкент: ФАН; 2005. 122 с.
4. Мальгин О. Н., Кустов А. М., Шеметов П. А. Совершенствование взрывных работ в Навоийском ГМК. *Горный вестник Узбекистана*. 2002;(3):9–12.
5. Рубцов С. К., Шеметов П. А. *Управление взрывным воздействием на горный массив при открытой разработке месторождений*. Ташкент: Изд-во «ФАН» АН РУз; 2011. 400 с.
6. *Типовой проект буровзрывных работ на карьерах Центрального рудоуправления НГМК*. Зарафшан; 2020. 20 с.
7. Холикулов Х. Ш. Контурное взрывание: повышение устойчивости высоких бортов и снижение обводненности последующего бурения. *Горный вестник Узбекистана*. 2009;(1):117–120.
8. Кучерский Н. И. *Современные технологии при освоении коренных месторождений золота*. М.: Руда и металлы; 2007. 696 с.
9. Бенерджи П., Баттерфилд Р. *Метод граничных элементов в прикладных науках*: Пер. с англ. М.: Мир; 1984. 494 с.

10. Силкин А. А., Кольцов В. Н. Геомеханический анализ и системы контроля деформации бортов карьера Мурунтау. *Горный вестник Узбекистана*. 2002;(4):17-22.
11. Гутер Р. С., Овчинский Б. В. *Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта*. М.: Наука; 1970. 434 с.
12. Paine Rolf S., Holmes D. K., Clark Harry E. Presplit Blasting at the Niagara Power Project. *The Explosives Engineer*. Wilmington, Delaware, USA. 2003;39(3):72-92.
13. Rossmanith H. P. The Mechanics and Physics of Advanced Blasting-Waves, Shocks, Fracture, Damage, Impact and Profit. Short Course. *FragBlast*. 2006;(8). 214 p.
14. Selberg H. L. Transient compression waves from spherical and cylindrical cavities. *Archive for physics*. 1995;5(7):307-314.
15. Ahmed R. *Comportement et Fragmentation Dynamique des Matériaux QuasiFragiles*. Application à la Fragmentation des Roches par Explosifs; Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris; 2004. 210 p.
16. Заиров Ш. Ш., Уринов Ш. Р., Равшанова М. Х. *Обеспечение устойчивости бортов карьеров при ведении взрывных работ*: Монография. Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing; 2020. 175 с.
17. Заиров Ш. Ш., Уринов Ш. Р., Равшанова М. Х., Номдоров Р. У. *Физико-техническая оценка устойчивости бортов карьеров с учетом технологии ведения буровзрывных работ*: Монография. Бухоро: Изд-во «Бухоро»; 2020. 175 с.
18. Уринов Ш. Р., Заиров Ш. Ш., Тухташев А. Б. Теоретическое обоснование методов оценки устойчивости откосов трещиноватых пород. *ТЕСНика*. 2020;(2):49-54.
19. Бибики И. П., Сытенков Д. В. Оптимизация параметров буровзрывных работ. *Горный журнал*. 2007;(5):48-51.
20. Шеметов П. А., Бибики И. П. Физико-техническое обоснование параметров взрывных работ в глубоких карьерах. *Горный вестник Узбекистана*. 2011;(1):24-36.
21. Бибики И. П. *Выбор и обоснование параметров процессов буровзрывных работ для повышения эффективности горно-транспортного оборудования глубоких карьеров*: Дис. ... канд. техн. наук. Навои; 2003.

## References

1. Shemetov P.A., Bibik I.P., Isakov M.M. Current state and problems of drilling and blasting in deep open pits in Uzbekistan. *Gorniy Vestnik Uzbekistana*. 2010;(4):12-19. (In Russ.)
2. Kuchersky N.I., Lukyanov A.N., Demich L.M. et. al. *Improvement of opencast mining methods for endogenous deposits of complicated structure*. Tashkent: FAN Publ.; 1998. 254 p. (In Russ.)
3. Shemetov P. A. *Improving efficiency of using subsoil resources in development of deposits*. Tashkent: FAN Publ.; 2005. 122 p. (In Russ.)
4. Malgin O. N., Kustov A. M., Shemetov P. A. Improving blasting operations in the Navoi MMC. *Gorniy Vestnik Uzbekistana*. 2002;(3):9-12. (In Russ.)
5. Rubtsov S. K., Shemetov P. A. *Control of blasting impact on a rock mass in open-pit mining*. Tashkent: FAN Publ.; 2011. 400 p. (In Russ.)
6. *Typical design of drilling and blasting operations at the open pits of the Central Mining Enterprise of the NMMC*. Zarafshan; 2020. 20 p. (In Russ.)
7. Kholikulov Kh. Sh. Blasting by presplitting method: increasing stability of high walls and decreasing watering of subsequent drilling. *Gorniy Vestnik Uzbekistana*. 2009;(1):117-120. (In Russ.)
8. Kuchersky N.I. Modern methods for development of primary gold deposits. Moscow: Ruda i Metally Publ.; 2007. 696 p. (In Russ.)
9. Benenergy P. *Butterfield R. Boundary element method in applied sciences*. Translated from English, Moscow: Mir Publ.; 1984. 494 p. (In Russ.)
10. Silkin A. A., Koltsov V. N. Geotechnical analysis and wall deformation control systems at the Muruntau open pit. *Gorniy Vestnik Uzbekistana*. 2002;(4):17-22. (In Russ.)
11. Guter R.S., Ovchinsky B.V. *Elements of numerical analysis and statistical analysis of experimental results*. Moscow: Nauka Publ.; 1970. 434 p. (In Russ.)
12. Paine Rolf S., Holmes D. K., Clark Harry E. Presplit Blasting at the Niagara Power Project. *The Explosives Engineer*. Wilmington, Delaware, USA. 2003;39(3):72-92.
13. Rossmanith H. P. The Mechanics and Physics of Advanced Blasting-Waves, Shocks, Fracture, Damage, Impact and Profit. Short Course. *FragBlast*. 2006;(8). 214 p.
14. Selberg H. L. Transient compression waves from spherical and cylindrical cavities. *Archive for physics*. 1995;5(7):307-314.



15. Ahmed R. *Comportement et Fragmentation Dynamique des Matériaux QuasiFragiles*. Application à la Fragmentation des Roches par Explosifs; Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris; 2004. 210 p.
16. Zairov Sh. Sh., Urinov Sh. R., Ravshanova M. Kh. Ensuring wall stability in the course of blasting. Monograph. Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing; 2020. 175 p. (In Russ.)
17. Zairov Sh. Sh., Urinov Sh. R., Ravshanova M. Kh., Nomdorov R. U. Physical and technical assessment of pit wall stability taking into account the drilling and blasting method used. Monograph. Bukhoro Publ. House; 2020. 175 p. (In Russ.)
18. Urinov Sh. R., Zairov Sh. Sh., Tukhtashev A. B. Theoretical substantiation of methods for assessing the stability of slopes of fractured rocks. *Techika*. 2020;(2):49-54. (In Russ.)
19. Bibik I. P., Sytenkov D. V. Optimization of parameters of drilling and blasting operations. *Mining journal*. 2007;(5):48-51. (In Russ.)
20. Shemetov P. A., Bibik I. P. Physical and technical substantiation of the parameters of blasting operations in deep open pits. *Gorniy Vestnik Uzbekistana*. 2011;(1):24-36. (In Russ.)
21. Bibik I. P. *Selection and substantiation of drilling and blasting parameters for increasing efficiency of mining-and-transport equipment in deep open pits*. Ph.D. thesis in Engineering Science. Navoi; 2003. (In Russ.)



## ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

DOI: 10.17073/2500-0632-2020-3-253-265

**Вопросы динамики многодвигательного электропривода  
на примере механизма наклона конвертера****В. Ф. Борисенко, В. А. Сидоров, А. И. Землянский** ✉Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ✉ [andrewiz@yandex.ru](mailto:andrewiz@yandex.ru)

**Аннотация:** Многодвигательным электроприводом оснащены многие тяжелые машины и механизмы горно-металлургической отрасли, например кислородные конвертеры. Уменьшение влияния недостатков, характерных для разветвленной многосвязной системы, возможно за счет создания систем регулирования на основе математических моделей рассматриваемых электромеханических систем (ЭМС). В полной математической модели учитывается число электродвигателей ЭМС, зазоры в передачах, упругости валопроводов, влияние диссипативных сил и т.д. Недостатком такого подхода является сложность таких моделей, что приводит к большим вычислительным и временным затратам при их реализации. Для анализа динамических процессов, возникающих в режимах разгона и торможения электромеханической системы механизма наклона конвертера, предлагается использовать упрощенную эквивалентную расчетную модель, которая учитывала бы изменение собственной частоты колебаний ЭМС для любого режима работы на основе технологических и конструктивных особенностей. На основании анализа расчетной модели сделан вывод о необходимости оценки механических нагрузок в системе методом сравнения их текущих и базовых значений, а также учет демпфирующих свойств электропривода. Для снижения динамических нагрузок предлагается сформировать закон изменения управляющего напряжения с помощью задатчика интенсивности, снижающего риски возникновения упругих моментов, значительно превосходящих допустимые для данного класса механизмов. Результаты термо- и вибродиагностики для оценки неисправностей основных звеньев механизма наклона конвертера, а также оценка поведения системы на базе модели Matlab Simulink при варьировании упругости валопроводов и приведенных зазоров показали существенное влияние последних на динамические нагрузки.

**Ключевые слова:** конвертер, электромеханическая система, валопровод, динамика, расчетная схема, термо- и вибродиагностика

**Для цитирования:** Борисенко В. Ф., Сидоров В. А., Землянский А. И. Вопросы динамики многодвигательного электропривода на примере механизма наклона конвертера. *Горные науки и технологии*. 2020;5(3):253-265. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-3-253-265

**Issues of Multi-Motor Electric Drive Dynamics  
through the Example of Converter Tilting Mechanism****V. F. Borisenko, V. A. Sidorov, A. I. Zemlyansky** ✉Donetsk National Technical University, Donetsk, ✉ [andrewiz@yandex.ru](mailto:andrewiz@yandex.ru)

**Abstract:** Many heavy machines and mechanisms of mining and metallurgical industry, for example, basic-oxygen converters (BOCs), are equipped with multi-motor electric drive. Reducing the influence of the disadvantages characteristic of a branched multi-connected system is possible by creating control systems based on mathematical models of the considered electromechanical systems (EMS). The full mathematical model takes into account the number of EMS motors, gear backlashes, elasticity of shafting, the effect of dissipative forces, etc. Disadvantage of this approach is complexity of such models, which leads to high computational costs and time expenditure for their implementation. To analyze dynamic processes arising under acceleration and deceleration conditions of the electromechanical system of the converter tilting mechanism, it is proposed to use a simplified equivalent simulation model, which would take into account changing the EMS natural oscillation frequency for any operation conditions based on process and design features. Based on the simulation model analysis, it was concluded that it is necessary to assess mechanical loads in the system by comparing their current and basis values, as well as taking into account the damping properties of the electric drive. To reduce dynamic loads, it is proposed to form a law of changing the control voltage using an intensity generator, which reduces the risks of occurrence of elastic moments,

significantly exceeding those permissible for this class of mechanisms. The results of thermal and vibration diagnostics for assessing malfunctions of key units of the converter tilting mechanism, as well as assessing the system behavior based on the Matlab Simulink model with varying shafting elasticity and normalized gear backlashes, showed significant effect of the latter on the dynamic loads.

**Keywords:** converter, electromechanical system, shafting, dynamics, design model, thermal and vibration diagnostics

**For citation:** Borisenko V. F., Sidorov V. A., Zemlyansky A. I. Issues of multi-motor electric drive dynamics through the example of converter tilting mechanism. *Gornyye nauki i tekhnologii = Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(3):253-265. (In Russ.) DOI: 10.17073/2500-0632-2020-3-253-265

## Введение

В настоящее время многодвигательным приводом (два, четыре и более) оснащены многие тяжелые машины и механизмы горно-металлургической отрасли, например кислородные конвертеры. Привод таких машин представляет собой разветвленную многосвязную систему валопроводов с суммированием моментов на общей шестерне. Такая схема позволяет уменьшить суммарный момент инерции механизма и снизить динамические нагрузки в передачах по сравнению с одновдвигательным приводом и, следовательно, снизить их массу и габариты. С другой стороны, увеличение числа валопроводов приводит к появлению дополнительных механических связей и, как следствие, к росту зазоров в зубчатых передачах и несинхронности нагружения отдельных ветвей. Даже небольшие отклонения в значениях моментов инерции и жесткости валопроводов приводят к росту динамических нагрузок, колебательному характеру в нестационарных режимах работы (пуск, торможение, реверс) и возможному преждевременному отказу оборудования.

Анализу поведения многосвязных электроприводов посвящено значительное число публикаций. Результаты теоретических и экспериментальных исследований динамики многомассовых ЭМС рассмотрены в работах Кожевникова С.Н. [1], Большакова В.И., Буцукина В.В. [2–4], Ключева В.И. [5], Борцова Ю.А., Соколовского Г.Г. [6].

Настоящая работа посвящена исследованию поведения электромеханической системы многодвигательного привода механизма

наклона конвертера в типовых режимах работы с целью определения путей локализации узлов, требующих ремонта.

Уменьшение влияния недостатков, характерных для разветвленной многосвязной системы, возможно за счет создания систем регулирования на основе математических моделей рассматриваемых электромеханических систем (ЭМС). В полной математической модели учитывается число электродвигателей ЭМС, зазоры в передачах, упругости валопроводов, влияние диссипативных сил и т.д. Недостатком такого подхода является сложность таких моделей. Это приводит к большим вычислительным и временным затратам при их реализации, что зачастую недопустимо в реальных условиях производства.

Для анализа динамических процессов, возникающих в режимах разгона и торможения электромеханической системы механизма наклона конвертера, предлагается использовать упрощенную эквивалентную расчетную модель, которая учитывала бы изменение собственной частоты колебаний ЭМС для любого режима работы на основе технологических и конструктивных особенностей. На основании анализа расчетной модели сделан вывод о необходимости оценки механических нагрузок в системе методом сравнения их текущих и базовых значений, а также учета демпфирующих свойств электропривода. Для предварительной оценки динамики рассматриваемой системы с помощью программного пакета Matlab Simulink выполнено моделирование процесса разгона.

Поскольку анализ текущих сигналов, поступающих от системы электроприводов, не позволяет оценить ее техническое состояние, предлагается использовать данные, полученные в результате термо- и вибродиагностики.

### Расчетная схема ЭМС многодвигательного привода наклона конвертера

Для многодвигательных электроприводов, содержащих два, четыре, шесть и более приводных электродвигателей основным недостатком является различие в кинематических зазорах по каждому из валопроводов. При пуске такой сложной ЭМС будут наблюдаться участки, соответствующие выбору зазоров по каждому из валопроводов. На приводимых ниже осциллограммах (рис. 1) хорошо прослеживается неодновременность пуска валопроводов четырехдвигательного привода механизма поворота и появление параметрического резонанса в районе половинной частоты вращения (на 11-й секунде) при пуске и в случае реверса

на 41-й и 51-й секундах. В качестве регистрируемых величин приняты упругие моменты по каждому из валопроводов (первый – четвертый), а также частота вращения и ток первого двигателя. Неодновременность выбора зазоров видна на характере изменения упругих моментов –  $M_{121}$ ,  $M_{122}$ ,  $M_{123}$ ,  $M_{124}$ .

Число приводных двигателей может достигать 10–16. При таком числе приводных двигателей приемлема их группировка в блоки по два или четыре, а также необходимость чередования блоков с последовательным и параллельным соединениями машин.

Нагрузка на двигатели у механизмов поворота и кантования будет усредняться в установившемся режиме движения, в пуско-тормозных режимах из-за различных условий выбора зазоров, нагрузка на отдельные двигатели может возрастать более чем в 2 раза, аналогичная ситуация повторяется и для упругих моментов в валопроводах [5, 6].

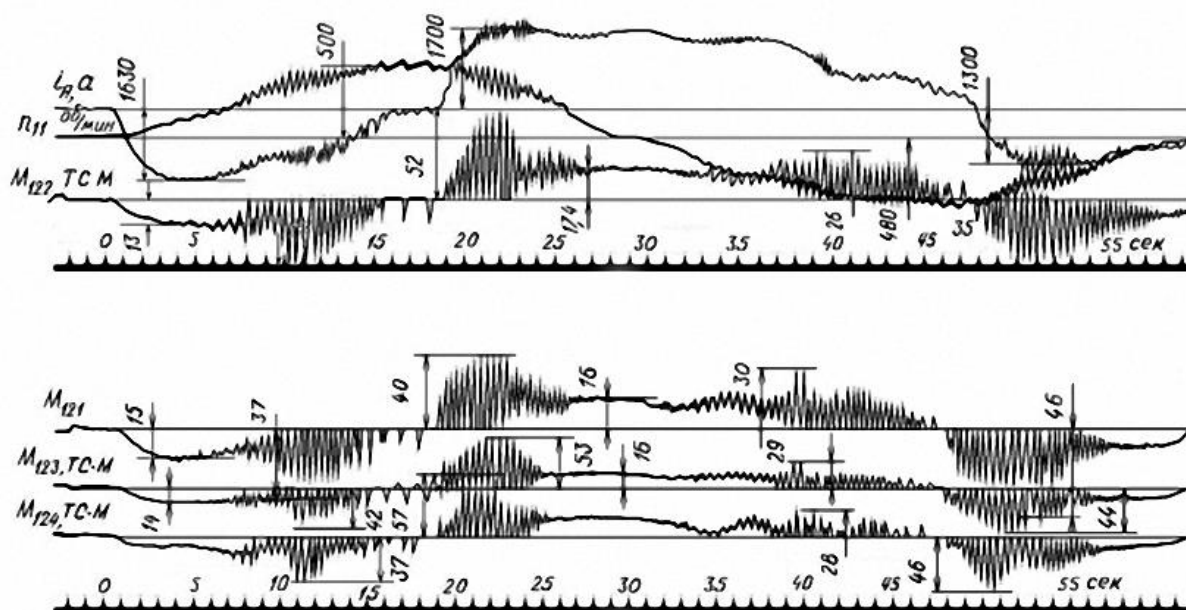


Рис. 1. Осциллограммы пуска четырехдвигательного привода механизма поворота:

$i_a$  – ток якоря электродвигателя;  $n_{11}$  – частота вращения 1-го электродвигателя;

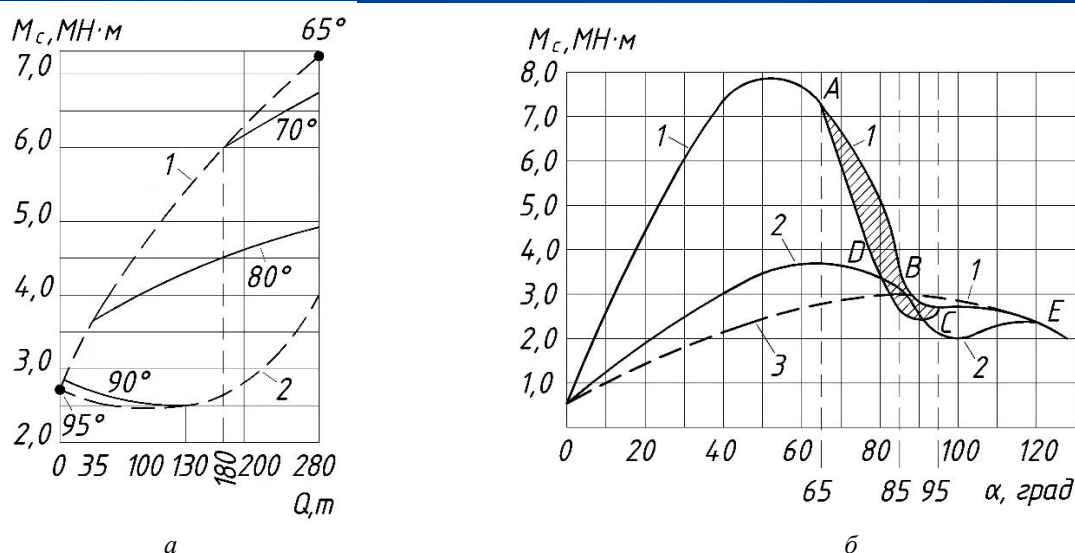
$M_{121}$ ,  $M_{122}$ ,  $M_{123}$ ,  $M_{124}$  – упругие моменты валопроводов (с 1-го по 4-й)

Fig. 1. Oscillograms of starting the four-motor drive of the tilting mechanism:

$i_a$  – electric motor armature current;  $n_{11}$  – speed of rotation of the 1st electric motor;

$M_{121}$ ,  $M_{122}$ ,  $M_{123}$ ,  $M_{124}$  – elastic momenta of shafting (from the 1st to 4th)





**Рис. 2. Зависимости статических моментов на цапфе от количества металла в конвертере (а) и в функции угла поворота  $\alpha$  конвертера (б):**

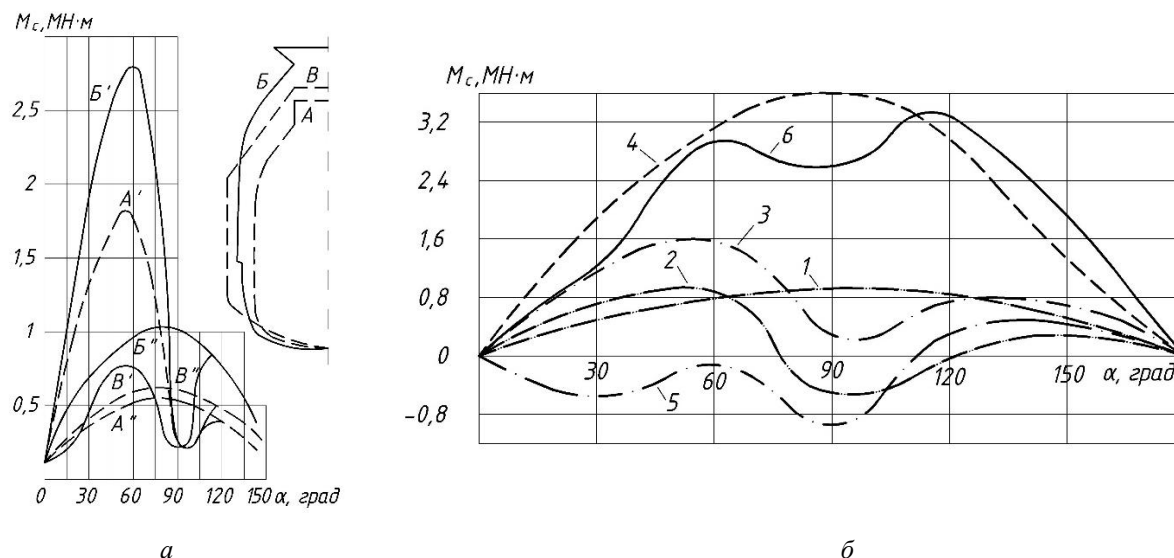
на а: 1 – граничная кривая, соответствующая появлению шлака в сталевыпускном отверстии; 2 – граничная кривая, соответствующая началу слива шлака через горловину конвертера;

на б: 1 – слив стали; 2 – возврат в исходное положение с 44 т шлака; 3 – поворот порожнего конвертера; 65° – начало слива стали; 85° – начало слива шлака через горловину; 95° – окончание слива стали; 120° – окончание слива шлака

**Fig. 2. First momenta on the trunnion as a function of the amount of metal in the converter (a) and as a function of the converter tilt angle  $\alpha$  (b)**

in (a): 1 – boundary curve corresponding to appearance of slag in the steel-tapping hole; 2 – boundary curve corresponding to the beginning of slag pouring through the converter mouth;

in (b): 1 – steel pouring; 2 – return to initial position with 44 tons of slag; 3 – tilting empty converter; 65° – start of steel pouring; 85° – start of slag pouring through the mouth; 95° – finish of steel pouring; 120° – finish of slag pouring



**Рис. 3. Зависимость статического момента на цапфах конвертера 250 т от профиля конвертера (а) и угла его поворота (б):**

A', B', B' – загруженные конвертеры с садкой 125 (А), 190 (В) и 230 (В), т; А'', Б'', В'' – то же для порожних конвертеров; 1 – момент порожнего конвертера с новой футеровкой; 2 – момент от садки в конвертере с новой футеровкой; 3 – суммарный момент при новой футеровке; 4 – момент порожнего конвертера с выгоревшей футеровкой; 5 – момент от садки в конвертере с выгоревшей футеровкой; 6 – суммарный момент при выгоревшей футеровке

**Fig. 3. Dependence of the first moment on the 250-t converter trunnions on the converter profile (a) and its tilt angle (b):**

A', B', C' – loaded converters with load 125 (A), 190 (B) and 230 (C), t; A'', B'', C'' – the same for empty converters; 1 – moment of empty converter with new lining; 2 – moment due to the load in converter with new lining; 3 – total moment at new lining; 4 – moment of empty converter with burnt-out lining; 5 – moment due to the load in the converter with burnt-out lining; 6 – total moment at burnt-out lining



Момент сил сопротивления  $M_c$  механизма наклона конвертера существенно изменяется в процессе отработки технологических операций [7–9]. Одновременно с изменением  $M_c$  наблюдается и изменение приведенного момента инерции:

$$J = m\rho^2,$$

где  $m$  – полная масса металла и собственно конвертера,  $\rho$  – радиус инерции.

Это очевидно, так как в процессе наклона изменяется положение центра тяжести. Наибольшие значения  $J(\varphi)$  будут иметь место в случае выгоревшей футеровки по сравнению с показателями для новой футеровки. Зависимость для  $J(\varphi)$  будет в некоторой степени повторять кривую  $M_c(\varphi)$ . Характерные зависимости момента сил сопротивления от состояния футеровки и угла наклона конвертера для различных садок приведены на рис. 2; влияние профиля конвертера на момент привода механизма наклона и зависимость  $M_c(\varphi)$  для  $Q = 250$  т – на рис. 3.

При анализе исследований по динамике привода наклона конвертера [2–4] было замечено, что основной упор делался на изучении нагрузок в валопроводах от тихоходного редуктора к венцовой шестерне, а также склонности электромеханической системы к биениям. В качестве расчетных схем принимались эквивалентная двухмассовая и многомассовая, в которых моделировалось изменение времени приложения движущего момента к рассматриваемым валопроводам, учитывался процесс растормаживания приводов [1, 5, 10]. Реальная расчетная схема должна учитывать систему электропривода, схему соединения электродвигателей, основные жесткости, зазоры по линии каждого из

валопроводов, характер изменения моментов сопротивления  $M_c(\varphi)$  и инерции  $J_{\text{конв}}(\varphi)$  при наклоне конвертера [11]. Особенно следует выделить зоны с минимальными и максимальными значениями  $M_c$  и  $J_{\text{конв}}$ . При упрощенном моделировании ЭМС наклона возможно задание механической характеристики двигателя в графическом виде или таблично [12, 13]. Типовая схема шестидвигательного одностороннего привода механизма наклона конвертера приведена на рис. 4.

При пуске многодвигательного привода механизма наклона конвертера наблюдается неодновременное подключение приводных ветвей к венцовой шестерне [3, 14, 15]. При этом возможно рассмотрение нескольких типовых случаев, к числу которых следует отнести: 1) подключение одной приводной ветви к венцовой шестерне в первый момент; 2) одновременное подключение двух приводных ветвей и 3) подключение оставшихся валопроводов к венцовой шестерне после выбора зазоров.

В первом случае [16] собственная частота колебаний может быть найдена как

$$\Omega'_{12} = \sqrt{\frac{(J_1 + J_7)C_{1-7}}{J_1 J_7}} \quad (1)$$

Подключение второго валопровода приводит к изменению собственной частоты

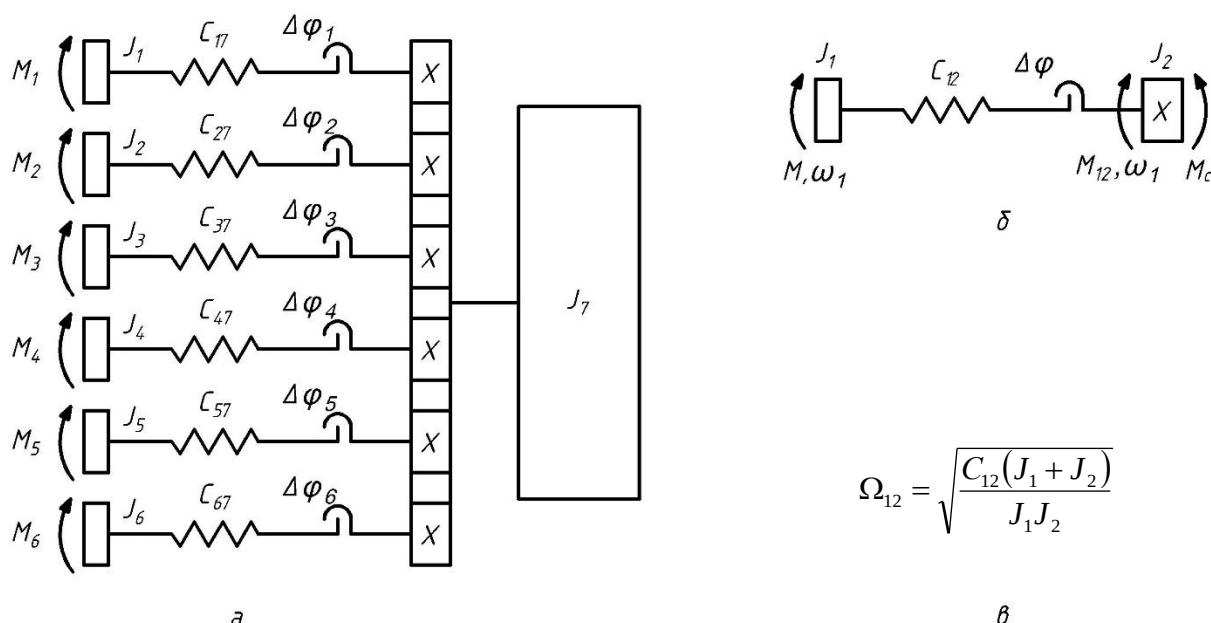
$$\Omega''_{12} = \sqrt{\frac{(J_1 + J_2 + J_7)(C_{1-7} + C_{2-7})}{(J_1 + J_2)J_7}} \quad (2)$$

В случае подключения всех валопроводов к венцовой шестерне собственная частота ЭМС наклона, приведенная к двухмассовой, находится из выражения

$$\Omega'''_{12} = \sqrt{\frac{(C_{1-7} + C_{2-7} + \dots + C_{6-7})(J_1 + J_2 + \dots + J_6 + J_7)}{(J_1 + J_2 + \dots + J_6)J_7}} \quad (3)$$

Рассмотрим отношение собственных частот колебаний:

$$\frac{(\Omega'_{12})^2}{(\Omega''_{12})^2} = \frac{(J_1 + J_7)C_{1-7}(J_1 + J_2)J_7}{J_1 J_7 (J_1 + J_2 + \dots + J_7)(C_{1-7} + C_{2-7})} \quad (4)$$



**Рис. 4. Расчетная схема механизма наклона конвертера с шестью приводными двигателями (а); двухмассовая расчетная схема (б); выражение для собственной частоты колебаний двухмассовой системы (в):**

$M_i$  – момент, развиваемый  $i$ -м приводным электродвигателем;  $J_i$  – момент инерции  $i$ -й массы;  
 $J_7$  – момент инерции венцовой шестерни;  $C_{i7}$  – жесткость  $i$ -го валопровода;  $\Delta\varphi_i$  – зазор в  $i$ -м валопроводе

**Fig. 4. Design model of the converter tilting mechanism with six drive motors (a); two-mass design model (b); expression for the two-mass system natural oscillation frequency (c):**

$M_i$  is the moment (torque) developed by the  $i$ -th drive motor;  $J_i$  is the moment of inertia (second moment) of the  $i$ -th mass;  
 $J_7$  is moment of inertia of the ring gear;  $C_{i7}$  is stiffness of the  $i$ -th shafting;  $\Delta\varphi_i$  is gap in the  $i$ -th shafting

Можно предположить, что в идеальном случае

$$J_1 = J_2 = \dots = J_6, C_{1-7} = C_{2-7} = \dots = C_{6-7}. \quad (5)$$

Учитывая предыдущие соотношения, получим

$$\frac{(\Omega'_{12})^2}{(\Omega''_{12})^2} = \frac{J_1 + J_7}{2J_1 + J_7}. \quad (6)$$

Отношение собственных частот колебаний при подключении одной ветви валопровода и всех ветвей к венцовой шестерне:

$$\frac{(\Omega'_{12})^2}{(\Omega'''_{12})^2} = \frac{J_1 + J_7}{6J_1 + J_7}. \quad (7)$$

Общее выражение:

$$\frac{(\Omega'_{12})^2}{(\Omega'''_{12})^2} = \frac{J_1 + J_7}{nJ_1 + J_7} \Rightarrow \frac{\Omega'_{12}}{\Omega'''_{12}} = \sqrt{\frac{J_1 + J_7}{nJ_1 + J_7}}. \quad (8)$$

То есть в процессе разгона собственная частота колебаний многомассовой системы (приведенной к двухмассовой) будет ступенчато изменяться в функции подключения валопроводов к ведущей шестерне (выбора зазоров в передачах). В момент окончания выбора зазора будут происходить удар и возбуждение колебаний в электромеханической системе [17, 18].

Одна из причин увеличения числа приводных двигателей механизма наклона конвертера – стремление уменьшить габаритные размеры контактных пар ведущая шестерня – венцовая шестерня и, как следствие, снизить динамические нагрузки на элементы приводных ветвей в пуско-тормозных режимах.

Очевидно, что установка приводных блоков механизма наклона конвертера требует высокой квалификации наладчиков, но даже в этом случае не удастся идеально установить зацепление в контактных парах. В пуско-тормозных режимах нагрузка на валопроводы будет существенно различаться из-за различных вели-

чин зазоров в контактных парах. Выше было отмечено, что наибольшая нагрузка будет на двигатель, по линии валопровода которого имеет место минимальный зазор (или он отсутствует), т.е. перегрузка по линии этой ветви будет максимальной. Время максимума нагрузки будет относительно небольшим, так как оно зависит от времени выбора минимального зазора по другим ветвям. В дальнейшем нагрузки по контактными парам будут снижаться, и при установившемся характере движения будет наблюдаться их усреднение [19, 20].

В процессе выбора зазора  $\Delta\varphi_3$  двигатель разгоняется, допустим, при постоянном ускорении; в конце выбора зазора он достигает скорости  $\omega_{1нач}$ , с которой и происходит удар в зацеплении. Запасенная кинетическая энергия частично рассеивается в передачах, а другая ее часть идет на создание упругих деформаций, которые вызывают дополнительные нагрузки в механической системе. Эти нагрузки могут быть оценены с помощью динамического коэффициента  $K_{дин}$  [4, 5], который представляет собой отношение максимального упругого момента  $M_{упр.макс}$  к базовому  $M_{баз}$ :

$$K_{\text{дин}} = M_{\text{упр.макс}} / M_{\text{баз.}} \quad (9)$$

В качестве базового удобно принимать среднюю величину упругого момента в передаче  $M_{\text{упр.ср.}}$ . Для двухмассовой упругой системы с выбранным зазором и  $W_{1\text{нач}}$  выражение для  $K_{\text{дин}}$  примет вид

$$K_{\text{дин}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{C_{12}^2 \omega_{\text{нач}}^2}{\Omega_{12}^2 M_{\text{упр.ср.}}^2}}. \quad (10)$$

где  $C_{12}$  – приведенная жесткость двухмассовой системы;  $J_1, J_2$  – моменты инерции первой и второй масс.

Для рассматриваемых, например, шести приводных двигателей (с одинаковыми паспортными данными) и однотипных линий связи с венцовой шестерней в общем случае можно записать уравнения движения одного и того же вида для каждой ветви [20]:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{1_{dB}} - M_{17} - M_{\delta 17} = J_1 d\omega/dt; \\ M_{2_{dB}} - M_{27} - M_{\delta 27} = J_2 d\omega/dt; \\ ..... \\ M_{6_{dB}} - M_{67} - M_{\delta 67} = J_6 d\omega/dt; \\ M_{17} + M_{27} + ... + M_{67} - M_c = J_7 d\omega/dt. \end{array} \right. \quad (11)$$

Условия существования упругих моментов:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{17} = C_{12}(\varphi_1 - \varphi_7); M_{17} = 0, |\varphi_1 - \varphi_7| \leq \Delta\varphi_{17}; \\ M_{17} > 0, |\varphi_1 - \varphi_7| \geq \Delta\varphi_{17}; \\ M_{27} = C_{27}(\varphi_2 - \varphi_7); M_{27} = 0, |\varphi_2 - \varphi_7| \leq \Delta\varphi_{27}; \\ M_{27} > 0, |\varphi_2 - \varphi_7| \geq \Delta\varphi_{27}; \\ ..... \\ M_{67} = C_{67}(\varphi_6 - \varphi_7); M_{67} = 0, |\varphi_6 - \varphi_7| \leq \Delta\varphi_{67}; \\ M_{67} > 0, |\varphi_6 - \varphi_7| \geq \Delta\varphi_{67}. \end{array} \right. \quad (12)$$

Учет диссипативных сил в передачах (1–6):

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{\delta 17} = b(\omega_1 - \omega_7); \\ M_{\delta 27} = b(\omega_2 - \omega_7); \\ \dots\dots\dots \\ M_{\delta 67} = b(\omega_6 - \omega_7). \end{array} \right. \quad (13)$$

При моделировании многодвигательного электропривода механизма наклона конвертера важно учесть схемы соединения групп электро двигателей – последовательное, параллельное, смешанное. Необходимо стремиться к сокращению числа групп с последовательным или параллельным соединением двигателей, имея в виду их недостатки. Наиболее благоприятными динамическими условиями будут обладать электроприводы с индивидуальным питанием двигателей от тиристорных преобразователей, когда вопросы токоограничения будут решаться в зависимости от нагрузок по каждой из ветвей механической связи [5, 12, 21].

Демпфирующие свойства электропривода можно оценивать по величине коэффициента электромеханической связи –  $K_{эс}$ . Для системы управляемый преобразователь – двигатель (УП – Д) при  $T_{пр} = 0$  и  $K_{от} = 0$  величина  $K_{эс}$  находится из выражения [5, 6, 9]



$$K_{эс} = \frac{\gamma - 1}{\sqrt{\gamma(\gamma - 1)T_m^2\Omega_0^2 + \gamma^2T_a^2T_m^2\Omega_0^4}}, \quad (14)$$

где  $\gamma = (J_1 + J_2) / J_1$  – величина относительного момента инерции.

Частота свободных колебаний вала двигателя при жесткой заделке вала механизма:

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}. \quad (15)$$

Связь  $\Omega_{12}$  с  $\Omega_0$  через  $\gamma$ :

$$\Omega_{12} = \Omega_0 \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}. \quad (16)$$

Величина  $K_{эс}$  при различном сочетании параметров электропривода для разомкнутой системы УП – Д может изменяться в широких пределах  $0 < K_{эс} < \infty$ . Диапазон изменения  $K_{эс}$  предлагается рассматривать в трех интервалах, соответствующих слабой ( $0 < K_{эс} < 0,2$ ), существенной ( $0,2 < K_{эс} < 2$ ) и жесткой ( $K_{эс} > 5$ ) электромеханической связи, двигатель обладает жесткой механической характеристикой. Имея конкретные значения  $K_{эс}$  для системы, можно судить о демпфирующей способности электропривода, т.е. о взаимовлиянии электрической и механической частей ЭМС [16].

**Контроль теплового состояния и виброспектров узлов механизма наклона**

Приведенные выше способы оценки технического состояния ЭМС механизма наклона конвертера (по величине изменения собственной частоты колебаний системы, величине коэффициента динамичности, величине коэффициента электромеханической связи) не дают возможности оценить степень неисправности отдельных звеньев системы. Поэтому нами используется один из современных методов контроля – метод оценки теплового состояния элементов. С другой стороны, может быть получена достоверная информация о состоянии узлов ЭМС механизма наклона конвертера с помощью методов вибродиагностики.

При работе механизма наклона основную нагрузку от веса конвертера воспринимает опорный подшипник [17, 22–24]. На рис. 5, 6 показаны разрушение подшипника опорного кольца, термограмма корпуса исправного подшипника, а также спектр виброускорения поврежденного подшипника. Необходимо констатировать, что характерным признаком повреждения подшипника является рост высокочастотной вибрации в области 2–4 кГц [20, 25, 26].

Возможный характер разрушения шестерен редукторов, износа зубчатого венца показан на рис. 7, 8. Вид разрушения позволяет судить о динамическом характере нагружения и значительных силах в зацеплении [27].



а



б

**Рис. 5. Опорный подшипник конвертера:**

а – разрушение опорного кольца; б – термограмма корпуса

**Fig. 5. Converter backing bearing:**

а – failure of the support rim; б – shell thermogram



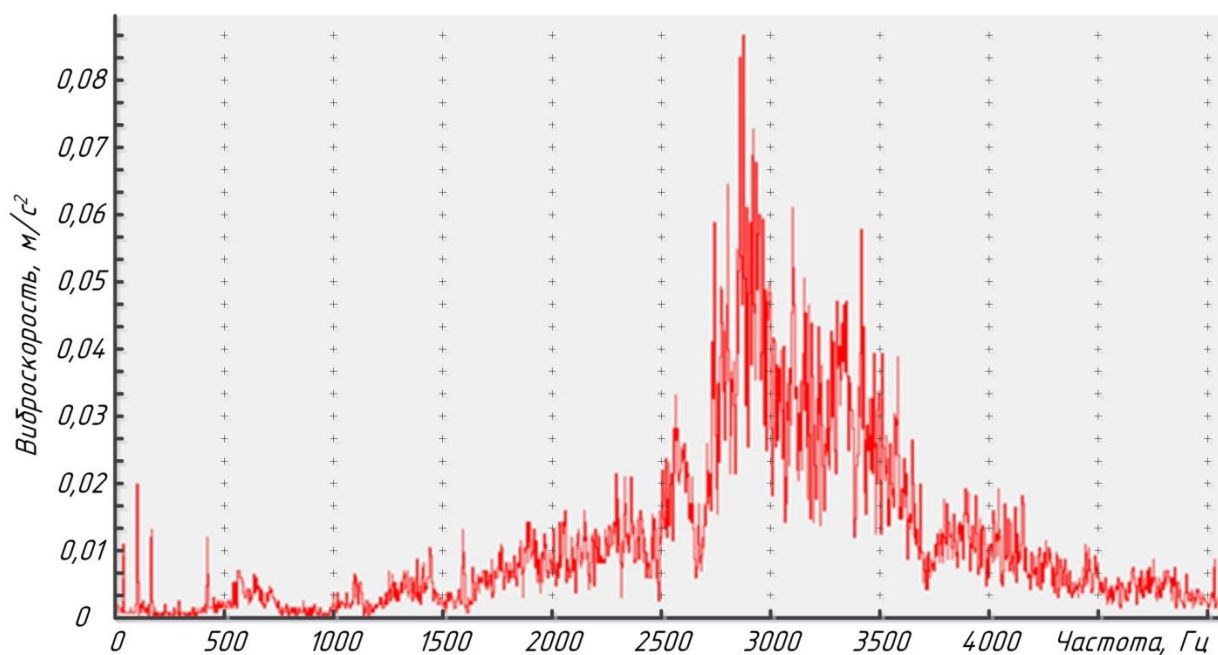


Рис. 6. Спектр виброускорения поврежденного подшипника

Fig. 6. Vibration acceleration spectrum of damaged bearing



Рис. 7. Разрушение шестерен редукторов

Fig. 7. Failure of reduction pinions



Рис. 8. Повреждения зубчатого венца

Fig. 8. Damage to gear rim

### Результаты исследования динамики привода наклона конвертера на основе математического моделирования

Для одного из типовых механизмов наклона конвертера с многодвигательным электроприводом с помощью программного пакета Matlab выполнено моделирование пускового режима с вариациями значений приведенного зазора при условии одинаковых жесткостей валопроводов. Рассмотрены одновременные пуски двух приводных двигателей при условии, что  $\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2$  и  $C_{12} = C_{22}$  (рис. 9–12).

Момент сил сопротивления на этапе разгона задавался ступенчатой зависимостью от  $M_{c0}$  до  $M_{сном}$ . В качестве системы электропривода рассматривалась система тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока с независимым возбуждением (металлургического исполнения). Для удобства оценивания результатов моделирование было выполнено в относительных единицах. На приводимых осциллограммах моментов и частот вращения расчетных масс хорошо прослеживается удар при выборе зазоров, значения упругих моментов достигают

практически трехкратного номинального значения ( $M_H$ ). Колебания упругих моментов затухают за относительно короткий промежуток времени. В рамках этого интервала времени происходит затухание частот вращения расчетных масс. По окончании выбора зазоров имеют место удар и частичное снижение частоты вращения приводных двигателей.

Здесь и на рис. 11:  $M_1$ ,  $M_2$  – моменты, развиваемые электродвигателями приводов;

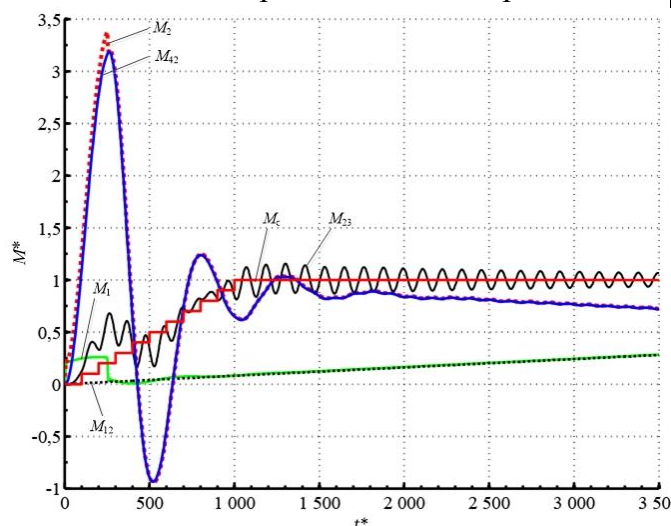


Рис. 9. Графики моментов при пуске разветвленной многомассовой модели ЭМС механизма наклона конвертера при равных зазорах в ветвях

Fig. 9. Graphs of momenta at starting branched multi-mass model of the converter tilting mechanism EMS at equal gear backlashes in the branches

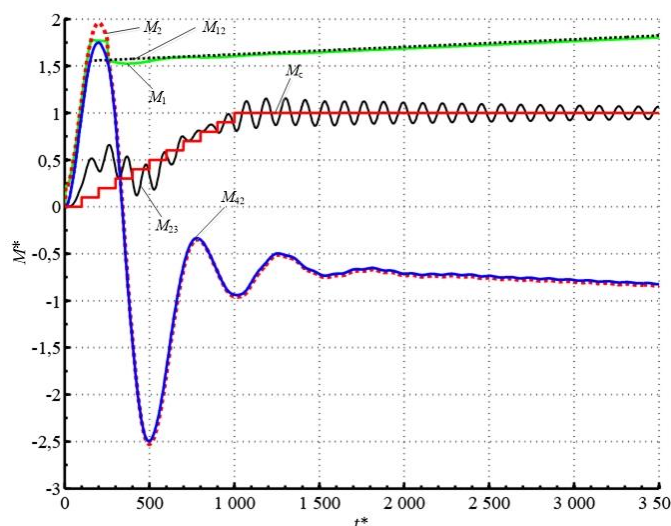


Рис. 11. Графики моментов при пуске разветвленной многомассовой модели ЭМС механизма наклона конвертера при разных зазорах в ветвях

Fig. 11. Graphs of momenta at starting branched multi-mass model of the converter tilting mechanism EMS at different gear backlashes in the branches

$M_{12}$ ,  $M_{23}$ ,  $M_{42}$  – упругие моменты в валопроводах между электродвигателями, венцовой шестерней и конвертером.

Здесь и на рис. 12:  $\omega_1$ ,  $\omega_4$  – частоты вращения электродвигателей приводов;  $\omega_2$  – частота вращения венцовой шестерни,  $\omega_3$  – частота вращения конвертера.

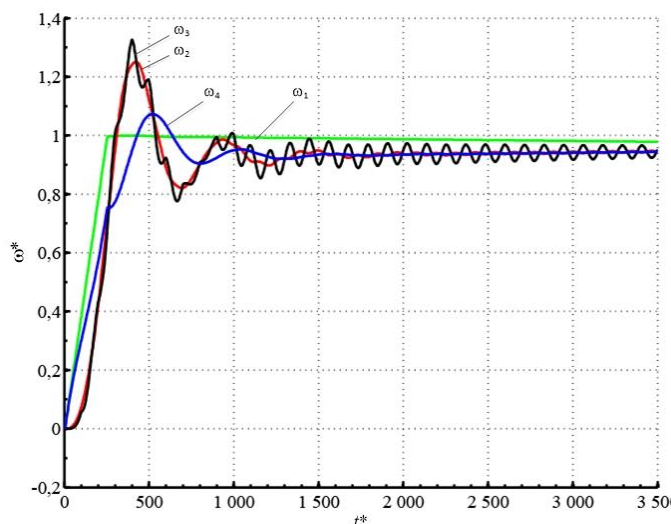


Рис. 10. Графики скоростей при пуске разветвленной многомассовой модели ЭМС механизма наклона конвертера при равных зазорах в ветвях

Fig. 10. Graphs of speeds at starting branched multi-mass model of the converter tilting mechanism EMS at equal gear backlashes in the branches

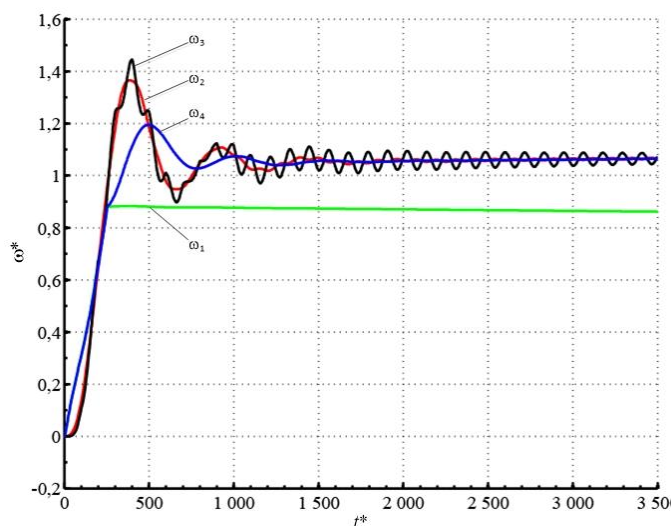


Рис. 12. Графики скоростей при пуске разветвленной многомассовой модели ЭМС механизма наклона конвертера при разных зазорах в ветвях

Fig. 12. Graphs of speeds at starting branched multi-mass model of the converter tilting mechanism EMS at different gear backlashes in the branches



В случае когда  $\Delta\varphi_1 < \Delta\varphi_2$ , практически всю нагрузку принимает первый двигатель – в момент удара запасенная кинетическая энергия трансформируется в упругий момент в первом валопроводе, упругий момент достигает четырехкратного номинального значения. Подключение второго двигателя приводит к росту частоты вращения первого (после просадки скорости в результате удара), а также наблюдается переход всей электромеханической системы в режим затухания колебаний, который продолжается в течение нескольких секунд.

### Выводы

1. Перегрузки в механических передачах многодвигательного электропривода механизма наклона конвертера приводят к выходу из строя подшипниковых узлов и шестеренных пар. Перегрузки возникают вследствие неточности изготовления механических кон-

тактных пар, а также отклонений при проведении монтажных операций по установке приводных групп.

2. Неодновременность выбора зазоров по линии каждого из валопроводов приводит к перераспределению нагрузок между приводными электродвигателями, большие нагрузки принимают на себя линии передач с меньшими приведенными зазорами.

3. Существенно снизить нагрузки в передачах возможно за счет применения двухступенчатого задатчика интенсивности  $U_{зи}(t)$ , когда на начальном этапе разгона выбор зазоров происходит при малой частоте вращения, после их выбора темп  $U_{зи}(t)$  возрастает до допустимого значения по условиям ограничения ускорения.

4. Непосредственная информация о текущем техническом состоянии элементов объекта может быть получена с помощью термо- и вибродиагностики.

### Библиографический список

1. Кожевников С. Н. *Динамика нестационарных процессов в машинах*. Киев: Наук. думка; 1986. 228 с.
2. Большаков В. И., Буцукин В. В. Исследование динамики привода наклона конвертера. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2001;(1):96-101.
3. Большаков В. И., Буцукин В. В. *Влияние неодновременности нагружения ветвей на динамические нагрузки привода конвертера*. Защита металлургических машин от поломок: сб. науч. тр. ПГТУ. 2002;6:39-48.
4. Большаков В. И., Буцукин В. В. *Динамические нагрузки разветвленной механической системы привода наклона конвертера*. Защита металлургических машин от поломок: сб. науч. тр. ПГТУ. 1997;2:16-24.
5. Ключев В. И. *Ограничение динамических нагрузок электропривода*. М.: Энергия; 1971. 320 с.
6. Борцов Ю. А., Соколовский Г. Г. *Автоматизированный электропривод с упругими связями*. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: Энергоатомиздат; 1992. 288 с.
7. Марголин Ш. М. *Электрооборудование конвертерных цехов*. М.: Металлургия; 1977. 248 с.
8. Cveticanin L. *Dynamics of Bodies with Time-Variable Mass*. Springer; 2016. 207 p.
9. Li Yejun, Song Meijuan, Zhang Shuang. In: *Swinging Analysis of 1# Converter Vessel Tilting Mechanism for Steelmaking Hangzhou* [J]. *Steel Research*. 2009;(37):37-40.
10. Чиликин М. Г., Ключев В. И., Сандлер А. С. *Теория автоматизированного электропривода*. Учеб. пособие для вузов. М.: Энергия; 1978. 616 с.
11. Łuczak Dominik. Mathematical model of multi-mass electric drive system with flexible connection. In: *2014 19<sup>th</sup> International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, MMAR*. 2014:590-595. DOI: [10.1109/MMAR.2014.6957420](https://doi.org/10.1109/MMAR.2014.6957420)
12. Michailov Oleg, Dayan Joshua. Analysis of the Multimass Electromechanical Drive System. *IFAC Proceedings*. 2004;37(14):389-394. DOI: [10.1016/S1474-6670\(17\)31135-7](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)31135-7)
13. Shahgholian G., Shafaghi P., Zeinali M., Moalem Sepehr. State Space Analysis and Control Design of Two-Mass Resonant System. In: *2009 International Conference on Computer and Electrical Engineering, ICCEE 2009*. 2010;(1):97-101. DOI: [10.1109/ICCEE.2009.105](https://doi.org/10.1109/ICCEE.2009.105)
14. Gu Y. K. et al. The dynamics analysis of full mounted converter vessel tilting mechanism. *Applied Mechanics and Materials*. 2012;128(129):1242-1245.
15. Wenjun Shao, Shihong Guo. Dynamic Simulation of Full Mounted Converter Vessel Tilting Mechanism and the Adjusting of the Buffer Spring. *Metallurgical Equipment*. 2009;177:13-16.

16. Электромеханические системы автоматизации стационарных установок. Под общ. ред. проф. В. Ф. Борисенко. *Машиностроение и техносфера XXI века, сб. тр. МНТК*. Донецк: ДонНТУ; 2005. 281 с.
17. Гольдин А. С. *Вибрация роторных машин*. 2-е изд. испр. М.: Маш.; 2000. 344 с.
18. Song-Manguelle J., Schroder S., Geyer T., Ekemb G., Nyobe-Yome J. Prediction of mechanical shaft failures due to pulsating torques of variable-frequency drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2010;46(5):1979-1988.
19. Sarkar N., Ellis R. E., Moore T. N. Backlash detection in geared mechanism: modeling, simulation, and experimentation. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 1997;11(3):391-408.
20. Борисенко В. Ф., Сидоров В. А., Мельник А. А. Подходы к оценке состояния электромеханических систем. *Науч. тр. ДонНТУ. Сер.: Электротехника и энергетика*. Донецк: ДонНТУ. 2004;79:23-26.
21. Nebojsa Mitrovic, Vojkan Kostic, Milutin Petronijevic, Borislav Jeftenic. Multi-Motor Drives for Crane Application. *Advances in Electrical and Computer Engineering*. 2009;9(3):57-62.
22. Brechting Robert, Prior Robert, Flack Ronald, Barrett Lloyd. Load direction effects on measured static and dynamic operating characteristics of tilting pad journal bearings. *Australian Journal of Mechanical Engineering*. 2005;2(2):143–150. DOI: [10.1080/14484846.2005.11464488](https://doi.org/10.1080/14484846.2005.11464488)
23. Costa Cesar, Brandao Iago. Vibration Analysis of Rotary Machines Using Machine Learning Techniques. *European Journal of Engineering Research and Science*. 2019;4(2):12-16. DOI: [10.24018/ejers.2019.4.2.1128](https://doi.org/10.24018/ejers.2019.4.2.1128)
24. Xue S., Howard I. Torsional vibration signal analysis as a diagnostic tool for planetary gear fault detection. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2018;100:706-728.
25. Boulenger A., Pachaud C. *Surveillance des machines par analyse des vibrations Du depistage au diagnostic*. 2-tirage. Paris: AFNOR; 1998. 213 p.
26. Dong, Hao & Hu, Yahui. Dynamic load-sharing characteristic analysis of face gear power-split gear system based on tooth contact characteristics. *AIP Conference Proceedings*. 2018;1955(1):030028. DOI: [10.1063/1.5033627](https://doi.org/10.1063/1.5033627)
27. Кравченко В. М., Сидоров В. А. *Визуальное диагностирование механического оборудования*. Учеб. пособие. Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд»; 2004. 120 с.

## References

1. Kozhevnikov S. N. *Dynamics of non-stationary processes in machines*. Kyiv: Naukova Dumka Publ.; 1986. 228 p. (In Russ.)
2. Bolshakov V. I., Butsukin V. V. Study of dynamics of converter tilt drive. *Metallurgical and Mining Industry*. 2001;(1):96-101. (In Russ.)
3. Bolshakov V. I., Butsukin V. V. *Influence of non-simultaneous loading of branches on dynamic loads of converter drive*. Protection of metallurgical machines from breakdowns. PSTU Publ. 2002;6:39-48. (In Russ.)
4. Bolshakov V. I., Butsukin V. V. *Dynamic loads of the branched mechanical system of the converter tilt drive*. Protection of metallurgical machines from breakdowns. PSTU Publ. 1997;2:16-24. (In Russ.)
5. Klyuchev V. I. *Electric drive dynamic load limitation*. Moscow: Energy Publ.; 1971. 320 p. (In Russ.)
6. Bortsov Yu. A., Sokolovskiy G. G. *Automated electric drive with elastic linkages*. 2nd Ed. amended. St-P.: Energoatomizdat Publ.; 1992. 288 p. (In Russ.)
7. Margolin Sh. M. *Electrical equipment of converter shops*. Moscow: Metallurgiya Publ.; 1977. 248 p. (In Russ.)
8. Cveticanin L. *Dynamics of Bodies with Time-Variable Mass*. Springer; 2016. 207 p.
9. Li Yejun, Song Meijuan, Zhang Shuang. In: *Swinging Analysis of 1# Converter Vessel Tilting Mechanism for Steelmaking Hangzhou [J]. Steel Research*. 2009;(37):37-40.
10. Chilikin M. G., Klyuchev V. I., Sandler A. S. *Theory of automated electric drive*. Manual for graduate students. Moscow: Energiya Publ.; 1978. 616 p. (In Russ.)
11. Łuczak Dominik. Mathematical model of multi-mass electric drive system with flexible connection. In: *2014 19<sup>th</sup> International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, MMAR*. 2014:590–595. DOI: [10.1109/MMAR.2014.6957420](https://doi.org/10.1109/MMAR.2014.6957420)
12. Michailov Oleg, Dayan Joshua. Analysis of the Multimass Electromechanical Drive System. *IFAC Proceedings*. 2004. 37(14):389–394. DOI: [10.1016/S1474-6670\(17\)31135-7](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)31135-7)
13. Shahgholian G., Shafaghi P., Zeinali M., Moalem Sepehr. State Space Analysis and Control Design of Two-Mass Resonant System. In: *2009 International Conference on Computer and Electrical Engineering, ICCEE 2009*. 2010;(1):97–101. DOI: [10.1109/ICCEE.2009.105](https://doi.org/10.1109/ICCEE.2009.105)
14. Gu Y. K. et al. The dynamics analysis of full mounted converter vessel tilting mechanism. *Applied Mechanics and Materials*. 2012;128(129):1242–1245.
15. Wenjun Shao, Shihong Guo. Dynamic Simulation of Full Mounted Converter Vessel Tilting Mechanism and the Adjusting of the Buffer Spring. *Metallurgical Equipment*. 2009;177:13–16.



16. Electromechanical automation systems for stationary installations. Engineering and technosphere of the XXI century/under the general editorship of V.F. Borisenko. In: *Proceedings of international scientific and technical conference*. Sevastopol, September 12-17, 2005. Donetsk: DonNTU Publ.; 2005. 281 p. (In Russ.)
17. Goldin A. S. Vibration of rotary machines. 2nd Ed., amended. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 2000. 344 p. (In Russ.)
18. Song-Manguelle J., Schroder S., Geyer T., Ekemb G., Nyobe-Yome J. Prediction of mechanical shaft failures due to pulsating torques of variable-frequency drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2010;46(5):1979-1988.
19. Sarkar N., Ellis R. E., Moore T. N. Backlash detection in geared mechanism: modeling, simulation, and experimentation. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 1997;11(3):391-408.
20. Borisenko V. F., Sidorov V. A., Mel'nik A. A. Approaches to assessing the state of electromechanical systems. In: *Proceedings of DonNTU, Series: Electrical engineering and power engineering*. Donetsk: DonNTU Publ. 2004;79:23-26. (In Russ.)
21. Nebojsa Mitrovic, Vojkan Kostic, Milutin Petronijevic, Borislav Jeftenic. Multi-Motor Drives for Crane Application. *Advances in Electrical and Computer Engineering*. 2009;9(3):57-62.
22. Brechting Robert, Prior Robert, Flack Ronald, Barrett Lloyd. Load direction effects on measured static and dynamic operating characteristics of tilting pad journal bearings. *Australian Journal of Mechanical Engineering*. 2005;2(2):143-150. DOI: [10.1080/14484846.2005.11464488](https://doi.org/10.1080/14484846.2005.11464488)
23. Costa Cesar, Brandao Iago. Vibration Analysis of Rotary Machines Using Machine Learning Techniques. *European Journal of Engineering Research and Science*. 2019;4(2):12-16. DOI: [10.24018/ejers.2019.4.2.1128](https://doi.org/10.24018/ejers.2019.4.2.1128)
24. Xue S., Howard I. Torsional vibration signal analysis as a diagnostic tool for planetary gear fault detection. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2018;100:706-728.
25. Boulenger A., Pachaud C. *Surveillance des machines par analyse des vibrations Du depistage au diagnostic*. 2-tirage. Paris: AFNOR; 1998. 213 p.
26. Dong, Hao & Hu, Yahui. Dynamic load-sharing characteristic analysis of face gear power-split gear system based on tooth contact characteristics. In: *AIP Conference Proceedings*. 2018;1955(1):030028. DOI: [10.1063/1.5033627](https://doi.org/10.1063/1.5033627)
27. Kravchenko V. M., Sidorov V. A. *Visual diagnostics of mechanical equipment*. Manual for graduate students. Donetsk: Yugo-Vostok LTD Publ.; 2004. 120 p. (In Russ.)

## ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

DOI: 10.17073/2500-0632-2020-3-266-284

**Методы идентификации системных задач стратегического управления  
и повышения эффективности геологоразведочных работ на предприятии****Д. Н. Молдаши**

АО НАК «Казатомпром», г. Нур-Султан, Республика Казахстан

**Аннотация:** Геологоразведочное предприятие – это современная геологоразведочная компания, обладающая передовыми технологиями и осуществляющая полный комплекс геологоразведочных работ высокого качества по всем видам твердых полезных ископаемых в соответствии с мировыми стандартами, являющаяся центром компетенции в урановой геологии, а также представляющая свои услуги в области геологоразведочных работ по твердым полезным ископаемым. На сегодняшний день остаются актуальными задачи обеспечения восполнения разведанных запасов полезных ископаемых, повышения эффективности их использования, а также увеличения доходности и капитализации предприятий минерально-сырьевой отрасли. Для реализации комплекса мероприятий, позволяющих решать проблемы, связанные с поиском, разведкой и эксплуатацией урановых месторождений, на более высоком качественном уровне и в кратчайшие сроки необходима разработка следующих подходов и методов: реконструкция и перевооружение методической и технической базы химико-аналитической лаборатории с целью применения минералогических и радиоизотопных методов поисков месторождений урана; проведение работ по расширению области аккредитации, экологических исследований и подготовке специалистов для полевых лабораторий; создание информационной системы геологического банка данных, позволяющей организовать единое информационное пространство и обеспечить наличие необходимых достоверных данных, а также их сохранность и разграничение доступа к ним. Проведенные исследования легли в основу разработки механизмов достижения стратегических целей и реализации стратегических задач предприятия. Для обеспечения устойчивого роста ключевых показателей деятельности предприятия необходима нацеленность на долгосрочную успешную работу. Это сопряжено с реструктуризацией активов и диверсификацией направлений деятельности предприятия, развитием инновационных методов и технических средств для поисковых работ и лабораторно-технологических исследований, совершенствованием комплекса радиоэкологических исследований на разведочных участках геологоразведочных работ и внедрением принципов корпоративной и правовой культуры. Обеспечение растущих потребностей добычных предприятий в структуре компании путем восполнения ресурсной базы урана должно базироваться на активном проведении разведочных работ, поиске и открытии новых месторождений урана, а также формировании штата профессиональных высокоэффективных кадров. Для повышения эффективности управления предприятию необходимо активизировать и повысить качество геологоразведочных работ, а также провести диверсификацию деятельности компании и снизить возможные риски. Реализация данного подхода возможна путем формирования штата профессиональных высокоэффективных кадров на основе признания высокой экономической значимости человеческих ресурсов. Кроме того, необходимо активное проведение геологоразведочных работ на перспективных площадях с целью открытия новых месторождений и соответственно прироста и восполнения запасов урана и увеличения активов компании, что позволит продлить срок службы рудников до 2040 г. за счет прироста доразведанных запасов.

**Ключевые слова:** геологоразведочные работы, стратегические цели, повышение эффективности управления, ресурсный потенциал, запасы урана

**Для цитирования:** Молдаши Д. Н. Методы идентификации системных задач стратегического управления и повышения эффективности геологоразведочных работ на предприятии. *Горные науки и технологии*. 2020;5(3):266-284. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-3-266-284

## Methods for identifying system tasks of strategic management and improving efficiency of exploration enterprise

D. N. Moldashi

Kazatomprom JSC NAC, Nur-Sultan, Republic of Kazakhstan

**Abstract:** A geological exploration company is a modern enterprise, possessing advanced techniques and carrying out full range of high quality exploration for all types of solid minerals in accordance with world standards, which is the center of competence in uranium geology, as well as provides its services in the field of exploration for solid minerals. To date, the tasks of ensuring replenishment of explored mineral reserves, increasing efficiency of their use, as well as increasing profitability and capitalization of enterprises of mining-and-processing industry remains relevant. To implement a set of measures for solving problems associated with prospecting, exploration, and exploitation of uranium deposits, it is urgently required to develop the following improved approaches and methods: modernization and re-equipment of methodological and technical base of the enterprise's chemical analytical laboratory for implementation mineralogical and radioisotope methods of prospecting for uranium deposits; carrying out work to expand the scope of accreditation, environmental research, and training of specialists for field laboratories; creation of an information system for geological data bank, which allows organizing a single information space and ensuring availability of the necessary reliable data, as well as their safety/integrity and the data access control. The conducted research formed the basis for the development of mechanisms for achieving strategic targets and implementing strategic objectives of the enterprise. To ensure sustainable growth of key performance indicators of the enterprise, it is necessary to focus on long-term successful work. This is connected with restructuring of assets and diversification of the company's activities, development of innovative methods and facilities for prospecting and laboratory-and-technological research, improvement of the set of radioecological studies at exploration areas, and introduction of the principles of corporate and legal culture. Providing growing demands of affiliated mining enterprises for mineable resources by replenishing the uranium resource base should be based on active prospecting, exploration, and discovery of new uranium deposits, as well as formation of highly efficient professional personnel. To improve management efficiency, the enterprise should activate and improve the quality of exploration, as well as diversify the company's activities and reduce possible risks. Implementation of this approach is possible through the formation of highly efficient professional personnel based on the recognition of high economic value of human resources. In addition, it is necessary to actively conduct exploration in promising areas for discovering new deposits and, correspondingly, increasing and replenishing the company's uranium reserves and increasing its assets. This will allow prolonging the life of the company's mines until 2040 due to increasing additional explored reserves.

**Keywords:** exploration, strategic targets, improving management efficiency, resource potential, uranium reserves

**For citation:** Moldashi D. N. Methods for identifying system tasks of strategic management and improving efficiency of exploration enterprise. *Gornye nauki i tekhnologii = Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(3):266-284. (In Russ.) DOI: 10.17073/2500-0632-2020-3-266-284

### Введение

На первом этапе исследования проведен анализ основных тенденций развития международного рынка и современного состояния в геологоразведочной отрасли Казахстана. Быстрый рост мировой индустриализации и растущие потребности глобальной экономики вызывают все большее потребление минерально-сырьевых ресурсов. Уровень вложений в геологоразведочные работы за последние 10 лет значительно вырос во всем мире, началось активное освоение слабоизученных территорий.

По данным отчета World Exploration Trends от Metals Economics Group's (MEG), затраты на геологоразведку в мире за период 2003–2013 гг. составили в среднем 3,1 млрд долл. США в год. В последующие годы отмечался ежегодный рост уровня затрат, который достиг своего пика в 2018 г. и составил 14,4 млрд долл. США [1–3].

Канада, Австралия и США являются лидерами по объемам затрат на геологоразведку, на их долю приходится 39 % от общей суммы. Регион Латинской Америки: Мексика, Перу, Чили, Бразилия и Аргентина – с 1994 г. также

занимает лидирующие позиции по затратам, которые составили 25 % общего уровня мировых затрат в 2018 г. В Казахстане выделены средства для затрат на геологоразведку из республиканского бюджета в сумме 9,3 млрд тенге, или около 0,35 % общемировых затрат. За счет применения более технологичных и эффективных методов изучения удельные затраты на геологоразведочные работы во всем мире растут. Показатель Казахстана на сегодняшний день относительно низкий и составляет 24 долл. США на 1 кв. км, по сравнению с расходами Канады на уровне 328 долл. США, Австралии – 311 долл. США и Соединенных Штатов Америки – 149 долл. США. Учитывая международный опыт, для восполнения запасов полезных ископаемых в РК необходимо ежегодное ассигнование порядка 180–200 млрд тенге, что составит около 3–4 % от общемировых затрат и позволит выйти на уровень Китая, Бразилии и Перу [4–6].

Отмечается тенденция роста спроса на золото в связи с повышением интереса со стороны инвесторов и спроса стран из-за пополнения золотовалютных резервов для стабилизации национальных экономик, что привело к росту цены на металл. В 2010–2018 гг. значительно выросли затраты на проведение геологоразведочных работ для поисков золота. Затраты десяти стран: Канада, Австралия, США, Мексика, Россия, Китай, Перу, Колумбия, Бразилия и Чили – составили 2/3 всего объема затрат на геологическую разведку по золоту [7].

Медь, никель и цинк, входящие в группу цветных металлов, находятся на второй позиции по привлекательности для инвесторов. С 2011 г. также был отмечен значительный рост проведения геологоразведочных работ по данным металлам. В частности, Латинская Америка аккумулирует около 33 % всего бюджета затрат по перечисленным металлам.

Также по уровню привлекательности и объемам затрат на геологоразведку лидируют алмазы и платиновая группа. Отмечается рост инвестиций на геологоразведочные работы на

уран, литий и редкоземельные металлы. Высокий интерес сохраняется к серебру, обнаружение которого зачастую идет попутно с обнаружением золота и полиметаллов.

Как показывает анализ мировой практики, региональные геологические исследования, которые не являются прибыльным видом деятельности и требуют значительных финансовых вложений, чаще всего финансируются государством.

Динамика общемировых затрат на геологоразведочные работы в зависимости от стадии демонстрирует, что на начальных стадиях ГРП (региональные, поисковые и оценочные работы) затрачивается около 70–80 % общих геологоразведочных затрат, тогда как на разведку всего 20–30 %. Государство контролирует геологическое изучение и формирование геологических баз данных ресурсного потенциала внутри своей страны и зачастую за рубежом. В Японии и Южной Корее государство в лице национальных геологических служб выступает в роли кредитора или инвестора для национальных компаний при разработке перспективных проектов. Таким образом выполняется экономическая программа развития страны и обеспечиваются долгосрочные поставки требуемых ресурсов [8–10].

По объемам и разнообразию минерально-сырьевых ресурсов Республика Казахстан занимает одно из ведущих мест в мире. На базе разведанных запасов создана мощная нефтегазодобывающая, урановая и угольная промышленность, промышленность по добыче и переработке руд черных, цветных и благородных металлов, различных видов неметаллических полезных ископаемых. Общее количество месторождений составляет 5 004, из них твердые полезные ископаемые (ТПИ) – 839 (16,8 %), углеводородное сырье (УВС) – 256 (5,1 %), подземные воды (ПВ) – 1 028 (25,7 %), общераспространенные полезные ископаемые – 2 624 (52,4 %). Ценность утвержденных запасов в недрах оценивается в объеме 9 155,2 млрд долл. США, при этом прогнозных ресурсов предположительно около 45 600 млрд долл. США [11].



Казахстан располагает значительными ресурсами черных металлов, достаточными для обеспечения устойчивого развития отрасли и увеличения объемов добычи. На базе железорудных месторождений Казахстана действует 6 крупных комбинатов с 10 рудниками проектной мощностью около 80 млн т руды в год. Прогнозный потенциал республики в несколько раз превышает разведанные запасы черных металлов.

Казахстан занимает лидирующее место в мире по запасам урана. Уникальность казахстанской сырьевой базы природного урана заключается в том, что основная часть запасов сосредоточена в гидрогенных месторождениях Южного Казахстана, пригодных для отработки способом подземного выщелачивания. На государственном балансе запасов полезных ископаемых учтено 53 месторождения урана, в том числе 3 с забалансовыми запасами. Однако прогнозный ресурсный потенциал урановых руд является достаточно высоким и требует дальнейшего изучения.

На сегодня в Казахстане разведано 1 438 месторождений подземных вод. Утвержденные запасы подземных вод, находящиеся на государственном балансе, составляют 42,1 млн м<sup>3</sup>/сут, в том числе для питьевых целей – 14,29 млн м<sup>3</sup>/сут, технического водоснабжения – 2,02 млн м<sup>3</sup>/сут (4,8 %), орошения земель – 20,92 млн м<sup>3</sup>/сут, или 49,7 %, и комплексного их использования – 4,9 млн м<sup>3</sup>/сут (11,6 %).

В последние годы в Казахстане больше внимания стало уделяться развитию геологоразведочной отрасли. Ежегодно увеличивается финансирование проведения геологического изучения недр. В целом в рамках геологических исследований выполняемых за счет средств республиканского бюджета и привлекаемых инвестиций, проводятся работы по обеспечению геологического изучения недр страны, выявлению дефицитных видов сырья и поддержанию общей конкурентоспособности минерально-сырьевой базы Республики Казахстан. Вместе с тем нынешнее состояние геологической отрасли не отвечает возросшим требованиям экономического развития.

Распад СССР и прекращение финансирования геологоразведочных работ в середине 1990-х гг. поставили геологическую службу Республики Казахстан в очень тяжелое положение, которое характеризовалось массовой миграцией специалистов геологической отрасли в другие страны СНГ. Сокращение численности продолжалось до конца 1990-х гг. В полевых экспедициях численность специалистов геологической и геофизической служб также сократилась. Таким образом, к началу возобновления геологоразведочных работ составе полевых экспедиций находилось по пять-шесть специалистов геологического профиля. Дальнейшее развитие деятельности по разведке месторождений (участков) требовало дополнительных сил. В короткие сроки на работу были приглашены бывшие специалисты предприятий геологоразведочных служб, которые в кратчайший срок смогли достаточно надежно освоить методы разведки пластово-инфильтрационных месторождений. Эти специалисты стали в настоящее время профессиональным геологическим ядром предприятия, способного полностью выполнять работы по проектированию разведочных работ, разрабатывать технико-экономические обоснования промышленных кондиций и итоговые отчеты с подсчетом запасов урана и попутных полезных компонентов. Для подготовки специалистов такого уровня необходимы не только теоретические знания, но и практический опыт и навыки, что требует достаточно длительного времени. Учитывая увеличение объемов разведки и возобновление поисковых работ, предприятие за счет собственных средств начало подготовку специалистов уранового профиля в ведущих профильных университетах и колледжах. Из-за острого дефицита казахстанских специалистов бурового профиля было создано казахстанско-российское совместное предприятие с целью привлечения российских специалистов, имеющих большой опыт в разведке и подготовке к освоению месторождений пластово-инфильтрационного типа. Между тем предприятие остается единственной в Республике Казахстан компанией, обладающей достаточным опытом и квалификацией

для проведения полного комплекса геологоразведочных и поисковых работ по урану с постановкой запасов на баланс.

В настоящее время предприятие проводит геологоразведочные работы, бурение разведочных и сооружение технологических скважин, а также осуществляет радиологическое сопровождение буровых работ. Кроме того, в состав предприятия входит центральная опытно-методическая экспедиция, деятельность которой направлена на предоставление следующих видов услуг: геологическое и радиоэкологическое сопровождение разведочного бурения; разработка технико-экономических обоснований постоянных кондиций с подсчетом запасов урана на опытных участках и защитой их в ГКЗРК; кодирование и перевод в цифровую форму геолого-геофизической информации по данным скважин и составление базы данных; лабораторные работы по анализу вещественного и химического состава руд.

Входящее в состав предприятия управление производственно-технического обеспечения и комплектации представляет собой крупный производственно-технический комплекс, предназначенный для обеспечения полного технического обслуживания буровых работ, в том числе изготовления буровых установок и бурового инструмента; изготовления жилых и специальных блоков, транспортных универсальных контейнеров и пр.; капитального ремонта геологоразведочного оборудования и спецтехники.

### **Сравнительный анализ зарубежных и казахстанских геологоразведочных компаний (бенчмаркинг)**

Проведенный анализ зарубежных геологоразведочных компаний позволил выявить следующие особенности функционирования. Геологоразведочные работы по урану в мире проводились в основном на ранее открытых объектах. Наиболее активными они были в странах, которые десятилетиями являются крупными поставщиками урана на мировой рынок: Казахстан, Австралия, Канада, Намибия, Россия. Вместе с тем возрождение интереса к атомной энергетике в

последние годы привело к возобновлению ГРР в ряде стран Европы – Швеции, Дании, Финляндии, Венгрии. Кроме того, в таких регионах, как Латинская Америка и Ближний Восток, такие работы были фактически организованы впервые или возобновлены после долгих десятилетий отсутствия активности. Рынок ГРР, в котором участвуют международные компании, в большей степени представлен компаниями из Канады, Австралии, США, Франции [12–16].

1. Rio Tinto Group – австралийско-британский концерн, крупнейшая в мире транснациональная горно-металлургическая компания. Занимается разведкой, добычей и реализацией урана, железной руды, бокситов, глинозема, меди, молибдена, золота, алмазов, угля, титана и др.

2. BHP Billiton – добывает уран, бокситы, уголь, медь, марганец, железную руду, никель, алмазы, серебро и титаносодержащие минералы, а также нефть и природный газ. Добывающие мощности компании сосредоточены в 25 странах, среди которых Австралия, Канада, Чили, Мозамбик, ЮАР, Колумбия, Пакистан, США и др.

3. Росгеология – государственный холдинг, который объединяет практически все государственные предприятия, занимающиеся геологоразведкой на территории РФ. Приоритетным направлением деятельности определено геологическое изучение и выявление ресурсного потенциала перспективных территорий РФ.

4. Paladin Energy Ltd – ориентируется на добычу и производство окиси урана на месторождении Langer Heinrich в Австралии.

5. Korea Resources Corporation (KORES), Южная Корея – государственная компания, обеспечивающая гарантированную поставку шести стратегических минералов (уголь, уран, железо, медь, цинк и никель) для отечественной промышленности, изучает привлекательность новых месторождений за рубежом.

6. Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC) содействует развитию японской индустрии и жизненного уклада населения путем предоставления постоянных поставок ре-

сурсов (нефть, газ и металлы) в страну. Основными направлениями деятельности являются финансовая поддержка японских компаний при разработке месторождений, технологическое развитие и техническая поддержка, создание резервов минеральных ресурсов для экономики страны, сбор и хранение информации, контроль загрязнения окружающей среды, изучение перспективных месторождений за рубежом.

7. Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – французский национальный сервисный оператор, который действует как коммерческая компания на открытом рынке. В результате при сохранении государственного участия достигнута высокая инвестиционная привлекательность геологоразведочных работ. Научный и технический центр находится в Орлеане, Франция, образованы 32 региональных агентства по геологическим исследованиям в 22 регионах Франции и 4 зарубежных представительства. BRGM активен в более чем 40 странах. Стратегические задачи BRGM включают изучение геологоразведочных процессов и сопутствующих рисков, разработку новых методологий и технологий, предоставление высококачественной информации; разработку и предоставление необходимых инструментов поверхностного и подземного исследования, управление ресурсами, предупреждение наступления рисков и загрязнения окружающей среды.

8. Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR) – германский государственный научный центр, подотчетный министерству экономики и технологий и являющийся частью научной и технической инфраструктуры. BGR предоставляет независимую информацию по геологии и минеральным ресурсам; осуществляет консультирование правительства по сохранению поставок энергоресурсов; разрабатывает новые методы перевода месторождений минеральных ресурсов в стадию промышленной добычи, в частности для металлов, используемых в высоких технологиях; разрабатывает научные методы повышения эффективности использования подземных вод; занимается вопросами утилизации радиоактивных

отходов и загрязнения окружающей среды; налаживает международное геологическое сотрудничество; проводит сбор, анализ и хранение геологической информации.

Изучение материалов, доступных в открытых источниках, дает основание полагать, что в мире не существует компаний, аналогичных рассматриваемому предприятию, специализирующихся непосредственно на урановой геологии. Добыча урана в Канаде и Австралии в основном проводится шахтным способом, методом кучного выщелачивания. В связи с этим невозможно провести бенчмаркинг с зарубежными компаниями по таким показателям, как количество пробуренных скважин и себестоимость бурения.

Проведенный анализ функционирования компаний, присутствующих на рынке буровых работ на урановых месторождениях и геологоразведочных работах в Казахстане, позволил сделать следующие выводы. Состояние рынка по сооружению технологических скважин для подземно-скважинного выщелачивания урана и бурения эксплуатационно-разведочных и разведочных скважин оценивается как конкурентное и, следовательно, как нестабильное для предприятия из-за наличия серьезных игроков и возрастающего влияния рыночных механизмов на процесс выбора заказчиками поставщиков работ и услуг [17–19].

Доля предприятия по бурению технологических скважин на данный момент составляет 75–80 %, а по бурению разведочных скважин – 100 %.

На рынке услуг по бурению и сооружению технологических скважин для компании в целом присутствует 8–10 буровых компаний, которые потенциально способны выполнять около 20 % от общего объема буровых работ.

В связи с введением в Казахстане закона о госзакупках Фонда национального благосостояния договорные отношения с заказчиками должны регулироваться рыночными механизмами. При этом компания не имеет возможности контролировать объемы, сроки, ценовую политику, а также качество выполняемых буровых



работ частными компаниями, как это происходит в отношении предприятия, что создает изначально неравные условия для осуществления его деятельности и деятельности буровых компаний на рынке.

При этом данные компании имеют ряд слабых сторон:

- отсутствие собственной производственной и социальной инфраструктуры, обеспечивающей оперативную организацию профилактических и капитальных ремонтов основного и вспомогательного оборудования, а также необходимых для бурения быстроизнашивающихся инструментов и металлических изделий;

- отсутствие стационарных вахтовых поселков для работников, проводящих буровые работы, отрицательно сказывается на темпах проведения буровых работ;

- отсутствие специализированной технологической службы, которая бы оперативно анализировала, реагировала и вносила технологические корректировки при изменении условий бурения;

- отсутствие собственных глинстанций и специалистов-технологов по приготовлению буровых растворов оптимального качества с требуемыми параметрами для сложных условий бурения;

- отсутствие программ подготовки собственных кадров, комплектация буровых установок машинистами и помощниками машинистов буровых установок производится за счет случайных специалистов;

- отсутствие складских резервов товарно-материальных ценностей на месячный срок для бесперебойной работы компаний.

Указанные обстоятельства значительно снижают качество выполнения буровых работ, что в конечном итоге негативно влияет на производительность и стабильность функционирования геотехнологического поля заказчиков и повышает стоимость конечного продукта. Однако отмечается тенденция ежегодного улучшения качества оказываемых частными компаниями услуг.

Кроме того, себестоимость работ у данных компаний ниже, чем у предприятия из-за ряда причин, в том числе отсутствия социальной нагрузки, мобильности и отсутствия социальных обязательств на региональном уровне. Отсутствие требований по закупке материалов с казахстанским содержанием позволяет закупать материалы для ведения работ по наименьшей цене. В Казахстане основной объем геологоразведочных работ выполняют порядка 50 специализированных организаций с низкой инвестиционной привлекательностью.

Существующие на казахстанском рынке геологоразведочных услуг компании не могут обеспечить в полном объеме выполнение всего комплекса геологоразведочных работ. В своей деятельности многие из них специализируются на определенном виде полезных ископаемых: ТПИ, УВС или подземные воды. Наиболее крупные из них, созданные на базе региональных подразделений советского времени (региональные объединения, крупные экспедиции и др.) с соответствующим техническим оснащением, выполняют работы по геологическому изучению недр в традиционных местах дислокации. Каждая из этих компаний занимает определенную нишу на рынке ГРП в Казахстане, но не в состоянии оказывать услуги в объемах, требуемых при дальнейшем росте затрат на ГРП, а также выступать конкурентами более оснащенного предприятия. Полученные результаты сравнительного анализа легли в основу построения матрицы SWOT-анализа предприятия (табл. 1).

### **Разработка механизмов достижения стратегических целей и реализации стратегических задач предприятия**

Проведенные исследования легли в основу разработки механизмов достижения стратегических целей и реализации стратегических задач предприятия. Миссией предприятия является проведение геологоразведочных работ в целях расширения и восполнения ресурсной базы урановой отрасли и твердых полезных ископаемых в Республике Казахстан.



Таблица 1

**SWOT-анализ деятельности геологоразведочного предприятия****SWOT analysis of the activities of an exploration company**

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Сильные стороны</b></p> <p>Компания является геологоразведочным предприятием с давними традициями, открывшим месторождения урана мирового значения.</p> <p>Имеется огромный опыт проведения буровых работ в различных горно-геологических условиях.</p> <p>Компания является крупнейшим игроком на рынке сооружения технологических скважин для предприятий урановой отрасли в Республике Казахстан.</p> <p>Компания имеет возможность предоставления полного комплекса геологоразведочных услуг по всем видам и стадиям геологоразведочных работ (от проектирования до составления отчета с подсчетом запасов и постановкой их на государственный баланс).</p> <p>Наличие у компании территориально распределенной производственной инфраструктуры.</p> <p>Наличие квалифицированных кадров.</p> <p>Разработка своих и использование новых технологий в геологической и горнодобывающей отрасли.</p> <p>Проведение научно-исследовательских работ на регулярной основе</p> | <p><b>Возможности</b></p> <p>Обучение имеющихся кадров и студентов.</p> <p>Привлечение специалистов со всех областей Казахстана и ближнего зарубежья за счет повышения заработной платы в результате повышения производительности, улучшения социальных условий.</p> <p>Наличие спроса на проведение полного цикла геологоразведочных работ по всем видам полезных ископаемых, не только по урану.</p> <p>Растущий спрос на минерально-сырьевые ресурсы во всем мире.</p> <p>Намерение государства увеличивать расходы на проведение геологоразведочных работ.</p> <p>Необходимость обеспечения стратегически важными ресурсами для нужд экономики страны</p> |
| <p><b>Слабые стороны</b></p> <p>Нехватка опытных специалистов геологического профиля.</p> <p>Недостаточность собственных средств на формирование полной материально-технической базы.</p> <p>Нехватка бурового оборудования.</p> <p>Устаревание станков для ГРП на уран – требуется дорогостоящая модернизация и техническое перевооружение</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | <p><b>Угрозы</b></p> <p>Удорожание стоимости 1 пог. м сооружения технологических скважин.</p> <p>Ухудшение конъюнктуры на рынке минерально-сырьевых ресурсов.</p> <p>Экономический кризис.</p> <p>Истощение минерально-сырьевой базы РК.</p> <p>Расширяющееся ограничение (вплоть до запрета) участия государства в секторах экономики, где присутствует частный бизнес</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

**Разработка механизмов достижения стратегических целей и реализации стратегических задач предприятия**

Проведенные исследования легли в основу разработки механизмов достижения стратегических целей и реализации стратегических задач предприятия. Миссией предприятия является проведение геологоразведочных работ в целях расширения и восполнения ресурсной базы урановой отрасли и твердых полезных ископаемых в Республике Казахстан.

**Видение предприятия к 2025 г. – современная ведущая геологоразведочная компания** в Республике Казахстан, обладающая передовыми технологиями и осуществляющая полный комплекс геологоразведочных работ высокого качества по всем видам твердых полезных иско-

паемых в соответствии с мировыми стандартами, являющаяся центром компетенции в урановой геологии, а также представляющая свои услуги в геологоразведочных работах по твердым полезным ископаемым.

На период до 2025 г. предприятие стремится к достижению следующих стратегических целей: 1) увеличение экономической добавленной стоимости компании; 2) обеспечение растущих потребностей добычных предприятий в структуре компании путем восполнения ресурсной базы урана [20–22].

Для достижения указанных стратегических целей предприятие определяет следующие стратегические задачи.

Для достижения 1-й стратегической цели и соответственно устойчивого роста ключевых показателей деятельности предприятия необходима

нацеленность на долгосрочную успешную работу. Кроме того, необходимо провести соответствующую реструктуризацию компании. В связи с этим определены следующие стратегические задачи: реструктуризация активов и диверсификация направлений деятельности предприятия; развитие передовых и инновационных методов и технических средств для поисковых работ и лабораторно-технологических исследований; реконструкция и перевооружение технической и совершенствование методической базы химико-аналитической лаборатории; создание и сопровождение электронного банка данных геологической информации по месторождениям и рудопроявлениям; совершенствование комплекса радиоэкологических исследований на разведочных участках геологоразведочных работ; внедрение принципов корпоративной и правовой культуры [23, 24].

Для достижения 2-й стратегической цели определены следующие стратегические задачи: проведение разведочных работ; поиск и открытие новых месторождений урана; формирование штата профессиональных и высокоэффективных кадров [25].

В соответствии с поставленными стратегическими задачами необходимо активизировать и повысить качество геологоразведочных работ, провести диверсификацию деятельности компании, что позволит понизить возможные риски, повысить эффективность производства и соответственно получить экономическую выгоду. Помимо этого, полный комплекс геологоразведочных работ высокого качества предполагает наличие современной хорошо оснащенной лаборатории для проведения соответствующих исследований со специалистами высокого уровня. В целях достижения стратегических целей предприятия необходимо успешно действовать на основе практического опыта, умения и знаний при решении стратегических задач, оптимизировать все виды затрат и качественно повысить уровень управления компании [26, 27].

В связи с этим для достижения целей предприятия намечены соответствующие стратегические задачи, решение которых будет осуществляться при помощи нижеуказанных механизмов.

Решение стратегической задачи по реструктуризации активов предприятия предполагает построение эффективной структуры компании. В целях оптимизации бизнес-процессов, исключения непрофильных активов и дальнейшего развития геологоразведочной деятельности работа по реструктуризации будет проводиться по следующим направлениям: интеграция в структуру предприятия профильных компаний; продажа части непрофильных активов и вывод из структуры предприятия бизнес-процесса по сооружению технологических скважин.

Для качественного проведения полного цикла работ на предприятии реализована процедура интеграции с компаниями, осуществляющими следующие виды деятельности: составление годовых проектов планов горных работ по эксплуатируемым месторождениям урана, их согласование и утверждение; разработка горной части проектов на промышленную отработку новых месторождений урана; проведение комплекса геофизических исследований на месторождениях урана; разработка и внедрение специализированного геофизического оборудования для подземного скважинного выщелачивания урана и соответствующих методик интерпретации данных геофизических исследований скважин. Целью интеграции являлось создание полного цикла геологоразведочных работ, контроль методики проведения измерений и подсчета линейных запасов, а также повышение ответственности за проведение геологоразведочных работ. В результате проведенной работы будет достигнута независимость контроля качества процесса бурения результатами ГИС технологических скважин, обеспечено четкое взаимодействие буровой и каротажной служб; услуги ГИС охватят поисковые, разведочные, горно-подготовительные работы, а также будут задействованы в процессе добычи урана (контроль технического состояния скважин). Услуги ГИС будут обеспечены современным оборудованием и оптимальной ремонтной базой для его обслуживания и стоимость услуг ГИС возможно оптимизировать [28–30].

В результате интеграции предприятие стало оказывать полный цикл геологоразведочных услуг, включающий геофизические исследования скважин, что позволит повысить достоверность полученных результатов геологоразведочных работ.

Продажа непрофильных активов будет реализована в целях исключения низкорентабельного бизнеса из структуры предприятия, а также в связи с постоянными отрицательными экономическими показателями и негативным влиянием на стоимость компании.

Вывод из структуры предприятия бизнес-процесса по сооружению технологических скважин заключается в следующем. В рамках программы трансформации компании по увеличению экономической стоимости компании (увеличение EVA) необходимо найти оптимальные пути достижения положительных показателей EVA и положительного влияния на показатели компании. Согласно проведенным исследованиям было сделано заключение, что монополизировать рынок по сооружению технологических скважин (технологическое бурение) невозможно. На рынке присутствует множество частных компаний, выполняющих работы по технологическому бурению. В связи с этим представляется возможность выведения бизнес-процесса по сооружению технологических скважин в конкурентную среду путем создания дочерних буровых компаний на базе филиалов с дальнейшей частичной реализации их внешнему инвестору.

Положительные стороны данного предложения: полное сохранение материальной базы всех филиалов; отсутствие необходимости сокращения персонала филиалов; возможность заключения добычными предприятиями договоров на сооружение технологических скважин с вновь созданными юридическими лицами способом из одного источника в рамках внутрихолдинговой кооперации; возможность передачи вновь созданным юридическим лицам обязательств предприятия по уже заключенным долгосрочным договорам

путем оформления договоров переуступки; в результате реализации доли предприятия в созданных буровых компаниях в частные руки на рынке технологического бурения скважин появятся «сильные» игроки в этой сфере бизнеса, присутствие которых позволит поддерживать на данном рынке нормальную конкурентную среду и исключить со стороны других, более «слабых» игроков манипуляции с тарифообразованием.

В результате проведения мероприятий по реструктуризации поэтапно количество дочерних организаций будет доведено до нуля; будут полностью отсутствовать непрофильные организации (100%-е сокращение). При этом прогнозируется улучшение финансово-экономических показателей предприятия.

Для решения стратегической задачи по диверсификации деятельности будет проводиться расширение сферы деятельности по геологоразведочным работам на месторождениях твердых полезных ископаемых. Материально-техническая база, кадровый состав и опыт в геологоразведке позволяют выполнять подобные работы с широким применением колонкового бурения и высокопроизводительного импортного оборудования. Анализ потребностей компаний-недропользователей по твердым полезным ископаемым в Казахстане показал, что 107 частных компаний готовы рассмотреть предложения по сотрудничеству. Из них 63 месторождения золота, 19 месторождений меди, 8 месторождений никеля, 17 месторождений полиметаллов и других полезных ископаемых. Изучается возможность оказания услуг по геологоразведке в других странах (Узбекистан, Кыргызстан, Китайская Народная Республика, Монголия). Проведение геологоразведочных работ по твердым полезным ископаемым позволит получить дополнительный доход в размере 3–4 млрд тенге в год. Для проведения полного комплекса геологоразведочных работ по другим твердым полезным ископаемым у предприятия имеются все возможности (буровая и вспомогательная техника, производственно-ремонтные

базы, химико-аналитическая лаборатория, квалифицированные специалисты, необходимые лицензии на проектирование и проведение технологических работ и т.д.) [31].

Решение стратегической задачи развития передовых и инновационных методов и технических средств для поисковых работ необходимо для повышения качества предоставляемых услуг, эффективного прогнозирования и выявления месторождений урана и других твердых полезных ископаемых на основе современных и инновационных наземных методов поиска, для опережающих наземных методов поиска посредством дистанционного зондирования земли. Также необходимо предусмотреть финансирование проекта по созданию лаборатории для моделирования технологических процессов буровой скважины и испытания новых видов технических средств.

Реализация в рамках стратегической задачи реконструкции и перевооружения методической и технической базы химико-аналитической лаборатории – одна из наиболее важных задач в достижении цели по увеличению экономической стоимости компании. В рамках выполнения задачи по укреплению научного обеспечения основных производств и решения комплексных задач, связанных с поиском, разведкой и эксплуатацией урановых месторождений, необходимо создание современной аналитической службы, отвечающей мировым стандартам, способствующей открытию новых месторождений и расширению минерально-сырьевой базы [32, 33].

В связи с этим будут реализованы следующие проекты: реконструкция и перевооружение методической и технической базы химико-аналитической лаборатории с целью применения минералогических и радиоизотопных методов поиска месторождений урана и твердых полезных ископаемых; проведение работ по расширению области аккредитации (проведение аналитических работ, технологических исследований, изучение вещественного состава рудовмещающих пород и руд

(минералогия и петрография), экологические исследования, подготовка специалистов для полевых лабораторий и повышение квалификации аналитиков добывающих предприятий). Реализация данного комплекса мероприятий позволит решать проблемы, связанные с поиском, разведкой и эксплуатацией урановых месторождений и месторождений ТПИ на более высоком качественном уровне и в кратчайшие сроки.

Создание информационной системы геологического банка данных позволит организовать единое информационное пространство и обеспечит получение достоверных и необходимых данных, а также их сохранность и разграничение доступа. Данная стратегическая задача предполагает проведение достаточно объемной работы, что в конечном итоге даст хорошие возможности как для акционера, так и для потенциальных инвесторов. В задачи геологического банка данных будет входить создание электронного архива геологических документов; обеспечение долговременной сохранности подлинников геологической информации (геологические отчеты, протоколы, изданные карты, паспорта и др.) за счет предоставления пользователям электронных копий этих документов взамен бумажных оригиналов; сохранение информации об объектах в случае утраты или неустраняемых повреждений оригиналов; обеспечение быстрого доступа к фондовым материалам как в локальном режиме, так и в режиме удаленного доступа; обеспечение быстрого поиска по комплексным запросам по геологии и недропользованию; возможность создания резервных (страховых) копий фондовых документов; предоставление информации в удобном для потребителя виде.

Приведенный перечень работ будет обеспечивать поддержку геологического банка данных, который будет постоянно дополняться необходимыми данными. В результате реализации проекта для акционера будет обеспечен постоянный мониторинг деятельности предприятий в сфере недропользования,



для потенциального инвестора – прозрачность, открытость и оперативность получения права недропользования, а для ученых и исследователей – обширный доступ к полной информации о недрах и недропользовании Республики Казахстан.

Решение стратегической задачи по совершенствованию комплекса радиоэкологических исследований на разведочных участках геологоразведочных работ возможно следующим образом. С возобновлением и расширением разведочных работ будет проводиться комплекс радиоэкологических исследований, необходимый как для обеспечения радиационной и экологической безопасности при ведении ГРР, так и для получения необходимых и достаточных радиоэкологических данных для разработки ТЭО и последующих проектов добычи урана. С возрастанием роли экологии в деятельности каждого предприятия необходима разработка нормативов эмиссий и природоохранных мероприятий на весь жизненный цикл ведения ГРР: создание службы радиационной и экологической безопасности для проведения производственного экологического контроля, включая радиационный контроль, отбор проб окружающей среды; сооружение мест сбора отходов с последующим их размещением на полигонах захоронения; предполетная подготовка, включающая приобретение и дешифрирование космоснимков; радиоэкологическое обследование с изучением почвенных разрезов, отбором проб ОС; оценка воздействия ГРР на окружающую среду с разработкой мероприятий по рекультивации нарушенных земель ГРР; составление отчета с представлением параметров ОС для последующих этапов ГРР, ТЭО и добычи урана.

В комплекс ГРР традиционно включаются дистанционные методы зондирования с привлечением геофизических материалов, полученных структурными методами геофизики в прошлые годы [34, 35]. Для этого будет выполняться следующий комплекс работ: приобретение программных средств для комплекс-

ной обработки цифровых данных космоснимков и геолого-геофизических материалов прошлых лет; разработка и внедрение современных методов ГРР; проведение геофизических методов исследования.

Высокий уровень корпоративной культуры является важным стратегическим фактором, мобилизующим все структурные звенья корпорации и ее отдельных работников на достижение поставленных целей в рамках продекларированной миссии компании. Для внедрения принципов корпоративной и правовой культуры необходима реализация следующих мероприятий: формирование корпоративных ценностей и регламентации стандартов поведения работников через Кодекс корпоративной этики и другие внутренние документы; внедрение стиля управления руководящего состава, создающего благоприятную атмосферу в коллективе и повышающего приверженность работников корпоративным ценностям; развитие внутренних коммуникаций и взаимодействий, системы обратной связи, усиливающих командную работу и способствующих реализации стратегии общества; постоянное улучшение взаимодействия с органами управления общества и акционерами, в том числе путем предоставления максимально полной и проработанной информации для принятия обоснованных и взвешенных решений; соблюдение законности при осуществлении деятельности общества в целом и принятии отдельных управленческих решений на всех уровнях; развитие правосознания как неотъемлемой составной части профессиональных компетенций каждого работника общества, в том числе посредством обучения работников общества по вопросам права; постоянное стремление к минимизации правовых рисков общества как необходимое условие для осуществления его деятельности.

В качестве основных механизмов достижения 2-й стратегической цели «Обеспечение растущих потребностей добычных предприятий в структуре компании путем восполнения

ресурсной базы урана» необходима реализация следующих задач.

Требуется проведение геологоразведочных работ на перспективных площадях с целью открытия новых месторождений и соответственно прироста и восполнения запасов урана и увеличения активов компании. Также проведение поисково-оценочных работ к 2025 г. позволит продлить срок службы рудников компании до 2040 г. за счет прироста доразведанных запасов. В связи с этим стратегическая задача проведения разведочных работ предполагает проведение разведочных работ в целях восполнения ресурсной базы урана.

Реализация стратегической задачи поиска и открытия новых месторождений урана позволит значительно увеличить добычу урана на месторождениях урановорудных провинций, что уже в ближайшем будущем неизбежно приведет к истощению урановой сырьевой базы Казахстана, вследствие чего возникает вопрос о ее возобновлении. В настоящем исследовании представлены перспективы и основные направления развития урановой сырьевой базы в свете возобновления и организации поисковых и поисково-оценочных работ по урану как на совершенно новых площадях, так и на участках, по сути, являющихся дальними флангами уже известных месторождений. Однако истощение запасов месторождений, а также включение в отработку бедных по содержанию урана, а потому низкорентабельных залежей этих месторождений, требует скорейшего обеспечения минеральными ресурсами рудников подземного выщелачивания.

Успех реализации стратегии предприятия зависит от признания высокой экономической значимости человеческих ресурсов на всех уровнях управления компанией как важной составляющей ее стратегического потенциала. Стратегическая задача по формированию штата профессиональных и высокоэффективных кадров – это часть реализации кадровой политики, которая включает реализацию следующих мероприятий.

Развитие профессионального кадрового состава. Специфика производственной деятельности требует привлечения профессионалов с большим опытом работы в сфере геологоразведочных работ и возможности передачи знаний и опыта молодым специалистам. Необходимо уделить действенное внимание подготовке, подбору и найму специалистов, необходимых для обеспечения выполнения утвержденных объемов работ: буровиков, геологов, геофизиков и соответствующих научных сотрудников.

Потребность в человеческих ресурсах будет регулироваться в соответствии с производственной программой общества. В случае увеличения объемов ГРП и количества приобретаемого оборудования штатная численность производственного и административного персонала будет увеличиваться в соответствии с потребностями. В связи с этим будут проводиться следующие мероприятия [36]:

– привлечение работающих профессионалов на рынке ГРП через создание системы вознаграждения и мотивации, а также предоставление социального пакета работникам на конкурентоспособном уровне. Будет уделено особое внимание вопросам создания качественных и комфортных условий труда и требуемого уровня безопасности работников. Такой подход позволит заинтересовать и удерживать опытных специалистов в области ГРП;

– создание системы наставничества для решения проблем нехватки и качественной подготовки опытных технических кадров. Для этих целей необходимо разработать программу практической подготовки молодых специалистов-геологов. Программа будет включать оценку молодых специалистов по результатам стажировки, на основе которой будет применяться система мотивации и поощрения для наставников-геологов;

– разработка эффективной системы подбора кадров, включающей планирование потребности в человеческих ресурсах, своевре-

менный подбор и прием специалистов соответствующей квалификации с необходимыми знаниями, навыками, деловыми и личностными качествами;

–совершенствование системы мотивации и повышения эффективности труда. Разработка системы мотивации, основанной на следующих принципах:

- ✓ увязка системы мотивации с политической оценки результатов деятельности на основе ключевых показателей, что позволит повысить эффективность труда, на основе мониторинга достижения стратегических целей и выполнения задач принимать своевременные корректирующие решения; оценка результативности каждого работника будет напрямую зависеть от выполнения конкретных задач и индивидуальных целей;
- ✓ повышение уровня профессиональных знаний и навыков работников, отвечающих интересам и потребностям общества, что позволит улучшить качество человеческих ресурсов;
- ✓ реализация системы кадрового резерва, направленного на эффективное использование кадрового потенциала и планирование карьерного роста сотрудников;
- ✓ развитие управленческих компетенций и лидерского потенциала руководящих работников, как залог максимизации долгосрочной стоимости Общества.

Мероприятия по решению поставленных стратегических задач предполагают дальнейшее проведение и улучшение работ по обеспечению требований техники безопасности, соблюдению мер радиационной безопасности и охраны окружающей среды. Наряду с этим предусматривается ряд мер в целях обеспечения устойчивого развития предприятия путем снижения энергоемкости при выполнении работ и предоставлении услуг и, как следствие, рост конкурентоспособности, финансовой

устойчивости, энергетической и экологической безопасности.

Создание здоровых и безопасных условий труда на предприятии ведется в соответствии с Экологическим кодексом РК и другими нормативно-правовыми документами, правилами и требованиями.

Целью управления охраной труда является обеспечение безопасности жизни и здоровья работников предприятия, обусловленных воздействием производственных опасных факторов на людей и среду их обитания. Задачи в этой области носят многоплановый характер и дифференцируются по следующим направлениям обеспечения производственных процессов: экологизация технологий; оздоровление производственной среды; обучение персонала безопасным методам работы; соблюдение законодательных актов в области ОТ и ТБ, РБ и ООС. Все это достигается реализацией конкретных мероприятий правового, организационного, технического, санитарно-гигиенического, лечебно-профилактического и социально-экономического характера.

Приоритетными направлениями и наиболее важными мероприятиями для предприятия на период до 2025 г. являются актуализация нормативно-технической документации в свете новых законов РК, директивных документов и положений; актуализация существующей системы управления охраны труда (СУОТ) и поддержание ее в соответствии с международными стандартами ISO и OHSAS; постоянная корректировка существующих на предприятии инструкций по безопасности по всем видам работ и специальностям в соответствии с появляющимися изменениями в требованиях по их разработке; ужесточение ответственности по охране труда в должностных инструкциях инженерно-технических, административных и руководящих работников общества согласно их управленческим функциям; проведение аттестации производственных объектов по условиям труда в установленные законодательством сроки; уменьшение степени риска выхода из строя техники и

оборудования; постоянное обучение, повышение квалификации, переподготовка работников общества.

Действенное использование системы классического управления охраной труда: анализ – оценка – планирование – организация – контроль – мотивация (стимулирование), является гарантом претворения данных планов в действие.

Основными задачами решения радиационной безопасности и охраны окружающей среды предприятия являются приведенные ниже.

Политикой акционерного общества в области обеспечения качества радиационной безопасности и охраны окружающей среды при ведении работ является гарантия безопасности персонала, населения и отсутствия вредного воздействия на окружающую среду и устанавливаются следующие приоритеты: не превышение допустимых пределов индивидуальных доз облучения; запрещение всех видов деятельности, связанных с использованием радиоактивных веществ, при которых полученная для человека, общества и природы польза не превышает риск возможного вреда, причиненного дополнительным облучением; обязательное повышение качества обеспечения радиационной безопасности персонала; расширение номенклатуры радиационного контроля.

Ключевым направлением программы энергосбережения и повышения энергоэффективности предприятия является обеспечение устойчивого развития путем снижения энергоемкости при выполнении работ и предоставлении услуг и, как следствие, роста конкурентоспособности, финансовой устойчивости, энергетической и экологической безопасности. Внедрение данной программы позволит снизить или предотвратить рост расхода всех видов ТЭР, используемых на собственные и хозяйственные нужды. Будут разработаны и внедрены механизмы, стимулирующие энергосбережение и повышение энергоэффективности. В дальнейшем будет сформирована си-

стема управления энергосбережением и повышением энергетической эффективности посредством внедрения системы энергетического менеджмента. Доля энергетических затрат в структуре себестоимости предоставляемых услуг снизится, что обеспечит повышение конкурентоспособности и энергетической безопасности. Дальнейшее развитие программы энергосбережения потребует подготовки специалистов, а также создания интегрированной информационной системы в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности.

При разработке вышеизложенных мероприятий и мер достижения поставленных стратегических целей были оценены риски, которые могут негативно повлиять на реализацию стратегических задач. Цель дальнейшего развития системы управления рисками – минимизация вероятности наступления негативного события (риска), влияющего на достижение стратегических и операционных целей предприятия.

На основе проведенного анализа сформулированы стратегические риски предприятия: недополучение чистого дохода, предусмотренного планом развития общества на календарный год; несанкционированные забастовки работников, местного населения в местах дислокации структурных подразделений общества.

В связи с этим необходимо реализовать комплекс следующих мероприятий: совершенствование методологии по СУР и СВК в соответствии с международными стандартами COSO и ISO; совершенствование процессов управления СУР и СВК; повышение квалификации риск-менеджеров, владельцев рисков, наличие международных сертификатов; автоматизация системы управления рисками.

### **Выводы**

Таким образом, результаты проведенных исследований позволяют отметить, что на период до 2025 г. предприятие стремится к достижению следующих стратегических целей: 1) увеличение экономической добавленной



стоимости компании; 2) обеспечение растущих потребностей добычных предприятий в структуре компании путем восполнения ресурсной базы урана.

Для достижения 1-й стратегической цели будут реализованы следующие стратегические задачи: реструктуризация активов; диверсификация направлений деятельности; развитие передовых и инновационных методов и технических средств для поисковых работ и лабораторно-технологических исследований; реконструкция и перевооружение технической и совершенствование методической базы химико-аналитической лаборатории; создание и сопровождение электронного банка данных геологической информации по месторождениям и рудопроявлениям; совершенствование комплекса радиоэкологических исследований на разведочных участках геологоразведочных работ; внедрение принципов корпоративной и правовой культуры.

Круг задач для достижения 2-й стратегической цели обеспечения растущих потребно-

стей добычных предприятий в структуре компании путем восполнения ресурсной базы урана следующий: проведение разведочных работ; поиск и открытие новых месторождений урана; формирование штата профессиональных и высокоэффективных кадров.

Перечисленные выше мероприятия по достижению цели и решению поставленных стратегических задач компании в долгосрочном периоде приведут к следующим результатам. Вывод из структуры бизнеса процесса сооружения технологических скважин снизит доходы предприятия. Тем не менее планируется, что в результате только геологоразведочных, поисковых работ и ГИС будет наблюдаться стабильность в основных финансовых показателях. Кроме того, показатель EVA будет иметь тенденцию к росту, а показатель ROE будет держаться на уровне 16–17 %. Рост чистого дохода, несмотря на уменьшение выручки, в 2020 г. составит 186 % и достигнет 226 % в 2025 г.

### Библиографический список

1. U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> Production Review. *Ux Weekly*. 2010;22(10).
2. Woods P., Pool T., Beneš V., Gorbatenko O., Jones B., Märten H., Solodov I., Slezak J. International overview of ISL uranium mining operations. In: *International Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environmental Issues (URAM-2014)*. 23–27 June 2014. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2014. P. 138.
3. Назарова З. М., Овсейчук В. А., Лементы О. Ю. Рынок урана: современное состояние, проблемы и перспективы его развития. *Проблемы современной экономики*. 2016;2:159-162.
4. Святецкий В. С., Солодов И. Н. Стратегия технологического развития уранодобывающей отрасли России. *Горный журнал*. 2015;7:68–77. DOI: [10.17580/gzh.2015.07.10](https://doi.org/10.17580/gzh.2015.07.10)
5. Derek M. Insight: Uranium is in a holding pattern. *Commodity Insights Bulletin*. 2015. 8 p.
6. Arnold N., Gufler K. The future of Nuclear Fuel Supply. In: *Proceedings of the 1<sup>st</sup> INRAG Conference on Nuclear Risk*. 16–17 April 2015. Vienna: University of Natural Resources and Life Sciences in Vienna; 2015. P. 1-27.
7. The Global Nuclear Fuel Market. *Supply and Demand 2011–2030*. WNA report; 2011. 236 p.
8. Polack C. Uranium exploration (2004–2014): New discoveries, new resources. In: *International Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environmental Issues (URAM-2014)*. 23–27 June 2014. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2014. P. 8–9.
9. Рогов Е. И., Языков В. Г., Рогов А. Е. Оптимизация подготовленных и готовых к выемке запасов на рудниках подземного скважинного выщелачивания урана. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. МГУ. 2002;4:149-150.
10. Живов В. Л., Бойцов А. В., Шумилин М. В. *Уран: геология, добыча, экономика*. М.: Атомредметзолото; 2012. 301 с.
11. Постановление Правительства Республики Казахстан от 20.08.2002 № 926 «О концепции развития урановой промышленности и атомной энергетики Республики Казахстан на 2002–2030 годы».

12. Khawassek Y. M., Taha M. H., Eliwa A. A. Kinetics of Leaching Process Using Sulfuric Acid for Sella Uranium Ore Material, South Eastern Desert. *Egypt International Journal of Nuclear Energy Science and Engineering*. 2016;6:62–73.
13. Yurtaev A., Golovko V. Prospects of block underground leaching application on Streltsovskoe field deposits. In: *International Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environmental Issues (URAM-2014)*. 23–27 June 2014. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2014. P. 172.
14. Joint A. *Uranium Resources, Production and Demand International: Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency*. Boulogne-Billancourt France. Organisation for economic cooperation and development; 2018. 462 p.
15. Saleh Ahmed, Fathi Elldakli, Phillip Mcelroy. *Simulation techniques used for modeling horizontal wells and the role of grid refinement*. 2019.
16. Solodov I. N. In Situ Leach Mining of Uranium in the Permafrost Zone, Khiagda Mine, Russian Federation. In: *URAM-2014. IAEA. International Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environment issues*. Vienna, Austria 23–27 June; 2014.
17. Юсупов Х. А., Джакупов Д. А., Назарбаева Н. А. Выбор схемы и параметров скважин технологического блока. *Международная научно-практическая конференция «Научное и кадровое сопровождение инновационного развития горно-металлургического комплекса»*. Алматы; 2017. С. 168–170.
18. Голик В. И., Заалишвили В. Б., Габараев О. З. Геофизическое обеспечение технологий выщелачивания урана. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2014;7:112–121.
19. Молчанов А. А., Демехов Ю. В. Повышение эффективности добычи урана из месторождений гидротермального типа, разрабатываемых методом подземного скважинного выщелачивания Республики Казахстан (на примере месторождения восточный Мынкудук). *Актуальные проблемы урановой промышленности. VII международная конференция*: Сб. науч. работ. Алматы: НАК Казатомпром; 2014. С. 92–98.
20. Минцберг Г., Альстрэнд Б., Лэмпел Дж. *Школы стратегий*: Пер. с англ. под ред. Ю.Н. Каптуревского. СПб.: Питер; 2011. 336 с.
21. Хорин А. Н., Керимов В. Э. *Стратегический анализ*: Учеб. пособие. М.: Эксмо; 2012. 288 с.
22. Ковени Майкл, Гэнстер Деннис, Хартлен Брайан, Кинг Дейв. *Стратегический разрыв: Технологии воплощения корпоративной стратегии в жизнь*: Пер. с англ. М.: Альпина Бизнес Букс; 2011. 232 с.
23. Брылин В. И. Технология бурения и оборудование эксплуатационных скважин при отработке месторождений урана методом подземного выщелачивания: Учеб. пособие. Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Томского политехнического университета; 2010. 211 с.
24. Гержберг Ю. М., Кузнецов Н. И., Киршин В. И., Кулигин А. В. Научные основы и современная технология безориентированного регулирования трассы скважины. М.: ООО «ИРЦ Газпром». 2008;2. 45 с.
25. Диева Н. Н., Вольпин С. Г., Корнаева Д. А., Штейнберг Ю. М. Повышение информативности исследований скважин, работающих при забойном давлении ниже давления насыщения, методом установившихся отборов. *Бурение и нефть*. 2014;1:41–46.
26. Коротченко А.Н., Земляной А.А. Система регистрации параметров закачиваемых в скважину жидкостей. *Бурение и нефть*. 2013;1:49–50.
27. Сушко С. М., Бегун А. Д., Федоров Б. В., Касенов А. К., Дауренбеков С. Д. *Методика сооружения скважин для разведки и добычи урана методом ПСВ*. Алматы: АО НАК «Казатомпром», ТОО «Институт высоких технологий»; 2007. 178 с.
28. Шумилин М. В. и др. *Разведка месторождений урана для отработки методом подземного выщелачивания*. М.: Недра, 1985. 208 с.
29. Ракишев Б. Р., Федоров Б. В. *Техника и технология сооружения геотехнологических скважин*. Алматы; 2013. 260 с.
30. Рогов Е. И., Язиков В. Г., Рогов А. Е. Оптимизация схем и параметров проектирования сети технологических скважин при ПСВ металлов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. МГТУ. 2001;9:35–37.
31. Самсонов Б. Г. Основы объектного мониторинга геологической среды на предприятиях по разведке, добыче и использованию атомного сырья. М.: Центр содействия социально-экологическим инициативам атомной отрасли; 2010. 120 с.
32. Гержберг Ю. М. Бурение ступенчатым стволом как средство ограничения искривления скважины. *Бурение и нефть*. 2013;6:28–31.

33. Цуприков Л. А. Определение параметров модели механической скорости бурения методом наименьших квадратов. *Телекоммуникационные и информационные системы*. Тр. междунар. конф. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та; 2007. С. 274–276.

34. Носков М. Д., Кеслер А. Г., Теровская Т. С., Бабкин А. С., Посохова Е. М. Экологический мониторинг и прогнозирование состояния недр при добыче урана в ЗАО «Далур». *Роговские чтения: проблемы инженерной геологии, гидрогеологии и геоэкологии урбанизированных территорий*: Сб. тр. конф., 7–9 апреля 2015 г. Томск: Изд-во Томского государственного архитектурно-строительного университета; 2015. С. 208–211.

35. Поезжаев И. П., Полиновский К. Д., Горбатенко О. А. и др. *Геотехнология урана*: Учеб. Пособие. Под общ. ред. Ю.В. Демехова, Б.М. Ибраева. Алматы; 2017. 327 с.

36. Кибанов А. Я., Захаров Д. К. *Формирование системы управления персоналом на предприятии*. М.: Дело, 2012. 315 с.

## References

1. U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> Production Review. *Ux Weekly*. 2010;22(10).
2. Woods P., Pool T., Beneš V., Gorbatenko O., Jones B., Märten H., Solodov I., Slezak J. International overview of ISL uranium mining operations. In: *International Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environmental Issues (URAM-2014)*. 23–27 June 2014. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2014. P. 138.
3. Nazarova Z. M., Ovseychuk V. A., Lementa O. Yu. Uranium market: current state, problems and prospects of development. *Problems of modern economics*. 2016;2:159–162. (In Russ.)
4. Svyatetskiy V. S., Solodov I. N. The strategy of technological development of uranium mining industry of Russia. *Mining Journal*. 2015, No. 7, 2015;7:68–77. DOI: [10.17580/gzh.2015.07.10](https://doi.org/10.17580/gzh.2015.07.10) (In Russ.)
5. Derek M. Insight: Uranium is in a holding pattern. *Commodity Insights Bulletin*. 2015. 8 p.
6. Arnold N., Gufler K. The future of Nuclear Fuel Supply. In: *Proceedings of the 1<sup>st</sup> INRAG Conference on Nuclear Risk*. 16–17 April 2015. Vienna: University of Natural Resources and Life Sciences in Vienna; 2015. P. 1–27.
7. The Global Nuclear Fuel Market. *Supply and Demand 2011–2030*. WNA report; 2011. 236 p.
8. Polack C. Uranium exploration (2004–2014): New discoveries, new resources. In: *International Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environmental Issues (URAM-2014)*. 23–27 June 2014. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2014. P. 8–9.
9. Rogov E. I. *Optimization of prepared for extraction reserves at uranium drillhole in-situ leaching mines*. Mining Information and Analytical Bulletin. MGGU Publishing House. 2002;4:149–150. (In Russ.)
10. Zhivov V. L., Boytsov A. V., Shumilin M. V. *Uranium: geology, mining, economics*. Moscow: Atomred-metizoloto; 2012. 301 p.
11. Decree of the Government of the Republic of Kazakhstan No. 926 of 20.08.2002 “On the concept for development of uranium industry and nuclear power industry of the Republic of Kazakhstan for 2002–2030”.
12. Khawassek Y. M., Taha M. H., Eliwa A. A. Kinetics of Leaching Process Using Sulfuric Acid for Sella Uranium Ore Material, South Eastern Desert. *Egypt International Journal of Nuclear Energy Science and Engineering*. 2016;6:62–73.
13. Yurtaev A., Golovko V. Prospects of block underground leaching application on Streltsovskoe field deposits. In: *International Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environmental Issues (URAM-2014)*. 23–27 June 2014. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2014. P. 172.
14. Joint A. *Uranium Resources, Production and Demand International: Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency*. Boulogne-Billancourt France. Organisation for economic cooperation and development; 2018. 462 p.
15. Saleh Ahmed, Fathi Elldakli, Phillip Mcelroy. *Simulation techniques used for modeling horizontal wells and the role of grid refinement*. 2019.
16. Solodov I. N. In Situ Leach Mining of Uranium in the Permafrost Zone, Khiagda Mine, Russian Federation. In: *URAM-2014. IAEA. International Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environment issues*. Vienna, Austria 23–27 June; 2014.
17. Yusupov H. A., Dzhabupov D. A., Nazarbayeva N. A. Selection of arrangement and parameters of a production block boreholes. In: *International research-to-practice conference "Scientific and personnel support of innovative development of mining-and-metallurgical industry"*. Almaty; 2017. P. 168–170. (In Russ.)
18. Golik V. I., Zaalishvili V. B., Gabaraev O. Z. Geophysical support of uranium leaching processes. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2014;7:112–121 (In Russ.)



19. Molchanov A. A., Demekhov Yu. V. Improving efficiency of uranium ISL production from deposits of hydro-genic type in the Republic of Kazakhstan (case study of the Vostochny Mynkuduk deposit). In: *Actual problems of ura-nium industry. Proceedings of VII International Conference*. Almaty, NAC Kazatomprom; 2014. P. 92–98 (In Russ.).
20. Minzberg G., Alstrand B., Lampel J. *Schools of strategy*. Translated from English, under the editorship of Kapturevsky Yu. N. St-P.: Piter Publ.; 2011. 336 p. (In Russ.).
21. Khorin A. N., Kerimov V. E. Strategic analysis. Manual for graduate students. Moscow: Eksmo; 2012. 288 p. (In Russ.).
22. Coveney Michael, Genster Dennis, Hartlen Brian, King Dave. *Strategic gap: Techniques for corporate strategy implementation*. Translated from English. Moscow: Alpina Business Books Publ.; 2011. 232 p.
23. Brylin V. I. *Drilling technology and equipment for production wells for in-situ leaching recovery of ura-nium*. Manual for graduate students. National Research Tomsk Polytechnic University, Yurga, Russia, Tomsk, Pub-lishing House of Tomsk Polytechnical University; 2010. 211 p. (In Russ.).
24. Gerzhberg Yu. M., Kuznetsov N. I., Kirshin V. I., Kuligin A. V. *Scientific fundamentals and modern tech-nique for non-oriented control of hole path*. Moscow: LLC IRC Gazprom Publ. 2008;2. 45 p. (In Russ.).
25. Dieva N. N., Volpin S. G., Kornaeva D. A., Steinberg Yu. M. Increasing information content of the studies of wells operating at bottomhole pressure below the bubble point pressure using the steady-state takeoff method. *Burenie i Neft'*. 2014;1:41-46 (In Russ.).
26. Korotchenko A. N., Zemlyanoy A. A. System for recording the parameters of fluids injected into well. *Burenie i Neft'*. 2013;1:49-50 (In Russ.).
27. Sushko S. M., Begun A.D., Fedorov B. V., Kasenov A. K., Daurenbekov S.D. Technique of construction of wells for exploration and production of uranium by ISL method. Almaty: NAC Kazatomprom JSC, Institute of High Technology LLP (IHT); 2007. 178 p. (In Russ.).
28. Shumilin M. V. et. al. *Exploration of uranium deposits for in-situ leaching extraction*. Moscow: Nedra Publ.; 1985. 208 p. (In Russ.).
29. Rakishev B. R., Fedorov B. V. Technique and technology of construction of geotechnological (wellfield) wells. Almaty; 2013. 260 p. (In Russ.).
30. Rogov E. I., Yazikov V. G., Rogov A. E. Optimization of arrangements and design parameters of a network of process wells for extraction of metals by ISL method. *Mining Information and Analytical Bulletin*. MGGU Publ. 2001;9:35–37. (In Russ.).
31. Samsonov B.G. *Fundamentals of subject monitoring of geological environment at enterprises for explo-ration, production, and use of nuclear feed*. Moscow: Center for Assistance to Social and Environmental Initiatives of the Nuclear Industry Publ.; 2010. 120 p. (In Russ.).
32. Gerzhberg Yu. M. *Drilling with stepped well bore as a method to limit the well bore deviation*. *Burenie i Neft'*. 2013;6:28-31. (In Russ.).
33. Tsuprikov L. A. Determination of the ROP model parameters by the least squares method. In: *Telecommunica-tion and information systems. Proceedings of Int. Conf.* St-P.: MSU Publishing House; 2007. P. 274-276 (In Russ.).
34. Noskov M. D., Kesler A. G., Terovskaya T. S., Babkin A. S., Posokhova E. M. Environmental monitoring and prediction of the subsoil conditions during uranium production at CJSC Dalur. In: *Proceedings of Rogov Scien-tific Conference: Problems of Engineering Geology, Hydrogeology and Geoecology of Urbanized Territories*. Tomsk: Publishing House of Tomsk State Architecture and Building University; 2015. P. 208-211. (In Russ.).
35. Poezjaev I. P., Polinovskiy K. D., Gorbatenko O. A. et al. *Uranium Geotechnology*. Manual for graduate students. Under the general editorship of Yu. V. Demekhov, B. M. Ibraev. Almaty; 2017. 327 p. (In Russ.).
36. Kibanov A. Ya., Zakharov D. K. Formation of Human Resource Management System at an Enterprise. Moscow: Delo Publ.; 2012. 315 p. (In Russ.).