ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2023;(1):142-158
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.272, 681.5 DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_142

СОЗДАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ РАБОТЫ ПОДЗЕМНЫХ УСРЕДНИТЕЛЬНЫХ СКЛАДОВ РУДЫ РУДНИКА СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ СОЛЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Н.А. Липницкий[1], Р.Г. Огородников[1], Я.В. Устинова[2]

[1] ООО «СПб-Гипрошахт», Санкт-Петербург, Россия
[2] Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: yana.kuskova@gmail.com

Аннотация: Выполнен обзор ряда факторов, осложняющих отработку сложноструктурных соляных месторождений, включающих в себя различные промышленные типы руд, которые одновременно участвуют в технологическом процессе получения товарной продукции предприятия, на примере Нивенского месторождения калийно-магниевых солей. На основании данного обзора подготовлено предложение использования алгоритма принятия решений и выполнено первичное его описание. Внедрение данного алгоритма позволит снижать и управлять экологическими рисками, связанными с освоением таких месторождений и повышать рентабельность будущего производства. Для выявления слабых мест предложенного подхода разработана имитационная модель работы подземных усреднительных складов в среде AnyLogic с описанием работы модели и ее внутреннего строения, которая интегрирована в общую концепцию алгоритма принятия решений. Приведено «проигрывание» во времени календарного плана отработки, позволяющее перспективно определить периоды работы предприятия, в которых необходимо произвести корректировку календарных планов добычи, либо внести оперативные управленческие решения. Приведена готовая концепция будущей бизнес-единицы ресурсного предприятия, осуществляющая разделение полномочий и обязанностей основных производственных подразделений с поддержанием совокупной устойчивости системы связей межу ними и описана схема управления с подходом к ведению операционной деятельности.

Ключевые слова: сложноструктурное соляное месторождение, калийные и калийно-магниевые месторождения, алгоритм принятия решений, имитационная модель работы предприятия, подземный усреднительный склад, методика определения оптимального состава руды, автоматизация горных работ, автоматизированная система управления.

Для цитирования: *Липницкий Н. А., Огородников Р. Г., Устинова Я. В.* Создание имитационной модели работы подземных усреднительных складов руды рудника сложноструктурных соляных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 1. – С. 142–158. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_142.

Simulation modeling of underground blending warehouse operation at structurally complex salt deposits

N.A. Lipnitsky[1], R.G. Ogorodnikov[1], Ya.V. Ustinova[2]

[1] SPb-Giproshakht Ltd, Saint-Petersburg, Russia
[2] Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: yana.kuskova@gmail.com

© Н.А. Липницкий, Р.Г. Огородников, Я.В. Устинова. 2023.

Abstract: This article presents a review of some complicating factors in mining structurally complex salt deposits composed of different commercial-purity ore types included in manufacture of marketable products as a case-study of Nivenskoe field of potassium and magnesium salts. Based on the review, a decision-making algorithm was proposed and described. The introduction of the algorithm can enable reduction and control of ecological risks associated with mining of such deposits, and can enhance profitability of mining practices. Aimed to reveal the flaws of the proposed approach, a simulation model of operation of underground blending warehouses was designed in the environment AnyLogic. The internal structures and operation of the model were described, and the model was integrated in the decision-making algorithm architecture. A mining schedule 'playing' in time allows the advanced detection of the operation periods when it is necessary to adjust the mining schedule or the managerial decisions made. This article presents the finished conception of a future mining business unit, which divides authorities and liabilities of production departments with maintenance of the cumulative stability of their communications, and describes the control chart and the approach to operating activities.

Key words: structurally complex salt deposit, potassium and potassium–magnesium deposits, decision-making algorithm, mine operation simulation model, underground blending warehouse, optimum composition procedure, mining operation automation, automated control.

For citation: Lipnitsky N. A., Ogorodnikov R. G., Ustinova Ya. V. Simulation modeling of underground blending warehouse operation at structurally complex salt deposits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(1):142-158. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_142.

Особенности освоения сложноструктурных соляных месторождения на примере Нивенского месторождения калийно-магниевых солей

Общей особенностью отработки соляных месторождений со сложной структурой слагающих его рудных залежей являются трудности в подготовке календарного плана добычи, так как на обогатительную фабрику необходимо подавать руду с определенным ранее содержанием и другими качественными характеристиками полезного ископаемого.

Первой отличительной особенностью Нивенского месторождения, помимо сложного строения продуктивной толщи, является наличие различных технологических типов руд, которые используются для получения товарной продукции. Соляные отложения данного соленосного бассейна стратиграфически относятся к верхнепермским и коррелируются с цехштейновыми породами цикла Верра, а конкретно — с их частью, относимой к прегольской свите. Калиеносные породы в основном установлены в ее средней части, но отмечаются и в верхних частях. В разрезе калиеносной зоны выделяется более 17 слоев пород, которые имеют повышенные содержания калийных, калийно-магниевых и магниевых минералов. Некоторые являются сближенными, что позволяет часть их объединить в пласты. Калиеносная зона перекрывается и подстилается зонами каменной соли. В основании всей соленосной толщи залегают ангидритовые породы, местами обогащенные полигалитом [1—4].

В ходе изучения химического состава рядовых проб установлено, что основной минеральный состав калиеносной зоны соленосной толщи центральной части Нивенской впадины как по разрезу, так и по простиранию довольно измен-

чив и представлен галитом (NaCl), карналлитом ($K_2MgCl_3 \times 6H_2O$), кизеритом ($MgSO_4 \times H_2O$), каинитом ($KMg[SO_4]Cl \times 3H_2O$), сильвином (KCl), бишофитом ($MgCl_2 \times 6H_2O$), реже полигалитом ($K_2MgCa_2[SO_4] \times 2H_2O$). Все эти минералы, на основании тех или иных их сочетаний, создают слои различных литологических типов калийно-магниевых пород, характерной чертой которых является их общая сульфатно-хлоридная и калийно-магниевая минерализация [5—8].

Второй главной особенностью становится подход к освоению месторождения. Основа стратегии работы будущего предприятия, которое будет осваивать запасы Нивенского месторождения, — полное отсутствие отходов обогащения на поверхности земли. Актуальность темы, в первую очередь, определена географическим расположением — Калининградская область, Восточная Европа. Площадь особо охраняемых природных территорий составляет 4,31% от общей площади области, также на территории расположено два курорта федерального значения [9—12].

Традиционный подход к обращению с отходами, образованными при обогащении руд, на аналогичных предприятиях в других субъектах РФ заключается в устройстве солеотвалов и шламохранилищ в непосредственной близости от промышленной площадки ГОКа [13, 14], что неприменимо в условиях Калининградской области.

Отсутствие отходов на поверхности земли обеспечивается путем формирования гидрозакладочной смеси из фактически полученных отходов обогащения с расчетным объемом производства связующего материала для дальнейшего размещения в выработанном пространстве рудника. Гидрозакладочную смесь также предлагается использовать как конструктивный элемент системы разработки, для повышения безопасности подработки водозащитной толщи (далее — ВЗТ) и увеличения извлечения полезного ископаемого из недр. Следует отметить определяющую, с точки зрения безопасности ведения очистных, подготовительных и гидрозакладочных работ, роль сохранения целостности ВЗТ [15—18].

Основными задачами данной работы являлись подготовка базы в виде последовательной схемы, а также создание имитационной модели для разработки технически реализуемых и обоснованных решений по освоению сложноструктурных соляных месторождений.

Методы исследований

Специалисты Государственного научного учреждения «Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси» (ГНУ «ИОНХ НАН Б») в период 2012—2021 гг. выполнили ряд научно-исследовательских работ по разработке технологии производства сульфата калия из калийно-магниевых руд Нивенского месторождения. В результате лабораторных и опытных исследований на опытно-промышленном оборудовании, анализа имеющихся литературных, патентных и практических данных разработаны нормы технологического режима и принципиальная технологическая схема процесса получения бесхлорных удобрений SOP (sulfate of potash) (95% K_2SO_4) из руд полиминерального и полигалитового типов.

Рекомендованная технология переработки предъявляет определенные требования к минералогическому и химическому составу подаваемой на обогатительную фабрику руды, что оказывает значительное влияние на планирование горных работ на этапе проектирования и эксплуатации, а также в целом на подход к освоению месторождения [19—21].

Предлагается в будущем при планировании горных работ на предприятии,

которое будет осваивать запасы Нивенского месторождения, вести их с таким расчетом, чтобы средние содержания основных компонентов в выдаваемой «на-гора» руде полиминерального типа отвечали расчетным, определенным на основании качества уже добытой руды полигалитового типа, так как технологическая схема процесса получения товарного продукта предусматривает их совместное обогащение.

Другими словами, ведение добычных работ в выемочном блоке с пониженным содержанием KCl и повышенным содержанием $MgSO_4$ сочетается с одновременной добычей в блоке с повышенным содержанием KCl и пониженным $MgSO_4$. Также с целью исключения выборочной отработки месторождения в соответствии с требованиями п. 24 ПБ-07-601-03 «Правил охраны недр» предусматривается одновременное с вышеуказанными блоками вовлечение в отработку блоков с минимальными промышленными содержаниями полезных компонентов KCl и $MgSO_4$.

При выборе порядка отработки шахтного поля рудника [22, 23], помимо указанных выше требований к качеству добываемой руды различных типов, в обязательном порядке необходимо учитывать фактор сохранения целостности ВЗТ, наличие сплошного фронта очистных работ и использование гидрозакладочного массива как элемента системы разработки на основании:

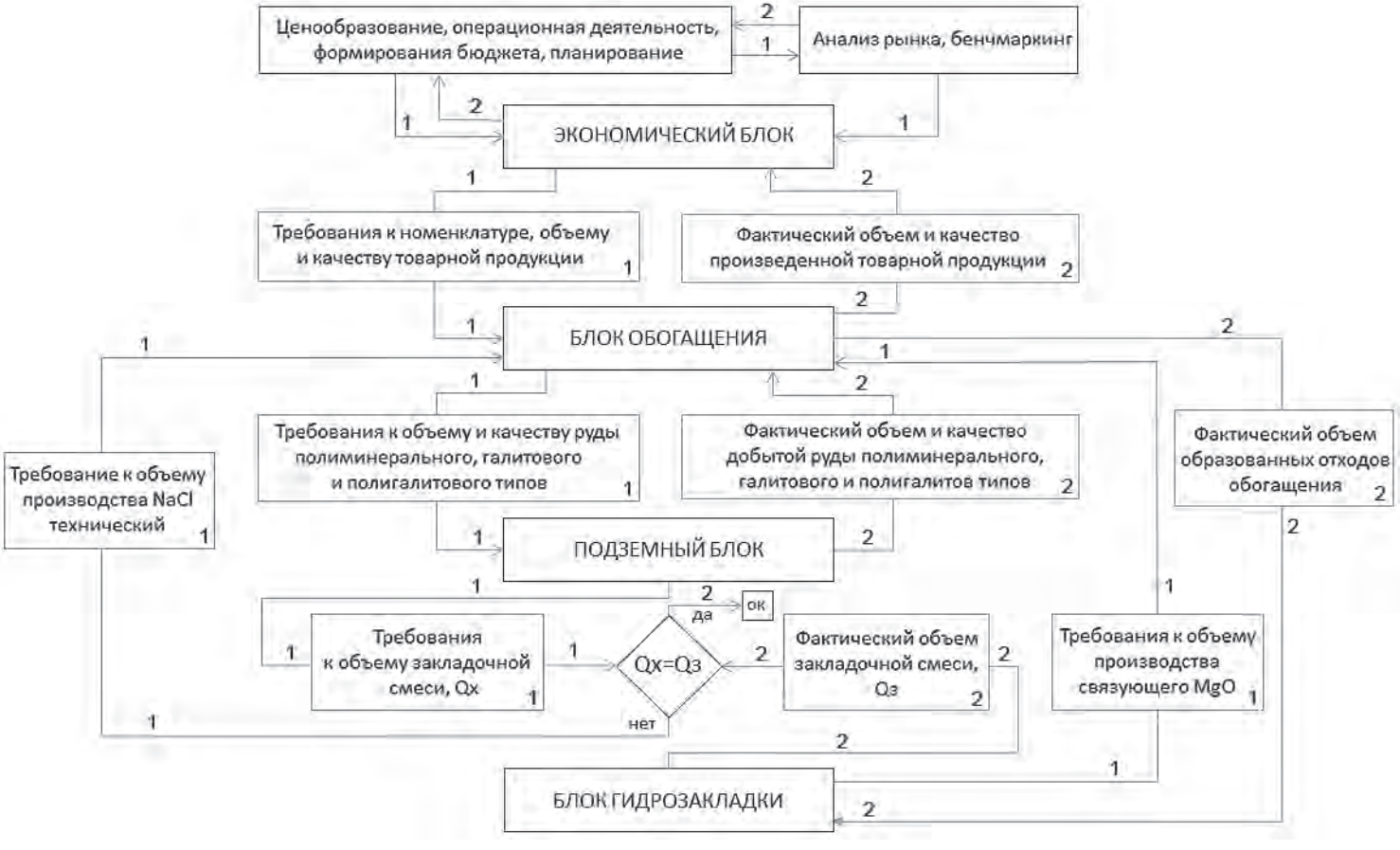
- геометризации выемочных участков с учетом горно-геологической и горнотехнической характеристики массива;
- принятых параметров технологических единиц и технологической схемы ведения очистных, подготовительных и гидрозакладочных работ;
- закономерного развития фронтов очистных работ и пространственной связи технологических единиц с капитальными и подготовительными выработками в увязке с основными технологическими процессами обогащения и работы закладочного комплекса;
- анализа направления первоочередных горно-капитальных работ, обеспечивающих приоритетное вскрытие запасов по схеме раскройки шахтного поля.

Одновременно учитывать в статическом режиме все указанные выше факторы и соблюдать баланс между всеми производственными подразделениями невозможно, как при разработке комплексных проектных решений для подтверждения безопасности и рентабельности будущего производства, так и при ведении эксплуатационных работ по освоению месторождения [24—26]. Для обеспечения работы предприятия в статье предложена схема алгоритма принятия решений (рис. 1).

Логика блок-схемы построена с учетом требований «Методики определения оптимального химического состава выдаваемой на обогатительную фабрику руды и объемов отходов переработки после обогащения». Методика разработана в проектно-консалтинговом институте СПб-Гипрошахт в 2018 г. и согласована в ГНУ «ИОНХ НАН Б». С помощью заданных в ней связей и наборов правил возможно корректно и независимо планировать ведение горных работ в увязке с работой обогатительной фабрики, закладочного хозяйства и инфраструктурного блока.

В будущем алгоритм рекомендуется трансформировать в автоматизированный «Центр управления основными блоками предприятия» (далее — ЦУОБП).

ЦУОБП — бизнес-единица ресурсного предприятия, осуществляющая разделение полномочий и обязанностей основных производственных подразделений Нивенского ГОКа, с поддержанием совокупной устойчивости системы связей межу ними. Главная задача — сохранение целостности и тождественно-



Линии голубого цвета (1) отражают требования к объему и качеству различных материалов на определенных участках работ; линии оранжевого цвета (2) отражают фактический объем различных материалов на определенных участках работ

Рис. 1. Рекомендуемая схема работы предприятия на основе ЦУОБП

Fig. 1. The recommended diagram of the enterprise work on the basis of the TCUOBP

сти систем самой себе при различных внешних и внутренних изменениях.

Схема управления и подход к ведению операционной деятельности позволит ЦУОБП принимать обоснованные решения, обеспечивающие промышленную и экологическую безопасность ведения работ по отработке месторождения с минимальными капитальными и операционными затратами, а также обеспечением достижения показателей, отраженных в утвержденном бизнес-плане компании.

Формируемая база позволит в режиме реального времени контролировать работу всех подразделений, а также корректировать сменные/дневные/недельные и т.д. планы горных и гидрозакладочных работ, работу обогатительной фабрики, а также выпуск товарной продукции в увязке со вспомогательными подразделениями ГОКа.

В данной статье подробно рассматривается организация работы системы подземных усреднительных складов [24—27] с помощью имитационной модели [28—30], позволяющей воспроизводить смешивание потоков руды различного качества при попадании в склады и смешивание (шихтовку) при заполнении бункера накопителя.

В представленной выше схеме склады находятся в «Подземном блоке», информация от которого передается и принимается «Блоком обогащения».

Перед началом добычных работ в границах каждого выемочного блока проводят участковую эксплуатационную доразведку с выполнением комплекса исследований, позволяющих установить представительный минералогический и химический состав руд. После полученные данные заносят по формуляру в базу данных ЦУОБП для оперативной корректировки паспортов ведения добычных работ и выдачи их соответствующим службам ГОКа. Также на основании полученных данных происходит корректировка геологической модели месторождения.

Усреднение выдаваемой руды полиминерального типа после получения оперативных данных от ЦУОБП будет происходить путем дозированной загрузки со складов ПМ (рис. 2) № 1 (поз. 133), № 2 (поз. 141), № 3 (поз. 147), используя кратцер-краны на главный загрузочный конвейер, расположенный в главном загрузочном штреке. Далее руда полиминерального типа поступает в общешахтный бункер ПМ и скипами выдается на поверхность.

За распределение потоков будет отвечать автоматизированная система управления и контроля конвейерных линий. Автоматизированный блок управления конвейером функционирует как проект-

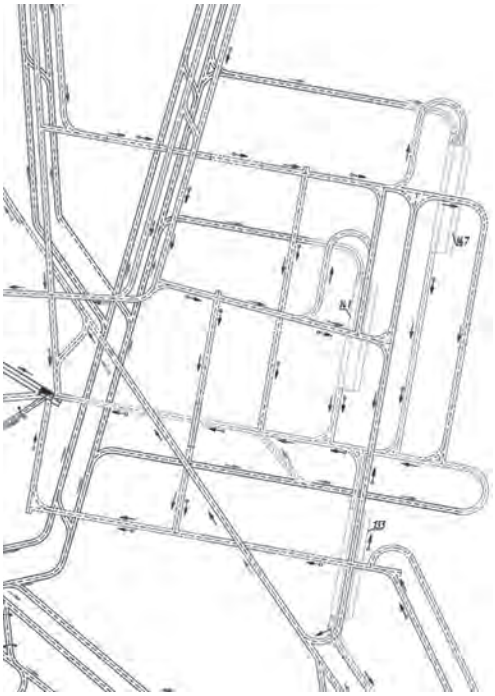


Рис. 2. Схема расположения усреднительных складов руды полиминерального типа в районе околоствольного двора рудника предприятия

Fig. 2. Scheme of location of polymineral ore averaging storages in vicinity of shaft yard of the mine

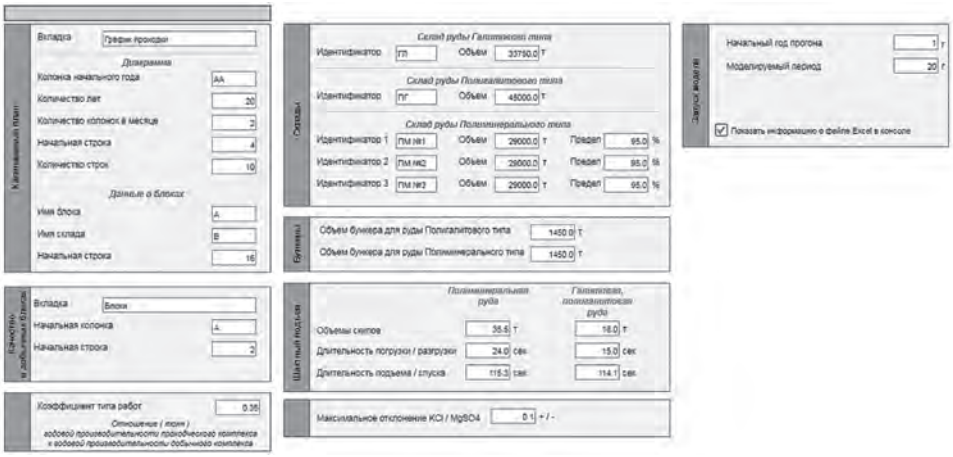


Рис. 3. Стартовое диалоговое окно модели
Fig. 3. The model's start dialog window

но-компонуемое изделие — блок управления конвейером во взрывозащищенном исполнении со встроенными функциями для управления.

Общая информация об имитационной модели

Используя календарный план добычи, модель воспроизводит движение руды различных типов из четырех различных частей месторождения. Каждый из потоков руды имеет свои характеристики, изменяющиеся во времени (скорость, содержание полезных компонентов) и попадает в отдельный накопительный склад [31—33], расположенный в околоствольном дворе рудника. Один раз в сутки модельного времени запускается алгоритм анализа содержимого складов, подбирая скорость опустошения для каждого из них таким образом, чтобы в бункер-накопитель поступала горная масса, имеющая определенные содержания компонентов после смешивания, при этом наиболее заполненные склады опустошатся наиболее быстро.

Конструктивно в модели (рис. 3, 4, 5) можно выделить четыре основные группы объектов, выполняющие определенные действия:

- активация данных и периодическое извлечение информации о параметрах четырех потоков руды: один поток руды полигалитового типа, направляемый на отдельный склад, и три потока руды полиминерального типа. Изначально для каждого потока руды полиминерального типа назначен конкретный склад, но в процессе работы модели происходит перенаправление потоков между складами, что предусмотрено проектом;
- хранение и передача параметров потоков до следующего обновления;
- моделирование наполнения и опустошения складов и смешивания потоков руды различного качества;
- моделирование наполнения и опустошения бункеров-накопителей и подъема руды на поверхность.

Источниками данных о потоках руды являются Excel-таблица качества выемочных блоков и календарный план отработки месторождения. Таблица качества несет информацию о названии выемочного блока и средневзвешенных значениях компонентов, содержащихся в горной массе. Календарный план добычи — это также таблица, имеющая определенную форму и учитывающая следующие параметры:

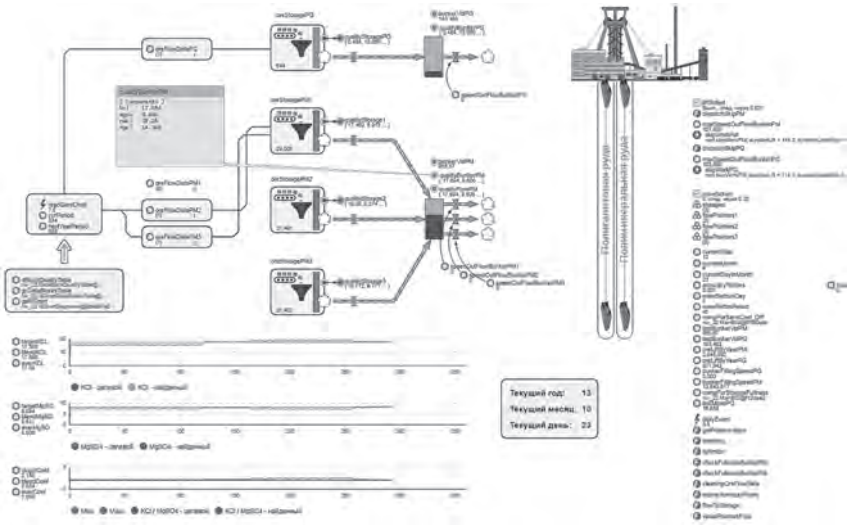


Рис. 4. Общий вид холста модели
Fig. 4. General view of the model canvas

- название выемочного блока;
- дата начала и длительность отработки выемочного блока или его части;
- общее количество тонн горной массы, извлекаемое из блока за год;
- тип выполняемых работ в блоке (проходка или добыча);
- название первоочередного подземного склада (в процессе работы модели поток может быть перенаправлен в другой склад).

На основе этих таблиц модель создает свой внутренний объект, связывающий план добычи с качественными показателями и позволяющий извлечь скорость и качество потоков в определенный момент времени. Частота извлечения параметров зависит от структуры таблицы календарного плана. Например, если для одного месяца (длительностью 30 дней) в таблице выделено две колонки, то в модели каждые 15 дней (30/2 = 15) обновляется информация о потоке. Между двумя такими событиями потоки руды, поступающие в подземные склады, считаются постоянными по всем парамет-

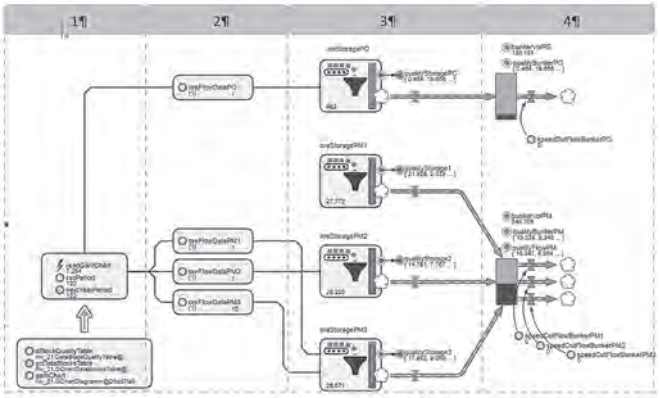


Рис. 5. Группы объектов модели
Fig. 5. Groups of model objects

рам. Но так как смешивание руды при наполнении и опустошении подземных складов намного более динамичный процесс, учитывающий перенаправление потоков между складами, то вычисление средневзвешенного содержания компонентов выполняется минимум один раз в минуту модельного времени.

Перенаправление потоков выполняется только для руды полиминерального типа. Решение о перенаправлении принимается один раз в сутки модельного времени. В этот момент оценивается наполненность первоочередного склада для каждого потока. Если склад наполнен выше указанного предела (параметр задается в процентах перед запуском модели), то поток перенаправляется в самый незаполненный склад, не достигший своего указанного предела. Если же другие склады заполнены, то перенаправление не выполняется и входящий поток останавливается, что в свою очередь можно интерпретировать как остановку работы проходческих и добычных комплексов.

Исходя из специфики решаемой задачи, содержимое складов представлено в виде списка элементов потока — объектов, построенных на компонентах системной динамики (рис. 6).

Каждый элемент потока несет в себе информацию о средневзвешенных содержаниях компонентов руды, об объеме, который должен поступить на склад, об объеме, уже находящемся внутри склада и об объеме, покинувшем склад. Эти объекты создаются и удаляются динамически в процессе работы модели. Создание происходит один раз в сутки модельного времени, удаление выполняется после того, как элемент покинет склад полностью. Объем и скорость каждого элемента потока определяются исходя из информации, поступившей из календарного плана добычи. Считается, что элемент потока — это объем руды, поступающий на склад в течение суток. Для склада руды полигалитового типа может быть только один поступающий элемент, для складов руды полиминерального типа таких поступающих элементов может быть от одного до трех, в зависимости от того, какое решение принято в алгоритме перенаправления потоков.

Элемент потока управляется складом, в котором он содержится. Минимум один раз в минуту модельного времени склад оценивает объемы всех его элементов и вычисляет коэффициенты, определяющие скорости истечения для

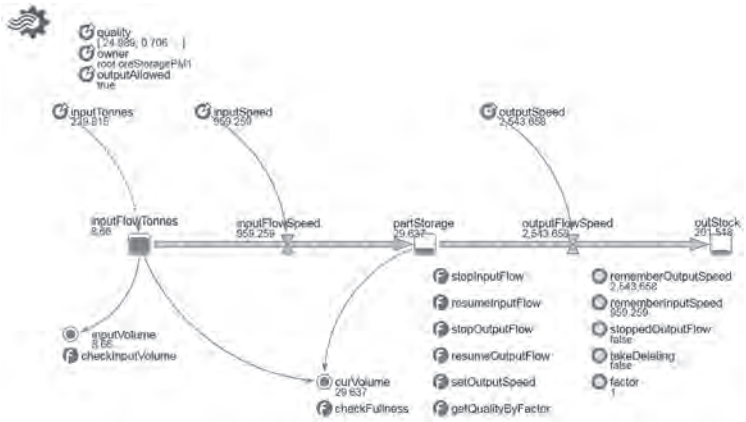


Рис. 6. Элементы потока
Fig. 6. Elements of the flow

каждого элемента относительно скорости опустошения самого склада. То есть чем больший объем занимает элемент на складе, тем большей скоростью истечения он обладает, и наоборот. Таким же образом каждый элемент потока влияет на средневзвешенные содержания компонентов руды в общем исходящем потоке склада.

Шихтовка руды полиминерального типа моделируется путем подбора скоростей опустошения каждого из трех складов один раз в сутки модельного времени. Целевым показателем, к которому стремится модель, является отношение средневзвешенных содержаний KCl к $MgSO_4$ в горной массе, поднимаемой на поверхность. Это значение заложено в календарном плане отработки месторождения и является индивидуальным для каждого года.

По условию задачи, в определенные моменты времени требуется оценить средневзвешенные содержания компонентов руды в каждом складе и вычислить скорости опустошения каждого склада таким образом, чтобы целевой показатель оставался в допустимом интервале значений, при этом самые заполненные склады должны обладать наибольшей скоростью опустошения.

Функция подбора скоростей опустошения складов построена на идее генетических алгоритмов — поиске значений путем отбора, комбинирования и вариаций переменных. Целевой функцией является следующее выражение:

$$S_{opt} = \left| S_{targ} - \frac{k_1 \times KCl_1 + k_2 \times KCl_2 + k_3 \times KCl_3}{k_1 \times MgSO_{41} + k_2 \times MgSO_{42} + k_3 \times MgSO_{43}} \right| \quad (1)$$

где S_{trag} — целевой показатель (отношения KCl к $MgSO_4$); $KCl_{1,\,2,\,3}$ — средневзвешенные содержания хлорида калия в руде каждого склада; $MgSO_{4\,1,\,2,\,3}$ — средневзвешенные содержания сульфата магния в руде каждого склада; $k_{1,\,2,\,3}$ — варьируемые коэффициенты, определяющие долю участия соответствующих складов в формировании потока шихты. Суммарное значение коэффициентов всегда равно единице.

В терминологии генетических алгоритмов коэффициенты k_1, k_2 и k_3 являются генами одной особи, S_{opt} — функция приспособленности особи — чем больше это число, тем дальше находится значение от целевого и тем больше шансов у особи быть отброшенной при отборе для формирования нового поколения, и наоборот.

При старте работы функции оптимизации генерируется популяция из ста особей, обладающих случайным набором генов и приспособленностью к выживанию. Особи оцениваются на пригодность по числу S_{opt}. Если нет ни одной особи, попадающей в заданный коридор значений, то формируется новое поколение путем скрещивания всех существующих особей. Пары формируются по порядку следования: 1–2, 3–4, 5–6 и т.д.

Каждая пара дает шесть потомков с различным набором генов. Скрещивание особей упрощено и представляет собой вычисление средних значений всех комбинаций из двух генов родителей. Для исключения «перепрыгивания» через возможную оптимальную комбинацию генов часть особей вновь сформированной популяции подвергается мутации — умножению каждого гена особи на случайное число в пределах от нуля до единицы, с последующей их нормализацией. Из сформированной популяции отбираются сто наиболее приспособленных особей, остальные, включая родителей, отбрасываются.

В данном месте алгоритм переходит на следующую итерацию, к оценке популяции. Формирование новых популяций происходит до тех пор, пока не поя-

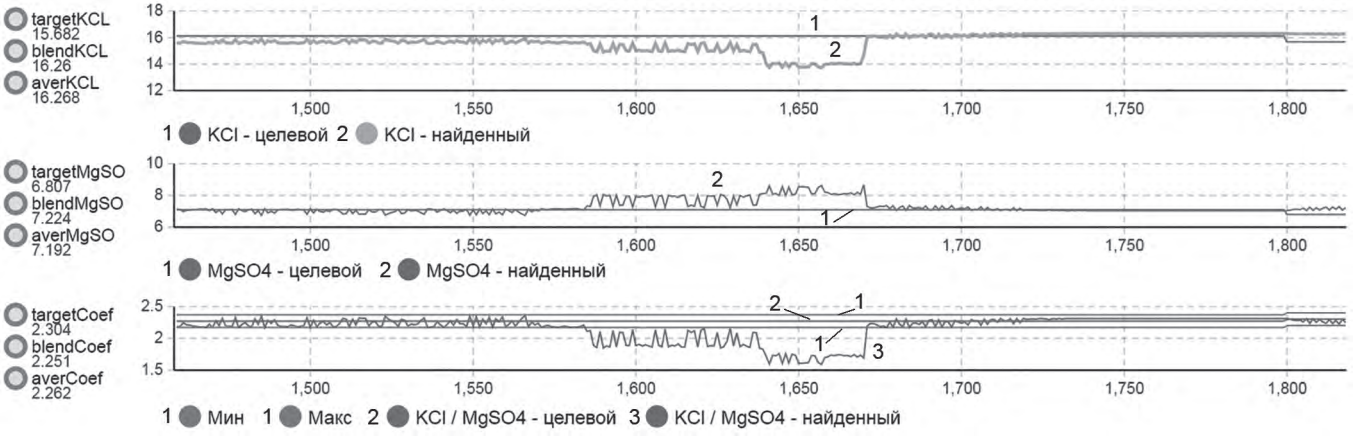


Рис. 7. Колебание содержаний KCl и $MgSO_4$ в шихте (падение содержания KCl)
Fig. 7. Fluctuation of KCl and $MgSO_4$ contents in the charge (decrease of KCl content)

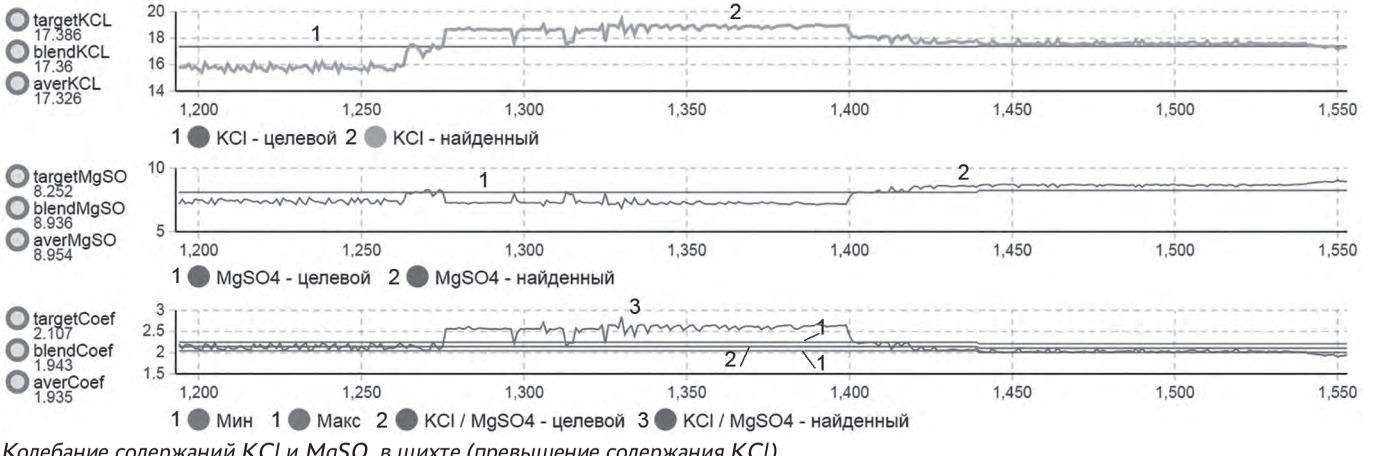


Рис. 8. Колебание содержаний KCl и $MgSO_4$ в шихте (превышение содержания KCl)
Fig. 8. Fluctuation of KCl and $MgSO_4$ contents in the charge (excess of KCl content)

вятся особи со значением S_{opt}, попадающим в установленный коридор, или до достижения максимального количества итераций цикла. Если в одном из поколений находятся особи с требуемыми значениями S_{opt}, это значит, что заданные комбинации генов найдены, и требуемые средневзвешенные содержания компонентов в шихте могут быть обеспечены. На данном этапе определяется наиболее сильная особь из самых приспособленных, т.е. какой из трех складов будет обладать наибольшей скоростью опустошения. Отбор происходит по формуле:

$$selector = p_1 \times k_1 + p_2 \times k_2 + p_3 \times k_3, \quad (2)$$

где $k_{1,\,2,\,3}$ — варьируемые коэффициенты, определяющие скорости опустошения складов; $p_{1,\,2,\,3}$ — проценты наполненности соответствующих складов.

Комбинация коэффициентов k_1, k_2, k_3, дающая наибольшее значение selector, определяет вариант, при котором наиболее заполненный склад будет обладать максимальной скоростью опустошения, исходя из средневзвешенного содержания компонентов в руде, находящейся в нем.

По завершении работы функция возвращает коэффициенты оптимального результата из найденных или коэффициенты варианта, наиболее приближенного к целевому значению.

Скорость опустошения складов вычисляется путем умножения соответствующих коэффициентов на общую скорость опустошения складов, в сумме давая поток руды с требуемым качеством или близким к нему.

Найденные комбинации представляются в виде графиков функций, отображающих колебания хлорида калия, сульфата магния и их отношения во времени (время указано в минутах).

Общие пояснения к содержимому рисунков графиков функций (рис. 7 и 8): вверху — график колебания KCl в шихте; посередине — график колебания $MgSO_4$ в шихте; внизу — соответствующий график отношения KCl / $MgSO_4$ с выходом за пределы допустимых значений.

Подобное «проигрывание» во времени календарного плана отработки позволяет перспективно определить периоды работы рудника, в которых необходимо произвести корректировки календарных планов добычи либо внести оперативные управленческие решения в работу ГОКа для снижения влияния возможной изменчивости геологических данных на работу всех производственных блоков предприятия.

Заключение

Освоение Нивенского месторождения калийно-магниевых солей является уникальной задачей в своем роде. Особенно учитывая полное отсутствие аналогов в РФ. Подходы обладают определенной спецификой, присущей только этому полезному ископаемому, а местоположение участков недр диктует ряд ограничений и требований по его освоению. Предложенная имитационная модель может быть тиражирована и в другие области промышленности различных регионов на другие сложноструктурные месторождения с определенной доработкой и учетом особенностей каждого объекта.

Перспектива использования разработанной имитационной модели в совокупности с организацией на объекте Центра управления основными блоками предприятия с предложенной структурой и наполнением предположительно позволит скорректировать экономические показатели работы, увеличить коэффициент извлечения из недр полезного ископаемого, исключить размещение отходов производства на земной поверхности и сократить влияние человеческого фактора на производственные процессы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вишняков В. В.*, *Смычник А. Д.*, *Панов В. Д.*, *Вафина М. С.*, *Рахматулина Ю. Ш.* Строение и условия образования калийно-магниевых солей центральной части Нивенской впадины Калининградско-Гданьского соленосного бассейна // Отечественная геология. — 2017. — № 4. — С. 90—97.

2. *Гончаренко О. П.*, *Лашина И. Л.* Условия формирования калийно-магниевых солей верхнепермского Калининградско-Гданьского участка Среднеевропейского солеродного бассейна (по результатам изучения включений в минералах) // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского. — 2021. — № 24. — С. 25—30. DOI: 10.17072/chirvinsky.2021.25.

3. *Тибилов Д. П.*, *Домахина Ю. А.* Развитие потенциала добычи калийных руд, производства сульфатных удобрений на территории Калининградской области и реализации сульфата калия на мировом рынке // Экономика в промышленности. — 2020. — Т. 13. — № 2. — С. 225—232. DOI: 10.17073/2072-1633-2020-2-225-232.

4. *Галченко Ю. П.* Обоснование методики лабораторных исследований вторичного поля напряжений при создании и применении конвергентной горной технологии подземной разработки каменной соли // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 11. — С. 35—47. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-0-35-47.

5. *Захаров В. Н., Федоров Е. В., Еременко В. А., Лагутин Д. В.* Геомеханическое обеспечение проектирования отработки запасов каменной соли на Илецком месторождении // Горный журнал. — 2018. — № 2. — С. 41—47. DOI: 10.17580/gzh.2018.02.06.

6. *Жуков А. А.*, *Пригара А. М.*, *Царев Р. И.*, *Ворошилов В. А.* Решение горнотехнических задач на месторождении калийных солей методами геофизики // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 5-1. — С. 82—91. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_82.

7. *Зубов В. П., Смычник А. Д.* Снижение рисков затопления калийных рудников при прорывах в горные выработки подземных вод // Записки Горного института. — 2015. — Т. 215. — С. 29—37.

8. *Lipnitsky N. A.*, *Kuskova Ya. V.* Complex approach to the development of potash, potassium-magnesium and salt deposits // E3S Web of Conferences. 2018, vol. 41, no. 1, article 01005. DOI: 10.1051/e3sconf/20184101005.

9. *Пешков А. А.*, *Мацко Н. А.*, *Кононыхин М. А.*, *Морев А. Н.* Современные подходы к обоснованию стратегий освоения минерально-сырьевых ресурсов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2009. — № 2. — С. 275—297.

10. *Вишняков А. К.*, *Московский Г. А.*, *Гончаренко О. П.* Минеральный состав галогенных пород центральной части Нивенской впадины Калининградско-Гданьского соленосного бассейна и условия их формирования // Литосфера. — 2016. — № 4. — С. 102—113.

11. *Shishlyannikov D. I.* Diagnostic assessment of base components of mining machinery of potash mines by analysis of excited vibrations // Journal of Physics. Conference Series. 2021, vol. 1753, no. 1, article 012065. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012065.

12. *Lipnitsky N. A.*, *Kuskova Ya. V.* Mechanical properties and mineralogical composition of potash ore as a factor in selecting the processing method // Materials Science Forum. 2021, vol. 1022, pp. 17—26. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1022.17.

13. *Alekseenko A. V.*, *Drebenstedt C.*, *Bech J.* Assessment and abatement of the eco-risk caused by mine spoils in the dry subtropical climate // Environmental Geochemistry and Health. 2022, vol. 44, pp. 1581—1603. DOI: 10.1007/s10653-021-00885-3.

14. *Alekseenko V. A.*, *Shvydkaya N. V.*, *Alekseenko A. V.*, *Machevariani M. M.*, *Bech J.*, *Pashkevich M. A.*, *Puzanov A. V.*, *Nastavkin A. V.*, *Roca N.* Element accumulation patterns of native plant species under the natural geochemical stress // Plants. 2021, vol. 10, no. 1, p. 33. DOI: 10.3390/plants10010033.

15. *Shishlyannikov D., Zvonarev I.* Investigation of the destruction process of potash ore with a single cutter using promising cross cutting pattern // Applied Sciences. 2021, vol. 11, no. 1, p. 464. DOI:10.3390/app11010464.

16. *Лаптев Б. В.* Историография аварий при разработке соляных месторождений // Безопасность труда в промышленности. — 2011. — № 12. — С. 41—46.

17. *Зубов В. П.*, *Ковальский Е. Р.*, *Антонов С. В.*, *Пачгин В. В.* Повышение безопасности рудников при отработке Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 5. — С. 22—33. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-22-33.

18. *Микрюков А. Ю.*, *Каменских Я. В.* Один из способов повышения эффективности эксплуатации шахтных подъемных установок калийных рудников / Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Сборник трудов XVII Международной научно-технической конференции. — Екатеринбург: УГГУ, 2019. — С. 180—183.

19. *Макаров В. А.*, *Малиновский Е. Г.*, *Кацер И. И.*, *Курчин Г. С.*, *Ефимов А. В.* Динамическая система управления качеством минерального сырья // Журнал СФУ. Техника и технологии. — 2016. — № 1. — С. 126—131.

20. *Эрих О. В.* Управление качеством руды при планировании горных работ // Записки Горного института. — 2002. — Т. 150. — С. 57—59.

21. *Богуславский Э. И.* Управление качеством руды — основа горно-технологического менеджмента // Записки Горного института. — 2006. — Т. 168. — С. 26—28.

22. *Semenov A. S.*, *Kruk M. N.* Project risk analysis and management decision-making in determining the parameters of ore quarries // Journal of Industrial Pollution Control. 2017, vol. 33, no. 1, pp. 1024—1028.

23. *Пронин Э. М.* Оптимизация работы горно-промышленных комплексов на основе расчета материального баланса технологического процесса // Записки Горного института. — 2014. — Т. 208. — С. 172—180.

24. *Hustrulid W. A.*, *Bullock R. L.* Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies. SME. 2001, 718 pp.

25. *Стаценко Л. Г.*, *Брановец Н. Е.* Разработка модуля «Усреднительный склад» информационной системы стабилизации качества полезного ископаемого в карьере // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. — 2014. — № 2(46). — С. 5—10.

26. *Шевелев В. А.* Определение емкости буферно-усреднительного склада с учетом параметров технологического оборудования // Известия ТулГУ. Науки о Земле. — 2012. — № 2. — С. 189—194.

27. *Прокопьева О. С.* Анализ роли усреднительных складов при оперативном управления параметрами рудопотоков / Наземные транспортно-технологические комплексы и средства. Материалы Международной научно-технической конференции. — 2015. — С. 279—282.

28. *Григалашвили А. В.* Реализация модели заполнения и разгрузки усреднительного склада руды // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. — 2016. — № 1. — С. 44—48.

29. *Журавлев С. С.*, *Рудометов С. В.*, *Окольнишников В. В.*, *Шакиров С. Р.* Применение модельно-ориентированного проектирования к созданию АСУ ТП опасных промышленных объектов // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. — 2018. — Т. 16. — № 4. — С. 56—67.

30. *Стаценко Л. Г.*, *Брановец Н. Е.* Разработка модуля «усреднительный склад» информационной системы стабилизации качества полезного ископаемого в карьере // Вестник Магнитогорского государственного технического университет им. Г.И. Носова. — 2014. — № 2. — С. 5—11.

31. *Стрельцова Г. А.*, *Ткаченко А. М.* Концептуальные модели управления технологией подземной поточной роботизированной добычи крепких руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2011. — № 6. — С. 506—517.

32. *Zatonskiy A. V., Yazev P. A.* Development of a mining simulation model for potassium ore mining planning // Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics. 2020, vol. 20, no. 4, pp. 47—54. DOI: 10.14529/ctcr200405.

33. *Поповичев Д. В.* Проблемы проектирования подземных складов сильвинитовой руды // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2011. — № 3. — С. 177—181. ГИАБ

REFERENCES

1. Vishnyakov V. V., Smychnik A. D., Panov V. D., Vafina M. S., Rakhmatulina Y. Sh. Structure and formation conditions of potassium-magnesium salts of the central part of the Niwenskaya depression of the Kaliningrad-Gdansk salt basin. *Otechestvennaya geologiya*. 2017, no. 4, pp. 90—97. [In Russ].

2. Goncharenko O. P., Lashina I. L. Conditions for the formation of potassium-magnesium salts of the Upper Permian Kaliningrad-Gdansk section of the Middle European salt basin (on the results of the study of inclusions in minerals). *Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii. Nauchnye chteniya pamyati P.N. Chirvinskogo* [Problems of Mineralogy, Petrography and Metallogeny. Scientific readings in memory of P.N. Chirvinsky]. 2021, no. 24, pp. 25—30. [In Russ]. DOI: 10.17072/chirvinsky.2021.25.

3. Tibilov D. P., Domakhina Yu. A. Development of potassium ore mining potential, sulfate fertilizers production in the kaliningrad region and sales of potassium sulfate in the world market. *The Russian Journal of Industrial Economics*. 2020, vol. 13, no. 2, pp. 225—232. [In Russ]. DOI: 10.17073/2072-1633-2020-2-225-232.

4. Galchenko Yu. P., Leizer V. I., Vysotin N. G., Yakusheva E. D. Procedure justification for laboratory research of secondary stress field in creation and application of convergent technology for underground mining of rock salt. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 11, pp. 35—47. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-0-35-47.

5. Zakharov V. N., Fedorov E. V., Eremenko V. A., Lagutin D. V. Geomechanical support for the design of mining reserves of rock salt in the Iletskoye field. *Gornyi Zhurnal*. 2018, no. 2, pp. 41—47. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2018.02.06.

6. Zhukov A. A., Prigara A. M., Tsarev R. I., Voroshilov V. A. Mining engineering problem solving at the potassium salt deposit by geophysical methods. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 5-1, pp. 82—91. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_82.

7. Zubov V. P., Smychnik A. D. The concept of reducing the risks of potash mines flooding caused by groundwater inrush into excavations. *Journal of Mining Institute*. 2015, vol. 215, pp. 29—37. [In Russ].

8. Lipnitsky N. A., Kuskova Ya. V. Complex approach to the development of potash, potassium-magnesium and salt deposits. *E3S Web of Conferences*. 2018, vol. 41, no. 1, article 01005. DOI: 10.1051/e3sconf/20184101005.

9. Peshkov A. A., Matsko N. A., Kononykhin M. A., Morev A. N. Modern approaches to the substantiation of strategies of development of mineral resources. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2009, no. 2, pp. 275—297. [In Russ].

10. Vishnyakov A. K., Moskovskiy G. A., Goncharenko O. P. Mineral composition of halogenic rocks of the central part of the Niven trough of the Kaliningrad-Gdansk salt basin and conditions of their formation. *Lithosphere*. 2016, no. 4, pp. 102—113. [In Russ].

11. Shishlyannikov D. I. Diagnostic assessment of base components of mining machinery of potash mines by analysis of excited vibrations. *Journal of Physics. Conference Series*. 2021, vol. 1753, no. 1, article 012065. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012065.

12. Lipnitsky N. A., Kuskova Ya. V. Mechanical properties and mineralogical composition of potash ore as a factor in selecting the processing method. *Materials Science Forum*. 2021, vol. 1022, pp. 17—26. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1022.17.

13. Alekseenko A. V., Drebenstedt C., Bech J. Assessment and abatement of the eco-risk caused by mine spoils in the dry subtropical climate. *Environmental Geochemistry and Health*. 2022, vol. 44, pp. 1581 — 1603. DOI: 10.1007/s10653-021-00885-3.

14. Alekseenko V. A., Shvydkaya N. V., Alekseenko A. V., Machevariani M. M., Bech J., Pashkevich M. A., Puzanov A. V., Nastavkin A. V., Roca N. Element accumulation patterns of native plant species under the natural geochemical stress. *Plants*. 2021, vol. 10, no. 1, p. 33. DOI: 10.3390/plants10010033.

15. Shishlyannikov D., Zvonarev I. Investigation of the destruction process of potash ore with a single cutter using promising cross cutting pattern. *Applied Sciences*. 2021, vol. 11, no. 1, p. 464. DOI:10.3390/app11010464.

16. Laptev B. V. Historiography of accidents during the development of salt deposits. *Occupational Safety in Industry*. 2011, no. 12, pp. 41 — 46. [In Russ].

17. Zubov V. P., Kovalski E. R., Antonov S. V., Pachgin V. V. Improving the safety of mines in developing Verkhnekamsk potassium and magnesium salts. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 5, pp. 22 — 33. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-22-33.

18. Mikryukov A. Yu., Kamenskikh Y. V. One of the way to improve the efficiency of exploitability of shore lifting inputs of kaline rooms. *Tekhnologicheskoe oborudovanie dlya gornoy i neftegazovoy promyshlennosti. Sbornik trudov XVII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Technological equipment for the mining and oil and gas industry. Proceedings of the XVII International Scientific and Technical Conference], Ekaterinburg, UGGU, 2019, pp. 180 — 183. [In Russ].

19. Makarov V. A., Malinovsky E. G., Katser I. I., Kurchin G. S., Efimov A. V. Dynamic system of quality management of mineral raw materials. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2016, no. 1, pp. 126 — 131. [In Russ].

20. Erich O. V. Ore quality management in mining planning. *Journal of Mining Institute*. 2002, vol. 150, pp. 57 — 59. [In Russ].

21. Boguslavsky E. I. Management of ore quality — the basis of mining technological management. *Journal of Mining Institute*. 2006, vol. 168, pp. 26 — 28. [In Russ].

22. Semenov A. S., Kruk M. N. Project risk analysis and management decision-making in determining the parameters of ore quarries. *Journal of Industrial Pollution Control*. 2017, vol. 33, no. 1, pp. 1024 — 1028.

23. Pronin E. M. Optimization of mining-industrial complexes on the basis of calculation of the material balance of the technological process. *Journal of Mining Institute*. 2014, vol. 208, pp. 172 — 180. [In Russ].

24. Hustrulid W. A., Bullock R. L. *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*. SME. 2001, 718 pp.

25. Statsenko L. G., Branovets N. E. Development of the module «averaging warehouse» information system to stabilize the quality of minerals in the quarry. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2014, no. 2(46), pp. 5 — 10. [In Russ].

26. Shevelev V. A. Determination of the capacity of a buffer-medium warehouse, taking into account the parameters of technological equipment. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2012, no. 2, pp. 189 — 194. [In Russ].

27. Prokop'eva O. S. Analysis of the role of averaging warehouses in the operational control of the parameters of ore streams. *Nazemnye transportno-tekhnologicheskie kompleksy i sredstva. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Ground transportation and technological complexes and facilities. Materials of the International Scientific and Technical Conference], 2015, pp. 279 — 282. [In Russ].

28. Grigalashvili A. V. Implementation of the model of filling and unloading of a blending ore stockpile. *Modern Science: actual problems of theory and practice. Series «Natural & Technical Sciences»*. 2016, no. 1, pp. 44 — 48. [In Russ].

29. Zhuravlev S. S., Rudometov S. V., Okolnishnikov V., Shakirov S. R. Application of model-oriented design to create ACS for hazardous industrial facilities. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*. 2018, vol. 16, no. 4, pp. 56—67. [In Russ].

30. Statsenko L. G., Branovets N. E. Development of the module «averaging warehouse» information system to stabilize the quality of minerals in the quarry. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2014, no. 2, pp. 5—11. [In Russ].

31. Streltsova G. A., Tkachenko A. M. Conceptual models of technology management of underground robotic flow-stream mining of hard ores. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2011, no. 6, pp. 506—517. [In Russ].

32. Zatonskiy A. V., Yazev P. A. Development of a mining simulation model for potassium ore mining planning. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2020, vol. 20, no. 4, pp. 47—54. DOI: 10.14529/ctcr200405.

33. Popovichev D. V. Problems of designing underground silvinite ore storages. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2011, no. 3, pp. 177—181. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Никита Александрович Липницкий[1] — заместитель генерального директора по развитию,
e-mail: lipnitckii@spbgipro.ru,
ORCID ID: 0000-0003-3000-8751,
Роман Геннадьевич Огородников[1] — ведущий специалист,
e-mail: rg.ogorodnikov@spbgipro.ru,
Устинова Яна Вадимовна — канд. техн. наук, доцент, e-mail: yana.kuskova@gmail.com,
Санкт-Петербургский горный университет,
ORCID ID: 0000-0002-4382-3301,
[1] ООО «СПб-Гипрошахт».
Для контактов: Устинова Я.В., e-mail: yana.kuskova@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

N.A. Lipnitsky[1], Deputy General Director for Development, e-mail: lipnitckii@spbgipro.ru,
ORCID ID: 0000-0003-3000-8751,
R.G. Ogorodnikov[1], Leading Specialist,
e-mail: rg.ogorodnikov@spbgipro.ru,
Ya.V. Ustinova, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia,
e-mail: yana.kuskova@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-4382-3301,
[1] SPb-Giproshakht Ltd, 191186, Saint-Petersburg, Russia.
Corresponding author: Ya.V. Ustinova, e-mail: yana.kuskova@gmail.com.

Получена редакцией 05.05.2022; получена после рецензии 21.10.2022; принята к печати 10.12.2022.
Received by the editors 05.05.2022; received after the review 21.10.2022; accepted for printing 10.12.2022.