

# ПРИМЕНЕНИЕ СЕТЕЙ ПЕТРИ К МОДЕЛИРОВАНИЮ РУДОПОТОКОВ В КОНТУРЕ ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ФАБРИК МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВЫХ КОМПЛЕКСОВ

П.Н. ЛАРИЧЕВ, В.С. ТЫНЧЕНКО

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий  
имени академика М.Ф. Решетнева»,  
г. Красноярск

*Ключевые слова и фразы:* минерально-сырьевой комплекс; моделирование; обогатительные фабрики; рудопотоки; сети Петри.

*Аннотация:* В статье рассматривается моделирование рудопотоков в контуре обогатительных фабрик минерально-сырьевых комплексов. Целью настоящего исследования является адаптация математического аппарата сетей Петри к такому моделированию. В статье описывается выбор и обоснование аппарата имитационного моделирования, приводится концептуальное представление модели рудопотоков в форме адаптации непрерывной сети Петри. Приводятся содержательные описания вершин-позиций, вершин-переходов, событий и состояний в сети Петри при моделировании рудопотоков. Применение предложенного аппарата позволит создавать системы мониторинга и диспетчеризации горных работ для своевременной и адекватной оценки состояния хода выполняемых работ и уточнения причин отставания от плановых графиков.

## Введение

Стабилизация качества рудопотока в контуре обогатительной фабрики (ОФ) является важной научно-технической задачей в рамках деятельности минерально-сырьевых комплексов (МСК) [1–3]. В настоящее время на множестве предприятий ситуация в части формирования свойств рудопотока и вариабельности его характеристик показывает, что создание устойчивой системы управления (стабилизации) качества требует системы решений, включающих технологические и технические решения в части организации сортовых складов руды и т.п., организационные мероприятия в части возможной рациональной схемы изменения в организации работ на отдельных участках и дополнительные средства обеспечения мониторинга и управления рудопотоком, обеспечивающие поддержку принятия решений на различных этапах формирования его показателей качества на основе модельных подходов, применимых как для уже сложившейся системы (AS-IS), так и для

системы, реализующей уже наработанные концептуальные решения (TO-BE) [4; 5].

Целью построения модели системы формирования и управления рудопотоком в контуре ОФ является стабилизация качества рудопотока за счет поддержки принятия решений по управлению совокупностью процессов в минерально-сырьевом комплексе на краткосрочном горизонте.

## 1. Выбор и обоснование аппарата имитационного моделирования рудопотока в контуре обогатительной фабрики

В качестве аппарата имитационного моделирования для системы управления качеством рудопотока в контуре ОФ предлагается использовать аппарат сетей Петри [6]. Такой выбор обусловлен анализом описаний и широким мировым опытом применения данного средства имитационного моделирования. По результатам выполненного анализа и с учетом целевого назначения и требований к технологическому

базису такой системы можно выделить следующие позиции, обуславливающие применимость и преимущества применения аппарата сетей Петри [6–8]:

- 1) логическая прозрачность;
- 2) возможность учета дискретных и непрерывных величин;
- 3) гибкость, позволяющая адаптировать и дорабатывать сеть в случае изменений в системе (например, модернизации, ввода новых участков добычи, транспортных линий и т.д.);
- 4) возможность учета как детерминированных, так и случайных событий;
- 5) приспособленность и опыт применения для моделирования элементарных источников сырья, операций по погрузке и транспортировке, накоплению и перераспределению сырья и другим производственным операциям, характерным для системы формирования рудопотока в контуре ОФ;
- 6) возможность изменения параметров в соответствии с изменениями в моделируемых потоках в реальном времени без необходимости, например, переобучения, характерного для моделей машинного обучения и интеллектуального анализа данных;
- 7) логично выстроенный и верифицированный, в том числе в рамках построения имитационных моделей в различных областях, математический аппарат, реализуемый в базисе графо-аналитических подходов и матричных операций, которые достаточно хорошо оптимизированы для расчета с использованием средств вычислительной техники, – это является существенным фактором с учетом потенциально значительного количества объектов при моделировании контура ОФ;
- 8) возможность встраивания в метапроцедуру оптимизации в качестве традиционной модели с набором входных параметров моделируемых объектов и выходом в виде параметров рудопотоков;
- 9) возможность выхода за рамки моделируемой системы простым подключением входящих потоков в аналогичную или иную модель смежной системы формирования продукции;
- 10) использование типовых схем имитационного моделирования для типовых объектов с точностью до параметров, что позволит выполнить «поучастковое» построение и сборку модели, а также обеспечит возможность ее модернизации собственными средствами пред-

приятий.

Первичное «концептуальное» представление в форме адаптации непрерывной сети Петри, не охватывающей все типы и количество элементов системы формирования и управления качеством рудопотока для одного рудника, представлено на рис. 1.

## 2. Оценка управляющих возможностей на стабилизацию качества рудопотока в контуре ОФ

Стабилизация качества управления рудопотока может быть достигнута за счет разработки и применения совокупности модельных и алгоритмических решений.

Имитационное моделирование с помощью сетей Петри в этой части позволяет следующее.

1. За счет варьирования (в установленных технологическими ограничениями пределах) характеристик потоков и переходов ( $Q$  и  $t$  на рис. 1 соответственно) определить путем многократной симуляции либо встраиванием в процедуру оптимизации вариантов сглаживания качества рудопотока в конечной (контрольной) точке. Свойство прозрачности позволит в явном виде соотносить технологические ограничения транспортной и емкостной природы с прогоняемыми на модели вариантами. Анализ работ по данному направлению позволяет обнаружить примеры стабилизации, рассчитанные при различных емкостях бункеров на имитационной модели с использованием сети Петри.

2. За счет фундаментальной (и реализованной на примере, представленном на рис. 1) возможности для любого типа объекта перехода в нерабочее состояние определить в целях проактивного управления последствия такого состояния в отношении объектов моделируемой системы формирования рудопотока в контуре ОФ. Это позволит достаточно динамично, изменив параметры смежных участков добычи, транспортировки и хранения, рассчитать компенсационные варианты стабилизации.

3. Мониторинговая функция, реализуемая через симуляцию в реальном времени, позволяющая выявлять и «анимировать» на схеме формирования рудопотока аномальные отклонения, критические с точки зрения просчитанного варианта формирования заданного качества рудопотока, может явиться частью реализации схемы повышения управляемости и стабилизации качества рудопотока в контуре ОФ.

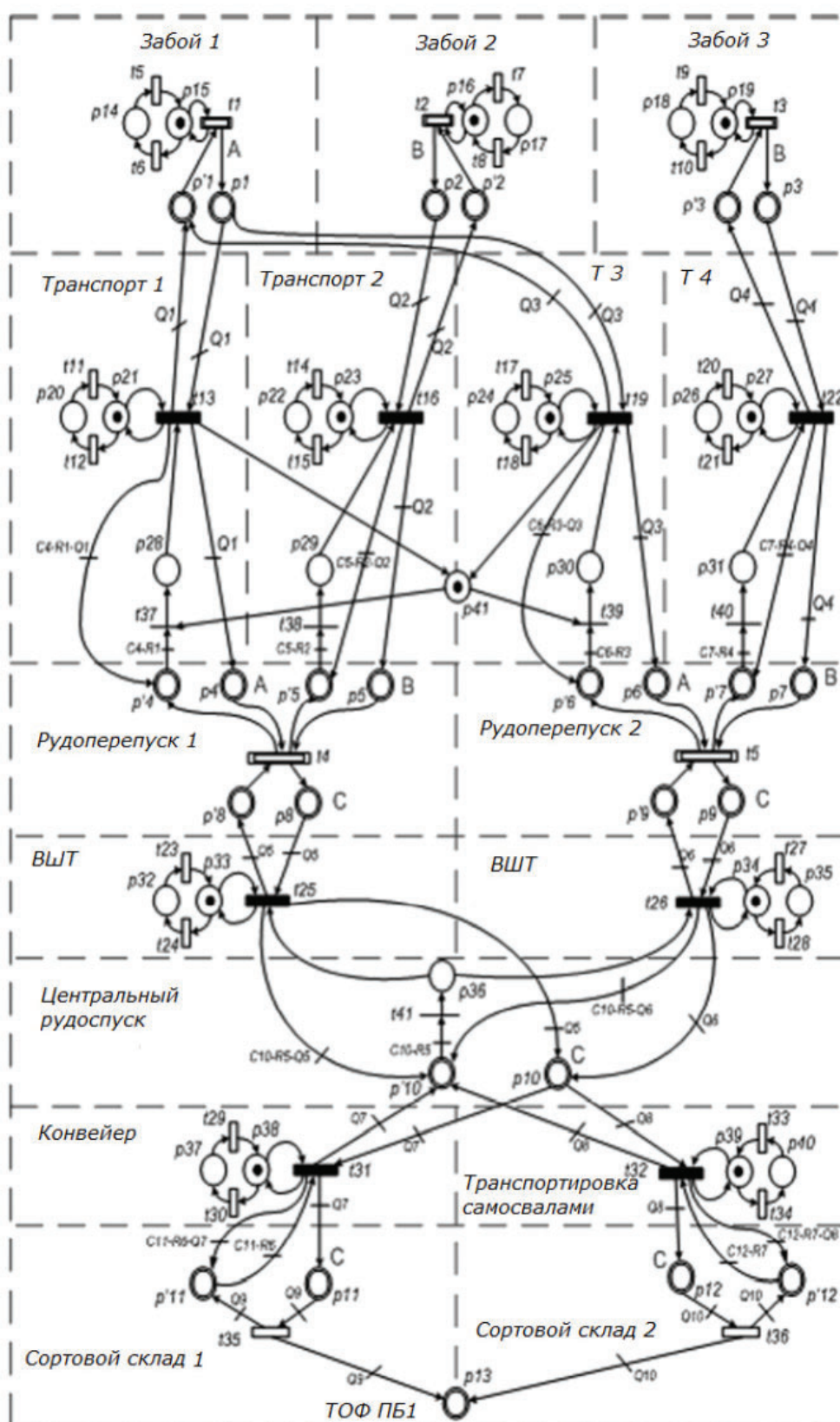


Рис. 1. Концептуальная адаптация непрерывной сети Петри для моделирования участка формирования рудопотока в контуре ОФ

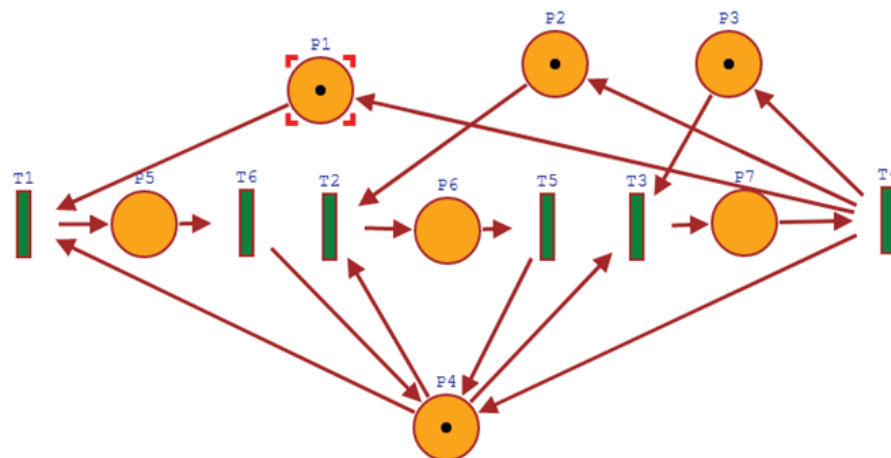


Рис. 2. Пример сети Петри

### 3. Концептуальное описание применения сетей Петри к моделированию рудопотока в контуре ОФ

Сети Петри являются инструментом моделирования динамических систем, в которых несколько распределенных процессов происходит одновременно. Как раз перемещение масс руды от забоев до обогатительной фабрики с различных рудников является подобной динамической системой, подходящей для моделирования ее функционирования сетями Петри. Таким образом, необходимо согласовать терминологию и методологию теории сетей Петри с терминологией и описанием системы процессов по перемещению горной массы (рудопотока). Рассмотрим применение основных компонентов сетей Петри для последующего описания концептуальной модели рудопотока.

#### 3.1. Содержательное описание применения сетей Петри к моделированию рудопотока

Канонически двудольный ориентированный граф представляет собой визуальную модель сети Петри.

Пример сети Петри отображен на рис. 2.

В соответствии с методологией классических сетей Петри существует два вида вершин в двудольном ориентированном графе: позиция (*place*) и переход (*transition*).

Таким образом, в сети Петри существует два множества взаимосвязанных вершин-позиций  $P = (P_1, \dots, P_n)$  и вершин-переходов  $T = (T_1, \dots, T_m)$ . Согласно рис. 2, все верши-

ны обоих множеств через направленные дуги (стрелочки) образуют собой логически обоснованную схему взаимосвязи направленных процессов, протекающих в динамической системе.

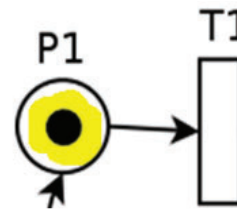
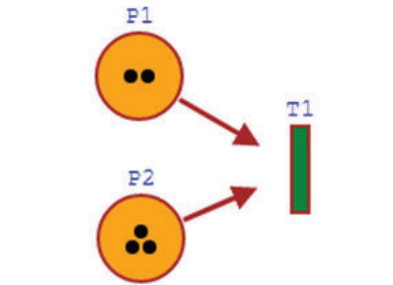
#### 3.2. Описание смысла вершин-позиций при моделировании рудопотока

Вершина-позиция при моделировании рудопотока является местом, в котором находится перемещаемая руда. Таким образом, вершина-позиция ассоциируется и моделирует забой, склад (участковый, рудниковый или поверхностный), рудоспуск (центральный или участковый), рудоперепуск, бункер и т.д. В рассматриваемом случае каждая вершина-позиция еще характеризуется рядом атрибутов (свойств, характеристик), таких как объем и масса руды в локации, а также ее качественные показатели по процентному содержанию полезных ископаемых (ПИ) с возможным указанием сортности или даже типизации.

В соответствии с теорией сетей Петри каждая вершина-позиция содержит некоторое неотрицательное количество меток («точек» внутри вершины-позиции). Метка – это элементарная (примитивная) сущность, подлежащая абстрактному перемещению по сети Петри. Согласно методологии метка отражает выполнение условий, характеризующих вершину-позицию. Отсутствие метки в вершине-позиции указывает на невозможность выполнения связанных с ней последующих вершин-переходов.

В данной работе по моделированию ру-





**Рис. 3.** Примеры отображения вершин разного вида: а) вершина-позиция, б) вершина-переход

**Рис. 4.** Сеть с двумя позициями и одним переходом

**Рис. 5.** Активация к запуску вершины-перехода

допотока метка – это в простейшем случае наличие руды в соответствующей локации, подлежащей и готовой к перемещению посредством активации процессов транспортировки. При развитии и расширении подхода моделирования рудопотока сетями Петри, метка буквально становится выемочной «единицей» руды, которая перемещается между позициями с помощью средств транспортировки (конвейер, скип и т.п.).

### 3.3. Описание смысла вершин-переходов при моделировании рудопотока

Вершина-переход моделирует приписанный данной вершине процесс. При этом процесс активируется в данной вершине, то есть готов к потенциальному запуску только после того, как появились метки в предстоящих вершинах-позициях, связанных направленными дугами (стрелками) с данной вершиной-переходом.

На рис. 5 наличие метки в  $P_1$  дает готовность к запуску процесса, ассоциированного с вершиной  $T_1$ . Или в другом примере, на рис. 4, считается, что процесс  $T_1$  готов к запуску (вершина  $T_1$  возбуждена), так как в предстоящих вершинах-позициях  $P_1$  и  $P_2$  есть метки.

Отметим, что с расширением подхода моделирования рудопотока сетями Петри предполагается использовать не только временные сети Петри, но и с цветной раскраской меток. Раскраска меток позволит ассоциировать цвет метки с сортностью или даже типом руды согласно и с учетом требуемой типизации руды, подаваемой на обоганительную фабрику. В данный момент это невозможно сразу в модели учесть в силу недостатка информации и знаний о моделях перемешивания руды в рудоспусках и бун-

керах, а также из-за отсутствия информации о типизации руды в блочной модели рудного тепла в системе *Micromine*. Тут главное понимать, что предлагаемый в общую концепцию подход моделирования рудопотока с помощью сетей Петри позволяет учесть в будущем учет типа руды в том числе.

В моделируемом рудопотоке вершины-переходы ассоциированы с процессами перемещения руды между двумя смежными локациями (например, между выемочной камерой (забоем) и участковым рудоспуском). Также становится очевидным, что каждый элементарный процесс по перемещению руды занимает некоторое время (как правило, случайное, но зависимое от скорости движения транспорта и расстояния откатки). Поэтому вершина-переход характеризуется продолжительностью интервала времени осуществления процесса перемещения руды, что указывает на применение не классических сетей Петри, а временных сетей Петри. Главное, любое перемещение руды завершается доставкой руды в место назначения, то есть в последующую смежную локацию.

Как описано выше, в сети Петри с течением времени, как и в моделируемой системе рудопотока, происходят события, связанные с совершенным фактом перемещения «единиц» руды, что приводит к изменению состояния сети Петри.

### 3.4. Описание смысла события и состояния в сети Петри при моделировании рудопотока

Определим состояние сети Петри как фиксированную на конкретный момент времени комбинацию распределения меток, которые находятся в вершинах-позиций в сети.

По сути состояние сети Петри к определен-

ному моменту времени – это уже отбитая руда и распределенная (или размещенная) по локациям системы рудопотока между забоями и обогащательной фабрикой. Таким образом, изменение состояния сети вызывает факт состоявшегося события транспортировки (метки) руды из одной произвольной локации (позиции в модели) до следующей смежной локации на транспортном пути, по которому руда перемещается от забоев к обогащательной фабрике. Состояние сети Петри еще называют маркировкой, то есть распределением меток (точек или маркеров) по вершинам-позициям. Следовательно, каждое состоявшееся элементарное событие транспортировки руды осуществляет изменение маркировки. Пусть  $M_0$  – это начальная маркировка сети Петри, что означает размещенные объемы руды, оставшиеся с прошлой смены. Таким образом, за произвольную смену маркировка сети Петри меняется от  $M_0$  до  $M_k$ , если совершено  $k$  элементарных событий в сети, связанных с  $k$  элементарными перемещениями руды.

### Заключение

Предложенный в настоящем исследовании подход по применению сетей Петри позволяет строить имитационные модели рудопотоков для обогащательных фабрик. В режиме реального времени все события-факты перемещения руды собираются и агрегируются в существующей информационной системе управления горными работами. При существующей базе данных событий за смену, сутки или декаду можно выполнить симуляцию функционирования рудопотока по модели сети Петри в ретроспективе. Выполнение данной симуляции позволит настроить параметры модели и провести ее ве-

рификацию, обучение, оценить доверительные временные интервалы выполнения элементарных операций при транспортировке, выявить устойчивость выполнения заданного плана в отведенный график работ в зависимости от возможных задержек на отдельных транспортных участках перемещения руды.

Также при планировании выполнения горных работ на модели рудопотока в сети Петри в ускоренном режиме можно «проиграть» сценарий работ на перспективу. При этом в процессе функционирования модели рудопотока в ускоренном режиме можно выявить и зафиксировать модельные моменты времени выполнения элементарных транспортных операций. Это позволит в режиме выполнения хода самих горных работ, работ по транспортировке руды ориентироваться на задержку или на опережение модельного хода работ, сравнивая текущую ситуацию со сценарием, полученным из модели сети Петри на уровне элементарных транспортных операций. Таким образом, система мониторинга и диспетчеризации горных работ сможет вовремя адекватно оценивать состояние хода выполняемых работ и уточнять или выяснять причины отставания по графику.

В развитии данного подхода моделирования можно считать, что метка, перемещаемая по графу, не обязательно является скалярной величиной, а может быть векторной. Следовательно, под меткой может пониматься не только объем и масса, а еще и содержание целевых компонентов и тип перемещаемой руды. Следовательно, для всей сети Петри по всем вершинам позиция в каждый момент времени будет описывать размещение руды по объему, массе, составу и типам сортов по всей сети снабжения до обогащательной фабрики.

### Литература

1. Каплунов, Д.Р. Обобщение современных подходов к управлению качеством рудопотоков в условиях действующих рудников на всех этапах освоения месторождения / Д.Р. Каплунов, А.Г. Рыльников // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. – 2020. – № 4. – С. 40–53.
2. Шадронов, А.Г. Совершенствование логистической схемы Светлинского рудника при переходе на цикличнопоточную технологию / А.Г. Шадронов // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. – 2020. – № 4. – С. 535–547.
3. Клебанов, Д.А. Прогнозная аналитика при управлении качеством на горнообогатительном производстве на примере добычи и обогащения угля / Д.А. Клебанов, Е.А. Князькин, М.А. Макеев // Уголь. – 2023. – № 12(1174). – С. 92–97.
4. Рыльникова, М.В. Цифровая трансформация – условие и основа устойчивого развития горнотехнических систем / М.В. Рыльникова // Горная промышленность. – 2021. – № 3. – С. 74–78.

5. Кантемиров, В.Д. Совершенствование методов рудоподготовки минерального сырья при освоении сложноструктурных месторождений / В.Д. Кантемиров // Горная промышленность. – 2022. – № S1. – С. 63–70.
6. Мальков, М.В. Сети Петри и моделирование / М.В. Мальков, С.Н. Малыгина // Труды Кольского научного центра РАН. – 2010. – № 3. – С. 35–40.
7. Кудж, С.А. Моделирование с использованием сетей Петри / С.А. Кудж, А.С. Логинова // Вестник МГТУ МИРЭА. – 2015. – № 1. – С. 10–22.
8. Игнатенко, В.А. Моделирование динамики функционирования систем управления технологическим процессом с использованием математического аппарата сетей Петри / В.А. Игнатенко, Д.А. Петросов // Информационно-аналитические системы и технологии, 2018. – С. 34–39.

### References

1. Kaplunov, D.R. Obobshchenie sovremennyh podhodov k upravleniyu kachestvom rudopotokov v usloviyah dejstvuyushchih rudnikov na vsekh etapah osvoeniya mestorozhdeniya / D.R. Kaplunov, A.G. Rylnikov // Izvestiya Tulsogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o zemle. – 2020. – № 4. – S. 40–53.
2. SHadrinov, A.G. Sovershenstvovanie logisticheskoy skhemy Svetlinskogo rudnika pri perekhode na tsiklichnopotchnuyu tekhnologiyu / A.G. SHadrinov // Izvestiya Tulsogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o zemle. – 2020. – № 4. – S. 535–547.
3. Klebanov, D.A. Prognoznaya analitika pri upravlenii kachestvom na gornoobogatitelnom proizvodstve na primere dobychi i obogashcheniya uglya / D.A. Klebanov, E.A. Knyazkin, M.A. Makeev // Ugol. – 2023. – № 12(1174). – S. 92–97.
4. Rylnikova, M.V. TSifrovaya transformatsiya-uslovie i osnova ustojchivogo razvitiya gornotekhnicheskikh sistem / M.V. Rylnikova // Gornaya promyshlennost. – 2021. – № 3. – S. 74–78.
5. Kantemirov, V.D. Sovershenstvovanie metodov rudopodgotovki mineralnogo syrya pri osvoenii slozhnostrukturnykh mestorozhdenij / V.D. Kantemirov // Gornaya promyshlennost. – 2022. – № S1. – S. 63–70.
6. Malkov, M.V. Seti Petri i modelirovanie / M.V. Malkov, S.N. Malygina // Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra RAN. – 2010. – № 3. – S. 35–40.
7. Kudzh, S.A. Modelirovanie s ispolzovaniem setej Petri / S.A. Kudzh, A.S. Loginova // Vestnik MGTU MIREA. – 2015. – № 1. – S. 10–22.
8. Ignatenko, V.A. Modelirovanie dinamiki funktsionirovaniya sistem upravleniya tekhnologicheskim protsessom s ispolzovaniem matematicheskogo apparata setej Petri / V.A. Ignatenko, D.A. Petrosov // Informatsionno-analiticheskie sistemy i tekhnologii, 2018. – S. 34–39.

---

© П.Н. Ларичев, В.С. Тынченко, 2023