

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Р.В. Ключев

Московский политехнический университет, Москва, Россия,
e-mail: kluev-roman@rambler.ru

Аннотация: Целью данного исследования является анализ и прогнозирование удельного электропотребления на горнодобывающем предприятии, а также выявление факторов, влияющих на расход электроэнергии, для дальнейшей оптимизации энергозатрат. В качестве объекта исследования выступает Тырныаузский вольфрам-молибденовый комбинат, характеризующийся сложными горно-геологическими условиями и применением как подземного, так и открытого методов добычи руды. Используются статистические данные по ежемесячному потреблению электроэнергии и объемам добычи руды. Проведенный анализ показал отсутствие устойчивой линейной корреляции между общим энергопотреблением и объемом добытой руды. Выявлена неоднородность в законах распределения электропотребления для различных производственных этапов. Прогнозные значения энергопотребления и удельного расхода, полученные с помощью метода наименьших квадратов, показывают их снижение в перспективе, но требуют дальнейшей верификации. С учетом сложной и многофакторной природы энергопотребления на горнодобывающем предприятии, перспективным направлением для дальнейших исследований является разработка комплексных моделей, сочетающих в себе статистические методы, методы машинного обучения и экспертные оценки. Такие модели позволят более точно прогнозировать энергопотребление и разрабатывать оптимальные стратегии управления энергоресурсами, что, в свою очередь, приведет к снижению затрат, повышению энергоэффективности и уменьшению негативного воздействия на окружающую среду.

Ключевые слова: вольфрам-молибденовое месторождение, удельное потребление электроэнергии, комбинат, добыча руды, уравнение регрессии, проходка, бурение, нарезные работы.

Для цитирования: Ключев Р. В. Моделирование и оптимизация удельного электропотребления основных технологических процессов горнодобывающего предприятия // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 4. – С. 170–181. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_4_0_170.

Modeling and optimization of energy intensity of basic flow processes at mines

R.V. Klyuev

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia, e-mail: kluev-roman@rambler.ru

Abstract: The aim of this study is to analyze and predict energy intensity of a mine, and to reveal factors that influence power consumption with a view to optimizing energy usage. The subject of research is the Tyrnauz Tungsten–Molybdenum Plant which practices both open-pit and underground method of mining in difficult geological conditions. This study uses statistical data on monthly energy consumption and ore production output. The implemented analysis shows the lack of stable linear correlation between the total energy consumption and the ore volume produced. Nonuniformity is found in energy use patterns at different production stages. The predicted values of energy consumption and energy intensity from the least square method display a decrease in the long view but need further verification. Considering a complex and multi-factor nature of energy consumption at the plant, the promising area of the further research is the integrated modeling using a combination of the statistical methods, machine learning and expert appraisal. Such models enable more accurate prediction of energy consumption, as well as optimization of energy resources control strategies, which, in its turn, can allow cost and energy improvement, as well as ensure mitigation of environmental impact.

Key words: tungsten–molybdenum deposit, energy intensity, plant, ore mining, regression equation, heading, drilling, face-entry driveage.

For citation: Klyuev R. V. Modeling and optimization of energy intensity of basic flow processes at mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(4):170-181. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_4_0_170.

Введение

Основными задачами систем энергоснабжения горных предприятий являются следующие:

- полное обеспечение потребностей предприятий всеми видами энергии: электрической и тепловой, сжатым воздухом, водой и т.д. [1, 2];
- повышение надежности и бесперебойности энергоснабжения [3, 4];
- экономичная работа технологических и энергетических установок и максимальное снижение расхода энергетических ресурсов [5];
- снижение стоимости систем энергоснабжения.

Возможность дальнейшего повышения выработки электроэнергии основывается на достижениях научно-технического процесса в области энергетики [6, 7] и связана с укрупнением единичной мощности агрегатов на сверхкритических параметрах пара на тепловых станциях, увеличением мощности агрегатов

на атомных и гидроэлектростанциях, ростом мощностей других электростанций и, в конечном итоге, с дальнейшим развитием энергосистем и их объединений. Рост производства электроэнергии, наблюдаемый в современном мире, неразрывно связан с ростом потребления как крупными промышленными объектами, так и частными пользователями. В связи с этим на передний план выходят вопросы по снижению энергопотребления и минимизации экономических затрат. Для повышения эффективности использования энергии на промышленных предприятиях необходимо внедрить целый комплекс мероприятий, включая оптимизацию технологических процессов, совершенствование организации производства, разработку и применение передовых норм удельного расхода энергии, а также организацию контроля за ее использованием [8, 9]. При этом особое внимание следует обратить на добычу и дальнейшую переработку стра-

тегически важных полезных ископаемых в горнодобывающей и перерабатывающей отрасли, а также осуществление мониторинга экологической ситуации в ходе проведения горных работ [10, 11]. Эффективное энергопотребление предполагает не только подсчет объемов потребляемой электроэнергии, но и выполнение расчетов по ее оптимальному использованию. Это, в свою очередь, ведет к снижению экономических издержек, нагрузки на энергетическую систему и уменьшению негативного воздействия на окружающую среду. Особую роль в этом процессе играет внедрение интеллектуальных систем управления энергопотреблением [12, 13], администрирование учета и контроля энергопотоков в режиме реального времени, а также корректировка режимов работы оборудования.

Объект исследования

Для удовлетворения потребностей промышленности в вольфраме и молибдене важная роль отводится вольфрамомолибденовым комбинатам (ВМК), перед которыми поставлена основная задача по увеличению добычи руды и ее дальнейшему обогащению на фабриках. Добыча руды, как правило, проводится подземным и открытым способом. В качестве объекта исследования в работе рассматривается Тырнаузский ВМК (ТВМК), который планируется в 2025 г. вновь ввести в работу.

Краткая характеристика объекта исследования

Разрабатываемое комбинатом вольфрамомолибденовое месторождение расположено в высокогорном скалистом районе с глубоко расчлененным крутосклонным рельефом с относительным превышением вершин до 1000 м и уклоном поверхности 35–40°. Главными производственными цехами ТВМК явля-

ются следующие: рудник «Молибден», карьер «Мукуланский», корпус самоизмельчения (КСИ), обогатительная фабрика — главный корпус (ГК), ремонтный завод. Порядка 80% руды направляется на обогатительную фабрику комбината с разработок рудника «Молибден».

Наиболее энергоемкими потребителями являются стационарные машины и установки, их доля составляет порядка 75–80% от всей мощности предприятия.

Основными стационарными установками рудника «Молибден» являются вентиляторные, пневматические, подъемные и водоотливные (водоснабжение) установки.

На Тырнаузском месторождении используется сочетание методов добычи: большая часть руды извлекается подземным способом, а примерно пятая часть — открытым.

Подземная отработка производится тремя участками (шахтами): Северо-Западным, Центральным (№ 1, № 2), связанными общими вскрывающими выработками.

На руднике открытых работ (РОР) «Мукуланский» ведется добыча руд открытым способом. В комплекс открытых работ входят буровзрывные работы с широким использованием высокопроизводительных станков шарошечного и пневмоударного бурения, экскаваторные работы и функционирование транспорта с широко развитым путевым хозяйством и применением электровозов и автотранспорта.

Под землей руду перевозят разными видами транспорта: до определенных точек — специализированными транспортными средствами, далее — электровозами с вагонетками, а на самых глубоких горизонтах (2242 и 2167 м) — самосвалами. Извлеченная руда сначала спускается по специальным шахтным стволам (рудоспускам), а затем направ-

ляется на более высокий уровень – в штольню «Главная».

Доставка руды до обогатительной фабрики происходит в два этапа:

- руда доставляется в вагонах в дробильно-сортировочную установку (ДСУ), где происходит сортировка и дробление руды до фракции $d = 300$ мм;
- с ДСУ руда конвейером ($l = 800$ м) доставляется в КСИ.

С главного конвейера руда поступает на два промежуточных конвейера ($l = 157$ м), откуда идет в бункера (10 шт.). Из бункеров руда поступает на питатели, далее идет на сборный конвейер. Непосредственно на сборном конвейере руда поступает в мельницы мокрого самоизмельчения (ММС) производительностью $130 \div 150$ т/ч. В ММС происходит самоизмельчение руды и смешивание ее с водой. В шаровых мельницах с разгрузкой через решетку (МШР) руда доводится до пульпообразного состояния и вторичного смешивания с водой, после чего она идет в классификаторы. Под действием собственного веса вся пульпа подается в гидротрассу, в которой имеется 132 колодца (колена) для погашения скорости, связанной с перепадом высот между КСИ и ГК. По гидротрассе руда в пульпообразном состоянии доставляется на обогатительную фабрику (главный корпус ГК) в распределительные баки. На обогатительной фабрике способом флотации извлекаются руды молибдена и вольфрама, а также происходит попутное извлечение золота и сурьмы. Завершающим звеном в цепи технологического процесса получения вольфрама и молибдена является гидрометаллургический завод.

Теоретические предпосылки анализа удельного электропотребления

В условиях постоянно растущей стоимости энергоресурсов и жестких требо-

ваний к энергоэффективности точное прогнозирование удельного электропотребления становится обязательным условием для горнодобывающих предприятий [14, 15].

При исследовании вопросов электропотребления, нормирования и прогнозирования удельных норм расхода электроэнергии основным математическим аппаратом выступают статистические и методы машинного обучения [16, 17].

Для определения потребления электроэнергии на горнодобывающем предприятии можно использовать линейную регрессию:

$$\omega_{\text{уд}} = b + a \cdot Q, \quad (1)$$

где Q – объем добытой руды, т (сутки, месяц); a и b – коэффициенты регрессионного уравнения, которые рассчитываются на основе статистических данных.

Если известен диапазон изменения объема добычи руды, выражение (1) позволяет прогнозировать расход электроэнергии на заданный период. Такой прогноз строится с использованием точечного метода Хельвига, который учитывает статистические данные по двум группам. Для каждой группы существуют средние значения и корреляции коэффициентов, которые позволяют оценить, что на данный момент существует тесная связь между энергопотреблением и результатами вычислений. Эффективность такого прогнозирования зависит от периода времени, на который делается прогноз, и от возможности корректировки модели. Для краткосрочного планирования обычно хорошо себя показывают модели, построенные на основе данных об электропотреблении и добыче руды за последние 3–5 лет и более. В конце каждого планового периода необходимо скорректировать модель, чтобы учесть различия между прогнозом и фактическими данными. Для создания моделей

прогнозирования важно использовать как можно меньше параметров, которые при этом достаточно точно подходят для объекта. Проверка адекватности модели проводится с помощью ретроспективного анализа. Помимо точечного метода Хельвига, для анализа зависимости энергопотребления от добычи руды могут применяться и другие характерные подходы, например, множественная линейная регрессия с учетом дополнительных факторов, таких как тип руды, глубина разработки, характеристики оборудования и погодные условия. Кроме того, использование методов машинного обучения, в частности, искусственных нейронных сетей и алгоритмов градиентного бустинга, может позволить построить более точные и устойчивые к аномалиям модели. Выбор конкретного метода зависит от объема и качества доступных данных, а также от требуемой точности и сложности модели.

Для повышения точности прогнозирования электропотребления необходимо учитывать не только объем добычи руды, но и другие факторы, такие как сезонные колебания, характеристики оборудования, технологические особенности процесса, качество руды и климатические условия [18, 19]. Машинное обучение позволяет интегрировать все эти факторы в единую модель и получить достаточно точный прогноз. Кроме того, методы машинного обучения позволяют автоматически адаптировать модели к изменениям по входным данным, что обеспечивает более высокую точность прогнозирования при меняющихся условиях производства. Важным аспектом является выбор набора критериев для обучения модели. Слишком мало признаков может привести к недообучению модели, слишком много — к переобучению. Применение методов отбора признаков (выбора признаков) и уменьшения размерности позволяет создавать ком-

пактные и эффективные модели прогнозирования, которые будут точно отражать реальные закономерности в данных, что делает процесс принятия решений по энергетическому планированию более обоснованным. Внедрение методов машинного обучения в практику управления энергетическими задачами горнодобывающих предприятий позволит не только снизить затраты на электроэнергетику, но и повысить эффективность производства, а также уменьшить негативное воздействие на окружающую среду. Это делает применение машинного обучения перспективным направлением для исследований и практической реализации в горнодобывающей отрасли. Методы машинного обучения, в отличие от классических статистических методов, предоставляют более гибкие инструменты для исследования сложных нелинейных зависимостей. Помимо линейной регрессии, которая хорошо подходит для описания простых связей, можно использовать нейронные сети, древовидные вычисления, методы опорных векторов и другие алгоритмы, способные выявлять более упрощенные закономерности в данных и учитывать влияние большего количества факторов [20, 21].

Анализ удельного электропотребления при добыче руды

В данном случае анализируется энергопотребление горнодобывающего предприятия в зависимости от объемов добычи руды. Цель исследования — установить статистическую связь между ежемесячным потреблением электроэнергии и потреблением добытой руды, вычислив основные статистические показатели в этой зависимости. Анализ проводится на основе данных о ежемесячном потреблении энергии и объемах добычи за определенный период. Для

повышения точности анализа энергопотребления на любых предприятиях помимо ежемесячных данных используются дополнительные факторы, такие как тип добываемого полезного ископаемого, применяемые технологии добычи (открытый или подземный метод, использование взрывчатых веществ), состояние технического оборудования, глубина залегания месторождения, а также внешние факторы (погодные условия, доступность путей). Включение этих параметров в анализ позволит создать более точную и информативную модель энергопотребления, которая будет лучше отражать реальную картину и позволит более эффективно планировать энергозатраты и корректировать работу предприятия. Более сложные модели, например, осно-

ванные на методах машинного обучения, могли бы учитывать нелинейные взаимосвязи между живыми переменными и повышать точность прогнозирования, в частности при различных способах аккумулирования энергии [22].

Были получены выборки данных объемом $50 \div 100$ значений на добычу руды, а также ее составляющих на проходку (ω_1), нарезные работы (ω_2), бурение (ω_3), отбойку (ω_4), вторичное дробление (ω_5) за период времени в течение 5 лет, которые были проверены на репрезентативность и однородность, рассчитаны значения математических ожиданий, среднеквадратичных отклонений, асимметрии и эксцесса, а также соответствующие коэффициенты корреляции и уравнений регрессии (a_1, a_2 – для W ; b_1, b_2 – для ω).

Таблица 1

Статистические параметры рассматриваемых массивов
Statistical parameters of the arrays under consideration

Параметр	Добыча руды	Проходка	Нарезные работы	Бурение	Отбойка	Вторичное дробление
m_Q, τ	326 351	326 351	326 351	326 351	326 351	326 351
σ_Q, τ	15 050	15 050	15 050	15 050	15 050	15 050
A_Q	0,668	0,668	0,668	0,668	0,668	0,668
E_Q	-0,252	-0,252	-0,252	-0,252	-0,252	-0,252
$m_W, \text{кВт}\cdot\text{ч}$	1 375 362	140 731	119 462	1 013 025	92 243	141 029
$\sigma_W, \text{кВт}\cdot\text{ч}$	291 401	58 982	36 791	210 520	66 174	85 502
A_W	0,7	-0,945	0,15	-0,504	-1,43	1,88
E_W	1,32	0,321	-1,21	0,119	-1,75	3,66
$m_\omega, \text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$	4,22	0,431	0,366	3,11	0,285	0,431
$\sigma_\omega, \text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$	0,909	0,179	0,112	0,67	0,202	0,259
A_ω	0,6	0,919	0,198	0,393	1,41	1,95
E_ω	1,31	0,367	-1,01	-0,016	1,78	4,18
R_{QW}	-0,054	0,106	0,09	-0,105	0,0164	0,163
$R_{Q\omega}$	-0,21	0,476	-0,043	-0,301	-0,065	0,077
a_1	0,143	0,417	0,22	-1,47	$7,23 \cdot 10^{-3}$	0,926
a_2	$-1,27 \cdot 10^{-5}$	$5,65 \cdot 10^{-8}$	$-3,24 \cdot 10^{-7}$	$1,34 \cdot 10^{-5}$	$-8,7 \cdot 10^{-7}$	$1,32 \cdot 10^{-6}$
b_1	1 409 203	4551	47 415	1 493 619	90 584	-161 093
b_2	8,35	0,413	0,472	7,5	0,569	$-5,52 \cdot 10^{-4}$



Усредненные значения математических ожиданий удельного расхода электроэнергии по отдельным технологическим операциям добычи руды

Average values of mathematical expectations of specific energy consumption for individual technological operations of ore mining

В табл. 1 представлены статистические параметры рассматриваемых массивов.

В табл. 1 приняты следующие обозначения: индексы Q , W , ω — добыча руды, расход электроэнергии, удельное электропотребление соответственно; m , σ , A , E — среднее квадратичное отклонение, асимметрия, эксцесс соответственно; R — коэффициент корреляции.

Для массива W , ω на добычу руды значения асимметрии и эксцесса показывают, что рассматриваемые массивы характеризуются распределением с правосторонней скошенностью ($A > 0$) и заостренной вершиной ($E > 0$). На рисунке представлены усредненные значения математических ожиданий удельного расхода электроэнергии по отдельным технологическим операциям добычи руды.

Суммарное усредненное значение удельного расхода электроэнергии на добычу руды составило 4,623 кВт·ч/т при общем объеме 324783 т.

Доверительные интервалы определяются по выражению

$$m_x - t_\beta \cdot \sigma_x \leq x \leq m_x + t_\beta \cdot \sigma_x, \quad (2)$$

где $t_\beta = 1,96$.

$$804\,216 \leq W \leq 1\,946\,507 \text{ кВт}\cdot\text{ч};$$

$$296\,853 \leq Q \leq 355\,849 \text{ т};$$

$$2,44 \leq \omega \leq 6,00.$$

Анализ взаимосвязи между объемом добываемой руды (Q) и общим энергопотреблением (W) показал, что эти параметры не демонстрируют устойчивой корреляции. Коэффициент корреляции (R_{QW}) изменялся в диапазоне от $-0,105$ до $0,163$, что свидетельствует о слабой и непостоянной связи между этими величинами. Аналогично, при рассмотрении удельного энергопотребления значение коэффициента корреляции ($R_{Q\omega}$) находилось в пределах от $-0,21$ до $0,476$, что также не подтверждает наличие статистически значимой взаимосвязи.

Для более детального изучения характеристик данных все массивы, представляющие потребление электроэнергии в различных производственных процессах, были протестированы на соответствие нормальному закону распределения. Результаты показали, что расход энергии на добычу, бурение и проходку подчиняется нормальному распределению, тогда как энергопотребление при нарезных работах и вторичном дроблении лучше всего описывается законом Макс-

велла, а расход электроэнергии на отбойку — показательным законом.

Выявленная неоднородность в законах распределения электропотребления для различных производственных этапов может быть обусловлена различиями в типах применяемого оборудования, режимах его работы и характере самих технологических процессов. Например, процессы бурения и проходки, как правило, характеризуются более стабильным режимом работы, тогда как отбойка и дробление могут подвергаться более значительным колебаниям в зависимости от характеристик рудного массива и производственных потребностей. Дальнейшее изучение этих особенностей распределения может позволить разработать более точные модели энергопотребления для каждого производственного этапа, что, в свою очередь, даст возможность более эффективно управлять энергозатратами на предприятии.

Прогнозирование потребления электроэнергии и удельного расхода электроэнергии

Прогнозирование электропотребления является ключевым элементом пла-

Таблица 2

Результаты расчетов коэффициентов a_2 и b_2 Results of calculations of coefficients a_2 and b_2

Квартал	Доверительные интервалы, $t = 1,96$ при $\beta = 0,05$	Уравнение регрессии	Прогнозное значение на следующий год
Расход электроэнергии на добычу, W, кВт·ч			
I квартал	$4\ 641\ 763 \geq W_I \geq 4\ 334\ 392$	$-688\ 772,51 \cdot T + 60\ 967\ 423$	3 110 533
II квартал	$4\ 315\ 426 \geq W_{II} \geq 3\ 406\ 751$	$-327\ 822 \cdot T + 30\ 578\ 582$	3 041 534
III квартал	$5\ 237\ 952 \geq W_{III} \geq 3\ 366\ 159$	$-215\ 055,5 \cdot T + 21\ 936\ 607,3$	3 871 987
IV квартал	$5\ 787\ 882 \geq W_{IV} \geq 2\ 060\ 997$	$-607\ 714,7 \cdot T + 53\ 453\ 187,8$	2 405 153
Удельный расход электроэнергии на добычу, ω, кВт·ч/т			
I квартал	$6,07 \geq \omega_I \geq 3,14$	$-0,58 \cdot T + 52,17$	3,45
II квартал	$4,82 \geq \omega_{II} \geq 3,14$	$-0,61 \cdot T + 53,69$	2,45
III квартал	$5,29 \geq \omega_{III} \geq 3,4$	$-0,29 \cdot T + 28,13$	3,77
IV квартал	$5,85 \geq \omega_{IV} \geq 2,17$	$-0,587 \cdot T + 51,85$	2,54

нирования и управления энергосистемами. От точности прогнозов зависит эффективность распределения ресурсов, стабильность работы сети и экономическая целесообразность инвестиций. Методы прогнозирования можно классифицировать по различным критериям, включая временной диапазон (краткосрочные, среднесрочные, долгосрочные), тип модели (статистические, машинного обучения, гибридные) и уровень детализации (общий спрос, спрос отдельных потребителей).

Выбор метода прогнозирования электропотребления требует тщательного анализа данных и учета специфических особенностей задачи. У каждого метода есть свои преимущества и недостатки, поэтому часто используются гибридные подходы для достижения наилучших результатов.

Современные тенденции связаны с использованием методов машинного обучения (ML), особенно глубокого обучения, для обработки больших данных и выявления скрытых закономерностей, но статистические методы остаются важным инструментом для анализа трендов и сезонности.

В работе использован метод наименьших квадратов (МНК) для прогнозирования W и ω .

Было выявлено, что расход электроэнергии на добычу руды распределен по нормальному расходу. Уравнение регрессии в данном случае будет иметь следующий вид:

$$W = a_1 \cdot T + b_1. \quad (3)$$

Для удельного расхода электроэнергии:

$$\omega = a_2 \cdot T + b_2. \quad (4)$$

Для нахождения прогнозируемой величины W или ω необходимо в выражения (3), (4) поставить порядковый номер года, на который ведется прогнозирование:

$$W_{(n+1)} = a_1 \cdot T_{(n+1)} + b_1; \quad (5)$$

$$\omega_{(n+1)} = a_2 \cdot T_{(n+1)} + b_2, \quad (6)$$

где $T_{(n+1)} = 84$.

Например, для первого квартала:

$$W_{(n+1)} = -688\,772,51 \cdot 84 + \\ + 60\,967\,423 = 3\,110\,533 \text{ кВт}\cdot\text{ч};$$

$$\omega_{(n+1)} = -0,58 \cdot 84 + 52,17 = \\ = 3,45 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}.$$

Доверительные интервалы, уравнения регрессии и прогнозные значения W или ω приведены в табл. 2.

Выводы

1. Основными задачами систем энергоснабжения горнодобывающих предприятий являются: обеспечение всех видов энергии, надежность и бесперебойность энергоснабжения, экономичная работа оборудования и минимизация затрат, а также снижение стоимости энергосистем.

2. В условиях роста производства электроэнергии и увеличения потребления ключевым становится вопрос снижения энергопотребления и минимизации

экономических издержек на промышленных предприятиях, особенно в горнодобывающей отрасли.

3. Объектом исследования выступает Тырныаузский вольфрамо-молибденовый комбинат (ТВМК) с его специфическими горно-геологическими и технологическими условиями.

4. Анализ показал, что прямая связь между общим энергопотреблением и объемами добычи руды не является устойчивой и линейной, что свидетельствует о влиянии дополнительных факторов на энергопотребление и необходимости использования более сложных моделей, учитывающих дополнительные факторы.

5. Расход электроэнергии на различных этапах горнодобывающего процесса (добыча, бурение, проходка, нарезные работы, отбойка, вторичное дробление) подчиняется различным законам распределения, что говорит о необходимости дифференцированного подхода к анализу и оптимизации энергопотребления на каждом из этих этапов.

6. Основными энергопотребителями на руднике «Молибден» являются стационарные установки, такие как вентиляционные, пневматические, подъемные и водоотливные, на которые приходится около 75–80% всей мощности предприятия.

7. Для прогнозирования энергопотребления может использоваться как статистический метод наименьших квадратов, так и более сложные методы машинного обучения, способные учитывать большее количество факторов и нелинейные зависимости.

8. Использование метода наименьших квадратов позволило получить доверительные интервалы и прогнозные значения по расходу электроэнергии и удельному потреблению на квартал следующего года.

9. Учитывая сложную и многофакторную природу энергопотребления на

горнодобывающем предприятии, перспективным направлением для дальнейших исследований является разработка комплексных моделей, сочетающих в себе статистические методы, методы машинного обучения и экспертные оценки. Такие модели позволяют более точно

прогнозировать энергопотребление и разрабатывать оптимальные стратегии управления энергоресурсами, что, в свою очередь, приведет к снижению затрат, повышению энергоэффективности и уменьшению негативного воздействия на окружающую среду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуковский Ю. Л., Сусликов П. К. Оценка потенциального эффекта применения технологии управления спросом на горных предприятиях // Устойчивое развитие горных территорий. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 895–908. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-895-908.
2. Ключев Р. В. Анализ надежности элементов системы электроснабжения карьеров // Горные науки и технологии. — 2024. — № 9(2). — С. 183–194. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-03-254.
3. Петров В. Л., Пичуев А. В. Оценка эффективности средств повышения качества электроэнергии в системе частотно-регулируемого электропривода скребковых конвейеров // Горные науки и технологии. — 2024. — Т. 9. — № 1. — С. 60–69. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-01-198.
4. Zatsepina V., Astanin S. Investigation of new approaches to determining the level of reliability / 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). 2021, pp. 1184–1187. DOI: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632086.
5. Ключев Р. В. Системный анализ методов расчета систем электроснабжения карьеров // Устойчивое развитие горных территорий. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 302–310. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-302-310.
6. Перстенёва Н. П., Токарев Ю. А., Горбунова О. А., Кравченко О. В. Моделирование влияния потребления различных видов энергоресурсов на экономическое развитие страны // Уголь. — 2022. — № 9. — С. 53–55. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-9-53-55.
7. Савон Д. Ю., Новоселов С. В., Борисова Л. В., Сафронов А. Е. Тенденции мирового потребления энергоресурсов и стратегическая роль угля в топливно-энергетическом балансе России // Уголь. — 2024. — № 5. — С. 86–91. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-5-86-91.
8. Zhukovskiy Y., Batueva D., Buldysko A., Shabalov M. Motivation towards energy saving by means of IoT personal energy manager platform // Journal of Physics: Conference Series. 2019, vol. 1333, no. 6, article 062033. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/6/062033.
9. Gunkel P. A., Jacobsen H. K., Bergaentzle C.-M., Scheller F. Andersen F. M. Variability in electricity consumption by category of consumer: The impact on electricity load profiles // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2022, vol. 147, article 108852. DOI: 10.1016/j.ijepes.2022.108852.
10. Кумаритов А. М., Соколова Е. А., Соколов А. А. Геоинформационная система мониторинга экологической обстановки в районе внутригородских промышленных объектов // Горный журнал. — 2016. — № 2. — С. 94–96. DOI: 10.17580/gzh.2016.02.18.
11. Sokolov A. A., Fomenko O. A., Ignatev I. V. Development of algorithms for control and control of electric power parameters based on information-measuring system data // Journal of Physics: Conference Series. 2022, vol. 2176, no. 1, article 012076. DOI: 10.1088/1742-6596/2176/1/012076.
12. Вялкова С. А., Моргоева А. Д., Гаврина О. А. Разработка гибридной модели прогнозирования потребления электрической энергии для горно-металлургического предприятия // Устойчивое развитие горных территорий. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 486–493. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-486-493.
13. Моргоева А. Д., Моргоев И. Д., Ключев Р. В., Гаврина О. А. Прогнозирование потребления электрической энергии промышленным предприятием с помощью методов машинного обучения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2022. — Т. 333. — № 7. — С. 115–125. DOI: 10.18799/24131830/2022/7/527.
14. Капанский А. А. Методы решения задач оценки и прогнозирования энергетической эффективности // Вестник Казанского государственного энергетического университета. — 2019. — Т. 11. — № 2 (42). — С. 103–115.

15. Голик В. И. Перспективное направление восстановления потенциала Садоны // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14. – № 1. – С. 68–75. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-1-68-75.

16. Martyushev N. V., Malozyomov B. V., Khalikov I. H., Kukartsev V. A., Kukartsev V. V., Tynchenko V. S., Tynchenko Ya. A., Qi M. Review of methods for improving the energy efficiency of electrified ground transport by optimizing battery consumption // *Energies*. 2023, vol. 16, no. 2, article 729. DOI: 10.3390/en16020729.


17. Malozyomov B. V., Martyushev N. V., Voitovich E. V., Kononenko R. V., Konyukhov V. Y., Tynchenko V., Kukartsev V. A., Tynchenko Y. A. Designing the optimal configuration of a small power system for autonomous power supply of weather station equipment // *Energies*. 2023, vol. 16, no. 13, article 5046. DOI: 10.3390/en16135046.

18. Zhou C., Chen X. Predicting China's energy consumption: Combining machine learning with three-layer decomposition approach // *Energy Reports*. 2021, vol. 7, pp. 5086–5099. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.08.103.

19. Yousaf A., Asif R. M., Shakir M., Rehman A. U., Adrees M. An Improved residential electricity load forecasting using a machine-learning-based feature selection approach and a proposed integration strategy // *Sustainability*. 2021, vol. 13, article 6199. DOI: 10.3390/su13116199.

20. Hamed M. M., Ali H., Abdelal Q. Forecasting annual electric power consumption using a random parameters model with heterogeneity in means and variances // *Energy*. 2022, vol. 255, article 124510. DOI: 10.1016/j.energy.2022.124510.

21. Kanté M., Li Y., Deng S. Scenarios analysis on electric power planning based on multi-scale forecast: A case study of Taoussa, Mali from 2020 to 2035 // *Energies*. 2021, vol. 14, article 8515. DOI: 10.3390/en14248515.

22. Афанасьев В. Я., Краев В. М., Тихонов А. И., Серебрякова Г. В. Перспективные способы аккумулирования энергии // Уголь. – 2024. – № 8. – С. 124–129. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-8-124-129. 

REFERENCES

1. Zhukovskiy Yu. L., Suslikov P. K. Assessment of the potential effect of applying demand management technology at mining enterprises. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 3, pp. 895–908. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-895-908.

2. Klyuev R. V. Reliability analysis of open-pit power supply system components. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024, no. 9(2), pp. 183–194. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-03-254.

3. Petrov V. L., Pichuev A. V. Assessing the efficiency of measures to enhance electric power quality in variable frequency drive for scraper conveyors. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024, vol. 9, no. 1, pp. 60–69. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-01-198.

4. Zatsepina V., Astanin S. Investigation of new approaches to determining the level of reliability. *3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*. 2021, pp. 1184–1187. DOI: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632086.

5. Klyuev R. V. System analysis of calculation methods for power supply systems in quarry points. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 1, pp. 302–310. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-302-310.

6. Persteneva N. P., Tokarev Yu. A., Gorbunova O. A., Kravchenko O. V. Modeling of influence of different energy resources consumption on the economic development of the country. *Ugol'*. 2022, no. 9, pp. 53–55. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-9-53-55.

7. Savon D. Yu., Novoselov S. V., Borisova L. V., Safronov A. E. Trends in global energy consumption and the strategic role of coal in the fuel and energy balance of the Russian Federation. *Ugol'*. 2024, no. 5, pp. 86–91. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-5-86-91.

8. Zhukovskiy Y., Batueva D., Buldysko A., Shabalov M. Motivation towards energy saving by means of IoT personal energy manager platform. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019, vol. 1333, no. 6, article 062033. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/6/062033.

9. Gunkel P. A., Jacobsen H. K., Bergaentzlé C.-M., Scheller F. Andersen F. M. Variability in electricity consumption by category of consumer: The impact on electricity load profiles. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2022, vol. 147, article 108852. DOI: 10.1016/j.ijepes.2022.108852.

10. Kumaritov A. M., Sokolova E. A., Sokolov A. A. Geoinformation system of ecological monitoring in inner-city industrial areas. *Gornyi Zhurnal*. 2016, no. 2, pp. 94 – 96. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2016.02.18.

11. Sokolov A. A., Fomenko O. A., Ignatev I. V. Development of algorithms for control and control of electric power parameters based on information-measuring system data. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022, vol. 2176, no. 1, article 012076. DOI: 10.1088/1742-6596/2176/1/012076.

12. Vyalkova S. A., Morgoeva A. D., Gavrina O. A. Development of a hybrid model for predicting the consumption of electrical energy for a mining and metallurgical enterprise. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 3, pp. 486 – 493. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-486-493.

13. Morgoeva A. D., Morgoev I. D., Klyuev R. V., Gavrina O. A. Forecasting of electric energy consumption by an industrial enterprise using machine learning methods. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022, vol. 333, no. 7, pp. 115 – 125. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2022/7/3527.

14. Kapansky A. A. Methods for solving the problems of evaluation and forecasting energy efficiency. *Kazan state power engineering university bulletin*. 2019, vol. 11, no. 2 (42), pp. 103 – 115. [In Russ].

15. Golik V. I. Promising direction of Sadon's potential recovery (RNO-Alania). *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 1, pp. 68 – 75. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-1-68-75.

16. Martyushev N. V., Malozyomov B. V., Khalikov I. H., Kukartsev V. A., Kukartsev V. V., Tynchenko V. S., Tynchenko Ya. A., Qi M. Review of methods for improving the energy efficiency of electrified ground transport by optimizing battery consumption. *Energies*. 2023, vol. 16, no. 2, article 729. DOI: 10.3390/en16020729.

17. Malozyomov B. V., Martyushev N. V., Voitovich E. V., Kononenko R. V., Konyukhov V. Y., Tynchenko V., Kukartsev V. A., Tynchenko Y. A. Designing the optimal configuration of a small power system for autonomous power supply of weather station equipment. *Energies*. 2023, vol. 16, no. 13, article 5046. DOI: 10.3390/en16135046.

18. Zhou C., Chen X. Predicting China's energy consumption: Combining machine learning with three-layer decomposition approach. *Energy Reports*. 2021, vol. 7, pp. 5086 – 5099. DOI: 10.1016/j.egy.2021.08.103.

19. Yousaf A., Asif R. M., Shakir M., Rehman A. U., Adrees M. An Improved residential electricity load forecasting using a machine-learning-based feature selection approach and a proposed integration strategy. *Sustainability*. 2021, vol. 13, article 6199. DOI: 10.3390/su13116199.

20. Hamed M. M., Ali H., Abdelal Q. Forecasting annual electric power consumption using a random parameters model with heterogeneity in means and variances. *Energy*. 2022, vol. 255, article 124510. DOI: 10.1016/j.energy.2022.124510.

21. Kanté M., Li Y., Deng S. Scenarios analysis on electric power planning based on multi-scale forecast: A case study of Taoussa, Mali from 2020 to 2035. *Energies*. 2021, vol. 14, article 8515. DOI: 10.3390/en14248515.

22. Afanasiev V. Ya., Kraev V. M., Tikhonov A. I., Serebryakova G. V. Prospective ways to store energy. *Ugol'*. 2024, no. 8, pp. 124 – 129. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-8-124-129.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Клюев Роман Владимирович — д-р техн. наук, доцент, профессор, Московский политехнический университет, e-mail: kluev-roman@rambler.ru, ORCID ID: 0000-0003-3777-7203.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

R. V. Klyuev, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Professor, Moscow Polytechnic University, 107023, Moscow, Russia, e-mail: kluev-roman@rambler.ru, ORCID ID: 0000-0003-3777-7203.

Получена редакцией 29.12.2024; получена после рецензии 03.02.2025; принята к печати 10.03.2025.
Received by the editors 29.12.2024; received after the review 03.02.2025; accepted for printing 10.03.2025.