

УДК 622.271:622.3.013 © С.М. Карпенко<sup>1</sup>, Н.В. Карпенко<sup>2</sup>,  
Е.А. Ематин<sup>1</sup>, У.В. Абелянц<sup>1</sup>, 2024

UDC 622.271:622.3.013 © S.M. Karpenko<sup>1</sup>, N.V. Karpenko<sup>2</sup>,  
E.A. Ematin<sup>1</sup>, U.V. Abelyants<sup>1</sup>, 2024

<sup>1</sup> Горный институт НИТУ «МИСИС», 119991, г. Москва, Россия

<sup>1</sup> Mining Institute National University of Science and Technology "MISIS"  
(NUST "MISIS"), Moscow, 119991, Russian Federation

<sup>2</sup> Институт экономики и финансов Российского университета  
транспорта (МИИТ), 103030, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Russian University of Transport (MIIT),  
Moscow, 103030, Russian Federation

✉ e-mail: ksm\_62@mail.ru

✉ e-mail: ksm\_62@mail.ru

# Статистический анализ и прогнозное моделирование электропотребления экскаваторов и участков угольного разреза

## Statistical analysis and predictive modelling of electric power consumption of excavators and sites of a coal strip mine

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-3-79-86>

### Аннотация

В статье приводятся результаты статистического анализа и прогнозного моделирования электропотребления экскаваторов и участков угольного разреза. В соответствии с предложенной методикой проведено исследование структуры рядов электропотребления и объемов работ, построены модели авторегрессии с распределенными лагами краткосрочного прогнозирования электропотребления экскаваторов и участков с учетом производственных факторов. Произведена верификация моделей, оценена прогностическая способность, рассчитаны показатели точности MAPE, определен модельный вклад каждого экскаватора в прогнозируемые объемы электропотребления участков для повышения точности прогноза. Предложенный подход позволяет учитывать индивидуальные особенности потребителей электроэнергии при краткосрочном прогнозировании электропотребления, улучшить показатели качества и точности прогнозов как по отдельным подразделениям, так и по предприятию в целом, повысить эффективность планирования электропотребления и снизить затраты при оплате за электроэнергию.

**Ключевые слова:** электропотребление, прогнозирование, угольный разрез, экскаваторы, временные ряды, корреляционный анализ, модель авторегрессии с распределенным лагом, точность прогноза.

**Для цитирования:** Статистический анализ и прогнозное моделирование электропотребления экскаваторов и участков угольного разреза / С.М. Карпенко, Н.В. Карпенко, Е.А. Ематин и др. // Уголь. 2024;(3):79-86. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-3-79-86.

### КАРПЕНКО С.М.

Канд. техн. наук, доцент кафедры  
«Энергетика и энергоэффективность  
горной промышленности»  
Горного института НИТУ «МИСИС»,  
119991, г. Москва, Россия,  
e-mail: ksm\_62@mail.ru

### КАРПЕНКО Н.В.

Канд. техн. наук, доцент кафедры  
«Информационные системы  
цифровой экономики»  
Института экономики  
и финансов Российского университета  
транспорта (МИИТ),  
103030, г. Москва, Россия,  
e-mail: nvkarpenko@yandex.ru

### ЕМАТИН Е.А.

Аспирант кафедры «Энергетика  
и энергоэффективность  
горной промышленности»  
Горного института НИТУ «МИСИС»,  
119991, г. Москва, Россия,  
e-mail: ematin\_1@mail.ru

**АБЕЛЬЯНЦ У.В.**

Магистрант кафедры  
«Энергетика и энергоэффективность  
горной промышленности»  
Горного института НИТУ «МИСИС»,  
119991, г. Москва, Россия,  
e-mail: u.abelyants@internet.ru

**Abstract**

The article presents the results of statistical analysis and predictive modelling of electric power consumption by excavators and various sites of a coal strip mine. In accordance with the proposed methodology, the structure of electric power consumption and work volume series were studied, and autoregression models with distributed lags for short-term forecasting of the electric power consumption by excavators and sites were built with account of production factors. The models were verified, their predictive ability was evaluated, the mean absolute percentage errors (MAPE) were calculated, and the contribution of each excavator model to the projected power consumption of the sites was determined in order to improve the accuracy of the forecast. The proposed approach makes it possible to take into account characteristics of individual electricity consumers in short-term forecasting of the electric power consumption, to improve the quality and accuracy of forecasts both for individual subdivisions and for the entire enterprise, to increase the efficiency of electric power consumption planning and to reduce the electric power costs.

**Keywords**

Electric power consumption, Forecasting, Coal strip mine, Excavators, Time series, Correlation analysis, Autoregression model with distributed lag, Forecasting accuracy.

**For citation**

Karpenko S.M., Karpenko N.V., Ematin E.A., Abelyants U.V. Statistical analysis and predictive modelling of electric power consumption of excavators and sites of a coal strip mine. *Ugol'*. 2024;(3):79-86. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-3-79-86.

**ВВЕДЕНИЕ**

Для эффективного управления энергоресурсами на горных предприятиях в условиях оптового рынка электроэнергии, в том числе на угольных разрезах, необходимо знать закономерности и тенденции электропотребления, проводить его анализ и прогнозное моделирование.

Значительные объемы электропотребления угольных разрезов приходятся на карьерные экскаваторы. Потребление электроэнергии экскаваторами и их основными механизмами (подъема, напора/тяги, поворота, хода) определяется прежде всего величиной и характером электрических нагрузок, но при этом, как правило, носит случайный характер, поскольку зависит и от множества других факторов: горно-геологических, технических, технологических, природно-климатических, человеческих и других [1, 2, 3, 4, 5].

В работах, посвященных анализу электропотребления на горных предприятиях, в том числе на карьерах и разрезах, используются статистические методы, и в них, как правило, рассматриваются «пространственные» модели, т.е. без учета фактора времени [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]. Вопросам прогнозирования электропотребления предприятий минерально-сырьевого комплекса посвящены работы [13, 14, 15, 16].

При решении задач анализа динамики и прогнозирования различных процессов применяется методология анализа временных рядов [17, 18], достоинством которой является хорошо проработанный математический аппарат, а также возможность построения моделей, позволяющих выявлять зависимости исследуемых параметров во времени и устанавливать закономерности потребления электроэнергии от текущих и предыдущих значений, причем как исследуемого параметра (электропотребления), так и влияющих на него факторов.

В статье приводятся результаты статистического анализа и прогнозного моделирования электропотребления участков разреза по добыче бурого угля и работающих на них экскаваторов. Используются данные за год суточного электропотребления ( $W_t$ , кВт·ч) участков, объема вскрышных работ ( $v_t$ , м<sup>3</sup>) участков бестранспортной, транспортно-отвальной, железно-дорожной вскрыши и объема добычи ( $q_t$ , т) добычного участка, электро-

потребления ( $W_{it}$ , кВт·ч) и объема работ ( $v_{it}$ , м<sup>3</sup>;  $q_{it}$ , т) экскаваторов. Исследовано влияние одного количественно оцененного фактора – объема работ, а влияние других, не оцененных количественно, факторов, носящих, как правило, инерционный характер, было учтено опосредованно, включением в модель значений электропотребления и объема работ за предыдущие сутки.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Предварительный анализ и корректировка рядов данных суточного электропотребления и объема работ устранением нулевых и восстановлением пропущенных значений; выявлением, тестированием и сглаживанием «выбросов».

2. Проведение автокорреляционного анализа, исследование структуры рядов данных, построение и анализ графиков автокорреляционных функций для рядов электропотребления и объема работ, а также кросс-корреляционных функций электропотребления по объему работ.

3. Построение модели электропотребления:

$$w_t^M = \hat{w}_t + \varepsilon_t,$$

где  $\hat{w}_t$  – функциональная зависимость электропотребления от факторов технологического процесса,  $\varepsilon_t$  – случайные возмущения (остатки модели).

Согласно проведенным исследованиям наилучшие результаты при описании зависимости электропотребления от объема работ показали функциональные формы из класса моделей авторегрессии с распределенным лагом ADL( $p, q$ ):

$$\hat{w}_t = b_0 + b_1 w_{t-1} + \dots + b_p w_{t-p} + a_0 v_t + \dots + a_q v_{t-q}. \quad (1)$$

Порядок моделей  $p$  и  $q$  определяется по результатам корреляционного анализа. Значения  $p$  и  $q$  равны максимальным лагам  $I_{\max}^p$  и  $I_{\max}^q$ , для которых соответствующие коэффициенты автокорреляции и кросс-корреляции имеют значения больше 0,5 и статистически значимы.

При моделировании сопоставимые ряды значений электропотребления и объема работ/добычи делятся на обучающую выборку (2/3 длины ряда) и тестовую выборку (1/3 длины ряда).

Для различных комбинаций  $p, q$  ( $p = 0, 1, \dots, I_{\max}^p$  и  $q = 0, 1, \dots, I_{\max}^q$ ) модели вида (1) оцениваются на обучающей выборке методом максимального правдоподобия, который позволяет нивелировать возможную мультиколлинеарность лаговых переменных, входящих в функциональную форму. Прогностическая способность (адекватность прогноза) модели определяется подчинением остатков  $\varepsilon_t$  требованиям случайности, нулевого среднего, независимости и нормальности. Наилучшей считается модель, имеющая наибольшую точность прогноза (т.е. минимальное значение показателя точности MAPE) как на обучающей, так и на тестовой выборке, для которой выполняются требования к остаткам. При равнозначных характеристиках предпочтение отдается более простой модели (с наименьшими значениями  $p$  и  $q$ ).

Моделирование электропотребления отдельными экскаваторами производится аналогично. Для вскрышных и

добычных экскаваторов строятся уравнения с функциональной формой ADL( $p, q$ ):

$$\hat{w}_{i,t} = b_0 + b_1 w_{i,t-1} + \dots + b_p w_{i,t-p} + a_0 v_{i,t} + \dots + a_q v_{i,t-q}. \quad (2)$$

Здесь и далее:  $i$  – номер экскаватора ( $i = 1, 2, \dots, k$ ),  $k$  – число экскаваторов на участке. Для каждого экскаватора выбирается наилучшая модель, имеющая наибольшую точность и хорошие прогностические свойства на обучающей выборке, строится прогноз на тестовую выборку, оценивается его точность.

С целью оценки вклада объема работ отдельных экскаваторов в электропотребление участка по всему ряду наблюдений строится зависимость:

$$\hat{w}_t = b_0 + b_1 v_{i,t} + \dots + b_k v_{k,t}, \quad (3)$$

где  $v_{i,t}$  – объем работ  $i$ -го экскаватора.

По регрессионному уравнению (3) находятся средние коэффициенты эластичности  $\bar{\varepsilon}_i$ , дельта-коэффициенты  $\Delta_i$  и частные коэффициенты детерминации  $R_i^2$ .

С целью повышения точности прогноза электропотребления участка на обучающей выборке строится линейная комбинация прогнозов (ЛКП):

$$\hat{w}_t = \lambda_1 \hat{w}_{i,t} + \dots + \lambda_k \hat{w}_{k,t}, \quad (4)$$

где  $\hat{w}_{i,t}$  – наилучший прогноз (по минимуму MAPE) электропотребления  $i$ -го экскаватора вида (2). Значения  $\lambda_i$  являются коэффициентами уравнения множественной линейной регрессии без константы зависимости электропотребления участков от прогнозного электропотребления отдельных экскаваторов.

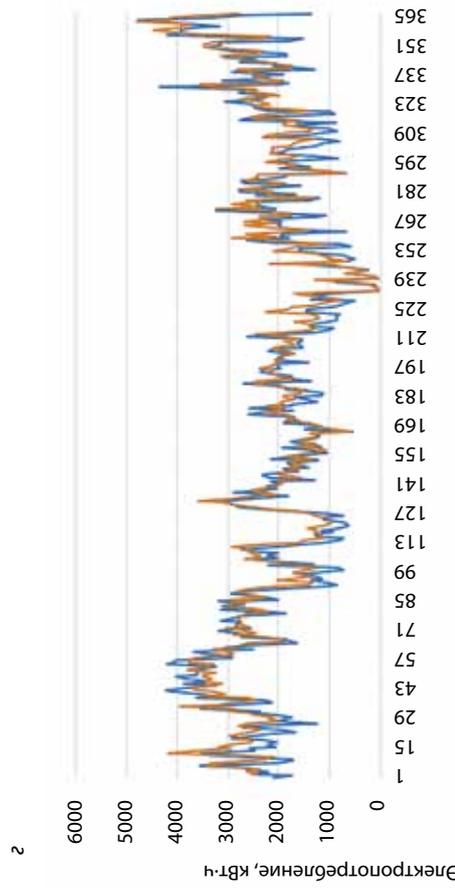
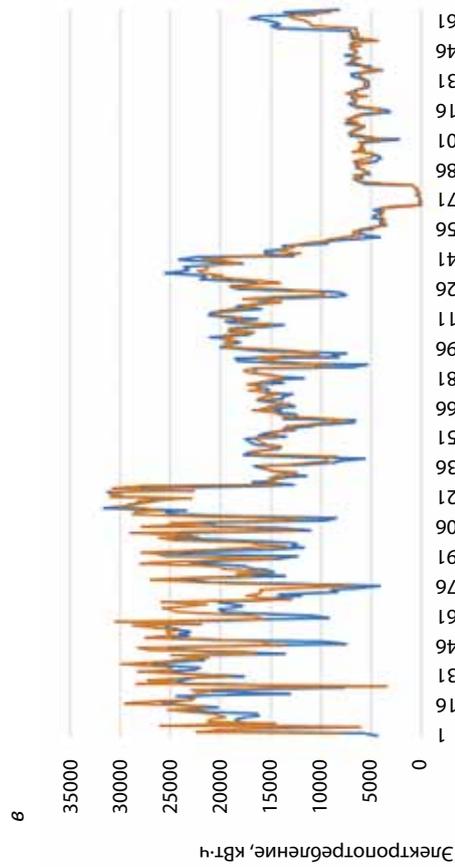
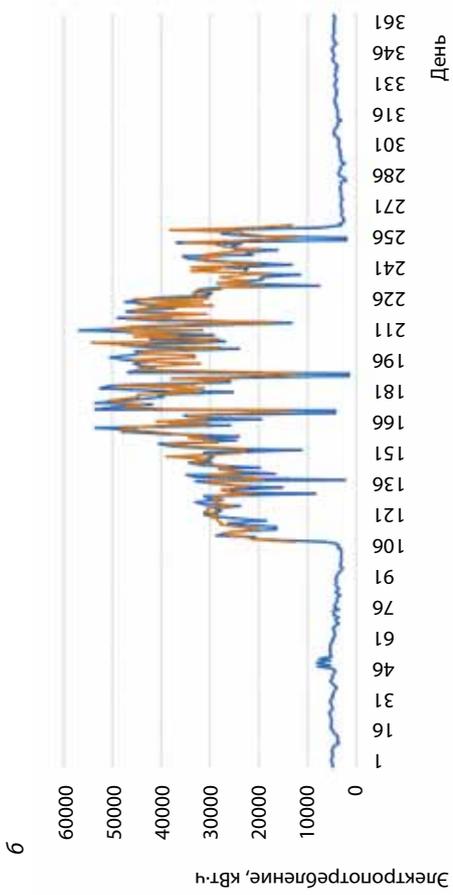
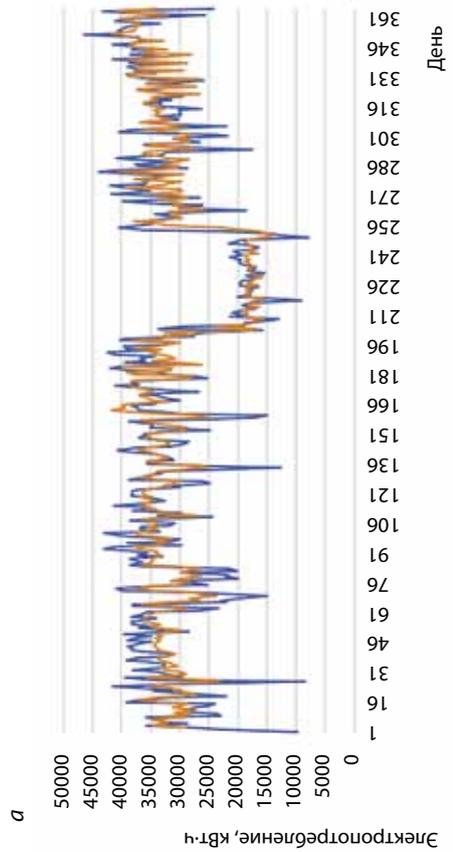
### РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Установлено, что для всех вскрышных участков имеет место слабая зависимость текущих уровней электропотребления  $w_t$  от потребления электроэнергии за предыдущие сутки (коэффициенты автокорреляции первого порядка равны 0,54, 0,50 и 0,37). Характер зависимости объясняется долгосрочным устойчивым влиянием других (помимо объема работ) факторов, причем это влияние слабое.

По добычному участку выявлена сильная зависимость объема электропотребления  $w_t$  от электропотребления за предыдущие сутки (коэффициенты автокорреляции первого и второго порядка соответственно равны 0,82, 0,69). Снижение силы зависимости происходит медленнее, чем для вскрышных участков.

На участках железнодорожной и транспортно-отвальной вскрыши объем электропотребления  $w_t$  имеет сильную зависимость от объема работ  $v_t$  за текущие сутки (коэффициенты кросс-корреляции нулевого порядка соответственно равны 0,77 и 0,74) и умеренную зависимость от объема работ за предыдущие сутки (коэффициенты кросс-корреляции первого порядка соответственно равны 0,59 и 0,51). Для лагов два и более эта зависимость становится слабой.

На участке бестранспортной вскрыши и добычном участке объем электропотребления  $w_t$  имеет умеренную зависимость от объема работ  $v_t, q_t$  за текущие сутки (0,57 и 0,52). Эта зависимость для предыдущих суток практически отсутствует (0,15 и 0,22).



Исходные данные и результаты прогнозного моделирования электропотребления участков безтранспортной (а), транспортно-отвальной (б), железнодорожной (е) вскрыши, добычного участка (з)

Input data and results of predictive modelling of electric power consumption for the direct dumping (a), conveying bridge stripping (б), railway (e) overburden and the mining (z) sites

Таблица 1

### Результаты корреляционного анализа электропотребления и вклад объемов работ экскаваторов в суточное электропотребление участков

Results of the correlation analysis of electric power consumption and contribution of excavator workloads to the daily power consumption of the sites

| Экскаватор                                   | Автокорреляция электропотребления | Автокорреляция объема работ | Кросс-корреляция нулевого порядка | Кросс-корреляция первого порядка | Средние коэффициенты эластичности, % | Дельта-коэффициенты | Частные коэффициенты детерминации, % | Коэффициенты ЛКП |
|--|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|---------------------|--------------------------------------|------------------|
| <b>Участок бестранспортной вскрыши</b>       |                                   |                             |                                   |                                  |                                      |                     |                                      |                  |
| ЭШ 20/90 №1                                  | 0,38                              | 0,28                        | 0,67 (0,72)                       | 0,14                             | 0,22                                 | 0,49                | 26,91                                | 1,028            |
| ЭШ 20/90 №2                                  | 0,30                              | 0,28                        | 0,54 (0,52)                       | 0,19                             | 0,28                                 | 0,51                | 27,21                                | 0,974            |
| <b>Участок железнодорожной вскрыши</b>       |                                   |                             |                                   |                                  |                                      |                     |                                      |                  |
| <b>Период 1</b>                              |                                   |                             |                                   |                                  |                                      |                     |                                      |                  |
| ЭКГ-10 №1                                    | 0,52                              | 0,33                        | 0,56 (0,78)                       | 0,23                             | 0,10                                 | 0,14                | 8,39                                 | 1,32             |
| ЭШ 10/70 №1                                  | 0,02                              | 0,10                        | 0,79 (0,79)                       | 0,11                             | 0,36                                 | 0,50                | 29,87                                | 0,92             |
| ЭШ 10/70 №2                                  | 0,59                              | 0,45                        | 0,79 (0,64)                       | 0,50                             | 0,23                                 | 0,36                | 21,66                                | 0,93             |
| <b>Период 2</b>                              |                                   |                             |                                   |                                  |                                      |                     |                                      |                  |
| ЭКГ-10 №2                                    | 0,46                              | 0,63                        | 0,76 (0,76)                       | 0,43                             | 0,12                                 | 0,21                | 12,97                                | 0,85             |
| ЭКГ-10 №1                                    | 0,59                              | 0,51                        | 0,74 (0,78)                       | 0,37                             | 0,09                                 | 0,11                | 6,73                                 | 1,07             |
| ЭШ 10/70 №2                                  | 0,45                              | 0,53                        | 0,84 (0,69)                       | 0,45                             | 0,32                                 | 0,68                | 42,31                                | 1,09             |
| <b>Период 3</b>                              |                                   |                             |                                   |                                  |                                      |                     |                                      |                  |
| ЭКГ-10 №2                                    | 0,49                              | 0,47                        | 0,79 (0,77)                       | 0,39                             |                                      | Не оценивались      |                                      |                  |
| ЭКГ-10 №1                                    | 0,68                              | 0,29                        | 0,52 (0,56)                       | 0,25                             |                                      | Не оценивались      |                                      |                  |
| ЭШ 10/70 №2                                  | 0,51                              | 0,42                        | 0,76 (0,68)                       | 0,44                             |                                      | Не оценивались      |                                      |                  |
| <b>Участок транспортно-отвальной вскрыши</b> |                                   |                             |                                   |                                  |                                      |                     |                                      |                  |
| СРСК-4000                                    | 0,54                              | 0,32                        | 0,74 (0,51)                       | 0,42                             |                                      | Не оценивались      |                                      |                  |
| <b>Добычный участок</b>                      |                                   |                             |                                   |                                  |                                      |                     |                                      |                  |
| ЭКГ-4У                                       | 0,51                              | 0,55                        | 0,68 (0,61)                       | 0,49                             | 0,10                                 | 0,12                | 3,54                                 | 1,249            |
| ЭР-1250 №1                                   | 0,57                              | 0,53                        | 0,75 (0,66)                       | 0,42                             | 0,19                                 | 0,51                | 15,06                                | 1,004            |
| ЭР-1250 №2                                   | 0,60                              | 0,57                        | 0,69 (0,64)                       | 0,39                             | 0,12                                 | 0,37                | 10,92                                | 0,713            |

На участке железнодорожной вскрыши отмечено несколько временных интервалов, на которых работали разные экскаваторы, при этом характер электропотребления существенно менялся, и ряд фактических значений электропотребления участка был разбит на три интервала: зимне-весенний (период 1); летний (период 2) и осенне-зимний (период 3) (см. рисунок, в).

Коэффициенты автокорреляции первого порядка и коэффициенты кросс-корреляции нулевого и первого порядка для всех экскаваторов приведены в табл. 1.

Отмечается существенное снижение величины коэффициентов автокорреляции до несущественных значений более чем на двое суток назад для всех участков. Коэффициенты автокорреляции первого порядка, кросс-корреляции нулевого и первого порядка показывают умеренную связь электропотребления от объема работ в текущих сутках для экскаватора ЭШ10/70 № 2 и комплекса СРСК-4000 (коэффициенты автокорреляции составляют 0,51 и 0,69).

Для добычных экскаваторов ЭКГ-4У, ЭР-1250 № 1 и ЭР-1250 № 2 фактическое электропотребление умеренно зависит от объема добычи, что показывают коэффициенты кросс-корреляции нулевого порядка. Коэффициенты автокорреляции меньше 0,7 (0,61, 0,66 и 0,64).

Зависимость электропотребления экскаваторов вскрышных участков от электропотребления за предыдущие сутки слабая, за исключением экскаваторов ЭКГ-10 № 1, ЭШ10/70 № 2. Для них характерна зависимость средней силы (коэффициенты автокорреляции первого порядка равны: для зимне-весеннего периода – 0,52 и 0,59; для осенне-зимнего периода – 0,68 и 0,51). Объем электропотребления всех экскаваторов добычного участка умеренно зависит от объема электропотребления за предыдущие сутки.

Зависимость объема работ экскаваторов от объема работ за предыдущие сутки слабая, за исключением летнего периода работы участка железнодорожной вскрыши и добычного участка. Корреляционный анализ показал, что зависимость уровня текущего электропотребления отдельных экскаваторов и объема произведенных ими работ от значений за предыдущие сутки и далее незначительная. В целом для участ-

ков такая зависимость более сильная, что объясняется аккумулярованием воздействия внешних факторов за счет агрегации на более высоком уровне.

Наиболее сильная зависимость, как правило, присутствует для одних предыдущих суток. Далее, при увеличении лага, связь ослабевает. Это можно объяснить тем, что при разнице во времени порядка 1-2-х суток горно-геологические, производственные и некоторые другие факторы схожи и поэтому оказывают воздействие, по силе близкое к текущим значениям. При этом для разных экскаваторов и участков эта связь различна, что обусловлено индивидуальными особенностями работы и технико-технологическими характеристиками.

### ПРОГНОЗНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ

Результаты прогнозного моделирования электропотребления по участкам приведены на рисунке а, б, в, г. На основе результатов корреляционного анализа, согласно представленной методике, на обучающих выборках были определены порядки моделей ADL(p, q) и оценены модели вида (1) краткосрочного прогнозирования суточного электропотребления участков. Коэффициенты наилучших по MAPE моделей приведены в табл. 2.

Из данных табл. 2 следует, что модели, выбранные в качестве наилучших по MAPE на обучающей выборке, сохраняют хорошую точность прогноза на тестовой выборке и имеют хорошие прогностические свойства. Для всех моделей выполняются требования случайности, нулевого математического ожидания и некоррелируемости остатков. Требование постоянства дисперсии остатков выполняется для 66,7% моделей, 50,2% моделей имеют нормально распределенные остатки.

Невыполнение требований гомоскедастичности и нормальности не снижает точности модели, однако не позволяет построить интервальную оценку прогноза. Статистические критерии в работе проверялись на уровне 5%-ой ошибки.

Оценка регрессионных уравнений зависимости электропотребления участков от объема работ отдельных экскаваторов вида (3) (за исключением участка транспортно-отвальной вскрыши, на котором работает один экскаватор) подтвердила их статистическую значимость в целом и по параметрам. По участку железнодорожной вскрыши в осенне-зимний сезон регрессия не оценивалась, в этот промежуток времени на участке работали от одного до трех экскаваторов в различных комбинациях, объема данных было недостаточно. По уравнениям (3) найдены коэффициенты, оценивающие вклад производительности отдельных экскаваторов в электропотребление участков, также определены коэффициенты ЛКП электропотребления вида (4), их значения приведены в табл. 1. Для участка железнодорожной вскрыши в период 3 и участка транспортно-отвальной вскрыши разложение (4) не оценивалось.

Согласно данным табл. 1, в целом работа экскаваторов на 54,1% объясняет формирование значений электропотребления участка бестранспортной вскрыши (коэффициент детерминации  $R^2 = 0,541$ ), 45,9% необъясненной вариации электропотребления приходится на другие факторы. При этом доля вариации, приходящаяся на экскаваторы ЭШ20/90 № 1 и ЭШ20/90 № 2, практически одинакова – 0,49 и 0,51. Вариация электропотребления, объясненная производительностью экскаваторов, составляет 26,9 и 27,2% соответственно. Чувствительность электропотребления к увеличению объема работ для экскаватора ЭШ20/90 № 2 несколько выше. При увеличении объема работ на 1% электропотребление участка в среднем увеличится на 0,28%. Для экскаватора ЭШ20/90 № 1 – на 0,22%.

Для участка железнодорожной вскрыши вариация электропотребления, объясненная объемом работ отдельных экскаваторов, составила 59,9% (период 1), 62% (период 2), 76,2% (период 3). Доля вариации и вариация, объясненная объемом работ экскаваторов ЭКГ-10 № 2, ЭКГ-10 № 1, ЭШ10/70 № 1, ЭШ10/70 № 2, как и чувствительность элект-

Таблица 2

#### Коэффициенты и показатели точности моделей электропотребления участков

Coefficients and indicators of accuracy for the models of electric power consumption of the sites

| Модель  | Коэффициенты |       |       |       |       | MAPE, %           |                  |
|---|--------------|-------|-------|-------|-------|-------------------|------------------|
|   | $a_0$        | $a_1$ | $a_2$ | $b_0$ | $b_1$ | Обучающая выборка | Тестовая выборка |
| <b>Участок бестранспортной вскрыши</b>  |              |       |       |       |       |                   |                  |
| ADL(2,0)  | 18608,81     | 0,29  | 0,09  | 0,32  | –     | 9,00              | 9,98             |
| ЛКП   |              |       | –     |       |       | 9,01              | 9,76             |
| <b>Участок транспортно-отвальной вскрыши</b>                                      |              |       |       |       |       |                   |                  |
| ADL(1,0)  | 11877,31     | 0,22  | –     | 0,52  | –     | 23,33             | 24,52            |
| <b>Участок железнодорожной вскрыши (1 – период 1; 2 – период 2; 3 – период 3)</b> |              |       |       |       |       |                   |                  |
| ADL(1,1) <sup>1</sup>   | 6344,72      | 0,36  | –     | 1,11  | 0,60  | 9,12              | 10,13            |
| ЛКП <sup>1</sup>  |              |       | –     |       |       | 8,07              | 9,12             |
| ADL(1,1) <sup>2</sup>   | 2779,07      | 0,58  | –     | 0,27  | 0,10  | 7,73              | 8,55             |
| ЛКП <sup>2</sup>  |              |       | –     |       |       | 6,72              | 7,84             |
| ADL(1,1) <sup>3</sup>   | 1293,55      | 0,64  | –     | 0,18  | 0,11  | 10,68             | 11,21            |
| <b>Добычной участок</b>   |              |       |       |       |       |                   |                  |
| ADL(2,1)  | 209,03       | 0,66  | 0,07  | 0,10  | 0,04  | 12,40             | 18,86            |
| ЛКП   |              |       | –     |       |       | 11,20             | 15,97            |

тропотребления участка к изменению объема работ экскаваторов, существенно зависят от режима работы.

Работа экскаваторов добычного участка объясняет формирование электропотребления только на 29,5% ( $R^2 = 0,295$ ). Высокое значение необъясненной вариации электропотребления (70,5%) объясняется влиянием «третьих» факторов, не включенных в модель. Наибольший вклад в электропотребление участка приходится на роторный экскаватор ЭР-1250 № 1 – 51%, наименьший – на экскаватор ЭКГ-4У – 12%. Для ЭР-1250 № 1 также отмечается наибольший рост электропотребления участка (в среднем на 0,19%) при увеличении объема добычи на 1%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование линейных комбинаций прогнозов электропотребления отдельных экскаваторов по показателю MAPE улучшает качество прогноза моделей суточного электропотребления участков вскрыши и добычного участка. Для всех участков ЛКП имеют большую точность как на обучающей, так и на тестовой выборке, по сравнению с моделями ADL( $p, q$ ) (см. табл. 2). Построенные модели обеспечивают высокую точность (от 6,72 до 12,4% на обучающей и от 7,84 до 18,86% на тестовой выборках) и адекватно описывают процесс электропотребления.

Предложенный подход к разработке прогнозных моделей позволяет учесть характерные особенности работы потребителей электроэнергии при формировании краткосрочных прогнозов электропотребления высокой точности и качества как по отдельным подразделениям, так и по предприятию в целом, что дает возможность улучшить эффективность планирования электропотребления и снизить затраты при оплате за электроэнергию.

## Список литературы • References

1. Подэрни Р.Ю. Механическое оборудование карьеров. М.: Изд-во МГГУ, 2007. 680 с.
2. Бабокин Г.И. Оценка влияния технических параметров, условий и режима работы одноковшового экскаватора на эксплуатационную энергоэффективность // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 11. С. 199-207. DOI: 10.25018/02361493-2019-11-0-199-207. Babokin G.I. Influence of technical parameters, work conditions and operating mode on energy efficiency of single-bucket excavator. *Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten'*. 2019;(11):199-207. (In Russ.). DOI: 10.25018/02361493-2019-11-0-199-207.
3. Стефанов В.К., Игумнова С.А., Антоненков Д.В. Удельный расход электрической энергии карьерных экскаваторов, работающих в условиях Крайнего Севера // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. Отдельный выпуск № 4 «Электрификация и энергоэффективность». С. 18-21. Stefanov V.K., Igumnova S.A., Antonenkov D.V. Specific consumption of electric power by open-pit excavators operating in conditions of the Far North *Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten'*. 2011, Special Issue No.4: Electrification and energy efficiency, pp. 18-21. (In Russ.).
4. Ключев Р.В., Гаврина О.А., Хетагуров В.Н., Фоменко О.А. Исследование горно-технологических факторов, влияющих на потребление энергии экскаваторов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 11-1. С. 146–157. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-11-1-0-146-157. Klyuev R.V., Gavrina O.A., Khetagurov V.N., Fomenko O.A. Analysis of geotechnical factors influencing power consumption of excavators. *Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten'*. 2020;(11-1):146-157. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2020-11-1-0-146-157.
5. Электрификация открытых горных работ: учебник для вузов / С.А. Волотковский, В.И. Щуцкий, Н.И. Чеботаев и др. М.: Недра, 1987. 332 с.
6. Анализ режимов работы электротехнического оборудования выемочного участка современной угольной шахты / В.А. Воронин, Ф.С. Непша, А.Н. Ермаков и др. // Устойчивое развитие горных территорий. 2021. Т. 13. № 4. С. 599-607. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-4-599-607. Voronin V.A., Nepsha F.S., Ermakov A.N., Kantovich L.I. Analysis of electrical equipment operating modes of the excavation site of a modern coal mine. *Ustojchivoje razvitie gornyh territorij*. 2021;13(4):599-607. (In Russ.). DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-4-599-607.
7. Кубрин С.С., Решетняк С.Н., Бондаренко А.М. Анализ влияния технологических факторов на удельные нормы электропотребления оборудования выемочных участков угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 2. С. 161-170. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-161-170. Kubrin S.S., Reshetnyak S.N., Bondarenko A.M. Impact of technology factors on specific power demands of equipment in extraction districts of coal mines. *Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten'*. 2020;(2):161-170. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-161-170.
8. Lyakhomskii A.V., Petrochenkov A.B., Petukhov S.V., Perfil'eva E.N. Consulting on energy management systems in mining industry. *Eurasian Mining*. 2022;38(2):30-33. DOI: 10.17580/em.2022.02.07.
9. Sychev Y.A., Aladin M.E. Overall performance analysis of general-purpose power quality controls on the basis of active converters in nonlinearly loaded industrial power lines. *Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten'*. 2023;(11):159-181. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2023-11-0-159.
10. Shevyreva N.Yu., Shevyrev Yu.V., Pichuev A.V. Electricity Quality Assurance in Open-Pit Mining: Considerations of Today. ICIEAM, Russia. IEEE Xplore. 2020. DOI:10.1109/ICIEAM48468.2020.9111993.
11. Shevyrev Yu.V., Pichuev A.V., Shevyreva N.Yu. Improving energy performance in networks with semiconductor converters. 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019. Sochi, 2019, article 8743020. DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8743020.
12. Исследование закономерностей электропотребления электропривода скребкового конвейера очистного забоя / Г.И. Бабокин, Д.М. Шпрекхер, Е.Б. Колесников и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2023. № 10. С. 149-163. DOI: 10.25018/0236-1493-2023-10-0-149. Babokin G.I., Shprekher D.M., Kolesnikov E.B., Ovsyannikov D.S. Economics of electric energy consumption by longwall scraper conveyor drives. *Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten'*. 2023;(10):149-163. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2023-10-0-149.
13. Антоненков Д.В. Краткосрочное прогнозирование электропотребления угольного разреза в условиях оптового рынка электроэнергии. Автореф. дис.... канд. техн. наук. Красноярск, 2009. 22 с.

14. Валь П.В. Краткосрочное прогнозирование электропотребления горного предприятия в условиях оптового рынка электроэнергии и мощности. Дисс... канд. техн. наук. Красноярск, 2012. 191 с.
15. Вялкova 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.  
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. *Ustojchivoe razvitie gornyh territorij*. 2022;14(3):486-493. (In Russ.). DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-486-493.
16. Краткосрочное прогнозирование электропотребления обогатительной фабрики / А.Д. Моргоева, И.Д. Моргоев, Р.В. Ключев и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2023. № 5-1. С. 157-169. DOI: 10.25018/0236-1493-2023-51-0-157.  
Morgoeva A.D., Morgoev I.D., Klyuev R.V., Khetagurov V.N., Gavrina O.A. Short-term prediction of energy consumption at concentration factory. *Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten'*. 2023; (5-1):157-169. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2023-51-0-157.
17. Подкорытова О.А., Соколов М.В. Анализ временных рядов: учебное пособие для вузов. М.: Издательство Юрайт, 2023. 267 с.
18. Bubnova G.V., Frolovichev A.I., Akopova E.S. Economic Models of Well-Balanced Usage of the Economic Resources of a Transportation Company. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2020, pp. 838-845. DOI: 10.1007/978-3-030-29586-8-95.

## ВНИМАНИЕ. ОТ РЕДАКЦИИ.

### В статьях:

1. Алгоритмическое обеспечение цифровой платформы мониторинга фугитивных выбросов парниковых газов при угледобыче / О.В. Тайлаков, С.В. Соколов, Е.А. Уткаев, Д.С. Михалев // Уголь. 2023. № 5. С. 84-90.
2. Регулирование выбросов парниковых газов в угледобывающих странах / О. В. Тайлаков, Е. А. Уткаев, А. В. Логинова, Е.С. Снетова, Д.С. Михалев // Уголь. 2023. № 512. С. 129-134.

**ТЕКСТ:** «Исследование выполнено в рамках комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 г. №1144-р (Соглашение № 075-15-2022-1196)».

**ЧИТАТЬ:** «Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 г. №1144-р (Соглашение № 075-15-2022-1196)».

### Authors Information

**Karpenko S.M.** – PhD (Engineering), Associate Professor, Department of Energy and Energy Efficiency of the Mining Industry, Mining Institute National University of Science and Technology “MISIS” (NUST “MISIS”), Moscow, 119991, Russian Federation, e-mail: ksm\_62@mail.ru

**Karpenko N.V.** – PhD (Engineering), Associate Professor, Department of Digital Economy Information Systems, Institute of Economics and Finance, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, 103030, Russian Federation, e-mail: nvkarpenko@yandex.ru

**Ematin E.A.** – Postgraduate student, Department of Energy and Energy Efficiency of the Mining Industry, Mining Institute National University of Science and Technology “MISIS” (NUST “MISIS”), Moscow, 119991, Russian Federation, e-mail: ematin\_1@mail.ru

**Abelyants U.V.** – Master student, Department of Energy and Energy Efficiency of the Mining Industry, Mining Institute National University of Science and Technology “MISIS” (NUST “MISIS”), Moscow, 119991, Russian Federation, e-mail: u.abelyants@internet.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию: 1.02.2024

Поступила после рецензирования: 15.02.2024

Принята к публикации: 26.02.2024

### Paper info

Received February 1, 2024

Reviewed February 15, 2024

Accepted February 26, 2024

РЕКЛАМА



**НПП ЗАВОД МДУ**

ООО НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ

**«ЗАВОД МОДУЛЬНЫХ  
ДЕГАЗАЦИОННЫХ УСТАНОВОК»**

**ОБОРУДОВАНИЕ  
ДЛЯ ДЕГАЗАЦИИ И УТИЛИЗАЦИИ  
МЕТАНА**

**МЕТАН ПОД КОНТРОЛЕМ!**

РОССИЯ  
Г. НОВОКУЗНЕЦК  
ШОССЕ СЕВЕРНОЕ, 8

WWW.ZAVODMDU.RU  
INFO@ZAVODMDU.RU  
ТЕЛ.: +7 (3843) 991-991