

УДК 621.316:658.8

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ СПРОСОМ НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ РЫНКА РОССИИ НА СУТКИ ВПЕРЕД

Елена Анатольевна Миняйло¹

соискатель

alena.anikyeva@mail.ru

Анатолий Анатольевич Аникьев¹

доктор физико-математических наук, профессор

aaanikyev@mail.ru

Эмилия Николаевна Аникьева²

старший преподаватель

korol_0909@mail.ru

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

г. Москва, Россия

²Мичуринский государственный аграрный университет

г. Мичуринск, Россия

Аннотация. В статье представлено описание текущих подходов по учету работы Demand response в рынке на сутки вперед в России. Приведен анализ срабатывания технологии управления спросом за 3 и 4 кварталы 2024 года. Выявлен потенциал для повышения эффективности работы технологии управления спросом. Разработаны варианты оптимизации учета ресурса технологии управления спросом в конкурентном отборе на сутки вперед и проведен расчет эффектов от предложенных вариантов оптимизации в отношении набора модельных календарных месяцев. Произведен расчет среднеквадратичного отклонения значений совокупных месячных эффектов от срабатываний. На основе проведенных расчетов предложены варианты

оптимизации задействования технологии управления спросом, дающий наибольший эффект.

Ключевые слова: технология управления спросом, электроэнергетические системы, повышение эффективности, модельные расчеты, среднеквадратичное отклонение, подходы по оптимизации.

Одним из трендов современных электроэнергетических систем как в мире, так и в России является технология Demand Response (DR, технология управления спросом) - технология, предполагающая отклонение в потреблении электроэнергии конечными потребителями в ответ на изменение ее цены во времени либо за счет оплачиваемого снижения потребления в те часы, когда оптовые цены наибольшие или надежность энергосистемы находится под угрозой [1,2].

В России использование технологии управления спросом получило применение с 2016 года, когда был запущен механизм ценозависимого снижения потребления для потребителей оптового рынка электрической энергии и мощности (далее - оптовый рынок) [3]. По мере накопления опыта работы «пилотного» проекта по функционированию Demand response, в рамках которого с 2019 года воздействовать на свое потребление электроэнергии смогли также некрупные потребители оптового рынка и розничные потребители, была концептуализирована целевая модель управления спросом в России [4,5]. Запущенная в апреле 2024 г. целевая модель фактически начала работать с 3-го квартала 2024 г. ввиду специфики проведения конкурентного отбора исполнителей услуг по изменению режима потребления - на каждый квартал календарного года.

Различные аспекты технологии управления спросом в России описывались, в том числе в работах [6], [7] и [8].

Применение технологии управления спросом в различных отраслях промышленности рассмотрено в работах [9], [10] и [11].

Предпосылкой для задействования Demand response является снижение стоимости покупки электрической энергии потребителями ценовых зон оптового рынка. Такое снижение от срабатывания технологии управления спросом учитывается при формировании цен на электрическую энергию на рынке на сутки вперед (далее - РСВ) - конкурентный отбор ценовых заявок поставщиков и покупателей за сутки до реальной поставки электроэнергии с определением цен и объемов поставки на каждый час суток [12].

Целью данной статьи является анализ действующего подхода к применению технологии управления спросом на РСВ и разработка предложений по повышению его эффективности.

Для понимания наличия потенциала для повышения эффективности задействования технологии управления спросом целесообразно оценить теоретически максимально возможный эффект на масштабах календарного месяца. Ситуация, когда фактически достигнутый эффект принимает значения существенно ниже, чем максимально возможный эффект, свидетельствует о наличии потенциала для повышения оптимизации работы Demand response.

Кроме того, авторами статьи была проведена оценка уровня рыночной концентрации рынка услуг по управлению изменением режима потребления посредством расчета индекса Херфиндаля – Хиршмана. Данные для расчета индекса - отобранные объемы оказания услуг по управлению изменением режима потребления участниками на 3 и 4 кварталы 2024 года в разбивке по ценовым зонам.

Оценка уровня рыночной концентрации рынка услуг по управлению изменением режима потребления показала, что данный рынок имеет уровень концентрации, который характерен для рынков несовершенной конкуренции.

Таким образом, в условиях ограниченной конкуренции на рынке услуг по управлению изменением режима потребления и отсутствия прогнозного снижения цен за оказываемые услуги вопрос повышения эффективности механизма Demand response играет ключевую роль в дальнейшем развитии данного рынка.

Учитывая сравнительно короткий срок работы целевой модели Demand response в России, работы по разработке предложений по повышению эффективности данной целевой модели до настоящего времени в литературе не представлены.

В рамках функционирования целевой модели эффекты от работы Demand response формируются в РСВ. Экономический эффект отражает снижение

стоимости покупки электрической энергии в I-ой и 2-ой ценовой зоне оптового рынка и в часы срабатывания механизма DR в течение операционных суток.

При этом Demand response «включается» на РСВ при выполнении условия превышения расчетного эффекта от DR на РСВ над произведением коэффициента K и среднего расчетного эффекта за предыдущие N рабочих дней [13], в отношении которых этот эффект рассчитывался:

$$Q_d \geq K \times \frac{1}{N} \times \sum_{d_k \in (d-1, \dots, d-N)} Q_{d_k}, \quad (1)$$

где K - коэффициент превышения расчетного экономического эффекта над средним;

N - количество предшествующих рабочих дней, за который берется средний расчетный эффект;

Q_{d_k} - эффект от срабатывания технологии Demand response в операционные сутки d_k ;

d - рассматриваемые операционные сутки

k - индекс суммирования.

Параметры N (целое число от 3 до 10) и K (число от 1 до 3, варьирующееся с шагом 0,01) публикуются на сайте системного оператора [14] и выбираются таким образом, чтобы совокупный расчетный экономический эффект за предшествующие 30 календарных дней был максимальный, а количество срабатываний DR не превышало 5 раз срабатываний DR в течение этого периода:

$$N \in [3, \dots, 10], \max_{K \in [1, 1.01, \dots, 2.99, 3]} \sum_{d_i \in (d-1, \dots, d-30)} Q_{d_i}, \text{ количество срабатываний} \leq 5, \quad (2)$$

d – рассматриваемые операционные сутки;

d_i – операционные сутки из периода $d-1 \dots d-30$, когда рассчитывается максимальный эффект от срабатывания технологии Demand response;

Q_{d_i} - эффект от срабатывания технологии Demand response в операционные сутки d_i ;

i - индекс суммирования.

В расчет экономического эффекта от учета снижения объема потребления электрической энергии включаются операционные сутки, для которых выполняются следующие условия:

рассматриваемые сутки из числа предыдущих 30 календарных дней являются рабочим днем;

в рассматриваемые сутки состоялась процедура конкурентного отбора на РСВ.

При этом, если к концу календарного месяца не было срабатываний механизма DR на РСВ, то параметры N и K принимают значения[14]:

$N = 3$, $K = 1$ - если за 5 рабочих дней до окончания месяца не было ни одного случая срабатывания Demand response;

$N = 1$, $K = 0,5$ (в последний рабочий день месяца) - если за 1 рабочий день до окончания месяца не было ни одного случая срабатывания Demand response.

Был проведен анализ эффектов от работы механизма управления спросом за июль - ноябрь 2024 года путем сбора следующих данных с сайта коммерческого оператора [15]:

значения параметров N и K по каждому операционным суткам за календарный месяц (за исключением выходных и праздничных дней);

средний эффект за предшествующие N рабочих дней по каждому операционным суткам за календарный месяц;

расчетный эффект от срабатывания Demand response по каждому операционным суткам за календарный месяц.

Текущий и теоретически возможный эффект от работы DR за рассматриваемый период представлены в таблице 1.

Таблица 1

Текущий и теоретически возможный эффект от работы DR

Месяц	Максимально возможный эффект, млн руб.	Текущий эффект, млн руб.	Дельта (2-3)
-------	--	-----------------------------	-----------------

1	2	3	4
Июль 2024	219	159	60
Август 2024	83	68	15
Сентябрь 2024	98	77	21
Октябрь 2024	99	76	23
Ноябрь 2024	491	396	95

Итоги анализа показали некоторую нестационарность эффектов от DR на РСВ, при этом:

- не всегда срабатывания происходят в оптимальные дни месяца;
- не каждый календарный месяц выбирается квота (5) срабатываний;
- сохраняется неопределенность эффективности механизма DR.

Таким образом, существует потенциал для повышения эффективности работы технологии управления спросом.

Распределение расчетных эффектов от DR в целевой модели показано на рисунке 1.



Рисунок 1 – Распределение расчетных эффектов от DR в целевой модели за 3 - 4 кварталы 2024 года.

Как видно из графика динамики расчетных эффектов от Demand response (рисунок 1), распределение величины эффектов от задействования технологии управления спросом не стационарно во времени, и достоверное прогнозирование их динамики на различных масштабах времени, в т.ч. календарного месяца, не представляется возможным.

Учитывая тот факт, что для большинства календарных месяцев отмечается некоторое недостижение совокупного максимального теоретического эффекта, а также невозможность заранее на каждый день календарного месяца прогнозировать величины эффектов от срабатывания технологии управления спросом, можно утверждать, что целесообразно проработать и провести статистическое моделирование различных подходов к оптимизации порядка учета ресурса управления спросом при проведении конкурентного отбора ценовых заявок на сутки вперед.

Задача оптимизации модели в работе сводится к нахождению возможных оптимальных вариантов или их сочетаний изменений подходов к работе самой модели с большими совокупными эффектами, чем в действующей модели. В качестве вариантов оптимизации были предложены:

1. Наступление 6-го события срабатывания технологии управления спросом в течение календарного месяца.
2. Принудительное доведение событий срабатывания технологии управления спросом в течение календарного месяца до 5-ти.
3. Задействование DR в случае, если расчетный эффект выше, чем $1/5$ от максимальной стоимости услуг за период и/или с учетом параметров N и K (как сейчас).
4. Задействование DR в случае, если расчетный эффект от ее срабатывания выше, чем пятый максимальный расчетный эффект от срабатывания за предшествующий календарный месяц.
5. Задействование DR в случае, если расчетный эффект от ее срабатывания выше, чем пятый максимальный расчетный эффект от срабатывания за предшествующий календарный месяц с учетом принудительного доведения числа событий до пяти.
6. Принудительное задействование DR в течение календарного месяца в случае, если расчетный эффект выше, чем $1,1/5$ от плановой максимальной стоимости услуг за соответствующий календарный месяц и/или с учетом параметров N и K (как сейчас).

7. Принудительное задействование технологии управления спросом в течение календарного месяца в случае, если расчетный эффект выше, чем $1,2/5$ от плановой максимальной стоимости услуг за соответствующий календарный месяц и/или с учетом параметров N и K (как сейчас).

Расчет эффектов от предложенных подходов оптимизации модели управления спросом проведен в настоящем параграфе в отношении набора модельных календарных месяцев функционирования целевой модели управления спросом в целях повышения достоверности расчетов ввиду малой выборки фактических данных от работы механизма (мощность выборки - 1106 модельных месяцев).

В основу такого моделирования положены следующие допущения:

максимальное количество срабатываний технологии управления спросом в течение календарного месяца - 5;

количество рабочих дней в течение календарного месяца - 22;

предполагается, что эффекты подчиняются нормальному распределению со средним значением, равным выборочному среднему по эффектам за период начиная с июля по ноябрь, и со среднеквадратичным отклонением, равным выборочному за тот же период.

В таблице 2 и на рисунке 2 показаны результаты модельного расчета средних эффектов по вариантам оптимизации порядка применения механизма управления спросом на РСВ в сравнении с действующей моделью механизма DR.

Таблица 2

Модельный расчет среднемесячных эффектов от срабатывания технологии управления спросом в рамках текущей модели и по предложенным вариантам, млн руб.

Максимально возможный эффект	Текущая модель	Вар. № 1	Вар. № 2	Вар. № 3	Вар. № 4	Вар. № 5	Вар. № 6	Вар. № 7
218,39	179	212	182	185	171	187	188	189
-	82%	-	83%	85%	78%	86%	86%	87%
-	-	18,07%	1,65%	3,09%	-4,81%	4,52%	4,84%	5,59%

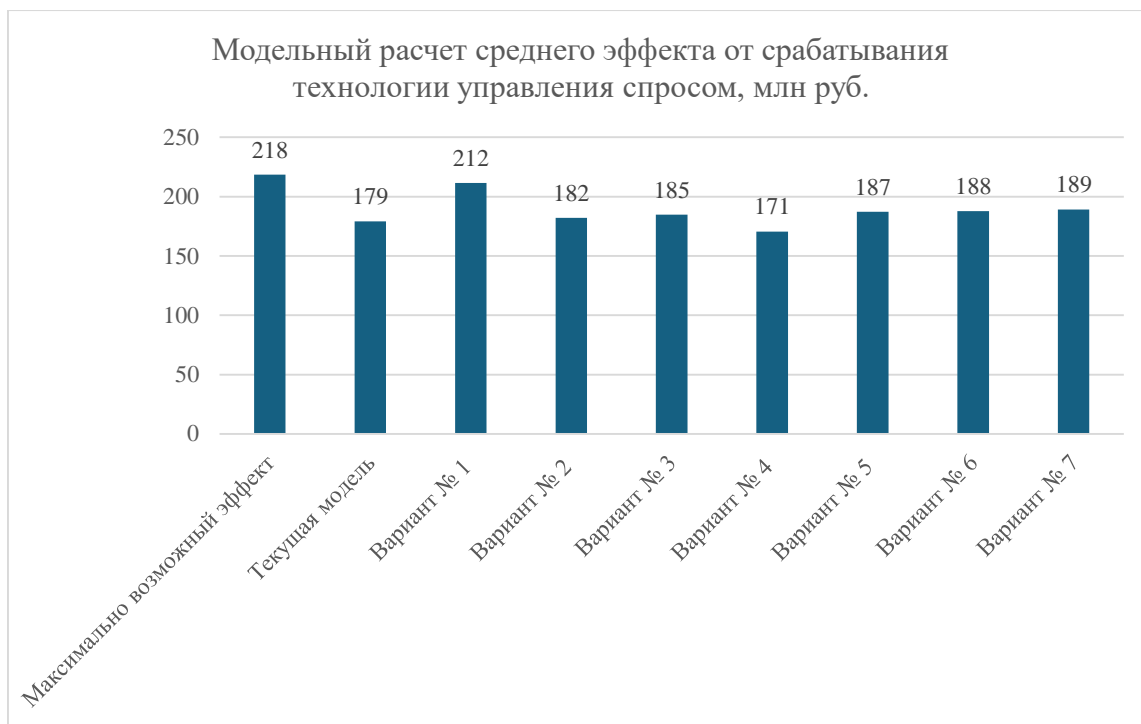


Рисунок 2 – Модельный расчет среднееесячного эффекта от срабатывания технологи управления спросом при текущей модели и в рамках предложенных вариантов.

На рисунке 3 представлено распределение модельных месячных эффектов. Значения по оси X представляют собой разряды эффектов от срабатывания технологии управления спросом в рамках выделенных диапазонов в млн рублей. Значения оси Y - выборочное количество месяцев с соответствующими величинами эффектов в рамках этих диапазонов.

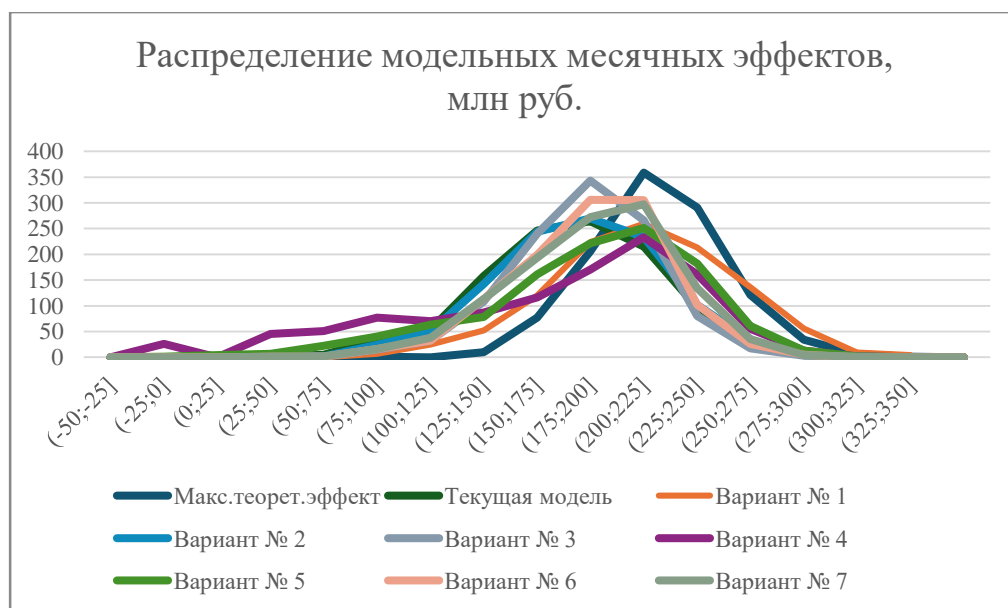


Рисунок 3 – Распределение модельных месячных эффектов в рамках текущей модели и по предлагаемым вариантам.

Анализ распределения модельных месячных эффектов от срабатывания технологии управления спросом показал, что некоторые варианты оптимизации порядка учета ресурса управления спросом дают лучший результат в сравнении с действующей моделью, но при этом разброс значений совокупных месячных эффектов от срабатываний (среднеквадратичное отклонение) более высокий, чем в текущей модели.

В таблице 3 представлена оценка реализации вариантов № 1 - № 7 в части полученных эффектов и величины среднеквадратичного отклонения.

Таблица 3

Оценка реализации вариантов № 1 - № 7 в части полученных эффектов и величины среднеквадратичного отклонения, млн руб.

	Текущая модель	Вар. № 1	Вар. № 2	Вар. № 3	Вар. № 4	Вар. № 5	Вар. № 6	Вар. № 7
Эффект	179	212	182	185	171	187	188	189
Дельта	-	+33	+3	+6	-8	+8	+9	+10
СКО	-	43	38	33	66	49	35	37

На основе анализа величин значений среднемесячного эффекта и величин среднеквадратичного отклонения наиболее предпочтительными вариантами повышения эффективности учета ресурса управления спросом в РСВ являются варианты № 6 и № 7. При этом значение коэффициента (1,1, 1,2) может варьироваться в будущем по мере сбора информации о параметрах работы целевой модели.

Вариант № 1 не выбран в качестве приоритетного, поскольку увеличение количества срабатываний за месяц до 6-ти, вероятно, потребует роста стоимости услуг по управлению изменением режима потребления. Ввиду указанного, реализация такого варианта целесообразна в случае, если потенциальный эффект от срабатывания Demand response выше, чем плата за оказанные услуги по управлению изменением режима потребления.

В данной работе был проведен анализ расчетных эффектов от срабатывания технологии управления спросом за 3 и 4 кварталы 2024 года, в результате которого был выявлен потенциал для оптимизации задействования технологии управления спросом в РСВ.

В результате расчета отмечено, что действующий механизм имеет стохастический характер формирования эффекта на масштабе календарного месяца и для целей его оптимизации возможно применять статистическое моделирование.

Проведен модельный расчет эффектов за 1106 модельных месяцев по предложенным вариантам оптимизации задействования технологии управления спросом в течение месяца. Рассчитано среднеквадратичное отклонение значений совокупных месячных эффектов от срабатываний Demand response.

По итогам проведенного анализа были определены и предложены предпочтительные варианты оптимизации действующего механизма, дающий на масштабе месяца наибольший эффект - варианты с задействованием технологии управления спросом с учетом параметров N и K , а также в случае, если расчетный эффект выше, чем $1/5$ стоимости услуг за месяц (варианты № 6 и № 7) с коэффициентом 1.1 или 1.2, или другим, определяемым по мере сбора статистики.

Список литературы:

1. Sustainability: Science, Practice and Policy 2023, Vol. 19, No. 1, 2154986 <https://doi.org/10.1080/15487733.2022.2154986>
2. Review of demand response under smart grid paradigm, 2012, ISGT2011-India, IEEE <https://ieeexplore.ieee.org/document/6145388>.
3. О технологии ценозависимого потребления // Системный оператор единой энергетической системы — URL: <https://www.soups.ru/functioning/markets/dr/npage/55/>

4. Введение в управление спросом // Системный оператор единой энергетической системы (АО «СО ЕЭС») – URL: <https://www.so-ups.ru/functioning/markets/dr/about/>
5. Нормативная база для запуска целевой модели управления спросом полностью сформирована // Системный оператор единой энергетической системы (АО «СО ЕЭС») – URL: <https://www.so-ups.ru/news/press-release/press-release-view/news/24543/>
6. Аникьева Э. Н., Аникьев А. А., Миняйло Е. А. Особенности технологии управления спросом на электрическую энергию и перспективные подходы её реализации // Энергетик. 2023. № 12. С. 3-7. EDN QHIGWT.
7. Мельникова Е. А. Перспективы использования технологии управления спросом на российском рынке электроэнергетики // Энергетика в контексте цифровой экономики. 2019. С. 58-60. EDN WAPVTT.
8. Копусова Д. Е. Технология управления спросом на электроэнергию // Актуальные проблемы управления в ТЭК - 2023: Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Москва, 20 апреля 2023 года. Москва: Государственный университет управления. 2023. С. 142-144. EDN WCZTCE.
9. Петров В. Л., Кузнецов Н. М., Морозов И. Н. Управление спросом на электроэнергию в горнопромышленном секторе на основе интеллектуальных электроэнергетических систем // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 2. С. 169-180. DOI 10.25018/0236_1493_2022_2_0_169. EDN DEVWDZ.
10. Дзюба А. П. Применение технологии сжиженного природного газа в системах управления спросом на потребление электроэнергии промышленных предприятий // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: Материалы IV Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 16–26 февраля 2021 года / Редколлегия: С.И. Сухоруков (отв. ред.), А.С. Гудим, Н.Н. Любушкина. Комсомольск-на-Амуре:

Комсомольский-на-Амуре государственный университет. 2021. С. 333-341. EDN GCGNVD.

11. Дзюба А. П. Теория и методология управления спросом на энергоресурсы в промышленности / Челябинск: Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), 2020. 323 с. ISBN 978-5-696-05126-0. EDN NVAMPX.

12. Оптовый рынок электрической энергии и мощности // Ассоциация «НП Совет рынка» - URL: <https://www.np-sr.ru/ru/market/wholesale/index.htm>

13. Приложение 7. Регламент проведения конкурентного отбора ценовых заявок на сутки вперед // Ассоциация «НП Совет рынка» - URL: <https://www.np-sr.ru/ru/regulation/joining/reglaments/1970>

14. Порядок установления значений параметров N и K, используемых для целей учета ценозависимого снижения объемов покупки электрической энергии и (или) снижения объема потребления электрической энергии потребителями, участвующими в групповом управлении изменением нагрузки // Системный оператор единой энергетической системы (АО «СО ЕЭС») - URL: https://www.sosops.ru/fileadmin/files/company/markets/dr/docs/2023/poryadok_NK_170223.pdf

15. Информация о ценозависимом снижении потребления // Администратор торговой системы оптового рынка электроэнергии" (ОАО «АТС») – URL: <https://www.atsenergo.ru/results/rsv/dr>

UDC 621.316:658.8

IMPROVING THE EFFICIENCY OF DEMAND MANAGEMENT FOR ELECTRICITY IN THE RUSSIAN MARKET DAY AHEAD

Elena An. Minyailo¹

applicant

alena.anikyeva@mail.ru

Anatoly An. Anikye¹

doctor of physics and mathematics, professor

aaanikye¹@mail.ru

Emilia N. Anikye²

senior lecturer

korol_0909@mail.ru

¹Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russia

²Michurinsk State Agrarian University

Michurinsk, Russia

Abstract. The article describes the current approaches to accounting for Demand Response in the day-ahead market in Russia. An analysis of demand response for the 3rd and 4th quarters of 2024 is provided. The potential for improving the efficiency of demand response is identified. Options for optimizing the accounting of the Demand Response technology resource in the competitive selection for the day ahead are developed and the effects of the proposed optimization options are calculated for a set of model calendar months. The standard deviation of the values of the total monthly effects from responses is calculated. Based on the calculations, options with the greatest effect for optimizing the use of Demand Response are proposed.

Key words: Demand Response, electric power systems, efficiency improvement, model calculations, standard deviation, optimization approaches.

Статья поступила в редакцию 10.09.2025; одобрена после рецензирования 20.10.2025; принята к публикации 31.10.2025.

The article was submitted 10.09.2025; approved after reviewing 20.10.2025; accepted for publication 31.10.2025.