

Анализ структуры и качества данных солнечной радиации из реанализа ERA5 для краткосрочного прогнозирования в условиях Крайнего Севера

В.З. Ковалев¹, С.В. Буш¹, О.В. Архипова¹, А.В. Мусеев¹, Ю.К. Шлык², Р.Н. Хамитов², В.Р. Махмутова²

¹Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск

²Тюменский индустриальный университет, Тюмень

Аннотация: В статье рассматривается оценка пригодности данных солнечной радиации из атмосферного реанализа ERA5 для задач прогнозирования в условиях северных территорий. В качестве объекта анализа выбрана экспериментальная площадка станции Мухрино (Ханты-Мансийский автономный округ), оснащённая автономной системой электроснабжения. Проведён статистический анализ годового массива данных глобальной горизонтальной инсоляции, полученных с помощью платформы PVGIS. Рассмотрены сезонные и суточные особенности изменения инсоляции, построены профили распределения, выполнена оценка выбросов методом межквартильного размаха. Установлено, что данные характеризуются высокой изменчивостью и наличием большого количества нулевых значений, обусловленных полярными ночами и метеоусловиями. Выявленные особенности необходимо учитывать при построении моделей краткосрочного прогнозирования. Сделан вывод о приемлемом качестве данных ERA5 для использования в задачах прогноза генерации и потребления энергии в системах распределённого энергоснабжения.

Ключевые слова: ERA5, солнечная радиация, горизонтальная инсоляция, Крайний Север, статистический анализ, прогнозирование, анализ выбросов, возобновляемые источники энергии, энергоснабжение удаленных территорий, временные ряды, интеллектуальное управление генерацией.

Введение

Особенности Северных регионов – это их огромные запасы углеводородного топлива при практическом отсутствии централизованного электроснабжения [1-3]. Развитие территорий Крайнего Севера и Арктики требует соответствующего количества электрической энергии. Очаговый характер расположения потребления электрической энергии на территориях Крайнего Севера и Арктики, а также большое количество относительно маломощных потребителей электрической энергии, привело к использованию

дизельной генерации в качестве основного источника электрической энергии [7 – 9]. Недостаток такого подхода к электроснабжению – высокая себестоимость производства электрической энергии и загрязнение окружающей среды [10–12]. Например, в работе [1] указывается, что себестоимость производства энергии дизельгенератора доходит до 237 руб/кВт*час.

Выход ищется в использовании возобновляемых источников энергии – ветровой, солнечной и других типов [13–15]. Однако для их эффективного использования в изолированных энергосистемах необходимо учитывать переменную природу таких источников. Особенно это актуально для солнечной энергии, которая подвержена значительным суточным и сезонным колебаниям. В связи с этим задача прогнозирования солнечной радиации становится ключевой как для управления генерацией, так и для оценки поведения нагрузки [16,17].

Эффективное использование солнечной энергии в условиях Крайнего Севера и Арктики требует качественной подготовки и оценки данных о солнечной инсоляции. В силу сложности получения наземных измерений в отдалённых регионах всё чаще применяются данные атмосферного реанализа. Цель данной статьи – выполнить оценку структуры и пригодности данных инсоляции, полученных из реанализа ERA5, для последующего краткосрочного прогнозирования на примере территории станции Мухрино (60°53'20" с.ш., 68°42'10" в.д., UTC+5), оснащённой автономной системой электроснабжения Югорского государственного университета.

Источник и предварительная обработка данных

Исследование основано на данных горизонтальной солнечной инсоляции за 2023 год, полученных из платформы Photovoltaic Geographical Information

System (PVGIS) [18]. Платформа PVGIS использует данные атмосферного реанализа ERA5, предоставляемого Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF) [19]. Данный набор характеризуется высоким пространственным ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$, что соответствует примерно $27.75 \text{ км} \times 27.75 \text{ км}$ в средней широте) и временным разрешением (1 час), что делает его подходящим для оценки параметров солнечной радиации в удалённых регионах.

Исходный набор данных представлен в виде таблицы из 8760 записей (почасовые данные за календарный год). Он содержит следующие параметры:

- дата и время (формат YYYYMMDD:HHMM);
- горизонтальная инсоляция, I (Вт/м²);
- высота солнца, H_c (градусы);
- температура воздуха, T (°C);
- скорость ветра, V_v (м/с);
- статус восстановления данных (Int).

Фрагмент исходных данных приведён в таблице №1.

Таблица №1

Фрагмент исходных данных

Дата, время	I , Вт/м ²	H_c , градусы	T , °C	V_v , м/с	Int
20230101:0030	0.0	0.0	-31.34	0.69	0.0
20230101:0130	0.0	0.0	-31.18	0.48	0.0
20230101:0230	0.0	0.0	-31.01	0.55	0.0
...
20231231:2130	0.0	0.0	-29.25	1.86	0.0

20231231:2230	0.0	0.0	-28.13	0.83	0.0
20231231:2330	0.0	0.0	-29.31	1.1	0.0

Для удобства дата и время были преобразованы из YYYYMMDD:HHMM в формат `datetime`, после чего выполнен перевод из UTC в местное время (добавлено 5 часов). В результате недостающие значения в начале года (первые 5 часов) заполнены нулями, а данные, выходящие за пределы 2023 года, были удалены. Поскольку в исходном массиве не оказалось пропусков, после этих операций данные готовы к дальнейшему анализу. В последующем используется только глобальная горизонтальная инсоляция, остальные параметры приведены для полноты картины.

Методы оценки данных

Оценка структуры и пригодности данных для прогнозирования выполнена посредством следующих методов:

1. Анализ годового и недельного профилей данных.
2. Расчёт статистических показателей (среднее, минимальное, максимальное значение, медиана, первый и третий квартили, стандартное отклонение).
3. Визуализация распределения с помощью гистограммы и диаграмм размаха (`boxplot`) [20].
4. Анализ выбросов методом межквартильного размаха (*IQR*).

Для наглядной оценки структуры данных на рис. 1 показано годовое распределение горизонтальной инсоляции за 2023 год. Видно, что график имеет характерную волнообразную форму: в январе значения радиации близки к нулю, затем происходит постепенное увеличение, достигающее максимума к июню–июлю, после чего величина инсоляции снижается и в декабре вновь возвращается

примерно к исходным значениям. Кроме того, на графике чётко прослеживаются суточные колебания. Такие циклические изменения объясняются географическим положением исследуемой территории (высокие широты), где продолжительность светового дня и угол наклона солнца изменяются весьма существенно в течение года.

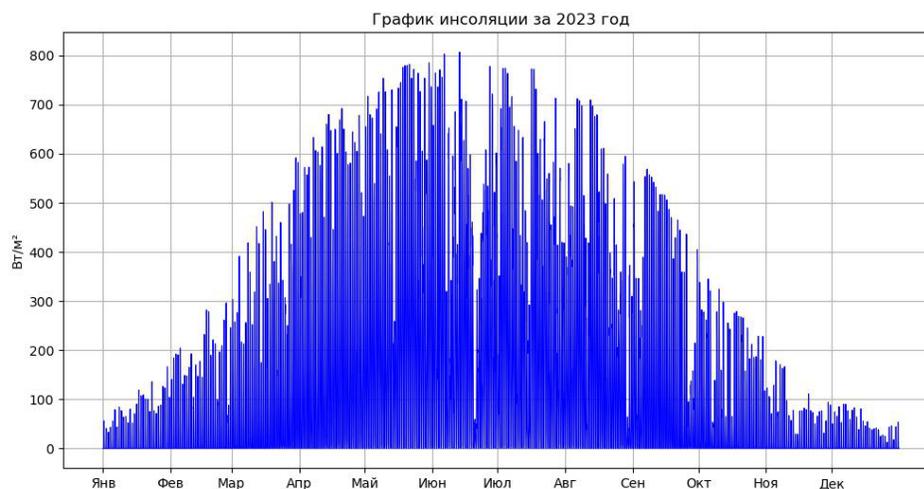


Рис. 1. – Годовое распределение горизонтальной инсоляции ($Вт/м^2$)

Для детального рассмотрения краткосрочных колебаний солнечной радиации на рис. 2 представлено её распределение за первую неделю ноября 2023 года. Этот участок хорошо иллюстрирует суточную динамику: в дневные часы наблюдается рост интенсивности излучения, затем оно снижается до нуля в ночные часы, формируя характерный «гребенчатый» вид. Такая форма кривой обусловлена более коротким световым днём в ноябре, а также переменной облачностью, которая может приводить к резким повышениям или спадам уровня радиации в течение суток.

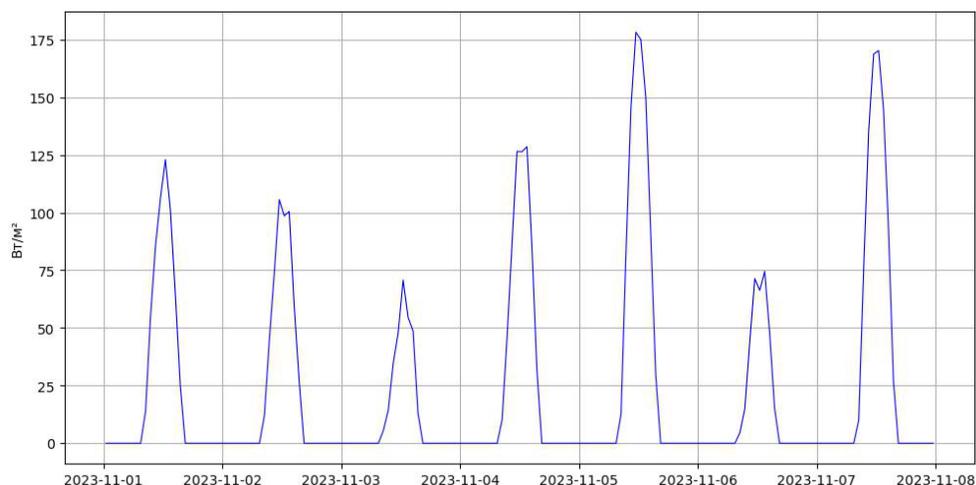


Рис. 2. – Распределение горизонтальной инсоляции за первую неделю ноября 2023 года

Сезонная и суточная изменчивость, наглядно проиллюстрированная графиками, подчёркивает важность корректного учёта периодических и случайных факторов (таких, как погода, облачность и т.п.) при дальнейшей работе с данными.

Результаты статистического анализа

В таблице 2 приведены основные статистические характеристики данных горизонтальной инсоляции за 2023 год: среднее значение (\bar{I}), минимальное и максимальное значения (I_{min} , I_{max}), медиана (\tilde{I}), первый и третий квартили (Q_1 , Q_3) и стандартное отклонение (σ_1). Общее количество записей составляет 8760 (по количеству часов в году).

Таблица №2

Статистические характеристики исходных данных

Количество значений, шт.	\bar{I} , Вт/м ²	I_{min} , Вт/м ²	Q_1 , Вт/м ²	\tilde{I} , Вт/м ²	Q_3 , Вт/м ²	I_{max} , Вт/м ²	σ_1 , Вт/м ²

8760	116.9	0.0	0.0	3.95	171.2	806.8	185.7
------	-------	-----	-----	------	-------	-------	-------

Анализ полученных характеристик показывает высокую вариативность солнечной радиации. Среднее значение составляет 116.9 Вт/м², тогда как медиана – лишь 3.95 Вт/м², что свидетельствует о преобладании низких (включая ночные) значений. Максимальное зарегистрированное значение (806.8 Вт/м²) соответствует ясным летним дням. Четверть наблюдений равна нулю, то есть 25% данных приходится на периоды полного отсутствия солнечного излучения. Высокое значение стандартного отклонения (185.7 Вт/м²) дополнительно подчёркивает существенные колебания уровня радиации в течение года.

Полученные результаты указывают на высокую вариативность солнечного излучения: среднее значение (\bar{I}) – 116.9 Вт/м² при медиане (\tilde{I}) 3.95 Вт/м², что говорит о значительном количестве низких (включая ночные) значений. Максимальная инсоляция (I_{max}) (806.8 Вт/м²) зарегистрирована в летний ясный период.

Высокое значение стандартного отклонения (σ_1) (185.7 Вт/м²) отражает существенные колебания в течение года. Четверть значений (Q_1) равна нулю, то есть 25% данных приходится на периоды без солнечного света, а 75% всех измерений не превышают 171.2 Вт/м².

На рис. 3 представлена гистограмма распределения значений солнечной радиации, построенная с разбиением на 20 интервалов. Размер каждого интервала ΔI рассчитывался по формуле (1):

$$\Delta I = \frac{I_{max}}{n} = \frac{806,8}{20} = 40,34 \frac{Вт}{м^2}, \quad (1)$$

где n – количество интервалов.

Очевидно, что большая часть значений (более 5000 значений) сосредоточена в диапазоне от 0 до 40,34 Вт/м², что подтверждает наличие большого количества низких значений, характерных для исследуемой местности.

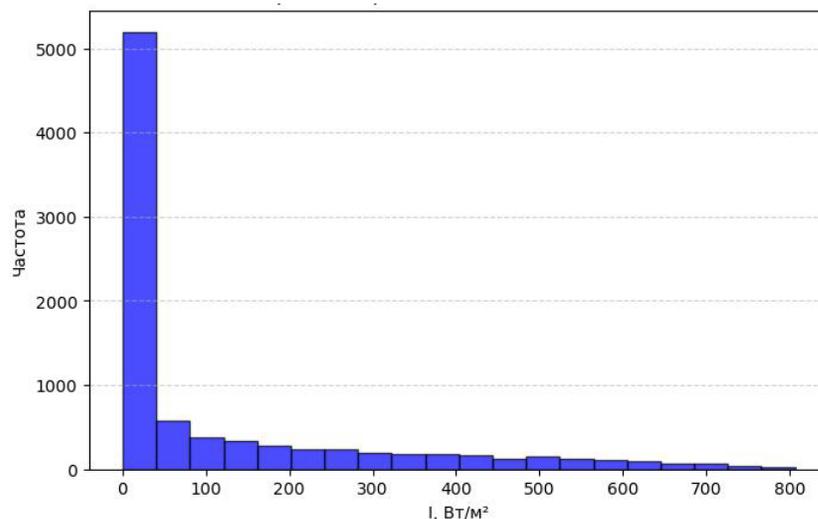


Рис. 3. – Гистограмма горизонтальной инсоляции за год

Анализ выбросов

Перед краткосрочным прогнозированием целесообразно провести анализ выбросов, то есть наблюдений, существенно отклоняющихся от основной массы данных. Своевременное обнаружение и корректная обработка таких аномальных значений (вплоть до исключения при необходимости) позволяют повысить точность и надёжность прогностических моделей. В рамках настоящего исследования для визуализации статистических характеристик и определения выбросов были построены диаграммы размаха, отражающие изменение уровней солнечной радиации по месяцам (рис. 4).

Диаграмма размаха (boxplot) является наглядным инструментом описательной статистики, позволяющим оценивать распределение данных и выявлять потенциально аномальные наблюдения. Центральная часть диаграммы («ящик») ограничивает 50% всех наблюдений, расположенных между первым

(Q_1) и третьим (Q_3) квартилями. Медиана выборки находится внутри данного диапазона, разделяя «ящик» на две части. Так называемые «усы» диаграммы простираются до минимальных и максимальных значений, не классифицируемых как выбросы. Наблюдения, выходящие за пределы интервала $[Q_1 - 1,5 \cdot IQR; Q_3 + 1,5 \cdot IQR]$, где $IQR = Q_3 - Q_1$ рассматриваются как выбросы и на графике отображаются в виде отдельно стоящих точек [20].

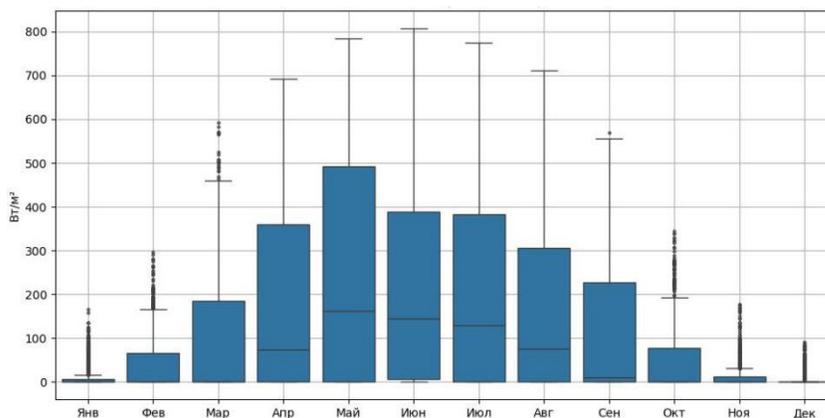


Рис. 4. – Месячная статистика солнечной радиации

Большинство таких точек связаны с особыми погодными условиями или переходными периодами восхода/заката солнца. То есть эти значения не обязательно являются ошибками, а могут отражать характерную для региона изменчивость (короткий световой день зимой, резкие колебания облачности и т.д.). Аналогичная картина прослеживается и при группировке данных по сезонам (рис. 5): весной и летом значения растут, осенью и зимой снижаются, при этом в каждом сезоне возможны «выбросы» из-за экстремальной облачности или других факторов.

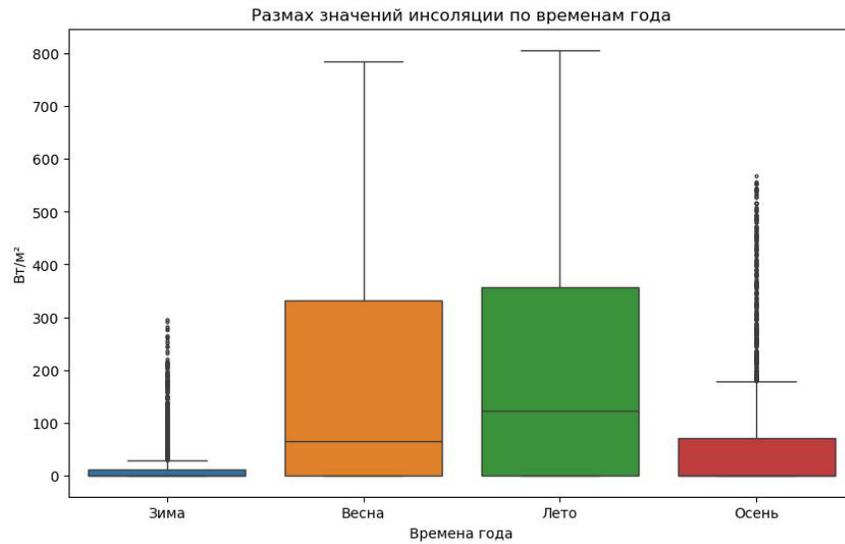


Рис. 5. – Сезонная статистика солнечной радиации

Рассмотрим также почасовое распределение (рис. 6). При анализе видно, что «выбросы» сосредоточены в ранние утренние и поздние вечерние часы (около восхода и заката). Однако стандартное отклонение в эти часы не превышает 50 Вт/м^2 (что показано на дополнительном графике, здесь не приводится), поэтому данные «аномалии» имеют вполне физическую природу (резкая смена облачности, просветы солнца на фоне низкого горизонта и т.п.).

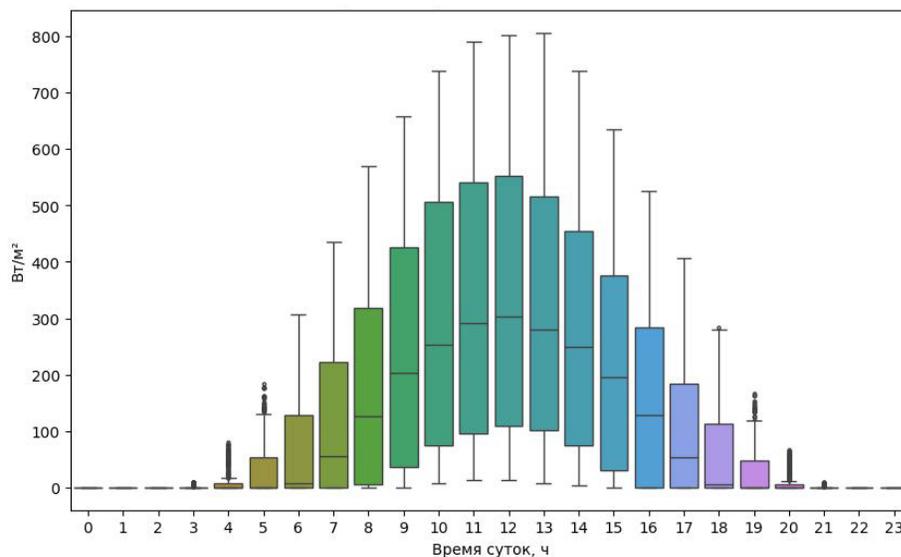


Рис. 6. – Почасовая статистика солнечной радиации

Из рисунка видно, что значения солнечной радиации сосредоточены в дневные часы (примерно с 9 до 17), а в утренние (3–5) и вечерние (19–21) – в основном равны нулю. Однако именно в этих граничных временных интервалах на диаграмме появляются единичные выбросы, что связано с редкими, но возможными случаями солнечного освещения в условиях удлинённого светового дня (например, летом).

Для оценки общей изменчивости значений инсоляции в течение суток построен график среднего значения и стандартного отклонения по каждому часу (рис. 7).



Рис. 7. – Среднее и стандартное отклонение солнечной радиации

Анализ графика показывает, что стандартное отклонение минимально в ночные и граничные часы, где значения радиации стабильно близки к нулю. Наибольшая изменчивость наблюдается в дневной период (с 10 до 15 часов), когда уровень радиации достигает максимума, а влияние облачности становится особенно заметным.

Выводы

Проведённый анализ данных реанализа ERA5 для станции Мухрино позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Данные характеризуются высокой сезонной и суточной изменчивостью, что объясняется географическими и климатическими особенностями северного региона (полярные ночи зимой, длинные световые периоды летом).

2. Несмотря на наличие «выбросов» (с точки зрения IQR-критерия), многие из них являются естественной составляющей климатических условий, а не результатом ошибок измерения. Коррекция таких точек должна проводиться с осторожностью, чтобы не исказить реальные экстремальные значения радиации.

3. Статистические показатели (среднее, медиана, квартили, стандартное отклонение) свидетельствуют о том, что преобладает большое количество низких (нулевых) значений, однако в ясную летнюю погоду радиация может достигать ~ 800 Вт/м².

4. Полученные результаты полезны для постановки задач краткосрочного прогноза: понимание структуры данных и природы выбросов помогает определять методы сглаживания, фильтрации или учёта аномальных точек.

Таким образом, данные реанализа ERA5 по горизонтальной инсоляции для района станции Мухрино имеют приемлемое качество для целей краткосрочного прогнозирования, при условии корректного учёта сезонных, суточных колебаний и естественных «выбросов» в моделях.

Благодарность

Исследование выполнено при финансировании Западно-Сибирского межрегионального научно-образовательного центра мирового уровня, технологический проект "Доступная и чистая энергия для малых поселений Арктики и районов Крайнего Севера".



Литература

1. Змиева К.А. Проблемы энергоснабжения Арктических регионов // Российская Арктика. 2020. № 8. С. 5–14. DOI: 10.2441/2658-4255-2020-10086.
2. Соловьев Д.А., Шилова Л.И., Гулев С.К. Проблемы энергообеспечения удаленных территорий Российской Арктики // Проект Байкал. 2023. Т. 20, № 76. С. 60–65. DOI: 10.51461/issn.2309-3072/76.2147.
3. Вариводов В.Н., Ковалев Д.И., Голубев Д.В. и др. Технические решения по передаче электроэнергии при высоком напряжении в арктических условиях // Российская Арктика. 2023. Т. 5, № 1(20). С. 45–57. DOI: 10.24412/2658-4255-2023-1-45-57.
4. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года // Сайт Правительства России URL: government.ru/news/39847/ (дата обращения: 15.03.2025).
5. Указ Президента Российской Федерации от 26.10.2020 г. № 645 "О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года" // Сайт Правительства России URL: government.ru/docs/all/130532/ (дата обращения: 17.03.2025).
6. Постановление Правительства Российской Федерации от 30.03.2021 г. № 484 "Об утверждении государственной программы Российской Федерации "Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации"" // Сайт Правительства России URL: government.ru/docs/all/133682/ (дата обращения: 16.03.2025).
7. Хоютанов А.М., Васильев П.Ф., Давыдов Г.И. Повышение эффективности работы энергетических систем на северных и арктических территориях



Республики Саха (Якутия) // Международный технический журнал. 2024. № 6(94). С. 34–44. DOI:10.34286/2949-4176-2024-94-6-34-44.

8. Атаев З.А. Территориальная организация энергосистемы Чукотского автономного округа // Региональные геосистемы. 2024. Т. 48, № 1. С. 5–17. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-1-5-17.

9. Фомин Р.Ю., Мингалеева Р.Д., Бессель В.В. К вопросу оценки территориального коэффициента удорожания стоимости топлива для автономных систем генерации электроэнергии на базе дизельной электростанции // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2023. № 7(223). С. 32–36. DOI: 10.33285/1999-6942-2023-7(223)-32-36.

10. Чаусов И.С., Мельников П.В., Приходько А.Д. и др. Многопараметрическое технико-экономическое моделирование микроэнергосистем с оптимизацией состава оборудования // Энергоэксперт. 2024. № 2(90). С. 17–20.

11. Шилкина С.В. Снижение уровня выбросов углекислого газа при реализации энергоэффективных решений в системе электроснабжения изолированных территорий // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2022. № 10(766). С. 101–110. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-766-10-101-110.

12. Вopilовский С.С. Стратегические тренды энергетического развития северных территорий России // Арктика и Север. 2022. № 49. С. 23–37. DOI: 10.37482/issn2221-2698.2022.49.23.

13. Кириллов И.Е., Кузнецов Н.М., Лазарев Н.И., Морозов И.Н. Солнечная энергетика для энергоснабжения удаленных потребителей в Арктической зоне //



Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2025. Т. 27, № 1. С. 48–58. DOI: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-48-58.

14. Жданеев О.В., Карасевич В.А., Москвин А.В., Хакимов Р.Р. Применение возобновляемой и водородной энергетики в Арктике на примере модернизации энергосистемы арктического поселения Хатанга // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2024. № 9(426). С. 111–130. DOI: 10.15518/isjaee.2024.09.111-130.

15. Банных С.М., Щеклеин С.Е. Использование открытой метеорологической информации для прогнозирования энерговыработки ФЭС на месяц вперед. Экспериментальное исследование // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2024. № 11(428). С. 20–31. DOI: 10.15518/isjaee.2024.11.020-031.

16. Исаев Ю.Н., Архипова О.В., Ковалев В.З., Хамитов Р.Н. Адаптивное краткосрочное прогнозирование потребления электроэнергии автономными энергосистемами малых северных поселений на основе методов корреляционного анализа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334, № 2. С. 224–239. DOI: 10.18799/24131830/2023/2/4076.

17. Сергеев Н.Н., Матренин П.В. Обзор международного опыта в прогнозировании генерации возобновляемых источников энергии с помощью методов машинного обучения // iPolytech Journal. 2023. Т. 27, № 2. С. 354–369. DOI: 10.21285/1814-3520-2023-2-354-369.

18. European Commission. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS): Documentation. URL: re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/ (дата обращения: 05.03.2025).



19. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. ERA5: data documentation. URL: confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5:+data+documentation (дата обращения: 06.03.2025).

20. Bruce P., Bruce A., Gedeck P. Practical Statistics for Data Scientists: 50+ Essential Concepts Using R and Python. 2nd ed. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, Inc., 2020. 368 p. ISBN 978-1-4920-7294-2.

21. Seo M., Kim H. Ch., Lee K. S. et al. Characteristics of the Reanalysis and Satellite-Based Surface Net Radiation Data in the Arctic // Journal of Sensors. 2020. Vol. 2020. P. 8825870. DOI: 10.1155/2020/8825870.

References

1. Zmieva K.A. Rossijskaya Arktika. 2020. № 8. pp. 5–14. DOI: 10.2441/2658-4255-2020-10086.

2. Solov'ev D.A., Shilova L.I., Gulev S.K. Proekt Bajkal. 2023. Т. 20, № 76. pp. 60–65. DOI: 10.51461/issn.2309-3072/76.2147.

3. Varivodov V.N., Kovalev D.I., Golubev D.V. i dr. Rossijskaya Arktika. 2023. Т. 5, № 1(20). pp. 45–57. DOI: 10.24412/2658-4255-2023-1-45-57.

4. Energeticheskaya strategiya Rossijskoj Federacii na period do 2035 goda [Energy Strategy of the Russian Federation for the period up to 2035]. Sajt Pravitel'stva Rossii URL: government.ru/news/39847 (date assessed: 15.03.2025). .

5. Ukaz Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 26.10.2020 g. № 645 "O Strategii razvitiya Arkticheskoj zony Rossijskoj Federacii i obespecheniya nacional'noj bezopasnosti na period do 2035 goda Sajt Pravitel'stva Rossii [Decree of the President of the Russian Federation dated October 26, 2020 No. 645 "On the Strategy for the Development of the Arctic Zone of the Russian Federation and ensuring National



Security for the period up to 2035"]. URL: government.ru/docs/all/130532/ (date assessed: 17.03.2025).

6. Postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 30.03.2021 g. № 484 "Ob utverzhdenii gosudarstvennoj programmy Rossijskoj Federacii "Social'no-ekonomicheskoe razvitie Arkticheskoj zony Rossijskoj Federacii". [Decree of the Government of the Russian Federation dated 03/30/2021 No. 484 "On Approval of the State programs of the Russian Federation "Socio-economic development of the Arctic zone of the Russian Federation"]. Sajt Pravitel'stva Rossii. URL: government.ru/docs/all/133682/ (date assessed: 16.03.2025).

7. Hoyutanov A.M., Vasil'ev P.F., Davydov G.I. Mezhdunarodnyj tekhnicheskij zhurnal. 2024. № 6(94). pp. 34–44. DOI: 10.34286/2949-4176-2024-94-6-34-44.

8. Ataev Z.A. Regional'nye geosistemy. 2024. T. 48, № 1. pp. 5–17. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-1-5-17.

9. Fomin R.Yu., Mingaleeva R.D., Bessel' V.V. Problemy ekonomiki i upravleniya neftegazovym kompleksom. 2023. № 7(223). pp. 32–36. DOI: 10.33285/1999-6942-2023-7(223)-32-36.

10. Chausov I.S., Mel'nikov P.V., Prihod'ko A.D. i dr. Energoekspert. 2024. № 2(90). pp. 17–20.

11. Shilkina S.V. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo. 2022. № 10(766). pp. 101–110. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-766-10-101-110.

12. Vopilovskij S.S. Arktika i Sever. 2022. № 49. pp. 23–37. DOI: 10.37482/issn2221-2698.2022.49.23.

13. Kirillov I.E., Kuznecov N.M., Lazarev N.I., Morozov I.N. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki. 2025. T. 27, № 1. pp. 48–58. DOI: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-48-58.



14. Zhdaneev O.V., Karasevich V.A., Moskvina A.V., Hakimov R.R. Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal Al'ternativnaya energetika i ekologiya. 2024. № 9(426). pp. 111–130. DOI: 10.15518/isjaee.2024.09.111-130.

15. Bannyh S.M., Shcheklein S.E. Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal Al'ternativnaya energetika i ekologiya. 2024. № 11(428). pp. 20–31. DOI: 10.15518/isjaee.2024.11.020-031.

16. Isaev Yu.N., Arhipova O.V., Kovalev V.Z., Hamitov R.N. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. 2023. T. 334, № 2. pp. 224–239. DOI: 10.18799/24131830/2023/2/4076.

17. Sergeev N.N., Matrenin P.V. iPolytech Journal. 2023. T. 27, № 2. pp. 354–369. DOI: 10.21285/1814-3520-2023-2-354-369. European Commission. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS): Documentation. URL: re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/

18. European Commission. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS): Documentation. URL: re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/

19. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. ERA5: data documentation. URL: confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5:+data+documentation

20. Bruce P., Bruce A., Gedeck P. Practical Statistics for Data Scientists: 50+ Essential Concepts Using R and Python. 2nd ed. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, Inc., 2020. 368 p. ISBN 978-1-4920-7294-2.

21. Seo M., Kim H. Ch., Lee K. S. et al. Journal of Sensors. 2020. Vol. 2020. P. 8825870. DOI: 10.1155/2020/8825870.

Дата поступления: 4.05.2025

Дата публикации: 25.06.2025
