

ОЦЕНКА ГЕЛИОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КЛИМАТА БЕЛАРУСИ

О. П. Мешик¹, М. В. Борушко², В. А. Морозова³¹ К. т. н. доцент, заведующий кафедрой природообустройства УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь² Старший преподаватель кафедры иностранных языков УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь³ Старший преподаватель кафедры начертательной геометрии и инженерной графики УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь**Реферат**

В работе рассматриваются характеристики климата, представляющие собой природный гелиоэнергетический потенциал территории Беларуси. Оценена пространственно-временная изменчивость радиационного режима, включающая энергетическую освещенность и прозрачность атмосферы, продолжительность солнечного сияния, облачность и другие факторы. Сделаны выводы о перспективах развития гелиоэнергетики в Беларуси.

Ключевые слова: климат, гелиоэнергетика, ресурсы, Беларусь, радиационный режим.

ASSESSMENT OF SOLAR ENERGY RESOURCES OF BELARUS' CLIMATE

A. P. Meshyk, M. V. Barushka, V. A. Marozava

Abstract

This research considers some climate characteristics which constitute the nature's potential for applying solar energy on the territory of Belarus. The authors estimate the space-time variability of the country's radiation regime including such factors as solar irradiance, air cleanness, sunshine duration, cloudiness, etc. They analyze and make a conclusion about the perspectives for developing solar energy in Belarus.

Keywords: climate, solar energy resources, Belarus, radiation regime

Введение

Основным источником формирования климата на Земле, а также всех происходящих энергетических процессов, является Солнце. Компоненты климатической системы: Солнце – атмосфера – подстилающая поверхность Земли находятся в состоянии постоянных сложных взаимодействий. Взаимодействия реализуются в процессе посредством прямых и обратных связей, раскрытие которых включает в себя качественную и количественную оценку потенциала развития солнечной (гелио) энергетики. Гелиоэнергетика происходит от греческого *Helios* – Солнце.

На земную поверхность поступает такое количество солнечной энергии, которое превышает суммарную энергию всех известных ресурсов, таких как нефть, газ, уголь и др. В древности человек обожествлял Солнце как источник света и тепла, однако уже со времен Г. Галилея начало формироваться потребительское отношение к Солнцу (в 1600 году был создан первый солнечный двигатель). Бытует мнение, что гелиоэнергетика – это отдаленное будущее, пока идет освоение традиционных невозобновляемых энергетических ресурсов. Однако это не так. В наше время стартом развития гелиоэнергетики стало использование солнечных батарей на спутниках с 1957 года. У энергии Солнца есть ряд неоспоримых преимуществ: неисчерпаемость, доступность в любой точке Земли, универсальность (тепловая энергия и ее преобразование в механическую и электрическую), экологичность и безопасность, бесплатность и др.

Наиболее интенсивное развитие гелиоэнергетики имеет место в США, странах Западной Европы, Китае, Японии, Южной Кореи. Согласно прогнозу Bloomberg New Energy Finance (BNEF) на долю возобновляемых источников энергии будет приходиться почти 3/4 мировых инвестиций в производство электроэнергии в период с 2017 до 2040 года. По оценкам BNEF, в ближайшие 22 года на производство электроэнергии в мире будет потрачено 10,2 триллиона долларов, из которых 7,4 триллиона долларов будут направлены на чистую энергию [1]. Доля гелиоэнергетики в настоящее время состав-

ляет около 5 % от всей возобновляемой энергии, но происходит стремительный рост солнечных электростанций в мире за счет субсидирования проектов и за период 2010–2015 гг. стоимость электроэнергии уже снизилась на 65 % и приблизилась к аналогичному показателю электроэнергии, получаемой из ископаемых видов топлива даже без учета субсидий [2]. Все это делает экономически целесообразным развитие гелиоэнергетики. Ожидается, что к 2040 году в солнечную энергию будет инвестировано 2,8 триллиона долларов, что приведет к 14-кратному увеличению мощности, «ветер» получит 3,3 триллиона долларов и увеличит мощность в 4 раза. В результате к 2040 году ветровая и солнечная энергия составит 48% установленной мощности в мире и 34% производства электроэнергии по сравнению с 12 и 5% в настоящее время. Также ожидается, что возобновляемая энергия достигнет 74% в Германии к 2040 году, 38% в США, 55% в Китае и 49% в Индии [1].

В настоящее время в Республике Беларусь доля возобновляемых источников энергии составляет 5,1 % [3]. Согласно Концепции энергетической безопасности к 2035 году запланировано довести показатель использования возобновляемой энергии до 9% от валового потребления энергии [4]. В соответствии с данными Государственного кадастра возобновляемых источников энергии [5] в Республике Беларусь эксплуатируется 108 установок, преобразующих солнечную энергию в электрическую. Большинство солнечных электростанций имеют проектную мощность 1,3–17 МВт. Суммарная мощность электростанций в Беларуси достигла к 2020 году около 250 МВт, что является достаточно скромным показателем и имеет существенные резервы для расширения.

Для обоснования целесообразности развития гелиоэнергетики на конкретных территориях следует оценивать теплоэнергетические ресурсы климата, куда относятся характеристики радиационного режима, являющиеся производными от солнечного излучения [6]. В распределении солнечной энергии и превращениях ее в атмосфере, на земной поверхности участвует множество факторов. Основные из

них [7]: состояние облачности; профили температуры, водяного пара и озона; наличие пыли и дымки в атмосфере; спектральные свойства подстилающей поверхности; концентрация в атмосфере CO₂; атмосферное давление на уровне поверхности Земли и др.

Существует большое количество работ, в которых оцениваются геолоэнергетические ресурсы климата Беларуси [8, 9 и др.], регионов России [10, 11, 12, 13 и др.] и других стран. Все эти работы объединяют выполненные статистические обобщения параметров радиационного режима. Отмечается, что условия являются благоприятными для развития геолоэнергетики несмотря на значительную территориальную удаленность и количественные различия в исследуемых характеристиках. Пространственно-временная изменчивость оцениваемых показателей нуждается в детализации, требуется более широкое привлечение методов аналитических расчетов ввиду ограниченности данных актинометрических наблюдений. Важным аспектом исследований является прогноз характеристик радиационного режима, что даст возможность обосновать геолоэнергетический потенциал исследуемой территории. Также актуальным на настоящем этапе является оценка экологических последствий развития геолоэнергетики, в увязки с происходящими и прогнозируемыми климатическими колебаниями, чему посвящены многие работы зарубежных авторов [14, 15, 16, 17 и др.]. В связи с этим проводимые исследования являются актуальными.

Материалы и методы

В настоящем исследовании использованы материалы государственного учреждения «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды», характеризующие радиационный режим территории Беларуси, облачность и атмосферные явления [18, 19]. Временные ряды за репрезентативный 41-летний период 1979–2019 г. приняты по 46 метеостанциям в соответствии с данными климатического кадастра Республики Беларусь, публикуемыми в соответствующих метеорологических ежемесячниках [20]. Также использованы материалы государственного кадастра возобновляемых источников энергии [5].

В работе реализованы методы статистической обработки экспериментальных данных, в частности: регрессионный анализ, анализ временных рядов, пространственное обобщение метеорологической информации и др. Широко использованы методы аналитических расчетов и картографирования.

Результаты и обсуждение

Необходимо отметить, что обоснование применения геолоэнергетических устройств, эффективность их работы зависят от ряда метеорологических факторов, среди которых интенсивность солнечной радиации (кВт/м²) и температура наружного воздуха (°C). Последняя влияет, прежде всего, на КПД солнечных коллекторов. Поступающую на земную поверхность солнечную радиацию можно охарактеризовать следующими показателями: прямой, рассеянной и суммарной радиацией, отражательной способностью подстилающей поверхности, радиационным балансом, продолжительностью солнечного сияния (ПСС), характеристиками облачности, числами пасмурных и ясных дней по разным градациям облачности и др. Большую часть значений можно получить из различных климатических справочников и баз данных, таких как NASASEE; ESRA, 1996, 2000; WRDC; Meteoporm 4.0; S@tel-Light и др. Однако все эти базы различаются по формам представления информации, наборам характеристик, стоимости данных, периодами усреднений и количеством метеостанций. При пространственном обобщении информации для больших территорий могут возникнуть определенные проблемы, связанные с репрезентативностью данных. Например, на сегодняшний день в Республике Беларусь действуют только 11 станций, где проводится регистрация актинометрических характеристик, причем только на трех из них – Минск, Василевичи и Полесская – наблюдения проводятся по полной программе за пятью составляющими ра-

диационного баланса. В связи с этим необходимо широкое привлечение опыта аналитических расчетов.

Данные о солнечной радиации характеризуют различные периоды: год, сезон, месяц, декада, сутки. В работе [9] отмечается, что разномасштабная изменчивость прихода солнечной радиации в геолоэнергетических расчетах учитывается неодинаково. Однако мы считаем, что суточная дифференциация является наиболее приемлемой. Суточные значения позволяют перейти к декадным, месячным и годовым.

Нами предлагается методика моделирования суточных величин суммарной солнечной радиации (Q_i) [7]. Первоначально определяется суточная инсоляция (Q_i'), для случая отсутствия земной атмосферы, по зависимости [21]

$$Q_i' = \frac{2Q_0}{(r_i / r_0)^2} \left[t_{oi} \sin \varphi \sin \delta_i + \frac{\pi}{24} \cos \varphi \cos \delta_i \sin \left(\frac{2\pi}{\pi} t_{oi} \right) \right], (1)$$

где Q₀=1,37 кВт/м² – солнечная постоянная; r₀=149597870 км – среднегодовое расстояние между Землей и Солнцем; r_i – расстояние между Землей и Солнцем в i-сутки, км; t_{oi} – момент восхода (захода) Солнца в i-сутки, час; π=24 часа – продолжительность солнечных суток; φ – географическая широта местности, °; δ_i – геоцентрическое склонение Солнца в i-сутки, °.

Решение уравнения (1) связано с нахождением ряда параметров (r_i), (t_{oi}) и (δ_i), входящих в него и непостоянных во времени. В течение года расстояние между Землей и Солнцем незначительно изменяется (±1,65 % от (r₀)) и при эксцентриситете земной орбиты (e), равном 0,017, составляет в афелии (r_a≈r₀(1+e)) около 152 млн км, в перигелии (r_p≈r₀(1-e)) около 147 млн км (рисунок 1).

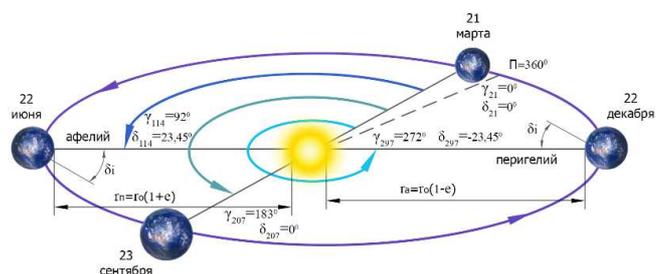


Рисунок 1 – Положение Земли в главные даты «годового движения Солнца»

При установленном эксцентриситете земной орбиты (e) изменение суточной инсоляции может достигать 7 %, т. е. практически значимой величины. В качестве главных дат «годового движения Солнца» нами используются: дни летнего (22 июня) и зимнего (22 декабря) солнцестояния, дни весеннего (21 марта) и осеннего (23 сентября) равноденствий, а расчеты соответствующих расстояний между Землей и Солнцем (r_i) выполняются, согласно законам Кеплера, по уравнениям эллиптической орбиты Земли.

Наиболее весомый вклад в величину суточной инсоляции (Q_i') вносит изменение во времени геоцентрического склонения Солнца (δ_i) – угла между линией: Солнце – Земля и плоскостью экватора. Расчеты величины (δ_i) нами выполняются по методике, изложенной в работе [22]. При этом весь процесс моделирования поступающей на земную поверхность суммарной солнечной радиации осуществляется, исходя из того, что полный годовой период составляет 360°, а его начало – 1 марта. Это позволяет обойти проблему високосного года и упростить вычисления. Некоторый годовой угол (Y_i) в сутки (i), исходя из того, что в день весеннего равноденствия (21 марта) Y_i=0°, будет определяться как [22]

Таблица 1 – Суммарная солнечная радиация, МДж/м²

Метеостанция	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Минск	Измеренная												
	69	133	291	393	567	624	590	478	315	154	59	41	3714
	Рассчитанная												
	58	127	276	420	571	615	608	494	329	190	79	37	3804
Василевичи	Измеренная												
	86	145	295	402	570	623	613	505	344	176	71	52	3882
	Рассчитанная												
	72	141	290	430	574	614	606	497	339	204	93	51	3910

$$Y_i = \left(i - \frac{21}{365} \right) \cdot 360^\circ \quad (2)$$

С учетом уравнения (1) величину геоцентрического склонения Солнца (δ_i) для любых (i) суток года определяем по эмпирической формуле [22]

$$\delta_i = 0,38092 - 0,76996 \cos Y_i + 23,26500 \sin Y_i + 0,36958 \cos 2 Y_i + 0,10868 \sin 2 Y_i + 0,01834 \cos 3 Y_i - 0,16650 \sin 3 Y_i - 0,00392 \cos 4 Y_i + 0,00072 \sin 4 Y_i - 0,00051 \cos 5 Y_i + 0,00250 \sin 5 Y_i + 0,00442 \cos 6 Y_i \quad (3)$$

С использованием схемы, представленной на рисунке 1, и зависимостей (2), (3) можно получить следующие значения геоцентрического склонения Солнца (δ_i) при соответствующей величине годового угла (Y_i): в дни равноденствий – $\delta_{21}=0^\circ$, $Y_{21}=0^\circ$ (весеннего, 21 марта); $\delta_{207}=0^\circ$, $Y_{207}=183^\circ$ (осеннего, 23 сентября); в дни солнцестояний – $\delta_{114}=23,45^\circ$, $Y_{114}=92^\circ$ (летнего, 22 июня); $\delta_{297}=-23,45^\circ$, $Y_{297}=272^\circ$ (зимнего, 22 декабря).

Момент восхода (захода) Солнца нами приурочен к местному полдню и определен из соотношения: $\pm t_0 = D/2$, где D – долгота дня, рассчитанная как разность истинного солнечного времени между заходом (З) и восходом (В) Солнца.

Далее, по установленной нами линейной зависимости [23] осуществляется переход от (Q_i) к среднесуточным величинам суммарной солнечной радиации

$$Q = a + bQ_i \quad (4)$$

где $a = -1,542$, $b = 0,575$ – коэффициенты уравнения, как комплексные параметры, отражающие в реальных условиях пропускную способность атмосферы.

Данные коэффициенты имеют небольшую пространственно-временную изменчивость в пределах территории Беларуси. Отмечается тенденция к некоторому уменьшению коэффициента (a) в направлении низких широт. Необходимо отметить, что суммарное количество поступающей на земную поверхность солнечной энергии за счет влияния атмосферных факторов на 40–80% ниже величин инсоляции (Q_i) без учета атмосферы.

В таблице 1 приведены данные, характеризующие месячные и годовые суммы суммарной солнечной радиации, рассчитанной по формулам (1–4) и обобщенные по регистрируемым на метеостанциях значениям [24].

Как видно из таблицы 1, годовые рассчитанные и измеренные суммы радиации отличаются не более 1–2 %, имеет место высокая сходимости результатов для большинства месяцев года, однако в январе, октябре, ноябре отклонения могут достигать 16–25 %. Это связано с тем, что последние официальные данные обобщений ограничиваются периодом до 1980 года и не учитывают временную изменчивость суммарной солнечной радиации за последние сорок лет. Климатические колебания, среди которых выделяются температурные, неизбежно привели к адекватным колебаниям режима облачности и ПСС. В этой связи необходим пространственно-временной анализ исследуемых характеристик.

Большинством авторов суммарная солнечная радиация оценивается с использованием эмпирических и полуэмпирических связей (Q) с ПСС ($T_{i \text{ солн.}}$) и баллом облачности (Q_i). Используя экспери-

ментальные данные по суммарной солнечной радиации и ПСС ($T_{i \text{ солн.}}$), мы получили зависимость [23]

$$Q = Q_{\min} + 1,649 T_{i \text{ солн.}} \quad \text{при } r = 0,97 \pm 0,01, \quad (5)$$

где $Q_{\min} = 0,207$ МДж/м² – величина суммарной солнечной радиации при отсутствии солнечного сияния ($T_{i \text{ солн.}} = 0$), сформированная, главным образом, за счет рассеянной радиации.

По уравнению (5) можно рассчитывать на территории Беларуси суточные величины суммарной солнечной радиации (Q) в реальные годы при наличии данных по ПСС.

Внутригодовой ход общей и нижней облачности, осредненный по территории Беларуси, представлен на рисунке 2.

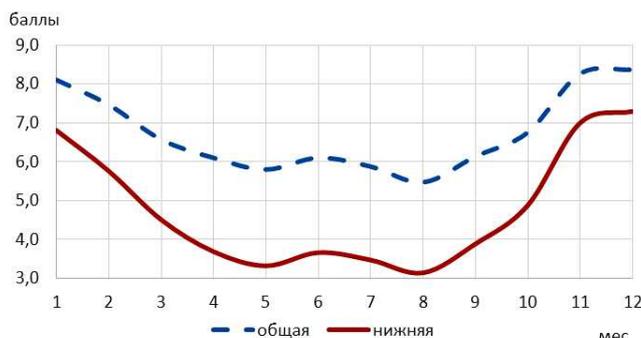


Рисунок 2 – Внутригодовой ход общей и нижней облачности на территории Беларуси

Рисунок 2 показывает наиболее типичную картину для Европы – наименьшие значения облачности приходятся на теплый период, с некоторым увеличением в июне и резким ростом в зимний период, когда велико влияние Атлантики. Адекватно внутригодовому ходу облачности следует среднее число ясных и пасмурных дней в году (рисунок 3).

Число ясных дней с общей облачностью увеличивается с севера, северо-запада на юг, юго-восток по территории Беларуси: от 20 (Гродно, Полоцк, Могилев) до 30-35 дней (Мозырь, Брагин) и с нижней облачностью от 50 (Высокое) до 100 дней (Мозырь, Пинск, Жлобин) (рисунок 4). Также имеет место уменьшение в том же направлении числа пасмурных дней по общей облачности со 160 (Полоцк, Шарковщина) до 120 дней (Брагин, Мозырь) и по нижней облачности со 120 (Борисов, Лепель, Сенно) до 60 дней (Василевичи, Пружаны) (рисунок 5). Следует отметить, что в отличие от продолжительности солнечного сияния параметры облачности на картах характеризуются значительной пятнистостью, что предполагает поиск закономерностей с характеристиками ландшафтов.

Наблюдается корреляция роста средней годовой продолжительности солнечного сияния, количества ясных дней с общей и нижней облачностью и уменьшением числа пасмурных дней по общей и нижней облачности с севера, северо-запада на юг, юго-восток [7]. Облачность уменьшает годовые суммы суммарной солнечной радиации в 2,5-3 раза. Например, в Минске при отсутствии облачности годовые суммы могут быть 4485 МДж/м². Годовые суммы суммарной радиации уменьшаются примерно на 40 % по сравнению с теми, какими они были бы при безоблачном небе. В то же время суммы рассеянной радиации в средних условиях облачности примерно на 40 % больше, чем при ясном небе [7].

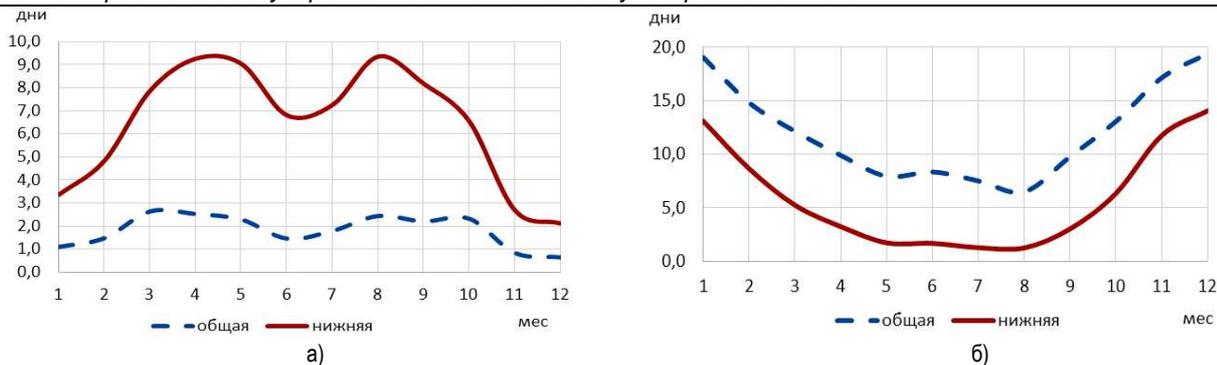


Рисунок 3 – Число ясных (а) и пасмурных (б) дней в году по различным категориям облачности на территории Беларуси

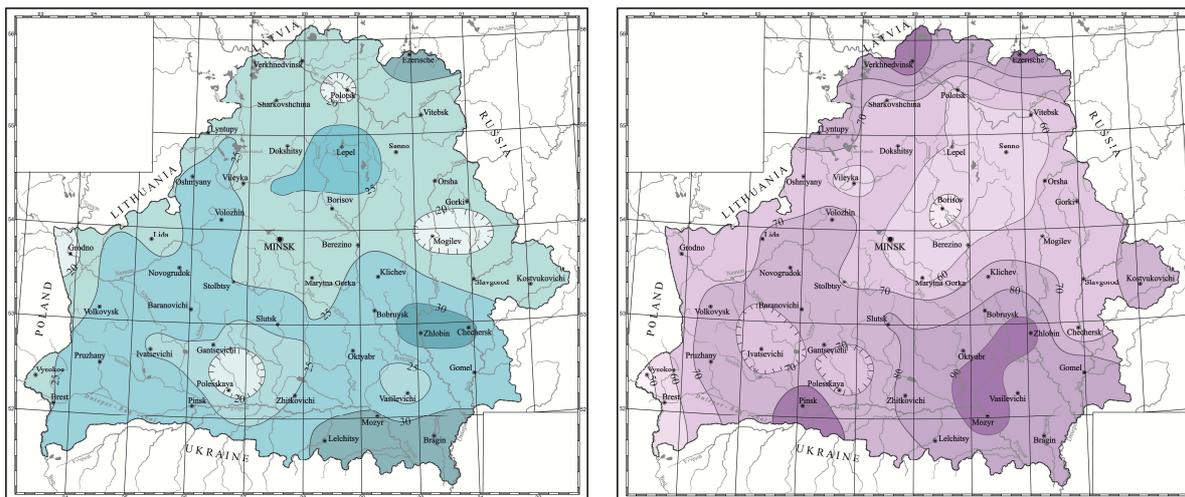


Рисунок 4 – Число ясных дней по общей облачности (слева), нижней облачности (справа) на территории Беларуси

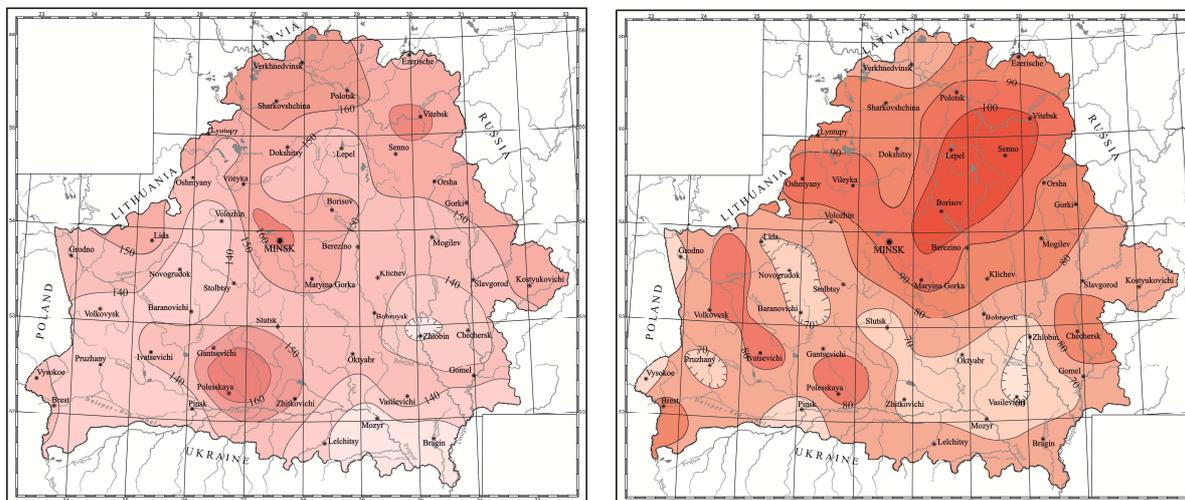


Рисунок 5 – Число пасмурных дней по общей облачности (слева), нижней облачности (справа) на территории Беларуси

Существуют определенные взаимосвязи между годовой суммой ПСС и средним годовым баллом облачности, однако их статистическая значимость не доказана (рисунок 6).

Статистически достоверными являются связи числа ясных и пасмурных дней в году с нижней облачностью (рисунок 7).

Проведенные исследования показали, что характеристика нижней облачности может являться достаточно хорошим инструментом для оценки гелиоэнергетических ресурсов в случае недостаточности или отсутствия актинометрических данных.

На рисунке 8 приведен внутригодовой ход возможной и фактической продолжительности солнечного сияния на территории Беларуси.

Кривые (рис. 8) следуют практически синхронно и дают возможность оценить соотношения между фактическими и возможными значениями (таблица 2).

Наибольшая фактическая продолжительность солнечного сияния соответствует летним месяцам и достигает максимума в июле – 277 часов и снижается до 28 часов в декабре. В мае-августе фактическая ПСС превышает 50 % от возможной и составляет менее 15 % в декабре-январе. Такое распределение увязывается с режимом облачности в эти месяцы (рисунок 2). В среднем за год отношение фактической и возможной ПСС составляет около 40 % и незначительно отличается по территории Беларуси. В отдельные месяцы холодного периода года территориальные различия увеличиваются и увязываются с широтой.

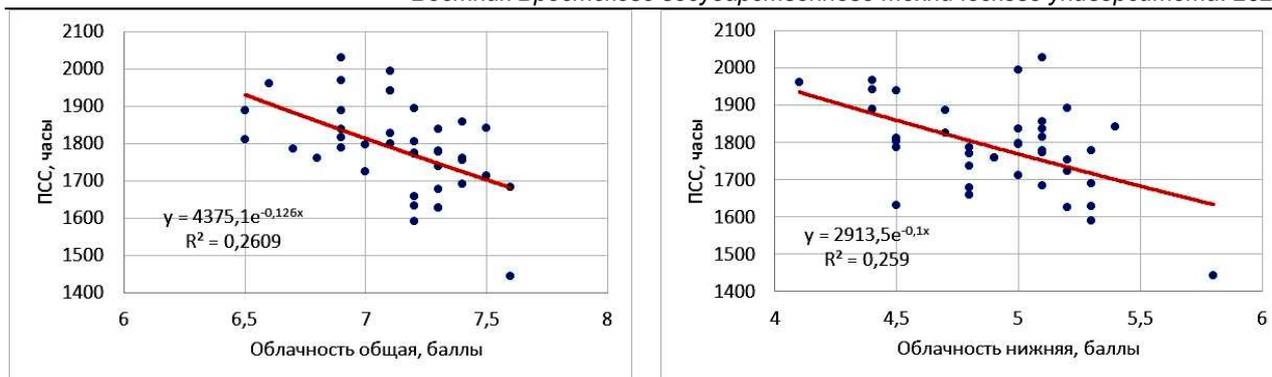


Рисунок 6 – Зависимость ПСС от облачности различных категорий в Минске

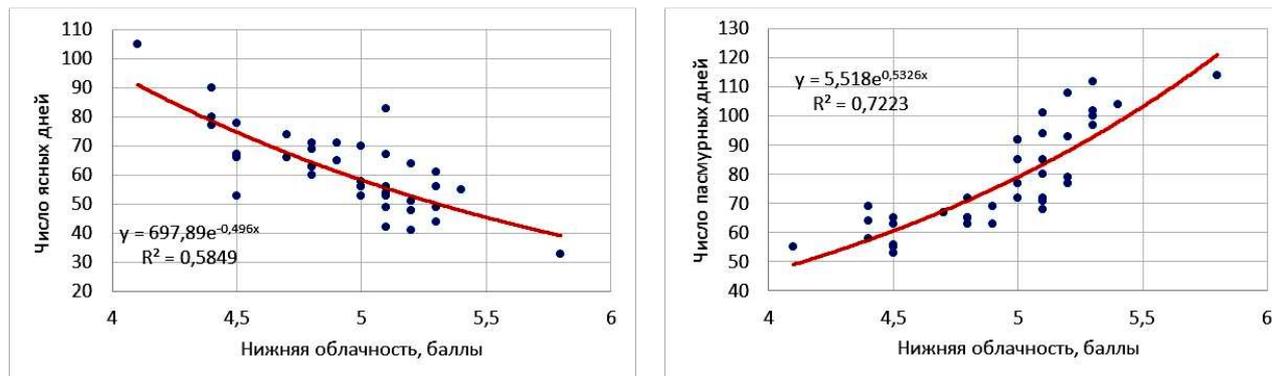


Рисунок 7 – Зависимость числа ясных и пасмурных дней в году от балла нижней облачности в Минске

Таблица 2 – Отношение фактической ПСС к возможной, %

Метеостанция	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Верхнедвинск	13,5	23,4	36,8	45,7	55,0	53,1	55,5	53,1	40,9	28,5	12,7	10,6	40,5
Минск	14,7	23,3	36,5	46,0	52,3	52,3	52,3	53,6	42,3	30,0	15,1	10,7	39,9
Брест	16,9	24,8	36,7	45,9	53,9	53,4	54,1	56,7	44,7	36,9	18,6	14,5	41,8

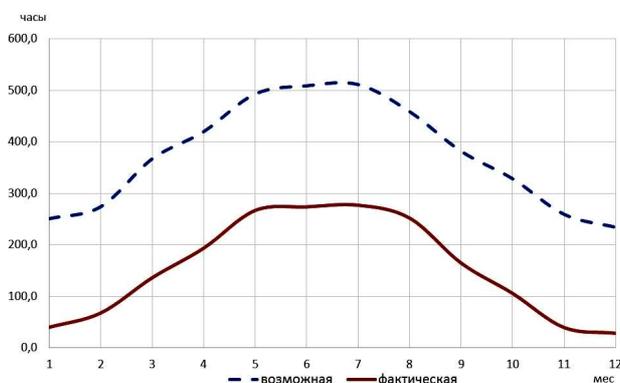


Рисунок 8 – Возможная и фактическая продолжительность солнечного сияния на территории Беларуси

Солнечное сияние подразумевает наличие прямой солнечной радиации. При этом определяющим фактором является не интенсивность, а сам факт поступления прямых солнечных лучей. Нижний порог интенсивности прямой радиации на перпендикулярную поверхность, начиная с которого отмечается солнечное сияние, равен 0,12 кВт/м². Под продолжительностью солнечного сияния понимают время, когда солнце находится над горизонтом (возможная продолжительность солнечного сияния) [25]. Поступление солнечной радиации определяется географическим положением Беларуси и зависит от продолжительности солнечного сияния и облачности, а также от высоты солнца над горизонтом в разное время года. На севере Беларуси самый длинный день в 2,5 раза длиннее наиболее короткого, на юге – в 2,1 раза. Разница в продолжительности дня между ее северной и южной частями, как летом, так и зимой, около одного

часа. Летом на севере Беларуси день длиннее, чем на юге, но солнце стоит ниже; это несколько уменьшает различия в климатических условиях между южными и северными районами. Зимой же, когда и продолжительность дня, и высота стояния солнца над горизонтом на юге больше, чем на севере, юг оказывается в более выгодных условиях, чем север [25].

Возможная продолжительность солнечного сияния на территории Беларуси составляет 4495 ± 10 часов в год. На севере она больше, что обусловлено рефракцией. Поэтому различия в действительной продолжительности солнечного сияния определяются режимом облачности. Средняя годовая продолжительность солнечного сияния увеличивается с севера, северо-запада на юг, юго-восток, примерно на 7 %: от 1740 (Лида, Ошмяны) до 1870 часов (Брагин) (рисунок 9).

Рисунок 9 согласуется с государственным кадастром возобновляемых источников энергии [5], где выполнено районирование территории по возможностям практической реализации гелиоэнергетического потенциала. Однако рисунок 9 имеет более высокое разрешение и детализацию.

На территории Беларуси имеет место увеличение годовой ПСС в среднем на 46 часов за 10 лет (от 20 в Верхнедвинске до 77 часов в Ошмянах) (рисунок 10). Это говорит о том, что климатические условия становятся более благоприятными для развития гелиоэнергетики. В работе [26] также отмечается значительный рост годовых значений продолжительности солнечного сияния в Москве с тенденцией около 35 часов за 10 лет. Несмотря на естественную оптимизацию климатических условий в целом, имеет определенная сезонность, когда естественные условия ухудшаются. Так, для территории Беларуси имеет место уменьшение ПСС в феврале, октябре, ноябре, декабре, что отражается в полученной разности измеренных и рассчитанных значений ПСС, приведенных в таблице 1.

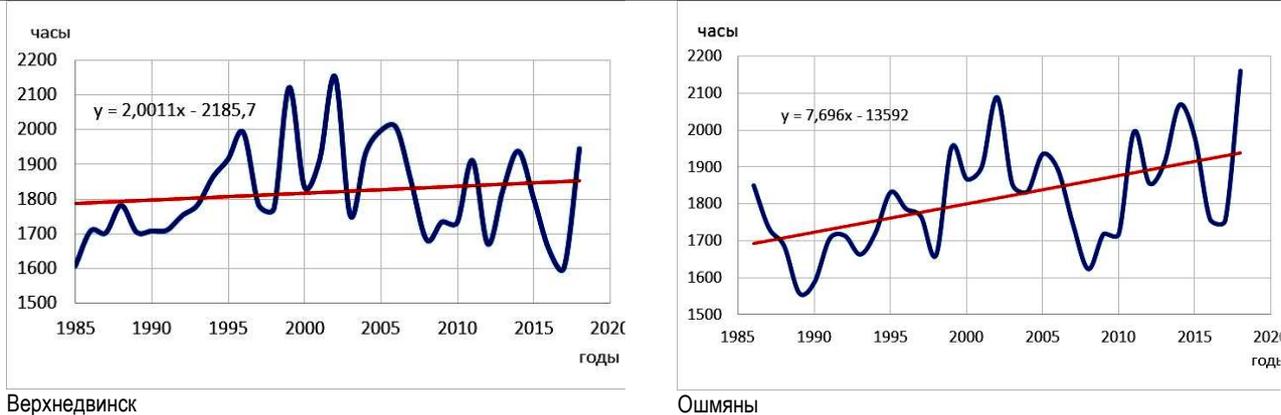


Рисунок 10 – Временная изменчивость ПСС на территории Беларуси

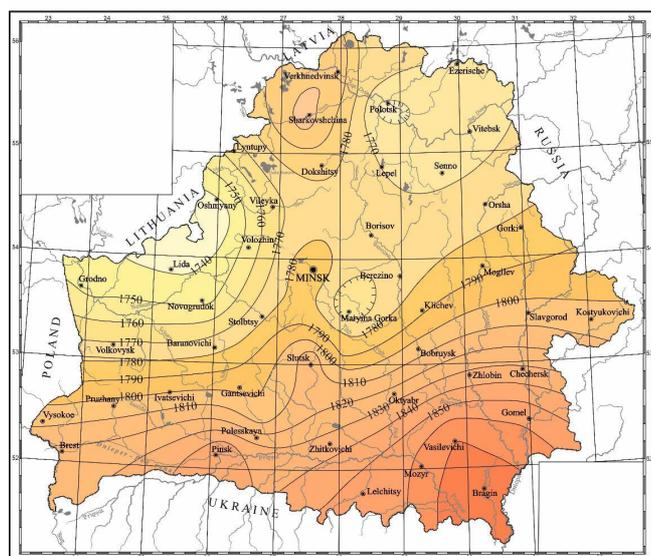


Рисунок 9 – Продолжительность солнечного сияния на территории Беларуси, часов в год

По данным [10] наивысшая эффективность использования геоло-установок обеспечивается в случае, когда годовое количество ясных дней более 200. Для территории Беларуси данный показатель не превышает 50 % на юге, и, очевидно, не может использоваться априори. Другим показателем является продолжительность периода с энергетической освещенностью горизонтальной поверхности 0,60 кВт/м² и более, что является технически приемлемой суммарной солнечной радиацией. Выполненные расчеты показали, что в декабре и январе данный показатель для территории Беларуси не обеспечивается. Например, для Минска он составляет 0,34 и 0,54 кВт ч/м² в день, соответственно. Наибольший показатель 5,69 кВт ч/м² в день – в июне. В целом, необходимо признать достаточно высоким геоло-энергетический потенциал Беларуси, несмотря на определенные сезонные различия.

Заключение

Несмотря на то, что в Республике Беларусь ввиду развития ядерной энергетики и ближайшему вводу БелАЭС прогнозируется профицит электрической энергии, необходимо идти по пути диверсификации источников. Это позволит укрепить национальную безопасность страны и снизить зависимость от внешних факторов, минимизировать рыночные риски и энергетические сбои. В настоящее время зависимость от импортных углеводородов велика и необходимо развитие альтернативной «зеленой» энергетики, обеспечивающей также экологическую безопасность.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что геоло-энергетических ресурсов в Беларуси достаточно для развития энергетики, однако они распределены в течение года неравномерно. В декабре и январе, в течение дня, не обеспечивается энергетическая освещенность горизонтальной поверхности 0,60 кВт/м² и более. В условиях ограниченности пунктов актинометрических наблюдений необходимо

привлекать методы аналитических расчетов, основанные на наличии связей между суммарной солнечной радиацией, ее интенсивностью и массово наблюдаемыми характеристиками (облачностью, ПСС и др.).

Список цитированных источников

1. EEnergyInformer. The International Energy Newsletter. – August 2017. – № 8. – Vol. 27.
2. Развитие солнечной энергетики в мире и России // Экологический бюллетень. – январь 2017. – Вып. 44. – С. 14–18.
3. Врублевский, Б. И. Направления использования возобновляемых и нетрадиционных источников энергии в Республике Беларусь / Б. И. Врублевский, И. В. Сенько // Потребительская кооперация. – 2015. – № 2. – С. 27–32.
4. Энергетическая [р]еволуция: перспективы устойчивого развития энергетического сектора Беларуси/ С. Симон, И. Филютич, А. Бекиш, П. Горбунов; под ред. Ю. Огаренко// Фонд им. Г. Белля – Минск : ООО «Типография «Плутос», 2018. – 124 с.
5. Государственный кадастр возобновляемых источников энергии [Электронный ресурс] / Минприроды Респ. Беларусь. – Минск, 2020. – Режим доступа : http://www.minpriroda.gov.by/ru/new_url_19948904-ru/. – Дата доступа : 25.02.2020.
6. Meshyk, A. Thermal Resources of the Climate of West Polesie, Belarus / A. Meshyk, M. Sheshka, M. Barushka // 7th International Congress on Energy and Environment Engineering and Management (CIEEM7) : Abstracts Book, Canary Islands, Spain, 17-19 July 2017 ; edited by ScienceKnowconferences. – Las Palmas (Spain), 2017. – P. 94–95.
7. Мешик, О. П. Перспективы развития солнечной энергетики в Республике Беларусь / О. П. Мешик, М. В. Борушко // Актуальные проблемы наук о Земле: исследования трансграничных регионов : сб. материалов IV Междунар. науч. – практ. конф., приуроч. к 1000-летию г. Бреста, 12–14 сент. 2019 г. / г. Брест; под ред. А. К. Карбанова [и др.]. – Брест : БрГУ, 2019. – Ч. 2 – С. 250–253.
8. Камлюк, Г. Г. Гелиоэнергетические ресурсы и перспективы развития гелиоэнергетики в Республике Беларусь / Г. Г. Камлюк // Энергетическая стратегия. – 2012. – № 6 (30). – С. 35–37.
9. Пашинский, В. А. Оценка падающей солнечной радиации на горизонтальную поверхность территории в условиях Республики Беларусь / В. А. Пашинский, А. А. Бутько, А. А. Черкасова // Экологический вестник. – 2015. – № 2 (32). – С. 77–82.
10. Невидимова, О. Г. Климатические условия развития гелиоэнергетики на территории Западной Сибири / О. Г. Невидимова, Е. П. Янкович // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – Ч. 2.
11. Носкова, Е. В. Природный гелиоэнергетический потенциал Забайкальского края / Е. В. Носкова // Географический вестник. – 2017. – № 4 (43). – С. 105–112. doi: 10.17072/2079-7877-2017-4-105-112.
12. Шакиров, В. А. Учет данных метеостанций при анализе эффективности применения солнечных энергетических установок / В. А. Шакиров, А. Ю. Артемьев // ВестникИрГТУ. – 2015. – № 3 (98). – С. 227–232.
13. Бутолин, А. П. Возобновляемые источники энергии Южного Урала / А. П. Бутолин, В. А. Щерба, Е. А. Абрамова // Экология урбанизированных территорий. – 2018. – № 4. – С. 20–25. doi: 10.24411/1816-1863-2018-14020.

14. Дашеев, С. С. Экологические последствия развития солнечной энергетики / С. С. Дашеев, Е. А. Малышев // Вестник науки и образования. – 2018. – № 17(53). – Ч. 1. – С. 53–55.
15. Aixue, Hu Impact of solar panels on global climate / Hu Aixue, Levis Samuel, A. Gerald, Meehl [et al.] // Nature climate change. – 2015. – P. 1-5. – doi: 10.1038/NCLIMATE2843.
16. Crook, Julia A. Climate change impacts on future photovoltaic and concentrated solar power energy output / Julia A. Crook, Laura A. Jones, Piers M. Forster and Rolf Crook // Energy Environ. Sci. – 2011. – № 4. – P. 3101–3109. – doi: 10.1039/c1ee01495a.
17. Hernandez, R. R. Environmental impacts of utility-scale solar energy / R. R. Hernandez, S. B. Easter, M. L. Murphy-Mariscal [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – № 29. – 2014. – P. 766–779. – doi: 10.1016/j.rser.2013.08.041.
18. Справочник по климату Беларуси. Часть 5. Влажность воздуха. Солнечное сияние. Метеорологическая дальность видимости / Под. общ. ред. В. И. Мельника. – Минск: Минприроды, 2007. – 48 с.
19. Справочник по климату Беларуси. Часть 6. Облачность. Атмосферные явления / Под. общ. ред. В. И. Мельника. – Минск: Минприроды, 2007. – 56 с.
20. Климатический кадастр Республики Беларусь. Метеорологический ежемесячник. – Минск: Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды, 1979–2019 гг.
21. Матвеев, Л.Т. Теория общей циркуляции атмосферы и климата Земли / Л.Т. Матвеев. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1991. – 295 с.
22. Франс, Дж. Математические модели в сельском хозяйстве / Дж. Франс, Дж. Х. М. Торнли; под ред. Ф. И. Ерешко. – Москва: Агропромиздат, 1987. – 400 с.
23. Мешик, О. П. Исследование и моделирование составляющих теплоэнергетических ресурсов климата Беларуси / О. П. Мешик // Рациональное использование природных ресурсов: труды Междунар. конф. «Научные аспекты рационального использования природных ресурсов», Брест, 20–22 окт. 1998 г. / Брестский политех. ин-т; редкол.: В.Е. Валуев [и др.]. – Брест, 1998. – С. 40–50.
24. Покотилов, В. В. Использование солнечной энергии для повышения энергоэффективности жилых зданий: справочное пособие / В. В. Покотилов, М. А. Рутковский. – Минск: 2014. – 51 с.
25. Климат Беларуси / Академия наук Беларуси, Комитет по гидрометеорологии МЧС Республики Беларусь; под ред. В. Ф. Логинова. – Минск: Институт геологических наук АН Беларуси, 1996. – 234 с.
26. Горбаренко, Е. В. Изменчивость солнечного сияния в Москве за период 1955–2017 гг. / Е. В. Горбаренко // Метеорология и гидрология. – 2019. – № 6. – С. 24–36.
27. alov IV Mezhdunar. nauch. – prakt. konf., prioruch. k 1000-letiyu g. Bresta, 12–14 sent. 2019 g. / g. Brest; pod red. A. K. Karabanova [i dr.]. – Brest: BrGU, 2019. – CH. 2 – S. 250–253.
28. Kamlyuk, G. G. Gelioenergeticheskie resursy i perspektivy razvitiya gelioenergetiki v Respublike Belarus' / G. G. Kamlyuk // Energeticheskaya strategiya. – 2012. – № 6 (30). – S. 35–37.
29. Pashinskij, V. A. Ocenka padayushchej solnechnoj radiacii na gorizontal'nyu poverhnost' territorii v usloviyah Respubliki Belarus' / V. A. Pashinskij, A. A. But'ko, A. A. CHerkasova // Ekologicheskij vestnik. – 2015. – № 2 (32). – S. 77–82.
30. Nevidimova, O. G. Klimaticheskie usloviya razvitiya gelioenergetiki na territorii Zapadnoj Sibiri / O. G. Nevidimova, E. P. Yankovich // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. – 2015. – № 1. – CH. 2.
31. Noskova, E. V. Prirodnyj gelioenergeticheskij potencial Zabajkalskogo kraja / E. V. Noskova // Geograficheskij vestnik. – 2017. – № 4 (43). – S. 105–112. doi: 10.17072/2079-7877-2017-4-105-112.
32. SHakirov, V. A. Uchet dannyh meteostancij pri analize effektivnosti primeneniya solnechnyh energeticheskikh ustanovok / V. A. SHakirov, A. YU. Artem'ev // Vestnik IrGTU. – 2015. – № 3 (98). – S. 227–232.
33. Butolin, A. P. Vozobnovlyаемые источники энергии YUzhnogo Urala / A. P. Butolin, V. A. SHCHerba, E. A. Abramova // Ekologiya urbanizirovannyh territorij. – 2018. – № 4. – S. 20–25. – doi: 10.24411/1816-1863-2018-14020.
34. Dasheev, S. S. Ekologicheskie posledstviya razvitiya solnechnoj energetiki / S. S. Dasheev, E. A. Malyshev // Vestnik nauki i obrazovaniya. – 2018. – № 17(53). – CH. 1. – S. 53–55.
35. Aixue, Hu Impact of solar panels on global climate / Hu Aixue, Levis Samuel, A. Gerald, Meehl [et al.] // Nature climate change. – 2015. – P. 1-5. – doi: 10.1038/NCLIMATE2843.
36. Crook, Julia A. Climate change impacts on future photovoltaic and concentrated solar power energy output / Julia A. Crook, Laura A. Jones, Piers M. Forster and Rolf Crook // Energy Environ. Sci. – 2011. – № 4. – P. 3101–3109. – doi: 10.1039/c1ee01495a.
37. Hernandez, R. R. Environmental impacts of utility-scale solar energy / R. R. Hernandez, S. B. Easter, M. L. Murphy-Mariscal [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – № 29. – 2014. – P. 766–779. – doi: 10.1016/j.rser.2013.08.041.
38. Spravochnik po klimatu Belarusi. CHast' 5. Vlazhnost' vozduha. Solnechnoe siyanie. Meteorologicheskaya dal'nost' vidimosti / Pod. obshch. red. V. I. Mel'nika. – Minsk: Minprirody, 2007. – 48 s.
39. Spravochnik po klimatu Belarusi. CHast' 6. Oblachnost'. Atmosfernye yavleniya / Pod. obshch. red. V. I. Mel'nika. – Minsk: Minprirody, 2007. – 56 s.
40. Klimaticheskij kadastr Respubliki Belarus'. Meteorologicheskij ezhemesyachnik. – Minsk: Republikanskij centr po gidrometeorologii, kontrolyu radioaktivnogo zagryazneniya i monitoringu okruzhayushchej sredy, 1979–2019 gg.
41. Matveev, L.T. Teoriya obshchej cirkulyacii atmosfery i klimata Zemli / L.T. Matveev. – Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991. – 295 s.
42. Frans, Dzh. Matematicheskie modeli v sel'skom hozyajstve / Dzh. Frans, Dzh.H.M. Tornli; pod red. F.I. Ereshko. – Moskva: Agropromizdat, 1987. – 400 s.
43. Meshik, O. P. Issledovanie i modelirovanie sostavlyayushchih teploenergeticheskikh resursov klimata Belarusi / O. P. Meshik // Racional'noe ispol'zovanie prirodnyh resursov: trudy Mezhdunar. konf. «Nauchnye aspekty racional'nogo ispol'zovaniya prirodnyh resursov», Brest, 20–22 okt. 1998 g. / Brestskij politekh. in-t; redkol.: V.E. Valuev [i dr.]. – Brest, 1998. – S. 40–50.
44. Pokotilov, V. V. Ispol'zovanie solnechnoj energii dlya povysheniya energoeffektivnosti zhilyh zdaniy: spravochnoe posobie / V. V. Pokotilov, M. A. Rutkovskij. – Minsk: 2014. – 51 s.
45. Klimat Belarusi / Akademiya nauk Belarusi, Komitet po gidrometeorologii MCHS Respubliki Belarus'; pod red. V. F. Loginova. – Minsk: Institut geologicheskikh nauk AN Belarusi, 1996. – 234 s.
46. Gorbarenko, E. V. Izmenchivost' solnechnogo siyaniya v Moskve za period 1955–2017 gg. / E. V. Gorbarenko // Meteorologiya i gidrologiya. – 2019. – № 6. – S. 24–36.

References

1. EEnergyInformer. The International Energy Newsletter. – August 2017. – № 8. – Vol. 27.
2. Razvitie solnechnoj energetiki v mire i Rossii // Ekologicheskij byulleten'. – yanvar' 2017. – Vyp. 44. – S. 14–18.
3. Vrublevskij, B. I. Napravleniya ispol'zovaniya vozobnovlyаемых i netradicionnyh istochnikov energii v Respublike Belarus' / B. I. Vrublevskij, I. V. Sen'ko // Potrebitel'skaya kooperaciya. – 2015. – № 2. – S. 27–32.
4. Energeticheskaya [r]evolyuciya: perspektivy ustojchivogo razvitiya energeticheskogo sektora Belarusi / S. Simon, I. Filyutich, A. Bekish, P. Gorbunov; pod red. YU. Ogarenko // Fond im. G. Bellya – Minsk: OOO «Tipografiya «Plutos», 2018. – 124 s.
5. Gosudarstvennyj kadastr vozobnovlyаемых istochnikov energii [Elektronnyj resurs] / Minprirody Resp. Belarus'. – Minsk, 2020. – Rezhim dostupa: http://www.minpriroda.gov.by/ru/new_url_19948904-ru/. – Data dostupa: 25.02.2020.
6. Meshyk, A. Thermal Resources of the Climate of West Polesie, Belarus / A. Meshyk, M. Sheshka, M. Barushka // 7th International Congress on Energy and Environment Engineering and Management (CIEEM7): Abstracts Book, Canary Islands, Spain, 17-19 July 2017; edited by Science-Knowconferences. – Las Palmas (Spain), 2017. – P. 94–95.
7. Meshik, O. P. Perspektivy razvitiya solnechnoj energetiki v Respublike Belarus' / O. P. Meshik, M. V. Borushko // Aktual'nye problemy nauk o Zemle: issledovaniya transgranichnyh regionov: sb. materi-

Материал поступил в редакцию 08.06.2020