

## СОВРЕМЕННЫЕ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

О. П. Мешик<sup>1</sup>, М. В. Борушко<sup>2</sup>, В. А. Морозова<sup>3</sup>

<sup>1</sup> К. т. н., доцент, декан факультета инженерных систем и экологии УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail : omeshyk@gmail.com

<sup>2</sup> М. т. н., аспирант кафедры природообустройства, старший преподаватель кафедры лингвистических дисциплин и межкультурных коммуникаций УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail : borushko.marina@mail.ru

<sup>3</sup> М.р.т. н., аспирант кафедры природообустройства, старший преподаватель кафедры начертательной геометрии и инженерной графики УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail : vmorozova-brest@mail.ru

### Реферат

В статье даются оценки пространственно-временной изменчивости интегральных показателей, характеризующих приход солнечной радиации на земную поверхность. Обобщенные и систематизированные данные о продолжительности солнечного сияния, режиме облачности являются основой при составлении геолоэнергетического кадастра Республики Беларусь. Полученные результаты характеризуют репрезентативный период с 1979 по 2022 гг.

**Ключевые слова:** продолжительность солнечного сияния, облачность, число ясных дней, число пасмурных дней.

### AN UP-TO-DATE ASSESSMENT OF SOLAR RADIATION CHARACTERISTICS OBSERVED IN BELARUS

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

### Abstract

The article provides an up-to-date assessment of space-time variability of the integral parameters that characterize solar radiation reaching the ground surface in Belarus. The summarised data about sunshine duration and cloudiness can be used as a source of data to develop a solar energy cadastre of the Republic of Belarus. The results obtained in the research cover the time period from 1979 to 2022.

**Keywords:** sunshine duration, cloudiness, number of clear days, number of cloudy days.

### Введение

Солнечная радиация – основной источник энергии на земле. Она играет первостепенную роль во многих биохимических процессах и формирует климат. В Республике Беларусь есть потребность в изучении особенностей пространственно-временного распределения характеристик солнечной радиации в связи с современными изменениями климата и его воздействиями на природу и жизнедеятельность человека, а также с внедрением энергосберегающих технологий и развитием возобновляемых, экологически безопасных энергоресурсов.

Изучением геолоэнергетических ресурсов климата Беларуси занимались многие белорусские исследователи [1, 2, 3, 4 и др.]. В работе [5] дается общее представление о распределении продолжительности солнечного сияния в исследуемом регионе. Автор отмечает, что 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 примерно 1 час.

Продолжительность солнечного сияния является интегральным показателем, характеризующим приход солнечной радиации на земную поверхность. Продолжительность солнечного сияния зависит от широты местности, сезона года, режима облачности, который в свою очередь определяется характером циркуляционных процессов.

Продолжительность солнечного сияния и режим облачности является одним из наиболее важных показателей, которые влияют на экологию, сельское хозяйство, здоровье человека и другие аспекты жизнедеятельности, поэтому их следует учитывать, в частности в градостроительстве, при планировании различных сельскохозяйственных мероприятий, для оценки геолоэнергетических ресурсов территорий и других видов деятельности. К тому же проведенные исследования могут представлять интерес для климатологов, занимающихся созданием региональных климатических моделей. Поэтому очевидна актуальность получения более глубокого, научно обоснованного представления о режиме солнечной радиации и его производных на территории Республики Беларусь.

Целью исследования является обобщение и систематизация данных о пространственно-временной изменчивости продолжительности солнечного сияния и режима облачности на территории Республики Беларусь для дальнейшего их применения при составлении геолоэнергетического кадастра изучаемой территории.

Для достижения поставленной цели исследования решались следующие задачи: систематизировать исследуемые характеристики и установить их современные численные значения; оценить характер пространственно-временной изменчивости месячных и годовых сумм продолжительности солнечного сияния (ПСС) и средней ПСС за день с солнцем, числа дней пасмурных с нижней и общей облачностью, числа дней ясных с нижней и общей облачностью, месячных и годовых значений балла нижней и общей облачности; выявить отношение фактически наблюдавшегося числа часов солнечного сияния к теоретически возможной ПСС; установить закономерности влияния широтных факторов, сезонности, циркуляционных процессов атмосферы на распределение исследуемых характеристик; установить взаимосвязи между исследуемыми характеристиками.

### Материалы и методы

В настоящем исследовании использованы материалы государственного учреждения «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды», характеризующие радиационный режим и облачность территории Беларуси [6, 7]. Временные ряды за репрезентативный 44-летний период с 1979 по 2022 годы приняты по 13 метеостанциям в соответствии с данными климатического кадастра Республики Беларусь, публикуемыми в метеорологических ежемесячниках [8] и включают данные о фактической продолжительности солнечного сияния, средней ПСС за день с солнцем, возможной ПСС, количестве дней пасмурных по нижней и общей облачности, количестве дней ясных по нижней и общей облачности, балле нижней и общей облачности. Также использованы материалы Государственного кадастра возобновляемых источников энергии [9].

В работе реализованы методы статистической обработки данных наблюдений, в частности, методы корреляционного и регрессионного анализа, аналитических расчетов, анализ временных рядов, пространственное обобщение метеорологической информации и др. Обработка данных расчетов проводилась с использованием пакетов прикладных программ Microsoft Office.

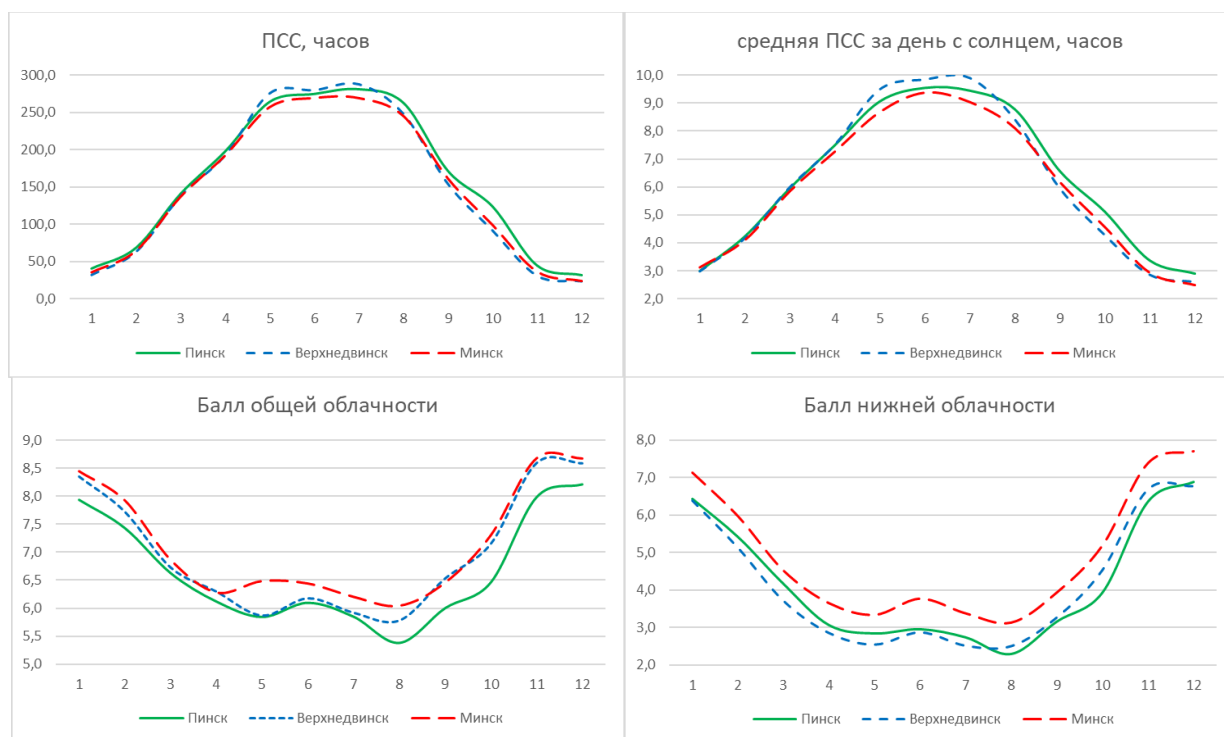
### Результаты и обсуждение

Радиационный режим территории Беларуси остается недостаточно изученным, в первую очередь из-за неполных актинометрических данных. Актинометрические наблюдения, включающие в себя наблюдения за прямой, рассеянной, суммарной, отраженной радиацией и радиационным балансом, производятся на метеорологических станциях. На сегодняшний день на территории Беларуси таких станций всего 15, что не вполне достаточно для проведения объективного научно-исследовательского анализа [10]. К тому же наблюдения на станциях прерывались по различным причинам, поэтому ряды наблюдений имеют значительные пропуски информации. Например, на метеостанции Гродно актинометрические данные отсутствуют с 1985 по 2022 год. Ряды наблюдений за ПСС на метеостанции Нарочь озерная заканчиваются в 1986 году, а на станции Слуцк – в 1991 г. Эти метеостанции исключены из данного обобщения, так как здесь нарушена однородность и в итоге – репрезентативность временных рядов.

Другой проблемой при обеспечении объективными метеорологическими данными является репрезентативность расположения метеорологических станций [11]. Очевидно, чем равномернее располагаются метеорологические станции, регистрирующие определенное метеорологическое явление, тем надежнее будет точность научно-исследовательского анализа. Те 15 метеорологических станций, на которых регистрируются актинометрические показатели, т. е. данные о солнечном сиянии расположены относительно равномерно в северо-западной и центральной части республики. Однако северо-восток и практически вся Гомельская область не охвачены актинометрическими наблюдениями. Некоторые метеостанции находятся совсем близко друг к другу, например, Пинск и Полесская, Гомель и Василевичи, Минск и Марына Горка и образуют так называемые «связки». При этом другие территории оказываются не охваченными актинометрическими наблюдениями. В итоге недостаточность и неравномерность расположения пунктов наблюдений затрудняют качественное пространственное обобщение информации, построение карт, когда необходимо подключать методы интерполяции.

Как уже было сказано, продолжительность солнечного сияния зависит не только от широты местности [12], сезона года, высоты солнца над горизонтом в разное время года, но также от режима облачности, который в свою очередь зависит от особенностей циркуляционных процессов. Наблюдения за режимом облачности, т. е. определение состояния и развития физических процессов в атмосфере основываются на инструментальных измерениях метеорологических параметров. Однако количество, формы, вид и разновидность облаков зачастую определяются визуально, что также может носить субъективную оценку. Например, при наблюдениях за количеством облаков определяется общее количество облаков всех ярусов, покрывающих весь видимый небосвод (общая облачность), и количество облаков нижнего яруса (нижняя облачность). Количество облаков оценивается визуально по 10-балльной шкале. Высота нижней границы облачности измеряется как расстояние от поверхности земли до основания облака. При отсутствии в пункте наблюдений средств измерений, а также в случае, если самые низкие облака находятся не над пунктом наблюдений, высота нижней границы облачности определяется визуально [13].

В ходе исследования проведен анализ внутригодового хода таких характеристик как продолжительность солнечного сияния, средняя ПСС за день с солнцем, количество дней пасмурных по нижней облачности, количество дней пасмурных по общей облачности, количество дней ясных по нижней облачности, количество дней ясных по общей облачности, балл нижней облачности, балл общей облачности. На рисунке 1 представлено сравнение внутригодового хода изучаемых параметров на метеорологических станциях Пинск, Минск, Верхнедвинск. Выбор станций обусловлен их географическим положением. Пинск (52,12°с. ш.) представляет юг республики, Минск (53,90°с. ш.) – центральную часть, Верхнедвинск (55,75°с. ш.) – север. Как видно из графиков, в целом, все анализируемые характеристики имеют примерно одинаковый внутригодовой ход. Так, ПСС практически одинаковая с января по май, в остальное время года наблюдаются некоторые незначительные различия, определяемые широтным фактором. Отмечается больший балл облачности в Минске, что, вероятно, объясняется влиянием мегаполиса на режим метеорологических характеристик. Наибольшие различия наблюдаются в количестве ясных дней с общей и нижней облачностью. Заметно значительно большее количество ясных дней в Пинске, чем на остальных станциях, в период с августа по октябрь. При этом число пасмурных дней с общей и нижней облачностью коррелируют друг с другом.



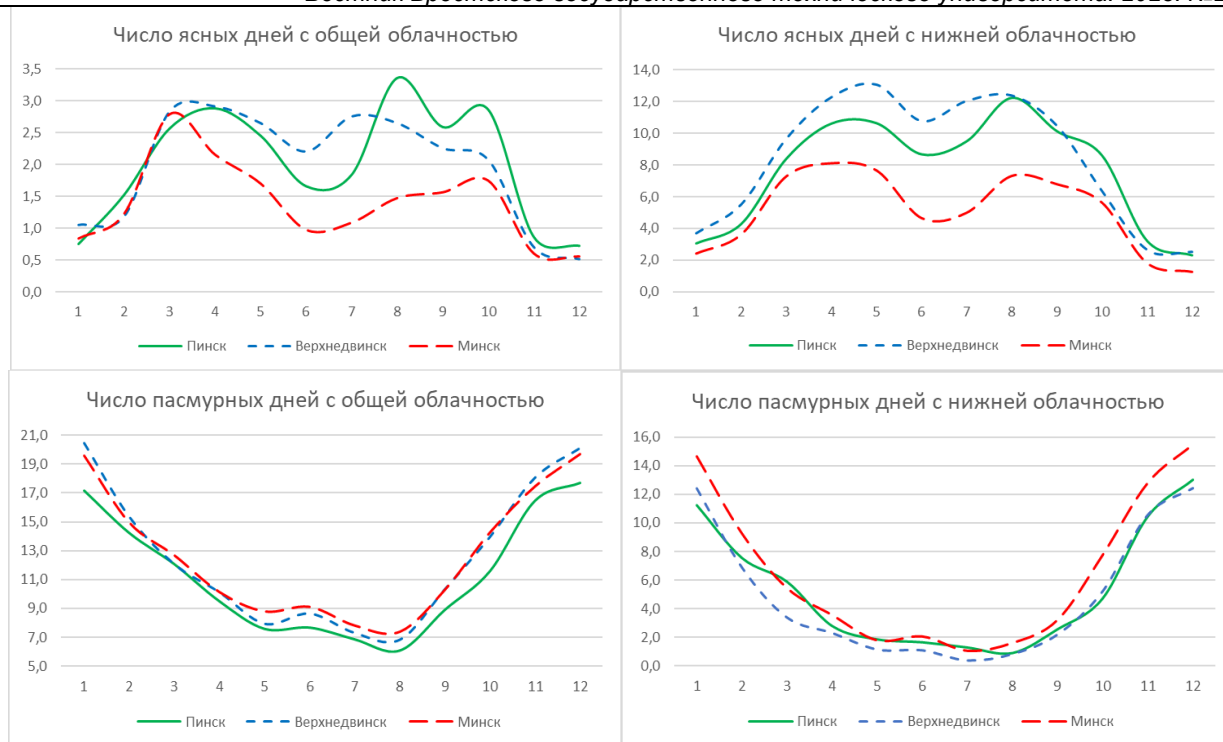


Рисунок 1 – Внутригодовой ход исследуемых характеристик солнечной радиации на метеорологических станциях Пинск, Минск, Верхнедвинск

В таблице 1 представлены современные оценки характеристик солнечной радиации за исследуемый репрезентативный период 1979–2022 гг. Как видно из таблицы 1, среднегодовая ПСС варьируется от 1793 часов в Минске до 1949 часов в Гомеле. Причиной тому, что наименьшее среднее значение ПСС соответствует Минску, отражены выше. Минимальное значение ПСС (1392 часа) зарегистрировано в Бресте в 1980 году, а максимальное – в Гомеле (2337 часов), что также не подтверждает прямую зависимость ПСС от широты метеостанции, так как Брест и Гомель находятся практически на одной параллели, 52,08 °с. ш. и 52,43 °с. ш. соответственно. Очевидно, есть другие причи-

ны, влияющие на величину ПСС, такие как облачность, обусловленная особенностями циркуляционных процессов в атмосфере под воздействием Атлантики, Балтийского моря и континентальных воздушных масс. В западном регионе республики имеют место большие коэффициенты вариации.

Так, средний балл общей облачности уменьшается с севера на юг. Максимальный среднегодовой балл общей облачности наблюдается в Березинском заповеднике (7,7 балла), а минимальный – в Бресте (6,5 балла), при этом разница между минимальными и максимальными значениями не имеют широких амплитуд (1,1 – 2,0 балла).

Таблица 1 – Средние и экстремальные (минимальные, максимальные) годовые значения исследуемых характеристик

Метеостанция	Продолжительность солнечного сияния за год, часов	ПСС средняя за день с солнцем, часов	Балл общей облачности	Балл нижней облачности	Число ясных дней с общей облачностью	Число ясных дней с нижней облачностью	Число пасмурных дней с общей облачностью	Число пасмурных дней с нижней облачностью
Верхнедвинск	1813	6,5	7	4,2	24	101	152	59
	1603–2154	5,3–7,7	6,4–7,7	3,5–4,8	13–43	74–143	129–203	39–88
Шарковщина	1865	6,1	7,3	4,8	18	68	168	74
	1645–2048	5,4–7,2	6,7–7,9	3,8–5,7	9–39	42–104	148–192	42–103
Березинский заповедник	1822	6,3	7,7	4,6	8	63	185	74
	1583–2076	5,3–7,4	7,3–8,1	3,7–5,5	2–18	41–98	72–214	44–108
Ошмяны	1833	6,3	7,1	5,2	21	62	151	87
	1559–2089	5,5–7,2	6,4–7,9	4,2–6,5	5–40	26–98	131–203	62–142
Горки	1855	6,4	6,8	4,5	22	80	135	66
	1540–2221	5,5–7,2	6,3–7,4	3,7–5,4	11–39	52–117	99–171	38–93
Минск	1793	6,3	7,1	4,9	17	61	153	78
	1443–2030	5,3–7,4	6,5–7,6	4,1–5,8	7–35	33–105	113–207	53–114
Марьяна Горка	1805	6,3	7	4,9	20	63	146	75
	1434–2094	5,4–7,7	6,5–7,5	3,2–6,3	9–41	29–128	116–197	26–139
Костюковичи	1831	6,6	6,9	4,5	19	74	147	72
	1539–2113	5,6–7,7	6,3–7,6	3,5–5,4	8–32	38–130	115–179	37–108
Волковыск	1940	6,2	6,9	4,6	22	92	137	62
	1703–2220	5,4–6,7	6,3–7,8	3–6,8	6–36	45–153	106–171	23–116
Гомель	1949	6,6	6,8	4,3	24	98	143	64
	1564–2337	5,7–8,1	6,3–7,4	3,2–4,7	13–44	64–142	111–176	41–96
Василевичи	1927	6,7	7,1	4,1	14	75	148	56
	1574–2306	5,6–7,3	6,6–7,5	3,1–5,3	6–28	45–119	120–180	25–88
Пинск	1897	6,6	6,6	4,2	24	92	135	63
	1525–2125	5,7–7,5	6,1–8	3,3–5,7	6–37	45–141	93–211	36–120
Брест	1887	6,5	6,5	4,8	25	64	130	75
	1392–2239	5,4–7,2	6–7,3	4,1–5,7	14–44	37–89	105–175	48–107

Наибольшее число ясных дней с общей облачностью наблюдается в разных широтах на территории Беларуси: по 24 дня в Верхнедвинске, Гомеле и Пинске, минимальное – в Березинском заповеднике (8 дней). Число пасмурных дней по общей облачности уменьшается с севера на юг со 184 (Березинский заповедник) до 130 дней (Брест).

Таким образом, наблюдается определенная связь между ростом средней годовой ПСС, балла общей облачности, 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 [4]. В таблице 2 приведены парные корреляции между исследуемыми характеристиками на метеостанции Минск.

Наилучшая корреляция с большинством исследуемых характеристик имеет место у числа пасмурных дней с общей облачностью, о чем свидетельствует максимальная сумма парных коэффициентов корреляции ( $\Sigma R = 4,12$ ). Также по баллу общей и нижней облачности можно проводить косвенные оценки других исследуемых параметров, при этом наблюдается наилучшая теснота связей и имеет место статистическая значимость. Однако статистически значимые связи для ПСС средней за день с солнцем с другими характеристиками отсутствуют.

**Таблица 2 – Матрица парных коэффициентов корреляции (R) исследуемых характеристик (годовые значения) на метеорологической станции Минск**

Метеорологические характеристики	Балл общей облачности	Балл нижней облачности	Число ясных дней с общей облачностью	Число ясных дней с нижней облачностью	Число пасмурных дней с общей облачностью	Число пасмурных дней с нижней облачностью	Продолжительность солнечного сияния за год, часов	ПСС средняя за день с солнцем, часов	$\Sigma R$
Балл общей облачности		0,62	0,67	0,60	0,82	0,46	0,53	0,34	4,04
Балл нижней облачности	0,62		0,38	0,76	0,71	0,85	0,49	0,08	3,89
Число ясных дней с общей облачностью	0,67	0,38		0,60	0,47	0,30	0,30	0,52	3,24
Число ясных дней с нижней облачностью	0,60	0,76	0,60		0,58	0,54	0,52	0,20	3,8
Число пасмурных дней с общей облачностью	0,82	0,71	0,47	0,58		0,74	0,52	0,28	4,12
Число пасмурных дней с нижней облачностью	0,46	0,85	0,30	0,54	0,74		0,27	0,13	3,29
Продолжительность солнечного сияния за год, часов	0,53	0,49	0,30	0,52	0,52	0,27		0,41	3,04
ПСС средняя за день с солнцем, часов	0,34	0,08	0,52	0,20	0,28	0,13	0,41		1,96

Значения ПСС являются наиболее важными и необходимы для составления геологического кадастра исследуемой территории. В таблице 3 представлены среднемесячные и среднегодовые значения фактической и возможной ПСС для метеорологических станций Пинск, Минск, Верхнедвинск. Наибольшая ПСС в Пинске и

Верхнедвинске достигается в июле (281 час и 288 часов соответственно), в Минске – в июне, июле (270 часов). Наименьшие значения количества часов солнечного сияния наблюдаются в декабре: Пинск – 32, Минск и Верхнедвинск – 24.

**Таблица 3 – Продолжительность солнечного сияния на метеорологических станциях Пинск, Минск, Верхнедвинск**

Метеостанция	Продолжительность солнечного сияния, часов	Месяц												Год
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Пинск	фактическая	40	68	141	198	265	275	281	263	171	124	45	32	1897
	возможная	258	279	367	416	486	499	502	454	380	330	265	242	4480
Минск	фактическая	36	65	138	193	258	270	270	246	162	99	37	24	1793
	возможная	249	274	367	420	494	510	512	460	382	328	258	232	4485
Верхнедвинск	фактическая	32	63	138	193	276	280	288	248	154	91	31	24	1813
	возможная	241	271	367	425	505	524	525	467	383	325	250	222	4505

ПСС во многом зависит от режима облачности. Это влияние особенно отчетливо прослеживается в отношении фактической ПСС к возможной (таблица 4). В зимние месяцы (ноябрь, декабрь, январь) процентное отношение достаточно малое и составляет 10–15 %. То

есть большая облачность холодного периода года сокращает возможную ПСС более чем на 80 %. В то же время, в летний период отношение фактической ПСС к возможной достигает более 50 %.

**Таблица 4 – Отношение фактической ПСС к возможной (%) на метеорологических станциях Пинск, Минск, Верхнедвинск**

Метеорологическая станция	Месяц												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Пинск	15,7	24,6	38,4	47,6	54,5	55,1	56,0	58,0	45,0	37,4	16,8	13,0	42,3
Минск	14,4	23,7	37,5	46,0	52,1	52,9	52,7	53,4	42,3	30,4	14,3	10,4	40,0
Верхнедвинск	13,3	23,3	37,5	45,3	54,6	53,4	54,8	53,1	40,2	28,2	12,3	10,6	40,2

В ходе исследования проведен комплексный анализ зависимостей наблюдаемых характеристик от широты метеорологической станции. Выполненный анализ характеризует исследуемые характеристики помесячно и в целом за год, что позволило оценить влияние

сезонных факторов на исследуемые взаимосвязи. На рисунках 2–4 приведены зависимости ПСС от широты за годовой период, июль – месяц с наибольшей продолжительностью ПСС и октябрь – месяц с наилучшей корреляцией исследуемых зависимостей.

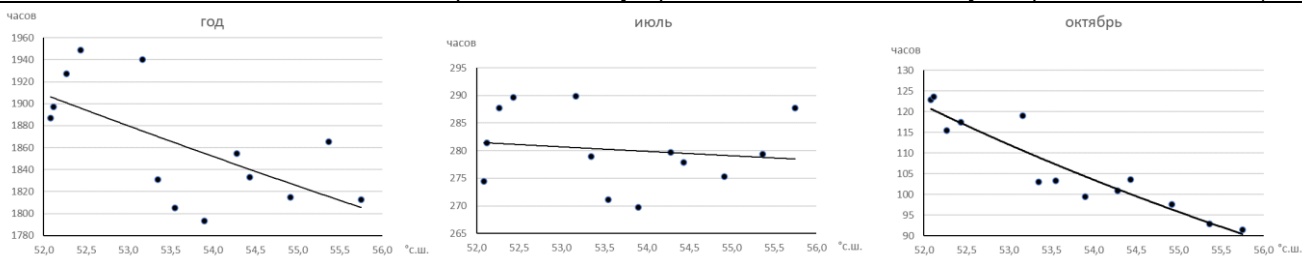


Рисунок 2 – Зависимость ПСС (часов) от широты метеорологической станции (°с. ш.)

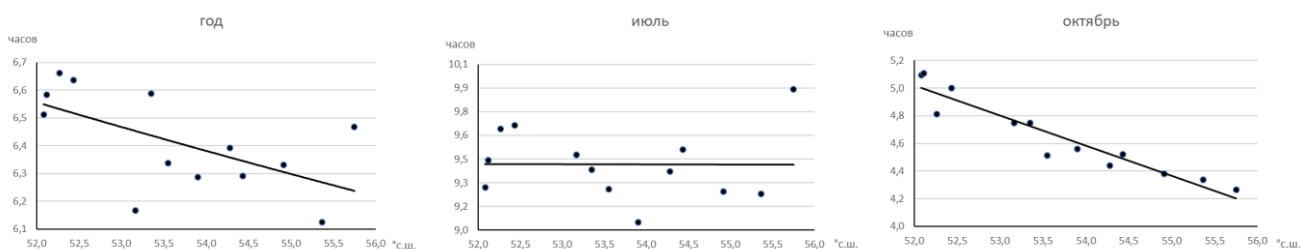


Рисунок 3 – Зависимость средней ПСС за день с солнцем (часов) от широты метеорологической станции (°с. ш.)

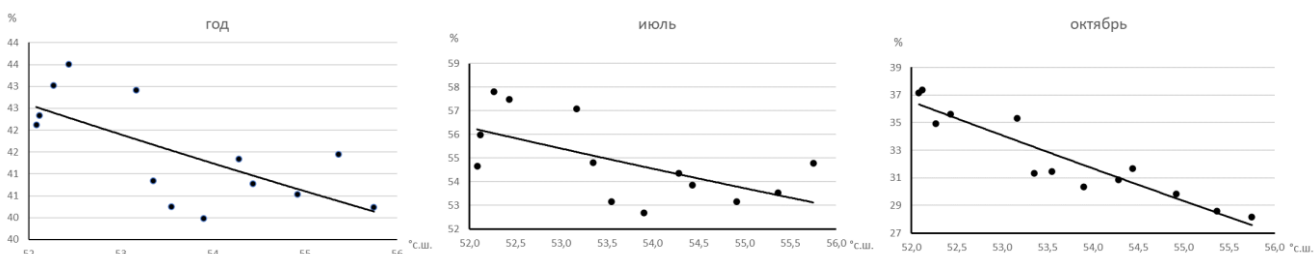


Рисунок 4 – Зависимость отношения наблюдавшейся ПСС к возможной (%) от широты метеорологической станции (°с. ш.)

В таблице 5 приведены уравнения регрессии и коэффициенты корреляции связей исследуемых характеристик солнечной радиации с широтой метеорологической станции. За отдельные месяцы приводятся худшие и лучшие оценки.

Таблица 5 – Статистические характеристики зависимостей между исследуемыми характеристиками (y) и широтой местности (x, °с. ш.)

Метеорологические характеристики	Год		Отдельные месяцы	
	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции
Продолжительность солнечного сияния, часов	$y = 44557x^{-0,797}$	0,65±0,18	$y = -0,8357x + 308,12$ (май)	0,13±0,28
			$y = 2E+09x^{4,237}$ (октябрь)	0,94±0,07
ПСС средняя за день с солнцем, часов	$y = 111,19x^{-0,716}$	0,60±0,19	$y = -0,01x + 6,4698$ (март)	0,08±0,29
			$y = -0,2187x + 16,392$ (октябрь)	0,95±0,07
Отношение фактической ПСС к возможной, %	$y = -0,779x + 83,053$	0,76±0,23	$y = -0,0979x + 52,298$ (апрель)	0,06±0,29
			$y = -128,5\ln(x) + 544,41$ (октябрь)	0,94±0,10
Балл общей облачности	$y = -0,1929x + 16,97$	0,24±0,26	$y = -0,0269x + 9,5937$ (ноябрь)	0,06±0,29
			$y = -0,3019x + 22,519$ (март)	0,37±0,24
Балл нижней облачности	$y = 4,2132\ln(x) - 12,2$	0,28±0,29	$y = 0,0268x + 1,9692$ (июнь)	0,08±0,29
			$y = 16,323\ln(x) - 60,338$ (октябрь)	0,73±0,21
Число дней ясных с общей облачностью	$y = 8E+07x^{-3,841}$	0,30±0,29	$y = -0,0436x + 4,334$ (март)	0,09±0,29
			$y = 2E+13x^{-7,486}$ (октябрь)	0,60±0,24
Число дней ясных с нижней облачностью	$y = 7113,7x^{-1,143}$	0,13±0,30	$y = -0,1135x + 10,901$ (февраль)	0,15±0,28
			$y = 6E+14x^{-8,065}$ (октябрь)	0,86±0,16
Число дней пасмурных с общей облачностью	$y = 0,0027x^{2,7386}$	0,66±0,23	$y = 0,2133x + 0,7812$ (март)	0,30±0,25
			$y = 59,257\ln(x) - 222,78$ (октябрь)	0,84±0,16
Число дней пасмурных с нижней облачностью	$y = 100,74\ln(x) - 331,55$	0,27±0,29	$y = 0,2298x - 4,1829$ (февраль)	0,23±0,26
			$y = 30,342\ln(x) - 114,68$ (октябрь)	0,56±0,25

Лучшую зависимость от широты местности демонстрирует продолжительность солнечного сияния практически в течение всего года, причем в октябре наблюдается наилучшая связь ( $R = 0,94 \pm 0,07$ ). Такие параметры, как балл нижней облачности, число ясных дней с общей облачностью, число пасмурных дней с нижней облачностью не имеют статистически значимых связей с широтой в течение всего года и в целом за год. Наилучшие связи большинства характеристик с широтой местности приходятся на сентябрь–ноябрь, наихудшие соответствуют февралю–маю. Октябрь характеризуется определенным изменением циркуляционных процессов в атмосфере. С октября в Беларуси формируется тип барического поля, наблюдается рост атмосферного давления, образуются мощные антициклоны, приводящие в итоге к увеличению повторяемости

«бабье лето», несколько увеличивается число ясных дней с нижней облачностью (рисунок 1).

На рисунке 5 представлены графики временной изменчивости исследуемых характеристик на метеостанциях Пинск, Минск и Верхнедвинск. Отклонения от среднего для всех характеристик носят знакопеременный характер и позволяют установить определенную цикличность и тенденции развития метеорологических процессов.

В ходе анализа пространственно-временной изменчивости исследуемых характеристик были построены линейные тренды за весь репрезентативный период 1979–2022 гг., которые позволили оценить происходящие трансформации. Данные таблицы 6 представлены для метеорологической станции Минск.



Рисунок 5 – Отклонение от среднего значения исследуемых характеристик солнечной радиации на метеорологических станциях Пинск, Минск, Верхнедвинск

На территории Беларуси имеет место увеличение годовой ПСС в среднем на 46 часов за 10 лет [3], в Минске на 29 часов (таблица 6). Однако это увеличение определяется прежде всего весенне-летними месяцами. Поздней осенью и в зимний период ПСС сокращается, что очевидно определяется общепланетарными процессами, связанными с потеплением климата. Потепление для территории Беларуси особенно значимо в зимний период, когда погода становится неустойчивой. ПСС средняя за день с солнцем, балл общей и нижней облачности, число ясных дней с общей облачностью практически не изменяются в десятилетнем разрезе. Имеют место локальные трансформации месячных величин. Годовые значения числа пасмурных дней с общей и нижней облачностью уменьшаются адек-

ватно увеличению продолжительности солнечного сияния, что согласуется с ранее сделанными выводами.

Исследование временных изменений месячных и годовых значений исследуемых характеристик в Беларуси за период с 1979 по 2022 гг. показало, что имеется тенденция к долгопериодическим колебаниям (рисунок 6). Однако этот исследуемый период возможно разделить на две части с полностью противоположными трендами. Для большинства станций и характеристик переломным моментом, т. е. моментом, когда меняется направление тренда в течение периода метеорологических наблюдений, является период с 1998 по 2005 гг. Проведенный комплексный анализ позволил разбить временные ряды на две части: 1979–2003 гг. – 25 лет; 2004–2022 гг. – 19 лет (рисунок 6).

Таблица 6 – Трансформация характеристик солнечной радиации на метеорологической станции Минск / за 10 лет

Метеорологические характеристики	Месяц												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Продолжительность солнечного сияния, часов	-0,3	-4	6,9	8,7	-1,5	12,2	4,1	4,9	8,9	-2,2	-3,5	-3	28,9
ПСС средняя за день с солнцем, часов	0,1	-0,3	-0,1	0,1	-0,1	0,3	0,1	0	0,3	-0,1	-0,1	-0,3	-0,2
Балл общей облачности	0,1	0,2	0	-0,2	0,1	-0,3	-0,1	0	-0,1	0	0,1	0,1	0
Балл нижней облачности	0,2	0,3	-0,2	-0,2	-0,1	-0,4	-0,2	-0,2	-0,3	-0,1	0,1	0,1	-0,1
Число ясных дней с общей облачностью	0,1	-0,4	0	0,2	-0,2	0,1	0	-0,2	-0,2	0	-0,1	-0,1	-0,9
Число ясных дней с нижней облачностью	0	-0,6	0,1	0,5	0,2	1,0	0,4	0,3	1,1	0,3	-0,3	-0,1	3
Число пасмурных дней с общей облачностью	0,5	0,5	-0,1	-0,6	-0,5	-1,5	-1,0	-0,5	-0,9	-0,1	0,1	0,2	-4,1
Число пасмурных дней с нижней облачностью	0,6	0,4	-0,9	-0,6	-0,1	-0,7	-0,3	-0,4	-0,3	-0,3	-0,6	0	-3,6

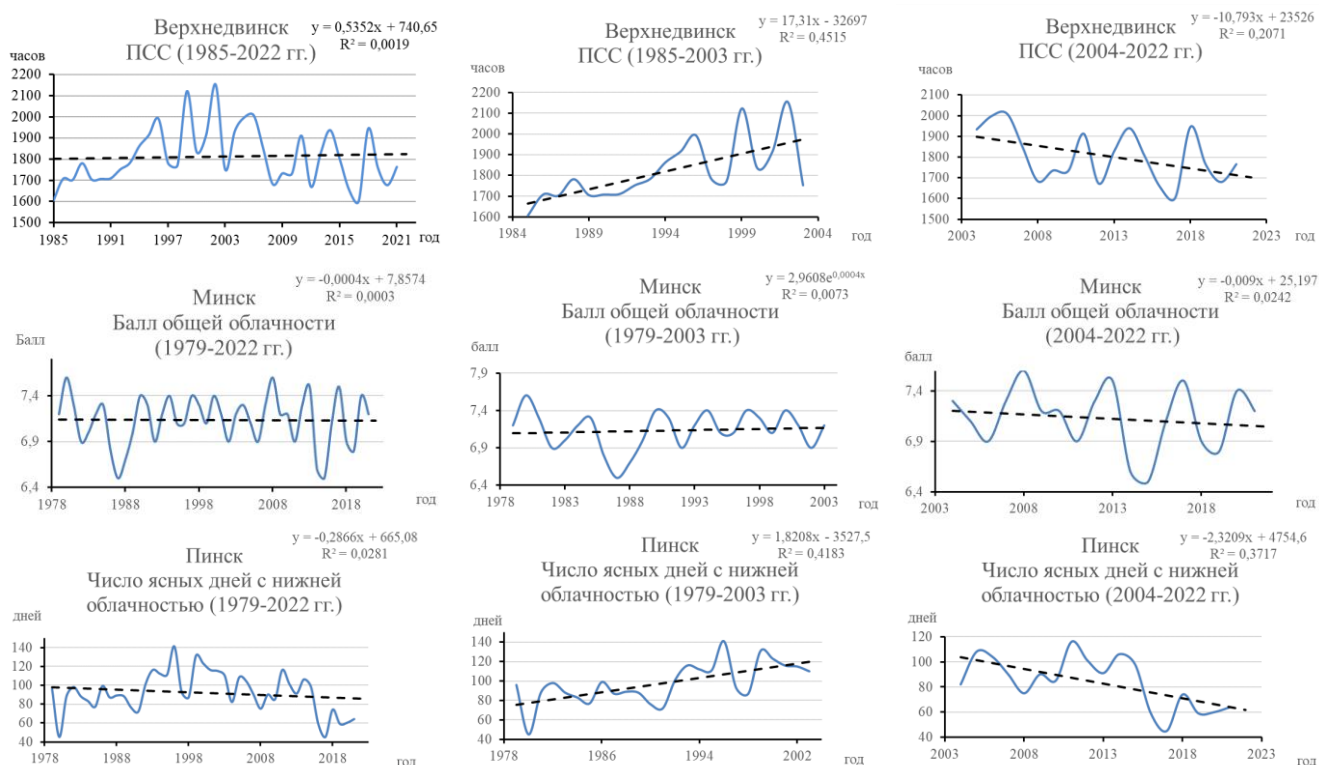


Рисунок 6 – Временная изменчивость характеристик солнечной радиации

В работах [14, 15, 16 и др.] исследованы многолетние изменения потока поверхностной нисходящей коротковолновой радиации, общей облачности, влияния облачности на коротковолновый поток и связанных с ними параметров в период 1965–2005 гг. Исследования свидетельствуют о повсеместном снижении приземной солнечной радиации в период с 1950-х по 1980-е годы, так называемое «глобальное затемнение» с частичным восстановлением во многих регионах в последнее время («глобальное осветление»). Авторы считают, что наиболее вероятным объяснением являются изменения в выбросах антропогенных аэрозолей, которые привели к большему рассеянию и поглощению коротковолнового излучения в период солнечного «затемнения» и меньшему рассеиванию и поглощению в более поздний период солнечного «осветления». Подобный эффект подтверждается наблюдаемыми нами долгопериодическими колебаниями (рисунок 6) на территории Беларуси и объясняется повсеместным энергетическим переходом промышленных предприятий Беларуси на использование более экологичного газового топлива вместо нефтепродуктов в 1990-х годах.

### Выводы

Полученные результаты являются ориентирующей основой для обеспечения критически важных отраслей экономики Республики Беларусь (сельское хозяйство, строительство, транспорт, чрезвычайные ситуации и др.) данными о состоянии режима солнечной радиации. Ограниченность актуальной информации (данные 15 метеорологических станций), характеризующей особенности распределения ресурсов солнечной радиации по территории Республики Беларусь предполагает широкое включение в обобщение методов аналитических расчетов и интерполяции данных. Актуальной является работа по обеспечению гелиоэнергетического кадастра Республики Беларусь информацией, позволяющей интенсифицировать развитие солнечной энергетики. Проведенные исследования показали, что ресурсы солнечной радиации распределяются неравномерно в течение года и по территории, однако их достаточно для развития гелиоэнергетики в Беларуси.

**Список цитированных источников**

1. Камлюк, Г. Г. Гелиоэнергетические ресурсы и перспективы развития гелиоэнергетики в Республике Беларусь / Г. Г. Камлюк // Энергетическая стратегия. – 2012. – № 6 (30). – С. 35–37.
2. Пашинский, В. А. Оценка падающей солнечной радиации на горизонтальную поверхность территории в условиях Республики Беларусь / В. А. Пашинский, А. А. Бут'ко, А. А. Черкасова // Экологический вестник. – 2015. – № 2 (32). – С. 77–82.
3. Мешик, О. П. Оценка гелиоэнергетических ресурсов климата Беларуси / О. П. Мешик, М. В. Борушко, В. А. Морозова // Вестник БрГТУ. – 2020. – № 2(120) : Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – С. 93–99.
4. A. Meshyk, M. Barushka, V. Marozava, E. Sarkynov, An. Meshyk, Climate Resource Potential to Develop Solar Power in Belarus / Meshyk A. [et al.]. – E3S Web Conf., 212 (2020) 01012.
5. 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.
6. Справочник по климату Беларуси: в 6 ч. / Под. общ. ред. В. И. Мельника. – Минск : Минприроды, 2007. – Часть 5. Влажность воздуха. Солнечное сияние. Метеорологическая дальность видимости. – 48 с.
7. Справочник по климату Беларуси: в 6 ч. / Под. общ. ред. В. И. Мельника. – Минск : Минприроды, 2007. – Облачность. Атмосферные явления. – 56 с.
8. Климатический кадастр Республики Беларусь. Метеорологический ежегодник. – Минск : Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды, 1979–2022 гг.
9. Государственный кадастр возобновляемых источников энергии [Электронный ресурс] / Минприроды Респ. Беларусь. – Минск, 2020. – Режим доступа : [http://www.minpriroda.gov.by/gu/new\\_url\\_19948904-ru/](http://www.minpriroda.gov.by/gu/new_url_19948904-ru/). – Дата доступа : 20.04.2023.
10. Борушко, М. В. Обеспеченность данными гидрометеорологических наблюдений проектной мелиоративной практики / М. В. Борушко // Мелиорация и сельское строительство. Поиск молодежи: Сборник научных трудов по материалам III Республиканской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и соискателей, посвященной 100-летию мелиоративно-строительного факультета / Белорусская государственная сельскохозяйственная академия; под ред. Р. А. Другомилова. – Горки : УО БГСХА, 2019. – С. 12–16.
11. Мешик, О. П. Продолжительность солнечного сияния как основной фактор, формирующий гелиоэнергетические ресурсы климата Беларуси / О. П. Мешик, М. В. Борушко, М. М. Мирзоев, В. А. Морозова, К. О. Мешик // Peasant. – 2022. – № 3 (96). – С. 127–133.
12. Метеопрогностическое регулирование в гелиоэнергетике / О. П. Мешик [и др.] // Вестник БрГТУ. – 2022: Технические науки (строительство, машиностроение, геоэкология); экономические науки. – № 3 (129). – С. 40–42.
13. Охрана окружающей среды и природопользование. Гидрометеорологическая деятельность. Порядок осуществления приземных метеорологических наблюдений : ТКП 17.10-45-2021 (33140). – Введ. 31.12.2021. – Минск : Минприроды Респ. Беларусь, 2021. – 23 с.
14. M. Wild (2009), Global dimming and brightening: A review, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, Climate and Dynamics., 114, D10. <https://doi.org/10.1029/2008JD011470>.
15. Norris, J. R., and M. Wild (2007), Trends in aerosol radiative effects over Europe inferred from observed cloud cover, solar “dimming,” and solar “brightening,” J. Geophys. Res., 112, D08214. <https://doi.org/10.1029/2006JD007794>.
16. Martin Wild, Barbara Trüssel, Atsumu Ohmura, Charles N. Long, Gert König-Langlo, Ellsworth G. Dutton, Anatoly Tsvetkov (2009), Global dimming and brightening: An update beyond 2000, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, Climate and Dynamics., 114, D10. <https://doi.org/10.1029/2008JD011382>.

**References**

1. Kamlyuk, G. G. Gelioenergeticheskie resursy i perspektivy razvitiya gelioenergetiki v Respublike Belarus' / G. G. Kamlyuk // Energeticheskaya strategiya. – 2012. – № 6 (30). – S. 35–37.
2. Pashinskij, V. A. Ocenka padayushchej solnečnoj 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.
3. Meshik, O. P. Ocenka gelioenergeticheskikh resursov klimata Belarusi / O. P. Meshik, M. V. Borushko, V. A. Morozova // Vestnik BrGTU. – 2020. – № 2(120) : Vodohozajstvennoe stroitel'stvo, teploenergetika i geoekologiya. – S. 93–99.
4. A. Meshyk, M. Barushka, V. Marozava, E. Sarkynov, An. Meshyk, Climate Resource Potential to Develop Solar Power in Belarus / Meshyk A. [et al.]. – E3S Web Conf., 212 (2020) 01012.
5. 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.
6. Spravochnik po klimatu Belarusi: v 6 ch. / Pod. obshch. red. V. I. Mel'nika. – Minsk : Minprirody, 2007. – CHast' 5. Vlazhnost' vozduha. Solnechnoe siyanie. Meteorologicheskaya dal'nost' vidimosti. – 48 s.
7. Spravochnik po klimatu Belarusi: v 6 ch. / Pod. obshch. red. V. I. Mel'nika. – Minsk : Minprirody, 2007. – Oblachnost'. ëAt-mosferye yavleniya. – 56 s.
8. Klimaticheskij kadastr Respubliki Belarus'. Meteorologicheskij ezhemesyachnik. – Minsk : Respublikanskij centr po gidrometeorologii, kontrolyu radioaktivnogo zagryazneniya i monitoringu okruzhayushchej sredy, 1979–2022 gg.
9. Gosudarstvennyj kadastr vozobnovlyаемых istochnikov energii [Elektronnyj resurs] / Minprirody Resp. Belarus'. – Minsk, 2020. – Rezhim dostupa : [http://www.minpriroda.gov.by/ru/new\\_url\\_19948904-ru/](http://www.minpriroda.gov.by/ru/new_url_19948904-ru/). – Data dostupa : 20.04.2023.
10. Borushko, M. V. Obespechennost' dannymi gidrometeorologicheskikh nablyudenij proektnoj meliorativnoj praktiki / M. V. Borushko // Melioraciya i sel'skoe stroitel'stvo. Poisk molodezhi: Sbornik nauchnykh trudov po materialam III Respublikanskoy konferencii studentov, magistrantov, aspirantov i soiskatelej, posvyashchennoj 100-letiyu meliorativno-stroitel'nogo fakul'teta / Belorusskaya gosudarstvennaya sel'skohozyaystvennaya akademiya: pod red. R. A. Drugomilova. – Gorki : UO BGSKHA, 2019. – S. 12–16.
11. Meshik, O. P. Prodolzhitel'nost' solnechnogo siyaniya kak osnovnoj faktor, formiruyushchij gelioenergeticheskie resursy klimata Belarusi / O. P. Meshik, M. V. Borushko, M. M. Mirzoev, V. A. Morozova, K. O. Meshik // Peasant. – 2022. – № 3 (96). – S. 127–133.
12. Meteoprognosticheskoe regulirovanie v gelioenergetike / O. P. Meshik [i dr.] // Vestnik BrGTU. – 2022: Tekhnicheskie nauki (stroitel'stvo, mashinostroenie, geoekologiya); ekonomicheskie nauki. – № 3 (129). – S. 40–42.
13. Ohrana okruzhayushchej sredy i prirodopol'zovanie. Gidrometeorologicheskaya deyatel'nost'. Poryadok osushchestvleniya prizemnykh meteorologicheskikh nablyudenij : TKP 17.10-45-2021 (33140). – Vved. 31.12.2021. – Minsk : Minprirody Resp. Bela-rus', 2021. – 23 s.
14. M. Wild (2009), Global dimming and brightening: A review, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, Climate and Dynamics., 114, D10. <https://doi.org/10.1029/2008JD011470>.
15. Norris, J. R., and M. Wild (2007), Trends in aerosol radiative effects over Europe inferred from observed cloud cover, solar “dim-ming,” and solar “brightening,” J. Geophys. Res., 112, D08214. <https://doi.org/10.1029/2006JD007794>.
16. Martin Wild, Barbara Trüssel, Atsumu Ohmura, Charles N. Long, Gert König-Langlo, Ellsworth G. Dutton, Anatoly Tsvetkov (2009), Global dimming and brightening: An update beyond 2000, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, Climate and Dynamics., 114, D10. <https://doi.org/10.1029/2008JD011382>.

Материал поступил 30.06.2023, одобрен 30.06.2023, принят к публикации 04.07.2023.