

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.521.12

## Радиационный блок измерительного комплекса обсерватории «Фоновая». Часть II. Результаты измерений в 2021 г.

Б.Д. Белан, Г.А. Ивлев<sup>✉</sup>, А.В. Козлов, Д.А. Пестунов,  
Т.К. Скляднева, А.В. Фофонов\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 16.06.2022 г.;  
после доработки 2.08.2022 г.;  
принята к печати 16.08.2022 г.

По данным наземных измерений в обсерватории «Фоновая» в 2021 г. проведен анализ изменчивости солнечной радиации в диапазонах длин волн  $\lambda = 0,285 \pm 2,8$ ;  $0,280 \pm 0,400$ ;  $0,280 \pm 0,315$  мкм. Приводятся результаты расчета радиационного баланса и альbedo подстилающей поверхности. Показано, что с ноября по март при устойчивом снежном покрове суточный радиационный баланс составляет  $1,20 \pm 1,18$  МДж/м<sup>2</sup>, а при отсутствии снега с мая по сентябрь —  $8,83 \pm 4,49$  МДж/м<sup>2</sup>. Сделаны оценки суточного поглощения солнечной радиации земной поверхностью. В период устойчивого снежного покрова с декабря по март суточное поглощение солнечной радиации земной поверхностью не превышало 2 МДж/м<sup>2</sup>, а в летний период изменялось от 10 до 25 МДж/м<sup>2</sup>.

*Ключевые слова:* атмосфера, радиация, альbedo, радиационный баланс; atmosphere, radiation, albedo, radiation balance.

### Введение

Согласно Второму оценочному докладу об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации [1] основная особенность современных изменений климата — это глобальное потепление конца XX — начала XXI в. По данным наблюдений, средняя скорость увеличения температуры воздуха на земном шаре составила  $0,166$  °C/10 лет за 1976–2012 гг. В [1] также отмечается, что во временном ряде среднегодовых аномалий температуры, осредненных по территории России, как и в глобальных временных рядах, период после 1976 г. характеризуется наиболее интенсивным потеплением, при этом его скорость на территории Российской Федерации ( $0,43$  °C/10 лет) более чем в два раза выше, чем глобального.

Среди важнейших факторов, влияющих на изменения климата и, в частности, на температуру приземного воздуха, — приходящая солнечная радиация и уровень длинноволнового излучения.

По результатам анализа долговременных измерений суммарной солнечной радиации более чем на 400 станциях по всей планете показано [2], что с 1920 до начала 1960-х гг. отмечался ее прирост, который в дальнейшем сменился на спад, продолжавшийся до конца 1980-х гг; с начала 1990-х гг. снова начался рост притока солнечной радиации, при этом температурная чувствительность к изменению радиации составила  $0,05$ – $0,06$  К/(Вт · м<sup>2</sup>). Анализ многолетней изменчивости коротковолновой солнечной радиации, измеренной на 180 актинометрических станциях Европы [3], показал наличие двух хорошо выраженных периодов: уменьшения с 1964 по 1989 г. и увеличения с 1990 по 2010 г. При этом на 123 из 130 европейских станций с 1990 по 2010 г. отмечается рост суммарной радиации. В то же время в [4] выявлено, что в период 1986–2010 гг. на азиатской территории России сформировалась обширная область со слабыми отрицательными трендами приходящей радиации. Наиболее ярко это проявляется в средней Сибири и на юге Западной Сибири. В Томске по данным многолетнего мониторинга за 1996–2016 гг. зарегистрировано сокращение продолжительности солнечного сияния и уменьшение годового поступления суммарной радиации (относительная величина тренда составила  $-2,5\%$ ) [5, 6]. При этом снижения температуры не отмечается [6].

\* Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Георгий Алексеевич Ивлев (ivlev@iao.ru); Артем Владимирович Козлов (artem@iao.ru); Дмитрий Александрович Пестунов (pest@iao.ru); Татьяна Константиновна Скляднева (tatyana@iao.ru); Александр Владиславович Фофонов (alenfo@iao.ru).

Поскольку климатическая система достаточно сложна и в ней присутствует множество прямых и обратных связей, измерения, направленные на выявление роли отдельных факторов, влияющих на формирование погоды и климата, должны быть комплексными. Учитывая, что в России скорость потепления остается выше, чем на планете, развитию отечественной сети станций наблюдения за радиационными характеристиками и состоянием атмосферы в приземном слое должно уделяться существенное внимание.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН ведет непрерывный мониторинг атмосферных параметров в приземном слое атмосферы на 11 постах, расположенных на территории Западной Сибири. Описание приборной базы постов наблюдения и некоторые результаты опубликованы в [7–9]. Одним из самых оснащенных постов является обсерватория «Фоновая», расположенная на восточном берегу р. Оби в 60 км к западу от Томска (56°25' с.ш., 84°04' в.д.) [9]. На ней с июля 2016 г. осуществляется мониторинг суммарной солнечной радиации пиранометром СМЗ производства Kipp & Zonen, измеряющим поток солнечной радиации в диапазоне длин волн  $\lambda = 0,305 \div 2,8$  мкм. С апреля 2019 г. начаты измерения фотосинтетической радиации датчиком PQS1 (Kipp & Zonen). В ноябре 2020 г. радиационный блок измерений пополнился еще группой приборов (пиранометрами SMP10, SUV-B, SUV5 и радиометром CNR4). Технические характеристики приборов и методические аспекты установки и измерений описаны в [10].

В настоящей работе анализируются результаты измерения солнечной радиации, радиационного баланса ( $B$ ) и альбедо ( $A$ ) подстилающей поверхности в обсерватории «Фоновая» в 2021 г.

### Перечень измеряемых радиационных характеристик

Для анализа изменения радиационных характеристик атмосферы в фоновом районе в 2021 г. использованы данные радиационного блока измерений обсерватории «Фоновая». Измерения суммарной солнечной радиации ( $\lambda = 0,285–2,800$  мкм) ведутся пиранометром SMP10, суммарной УФ-радиации в спектральной области  $\lambda = 0,280–0,400$  мкм – пиранометром SUV5, суммарной УФ–В-радиации ( $\lambda = 0,280–0,315$  мкм) – пиранометром SUV-B. Далее в статье для обозначения суммарной солнечной радиации используется термин «суммарная радиация» или « $Q$ », суммарной ультрафиолетовой радиации термин «УФ-радиация», а для суммарной УФ–В-радиации – термин «УФ–В-радиация».

С помощью радиометра CNR4 начаты измерения суммарной  $Q$  и отраженной коротковолновой  $R_k$  радиации, а также собственного излучения земной поверхности  $E_n$  и встречного длинноволнового излучения атмосферы  $E_a$ , которые определяются в волновых диапазонах 0,3–2,800 и 4,5–42 000 мкм соответственно.

### Солнечная радиация

По данным измерений рассчитаны суточные суммы  $Q$ , УФ- и УФ–В-радиации. Изменчивость суточного поступления солнечной радиации в течение года для трех диапазонов длин волн представлена в табл. 1. Суточные суммы солнечной радиации в течение года изменялись от максимальных значений в мае–июле до минимальных в декабре. В зимние месяцы среднее суточное поступление солнечной радиации не превышало  $Q = 5,5$  МДж/м<sup>2</sup>, УФ-радиация = 0,3 МДж/м<sup>2</sup>, УФ–В-радиация =  $1,3 \cdot 10^{-3}$  МДж/м<sup>2</sup>. Весной с увеличением высоты Солнца растет суточное поступление солнечной радиации ( $Q = 14,6 \pm 7,0$  МДж/м<sup>2</sup>, УФ-радиация =  $0,8 \pm 0,3$  МДж/м<sup>2</sup>, УФ–В-радиация =  $1,0 \cdot 10^{-2} \pm 0,5 \cdot 10^{-2}$  МДж/м<sup>2</sup>). В летний период (июнь–август) по сравнению с зимой суточное поступление суммарной и УФ-радиации возрастает примерно в пять раз, а УФ–В-радиации – более чем в 10 раз. В этот период коэффициент вариации ( $V$ ) суточных сумм изменялся в диапазоне 25 ÷ 38%. Максимальное суточное поступление солнечной радиации зарегистрировано 5 июня 2021 г.:  $Q = 31,0$  МДж/м<sup>2</sup>, УФ-радиация = 1,6 МДж/м<sup>2</sup>, УФ–В-радиация =  $2,4 \cdot 10^{-2}$  МДж/м<sup>2</sup>. Осенью диапазон изменения суточных сумм  $Q$ , УФ- и УФ–В-радиации составил 0,40 ÷ 18,28; 0,03 ÷ 0,92;  $0,10 \cdot 10^{-3} \div 1,55 \cdot 10^{-2}$  МДж/м<sup>2</sup> соответственно.

Среднемесячная доля суточных значений УФ-радиации в суммарной радиации составила от 5% до 8%, а УФ–В-радиации 0,01 ÷ 0,1% в зависимости от сезона.

Наряду с измерениями суммарной радиации пиранометром SMP10 на территории обсерватории «Фоновая» с 2016 г. ведутся измерения суммарной радиации пиранометром СМЗ в диапазоне длин волн  $\lambda = 0,305–2,800$  мкм. Такой же радиационный датчик в январе 2019 г. был установлен на базовом экспериментальном комплексе (БЭК), расположенном на восточной окраине г. Томска. Оба датчика СМЗ установлены на одинаковой высоте, и измеряемые ими параметры фиксируются одновременно. Было проведено сравнение результатов измерения  $Q$  в двух этих точках. В 2021 г. годовое поступление солнечной радиации на «Фоновой» на 1,6% больше, чем на БЭКе (3865 МДж/м<sup>2</sup> – «Фоновая», 3801 МДж/м<sup>2</sup> – БЭК). Похожий результат получен и для 2020 г.: годовое поступление солнечной радиации на «Фоновой» больше на 2,8% (3921 МДж/м<sup>2</sup> – «Фоновая» и 3812 МДж/м<sup>2</sup> – БЭК). В табл. 2 приведены отклонения месячных сумм суммарной радиации на БЭКе ( $Q_{\text{БЭК}}$ ) от данных на «Фоновой» ( $Q_{\text{фон}}$ ) для разных периодов, рассчитанные по формуле

$$\Delta Q = (Q_{\text{фон}} - Q_{\text{БЭК}}) / Q_{\text{фон}} \cdot 100\%.$$

Из табл. 2 видно, что в течение года разница месячного поступления суммарной радиации непостоянна. Одним из основных общепризнанных факторов, влияющих на поступление солнечной радиации, является облачность. Возможно, именно параметры облачности и более высокая прозрач-

Таблица 1

## Статистические значения суточных сумм радиационных параметров атмосферы в 2021 г.

Параметр	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Q, МДж/м <sup>2</sup>												
Среднее	2,70	5,55	8,36	15,99	19,41	18,89	21,65	14,94	8,82	5,61	1,46	1,13
Min	1,14	1,27	3,15	3,21	6,13	6,49	5,60	3,75	1,50	1,00	0,37	0,49
Max	5,14	10,26	13,07	24,41	28,26	31,00	29,14	21,64	18,28	11,12	3,40	2,33
Стандартное отклонение	1,04	2,59	2,89	6,06	6,37	7,16	5,48	5,24	4,74	2,91	0,76	0,55
V, %	38	46	35	38	33	38	25	35	54	52	52	49
УФ-радиация, МДж/м <sup>2</sup>												
Среднее	0,12	0,29	0,57	0,84	1,02	1,04	1,16	0,82	0,49	0,31	0,11	0,07
Min	0,06	0,10	0,29	0,25	0,41	0,45	0,41	0,29	0,12	0,08	0,03	0,04
Max	0,17	0,58	0,81	1,23	1,43	1,58	1,49	1,12	0,92	0,56	0,21	0,14
Стандартное отклонение	0,02	0,16	0,16	0,27	0,28	0,33	0,24	0,23	0,21	0,13	0,04	0,03
V, %	17	55	28	32	27	32	21	28	43	42	36	43
УФ–В-радиация · 10 <sup>2</sup> , МДж/м <sup>2</sup>												
Среднее	0,04	0,13	0,46	0,97	1,57	1,72	2,01	1,38	0,68	0,28	0,05	0,02
Min	0,02	0,03	0,21	0,33	0,65	0,62	0,60	0,48	0,14	0,06	0,01	0,01
Max	0,07	0,29	0,75	1,60	2,40	2,62	2,63	1,93	1,55	0,54	0,14	0,14
Стандартное отклонение	0,02	0,06	0,17	0,36	0,50	0,56	0,44	0,41	0,37	0,14	0,03	0,01
V, %	50	46	37	37	32	33	22	30	54	50	60	50
B, МДж/м <sup>2</sup>												
Среднее	-0,91	-1,59	-1,26	4,27	9,91	10,18	12,68	8,63	3,49	0,49	-1,30	-1,08
Min	-3,38	-3,98	-3,62	-1,36	3,39	3,40	3,18	2,44	0,22	-1,74	-4,14	-3,40
Max	1,91	0,10	1,12	10,64	15,11	16,87	16,98	13,18	8,97	2,55	0,08	0,80
Стандартное отклонение	1,36	1,07	1,09	3,80	3,46	3,93	3,62	3,11	2,26	1,31	1,08	1,02
V, %	184	67	87	89	35	37	29	36	65	267	83	94
A, %												
Среднее	75	80	82	47	20	23	19	21	23	22	78	82
Min	66	71	76	15	13	20	14	18	17	15	59	58
Max	87	90	87	81	22	29	25	24	30	26	91	95
Стандартное отклонение	6,5	5,0	2,9	22,5	2,0	1,6	3,0	1,9	2,3	2,6	9,4	8,3
V, %	9	6	4	48	10	7	16	9	10	12	12	10

Таблица 2

Разность месячных сумм суммарной радиации на «Фоновой» и БЭКа ( $\Delta Q, \%$ )

Год	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2021	-0,4	0,6	5,2	-3,0	5,2	-1,3	3,3	4,5	3,8	-5,1	-10,8	2,7
2020	5,5	0,2	8,6	-0,8	5,1	5,0	3,6	-2,3	4,1	2,8	-9,5	4,2
2019	—	0,1	9,2	2,8	1,8	1,9	5,5	4,3	-4,8	-6,4	-2,4	4,6

ность атмосферы в районе обсерватории «Фоновая» определили большее поступление солнечной радиации практически во все месяцы года по сравнению с районом БЭКа. Между тем наблюдается устойчивая тенденция преобладания месячных сумм Q в районе БЭКа над районом «Фоновой» в октябре-ноябре 2021 и 2019 гг. и в ноябре 2020 г. По нашим предположениям, это может быть связано с нахождением обсерватории «Фоновая» на берегу р. Оби. И этот крупный не скованный льдом водоем способен осенью оказывать влияние на сниженные прозрачности атмосферы.

## Альbedo подстилающей поверхности

С использованием данных радиометра CNR4 рассчитано альbedo подстилающей поверхности

$$A = (R_k/Q) \cdot 100\%.$$

Среднесуточные значения альbedo рассчитывались для зенитных углов меньше 85°.

В годовой изменчивости A в течение 2021 г. можно выделить два периода (рис. 1, табл. 1): с устойчивым снежным покровом (январь – март и ноябрь – декабрь) и без снега (май – октябрь). В период с устойчивым снежным покровом альbedo поверхности изменялось в диапазоне 58 ÷ 95% в зависимости от состояния снежного покрова (свежевыпавший, спрессованный или грязный снег). Коэффициент вариации альbedo подстилающей поверхности в этот период равен 4 ÷ 12%. В период с мая по октябрь A = 13 ÷ 30% (V = 7 ÷ 16%).

В апреле нам удалось в короткие сроки наблюдать резкий рост значений альbedo (V = 48%) из-за изменения свойств подстилающей поверхности с последующим спадом и возвращением к первоначальным значениям. В первой половине апреля

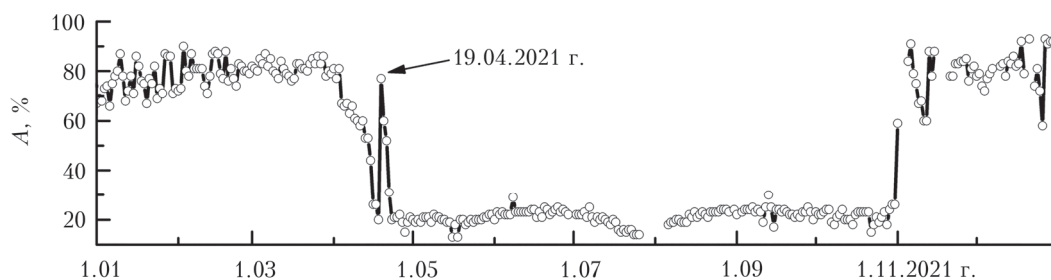


Рис. 1. Годовой ход альbedo подстилающей поверхности

при постепенной смене подстилающей поверхности  $A$  уменьшилось с 70 до 26% (снег полностью сошел). 18 апреля 2021 г. шел дождь, выпало 4 мм осадков ( $A = 20\%$ ), а 19 апреля выпал снег и альbedo поверхности резко возросло до 77%. Далее снег таял, альbedo уменьшалось и к 24 апреля  $A = 21\%$ .

### Радиационный баланс

Радиационный баланс подстилающей поверхности [11]:

$$B = (Q - R_k) - E_{эф} = Q(1 - A) - E_{эф},$$

где  $Q \cdot (1 - A)$  — поглощенная радиация (коротковолновый баланс  $B_k$ );  $E_{эф} = (E_{п} - E_a)$  — эффективное излучение (длинноволновый баланс  $B_d$ ), характеризующее потерю тепла земной поверхностью.

В зависимости от соотношения поглощенной радиации и эффективного излучения радиационный баланс может быть положительным или отрицательным. Величиной и знаком  $B$  определяется тепловое состояние земной поверхности и приземного слоя воздуха [12].

В период глобального изменения климата изучение колебаний радиационного баланса и его составляющих представляет большой интерес. Анализ многолетних изменений радиационных потоков, проведенный по результатам наблюдений в Метеорологической обсерватории МГУ за 60 лет, показал наличие тенденции к увеличению поглощенной радиации, эффективного излучения, противоизлучения атмосферы и радиационного баланса земной поверхности [13–15]. Существенное увеличение значений радиационного баланса началось с середины 1990-х гг. В современный период скорость увеличения годовых значений  $B$  в два раза больше, чем за весь период наблюдения с 1954 г. [14, 15]. С середины 1990-х гг. отмечается рост длинноволновых потоков, выявлена значительная тенденция роста встречного излучения атмосферы [14, 15], т.е. растет вклад длинноволновых потоков в увеличение радиационного баланса.

Наши наблюдения с помощью радиометра CNR4 позволили получить годовой ход  $B$ ,  $B_k$  и  $B_d$  в 2021 г. на территории обсерватории «Фоновая» (рис. 2, табл. 1). При устойчивом снежном покрове

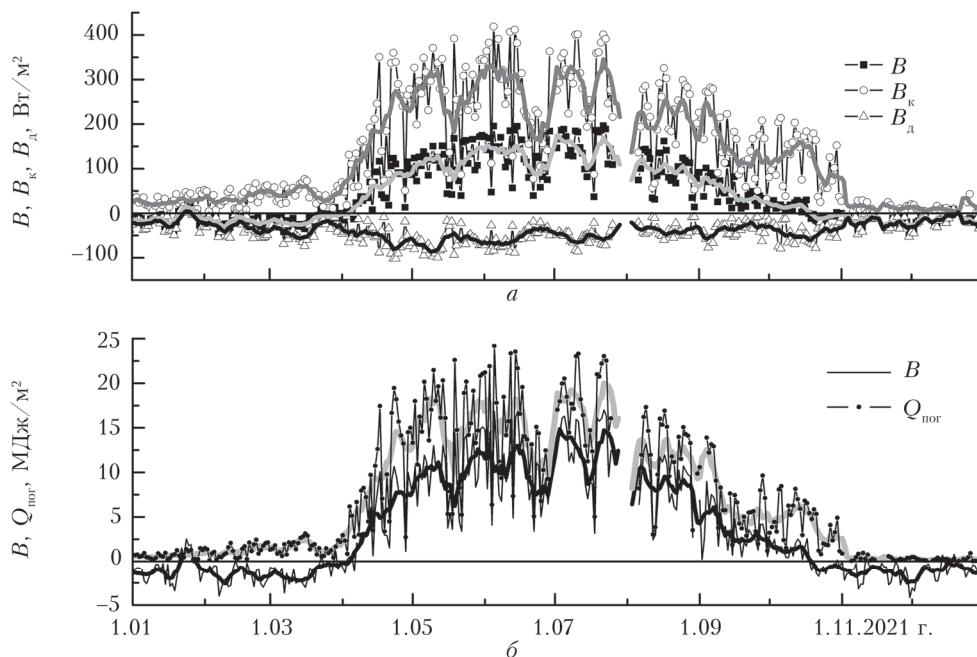


Рис. 2. Среднесуточные значения полного ( $B$ ), коротковолнового ( $B_k$ ) и длинноволнового ( $B_d$ ) радиационного баланса и сглаженные по семи точкам кривые их значений (светло-серая, серая и черная кривые соответственно) (а); суточный радиационный баланс  $B_c$  и поглощенная солнечная радиация земной поверхности ( $Q_{пор}$ ) за сутки, а также сглаженные по семи точкам кривые радиационного баланса (черная кривая) и поглощенной солнечной радиации (светло-серая кривая) (б)

с января по март и с ноября по декабрь 2021 г.  $B_k = 27,96 \pm 19,03 \text{ Вт/м}^2$ ,  $B_d = -25,75 \pm 18,31 \text{ Вт/м}^2$ , а с 7 апреля по 18 октября 2021 г.  $B_k = 223,58 \pm 102,06 \text{ Вт/м}^2$ ,  $B_d = -49,85 \pm 22,59 \text{ Вт/м}^2$ . При устойчивом снежном покрове абсолютная величина  $B_d$  в два раза меньше, чем без снега. Коротковолновый баланс в весенне-летне-осенний период в восемь раз больше, чем зимой. Наибольшие изменения эффективного излучения происходят с марта по апрель и с октября по ноябрь во время схода и установления снежного покрова при перераспределении доли коротковолновой и длинноволновой частей полного баланса, что соответствует выводам [16].

Закономерности изменения радиационного баланса определяются различными факторами, влияющими на его основные составляющие. Ночью его величина определяется фактически только эффективным излучением, зависящим от температуры подстилающей поверхности, облачности и стратификации атмосферы. Днем основные факторы, которые определяют радиационный баланс, — это высота Солнца, облачность и альbedo подстилающей поверхности [11].

Мы рассчитали суточные суммы радиационного баланса (рис. 2, б, табл. 1). В период с устойчивым снежным покровом на подстилающей поверхности  $\Sigma B_c$  отрицательные (средний  $\Sigma B_c = -0,91 \pm -1,59 \text{ МДж/м}^2$ ), без снега — положительные (средний  $\Sigma B_c = 0,49 \pm 12,68 \text{ МДж/м}^2$ ). Для сравнения: в Москве за период 1994–2007 гг. с ноября по март средние многолетние суточные суммы радиационного баланса изменялись от  $-0,42 \text{ МДж/м}^2$  в ноябре до  $1,01 \text{ МДж/м}^2$  в марте, а в теплый период — от  $3,70$  до  $10,14 \text{ МДж/м}^2$  [13].

Суточные суммы радиационного баланса значительно меняются в зависимости от условий погоды и состояния подстилающей поверхности. Коэффициент вариации большой в течение всего года, максимальные вариации отмечены в октябре (267%), минимальные — в июле (29%).

Весной 2021 г. переход суточного радиационного баланса от отрицательных значений к положительным произошел 7 апреля ( $B = 2,05 \text{ МДж/м}^2$ ), на 10 дней раньше разрушения устойчивого снежного покрова. Осенью смена знака радиационного баланса на отрицательные значения отмечена 18 октября ( $B = -0,07 \text{ МДж/м}^2$ ), на 14 дней раньше образования устойчивого снежного покрова. По данным [17], на территории России в среднем переход значений  $\Sigma B_c$  через ноль наблюдается после 13 марта и 24 октября.

Сделаны оценки количества поглощенной солнечной радиации земной поверхностью ( $Q_{\text{пог}} = Q - R_k$ ). В период устойчивого снежного покрова суточное поглощение солнечной радиации земной поверхностью не превышало  $2 \text{ МДж/м}^2$  (рис. 2, б). С постепенным таянием снега в весенний период количество поглощенной солнечной радиации возрастает до  $15 \text{ МДж/м}^2$  за сутки. В летний период  $Q_{\text{пог}}$  из-

меняется в диапазоне  $10 \div 25 \text{ МДж/м}^2$ , в осенний период —  $2 \div 10 \text{ МДж/м}^2$ .

На рис. 3 показано, как изменяется радиационный баланс в течение суток при разном состоянии подстилающей поверхности. Чтобы исключить влияние облачности, были выбраны ясные дни. Используются данные наблюдений на метеорологической станции с. Кожевниково (№ 29532, <http://pogodaiklimat.ru>), расположенной на расстоянии ~ 20 км от обсерватории «Фоновая».

При устойчивом снежном покрове в ясные дни с увеличением высоты солнца наблюдается рост радиационного баланса (рис. 3), но различий в дополуночных и послеполуночных значениях и во времени перехода баланса через ноль утром и вечером не отмечается. В ночной период в условиях отсутствия облачности радиационный баланс поверхности, покрытой снегом, по абсолютной величине меньше, чем радиационный баланс поверхности с травой. Однако для среднемесячных ночных значений баланса в январе и июле это не выполняется (табл. 3).

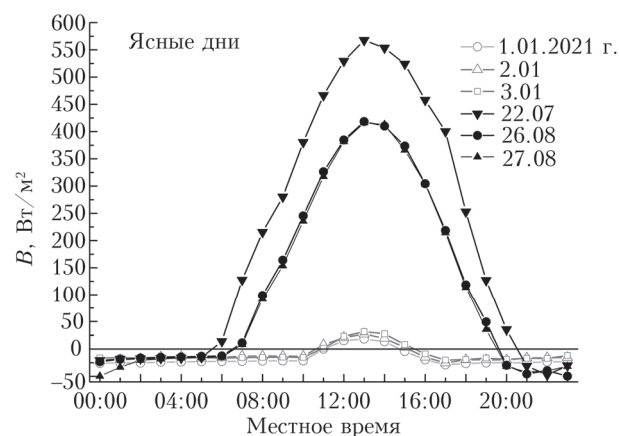


Рис. 3. Суточный ход радиационного баланса в условиях ясного неба

Для оценки энергетических ресурсов необходимо знать значения радиационного баланса отдельно для дня и ночи. В табл. 3 приведены абсолютные значения суточной амплитуды радиационного баланса, а также положительная (в дневное время) и отрицательная (ночью) средние суточные суммы радиационного баланса.

Годовой ход месячных сумм радиационного баланса в основном повторяет годовой ход суммарной радиации. Его значение положительно с апреля по октябрь с максимумом в июле ( $B = 369 \text{ МДж/м}^2$ ). В 2021 г. годовая сумма радиационного баланса составила  $1280 \text{ МДж/м}^2$ , или 34% от суммарной радиации. Эти данные хорошо согласуются с результатами других авторов. Согласно [18] в Томской обл. радиационный баланс в среднем за год колеблется в диапазоне  $1122\text{--}1441 \text{ МДж/м}^2$ , увеличиваясь с севера (Александровское) на юг (Томск). Годовая сумма радиационного баланса

Средняя абсолютная амплитуда суточного изменения интенсивности радиационного баланса ( $\Delta$ ), Вт/м<sup>2</sup>, положительная средняя суточная сумма радиационного баланса  $B_+$  и отрицательная средняя суточная сумма радиационного баланса  $B_-$ , МДж/м<sup>2</sup>

Параметр	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$\Delta$	41,95	48,55	69,10	275,53	416,56	451,69	484,89	380,51	245,67	182,65	10,80	9,62
$B_+$	0,25	0,18	0,51	5,92	11,15	11,98	13,44	9,48	4,99	2,49	0	0
$B_-$	-1,05	-1,77	-1,77	-1,66	-1,13	-1,13	-0,90	-0,86	-1,18	-2,01	-1,31	-1,08

составляет 32–37% суммарной радиации. В Москве среднее значение  $B = 1295$  МДж/м<sup>2</sup> (1958–2007 гг.), а коэффициент вариации – 9% [13]. В [13] также отмечается, что в Москве с 1994 по 2007 г. наблюдается резкое увеличение значений годовых сумм  $B$  (на 23% за 13 лет) и рост радиационного баланса в последнее десятилетие продолжается [15].

### Заключение

В результате измерений, проведенных в 2021 г. на радиационном блоке измерительного комплекса обсерватории «Фоновая», получены статистические значения суточных сумм радиационных параметров атмосферы.

Анализ результатов измерения солнечной радиации в разных спектральных диапазонах позволил сделать оценки изменения приходящей солнечной радиации в фоновом районе Западной Сибири. В зимний период, с декабря по февраль, суточное поступление солнечной радиации не превышало 7,3 ( $\lambda = 0,285–2,800$  мкм); 0,4 ( $\lambda = 0,280–0,400$  мкм);  $1,4 \cdot 10^{-3}$  МДж/м<sup>2</sup> ( $\lambda = 0,280–0,315$  мкм). В летний период суточное поступление суммарной и УФ-радиации возрастает почти в пять раз ( $Q = 18,9 \pm 6,6$  МДж/м<sup>2</sup>, УФ-радиация =  $1,0 \pm 0,3$  МДж/м<sup>2</sup>), а УФ–В-радиации – в 10 раз ( $1,7 \cdot 10^{-2} \pm 0,5 \cdot 10^{-2}$  МДж/м<sup>2</sup>).

Проведен расчет и сделаны первые оценки изменения радиационного баланса в фоновом районе. Установлено, что с ноября по март при устойчивом снежном покрове суточный радиационный баланс  $B = -1,20 \pm 1,18$  МДж/м<sup>2</sup>, а при отсутствии снега с мая по сентябрь  $B = 8,83 \pm 4,49$  МДж/м<sup>2</sup>. Весной 2021 г. переход суточного радиационного баланса от отрицательных значений к положительным произошел 7 апреля ( $B = 2,05$  МДж/м<sup>2</sup>). Осенью смена положительных значений на отрицательные отмечена 18 октября ( $B = -0,07$  МДж/м<sup>2</sup>). Получены среднemesячные значения радиационного баланса для дневного и ночного времени суток.

Показано, что в период устойчивого снежного покрова с декабря по март суточное поглощение солнечной радиации земной поверхностью не превышало 2 МДж/м<sup>2</sup>, а в летний период изменялось в диапазоне от 10 до 25 МДж/м<sup>2</sup>.

Установлено, что в течение 2021 г. для временных периодов январь – март и ноябрь – декабрь (устойчивый снежный покров)  $A = 58 \div 95\%$ , а с мая по октябрь (бесснежный период)  $A = 13 \div 30\%$ .

**Финансирование.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-05-50024). Для выполнения исследований использовалась инфраструктура ЦКП «Атмосфера», при частичной финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-661).

### Список литературы

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. Т. 1. 59 с.
2. Ohmura A. Observed decadal variations in surface solar radiation and their causes // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. P. D00D05. DOI: 10.1029/2008JD011290.
3. Самукова Е.А., Горбаренко Е.В., Ерохина А.Е. Многолетние изменения солнечной радиации на территории Европы // Метеорол. и гидрология. 2014. № 8. С. 15–24.
4. Хлебникова Е.И., Махоткина Е.Л., Салль И.А. Облученность и радиационный режим на территории России: наблюдаемые климатические изменения // Тр. ГГО. 2014. Вып. 573. С. 65–91.
5. Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Складнева Т.К. Многолетний мониторинг суммарной и ультрафиолетовой (В) радиации в районе г. Томска // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 1. С. 61–65; Belan B.D., Ivlev G.A., Sklyadneva T.K. Long-term monitoring of total and UV-B radiation in Tomsk // Atmos. Ocean. Opt. 2012. V. 25, N 4. P. 281–285.
6. Складнева Т.К., Рассказчикова Т.М., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю. Изменения радиационных и метеорологических параметров атмосферы по данным наблюдений в Томске // Оптика атмосфер. и океана. 2018. Т. 31, № 4. С. 288–293.
7. Давыдов Д.К., Белан Б.Д., Антохин П.Н., Антохина О.Ю., Антонович В.В., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Ахлестин А.Ю., Белан С.Б., Дудорова Н.В., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н., Фазлиев А.З., Фофанов А.В. Мониторинг атмосферных параметров: 25 лет TOR-станции ИОА СО РАН // Оптика атмосфер. и океана. 2018. Т. 31, № 10. С. 845–853; Davydov D.K., Belan B.D., Antokhin P.N., Antokhina O.Yu., Antonovich V.V., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Akhlestin A.Yu., Belan S.B., Dudorova N.V., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Pestunov D.A., Rasskazchikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Fazliev A.Z., Fofonov A.V. Monitoring of atmospheric parameters: 25 Years of the Tropospheric Ozone Research Station of the Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 2. P. 180–192.

8. Watai T., Machida T., Shimoyama K., Krasnov O., Yamamoto M., Inoue G. Development of an atmospheric carbon dioxide standard gas saving system and its application to a measurement at a site in the West Siberian forest // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2010. V. 27, N 5. P. 843–855.
9. Antonovich V.V., Antokhin P.N., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Balin Yu.S., Davydov D.K., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Kozlov V.S., Kokhanenko G.P., Novoselov M.M., Panchenko M.V., Penner I.E., Pestunov D.A., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Tolmachev G.N., Fofonov A.V., Chernov D.G., Smargunov V.P., Yausheva E.P., Paris J.-D., Ancellet G., Law K.S., Pelon J., Machida T., Sasakawa M. Station for the comprehensive monitoring of the atmosphere at Fonovaya Observatory, West Siberia: Current status and future needs // *Proc. SPIE*. 2018. V. 108333. P. 108337Z-1–6. DOI: 10.1117/12.2504388.
10. Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Скляднева Т.К., Фофонов А.В. Радиационный блок измерительного комплекса обсерватории «Фоновая». Часть I. Технические характеристики и методические аспекты // *Оптика атмосфер. и океана*. 2022. Т. 35, № 9. С. 759–765.
11. Пивоварова З.И. Радиационные характеристики климата СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1977. 335 с.
12. Кондратьев К.Я. Лучистый теплообмен в атмосфере. Л.: Гидрометиздат, 1956. 419 с.
13. Горбаренко Е.В., Абакумова Г.М. Вариации радиационного баланса подстилающей поверхности по многолетним наблюдениям Метеорологической обсерватории МГУ // *Метеорол. и гидрол.* 2011. № 6. С. 42–54.
14. Горбаренко Е.В. Климатические изменения радиационных параметров атмосферы по данным наблюдений в Метеорологической обсерватории МГУ // *Метеорол. и гидрология*. 2016. № 12. С. 5–17.
15. Горбаренко Е.В. Радиационный климат Москвы // *Метеорол. и гидрология*. 2020. № 7. С. 36–49.
16. Горбаренко Е.В. Многолетние изменения длинноволновой радиации в Москве // *Метеорол. и гидрология*. 2013. № 10. С. 29–39.
17. Покровский О.М., Махоткина Е.Л., Покровский И.О., Рябова Л.М. Тенденции межгодовых колебаний составляющих радиационного баланса и альbedo поверхности суши на территории России // *Метеорол. и гидрология*. 2004. № 5. С. 37–46.
18. Данченко А.М., Задде Г.О., Земцов В.А., Иншиева Л.И., Лукутин Б.В., Мезенцев А.В., Маслов С.Г., Назаров А.Д., Обухов С.Г., Севостьянов В.В., Севостьянова Л.М., Слуцкий В.И. Кадастр возможностей. Томск: Изд-во НТЛ, 2002. 280 с.

*B.D. Belan, G.A. Ivlev, A.V. Kozlov, D.A. Pestunov, T.K. Sklyadneva, A.V. Fofonov. Solar radiation measurements at the Fonovaya observatory. Part II. Measurement results of 2021.*

Variations in solar radiation in the wavelength ranges  $\lambda = 0.285 \div 2.8 \mu\text{m}$ ,  $\lambda = 0.280 \div 0.400 \mu\text{m}$ , and  $\lambda = 0.280 \div 0.315 \mu\text{m}$  are analyzed on the basis of ground-based measurements at the Fonovaya observatory in 2021. The results of calculations of the radiation balance and albedo of the underlying surface are presented. During the period of a stable snow cover, from November to March, the daily average radiation balance is shown to be  $-1.20 \pm 1.18 \text{ MJ/m}^2$ , and in the absence of snow, from May to September,  $+8.83 \pm 4.49 \text{ MJ/m}^2$ . The daily solar radiation absorption by the Earth's surface is estimated. During the period of a stable snow cover, from December to March, the daily solar radiation absorbed by the Earth's surface did not exceed  $2 \text{ MJ/m}^2$ , and it varied from to  $25 \text{ MJ/m}^2$  in summer.