

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 551.521.1

Новый радиационный комплекс Метеорологической обсерватории МГУ стандарта BSRN: методические аспекты и первые результаты измерений

Н.Е. Чубарова[✉], В.А. Розенталь, Е.Ю. Жданова, А.А. Полухов*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1

Поступила в редакцию 28.02.2022 г.;
после доработки 22.04.2022 г.;
принята к печати 16.05.2022 г.

Обсуждаются особенности эксплуатации нового автоматизированного радиационного комплекса RAD-MSU(BSRN), установленного в Метеорологической обсерватории МГУ в 2021 г. Хотя комплекс RAD-MSU(BSRN) не входит в сеть BSRN (Baseline surface radiation network), он оснащен полным набором приборов, рекомендованных для высокоточной сети радиационных измерений этой сети, включая измерения всех компонентов радиационного баланса, а также ультрафиолетовой (УФ) радиации области А, эритемной УФ-радиации и продолжительности солнечного сияния. Описано специально разработанное программное обеспечение, используемое для визуализации и обработки данных измерений, а также для оценки критериев качества данных. Показаны основные закономерности изменчивости компонент радиационного баланса и УФ-радиации в 2021 г.

Ключевые слова: радиационный баланс, комплекс измерений BSRN, ультрафиолетовая радиация, УФ-индекс, мониторинг, коротковолновая и длинноволновая радиация; net radiation, BSRN measurement complex, ultraviolet radiation, UV index, monitoring, short-wave and long-wave radiation.

Введение

Даже небольшие долговременные изменения в радиационном балансе приводят к значительным последствиям для климата [1–3]. Это необходимо учитывать, особенно при оценке антропогенного влияния на климатические процессы. Для изучения особенностей радиационного баланса и его компонент под эгидой ВМО в 1964 г. был создан Мировой банк данных по радиации (<http://wrdc.mgo.gssi.ru/2>), в котором хранятся данные измерений более чем с 1000 станций с суточным и месячным разрешением, полученные с использованием приборов разных классов точности. Однако в последние десятилетия возникла необходимость проведения высокоточных радиационных измерений, которые бы позволили уверенно определять даже небольшие изменения радиационного бюджета, важные для климатических оценок. Кроме того, возрастает роль высокодискретных по времени (порядка минуты) наземных радиационных измерений для тестирования спутниковых данных. В связи с этими задачами с 1990-х гг. стала активно развиваться международная радиационная сеть BSRN (Baseline surface

radiation network), в которой используются высокоточные приборы, а данные измерений хранятся с минутным временным разрешением [4–6].

Результаты измерений сети BSRN используются для валидации моделей [3] и спутниковых расчетов излучения у поверхности Земли [7]; данные многолетних радиационных измерений применяются для оценки трендов и верификации моделей реконструкции [8, 9], а также для оценки радиационных эффектов облачности и аэрозоля. В последнее десятилетие информацию со станций сети BSRN все чаще применяют специалисты в области солнечной энергетики, для которых важно высокое качество и хорошее временное разрешение данных.

Сеть BSRN начала свою работу в 1992 г. и к 2018 г. состояла из 59 станций. Согласно [4], погрешность измерений рассеянной радиации для этой сети не превышает 2%, прямой радиации – 0,5%, суммарной радиации – 2%, для длинноволновых потоков – 2%.

В Метеорологической обсерватории (МО) МГУ (55,707° с.ш., 37,52° в.д.) (<http://momsu.ru>) измерения составляющих радиационного баланса проводятся с 1954 г. термоэлектрическими приборами, используемыми на станциях российской актинометрической сети. Однако погрешность измерений этими приборами довольно высока: от 3% для прямой солнечной радиации до 15% для радиационного баланса [10]. Вследствие этого в 2021 г. для МО МГУ

* Наталья Евгеньевна Чубарова (natalia.chubarova@gmail.com); Виктор Александрович Розенталь (vandtqqq@list.ru); Екатерина Юрьевна Жданова (ekaterinazhdanova214@gmail.com); Алексей Андреевич Полухов (aeromsu@gmail.com).

был приобретен полный радиационный комплекс приборов фирмы Kipp&Zonen (<https://kippzonen.com>), рекомендованный для сети BSRN. Поскольку в МО МГУ осуществлялись длительные измерения солнечной ультрафиолетовой (УФ) радиации в области А и эритемной радиации, новый радиационный комплекс был дополнительно укомплектован датчиками для измерения УФ-радиации в этих спектральных диапазонах.

В настоящей работе описаны разработанные методические основы измерений, приближенные к рекомендованным стандартам BSRN, и программное обеспечение, позволяющее контролировать измерения в дистанционном режиме, визуализировать и обрабатывать результаты наблюдений. Также приведены результаты анализа особенностей измерения коротковолновой и длинноволновой радиации, радиационного баланса, альbedo поверхности и УФ-радиации в 2021 г. в Москве на основе данных радиационного комплекса RAD-MSU(BSRN).

1. Комплекс RAD-MSU(BSRN)

В состав комплекса RAD-MSU(BSRN) входят приборы для измерения: нисходящей коротковолновой и длинноволновой радиации, продолжительности солнечного сияния, а также УФ-радиации; (установлены на крыше здания на высоте ~ 10 м); восходящей (отраженной) коротковолновой и длинноволновой радиации (установлены на площадке с естественной поверхностью). Сбор данных ведется с помощью трех логгеров Kipp&Zonen. Параллельно с помощью стандартного термистора 10K измеряется температура всех приборов, за исключением датчика для измерения продолжительности солнечного сияния со встроенным термостатом; температурная зависимость приборов – менее 1% в интервале температуры воздуха от –20 до +50 °С. Трекер Solys 2 Kipp&Zonen, который используется на многих станциях BSRN, обеспечивает наведение на Солнце датчика измерения прямой радиации, а также полное затенение датчиков рассеянной и длинноволновой нисходящей радиации в течение всего дня с погрешностью менее 0,1°, что соответствует критериям сети BSRN.

Для сохранения однородности ряда измерений приборы нового типа установлены рядом с давно действующими приборами.

Требования к станциям BSRN в соответствии с [4, 11] включают: регулярное техническое обслуживание и проверку приборов (по крайней мере, в рабочие дни); обязательные измерения прямой, рассеянной и суммарной нисходящей коротковолновой и нисходящей длинноволновой радиации с временным разрешением 1 мин при первичных измерениях с частотой 1 Гц; вентиляцию для всех радиационных приборов, чтобы гарантировать высокое качество измерений. Все эти условия выполняются для приборов комплекса RAD-MSU(BSRN). Раз в месяц осуществляется контроль и при необходимости коррекция данных измерений времени

с помощью подключения логгеров к компьютеру путем синхронизации времени по сети интернет. Все приборы (за исключением приборов для измерения прямой радиации и продолжительности солнечного сияния) оснащены вентилирующим устройством CVF4.

Также должно выполняться условие репрезентативности места проведения измерений относительно большой прилегающей территории, чтобы данные могли использоваться для тестирования спутниковых и модельных оценок. В городских условиях Москвы оно выполняется не полностью в связи с закрытостью горизонта, особенно в зимнее время, для приборов, расположенных у поверхности Земли и измеряющих восходящее излучение. Однако более ранние исследования по сопоставлению результатов радиационных измерений со спутниковыми и модельными оценками для условий МО МГУ показали, что в целом измерения отражают общие закономерности, наблюдающиеся во всем Московском регионе и на Русской равнине [12–14].

Еще одно требование BSRN – измерение восходящих потоков на высоте 30 м. Однако оно выполняется далеко не на всех станциях BSRN. В комплексе RAD-MSU(BSRN) пиранометр SMP21 для измерения отраженной радиации и пиргеометр CGR-4 для измерения восходящей длинноволновой радиации установлены на высоте 1,5 м над естественной поверхностью для того, чтобы обеспечить однородный ряд измерений радиационного баланса, которые производятся по стандартам российских актинометрических наблюдений с 1954 г. Добавим, что в рекомендациях [4] отмечено, что высота расположения датчиков по измерению восходящих потоков должна указываться в примечании к архивам, что также свидетельствует о не критичности этого требования.

В регламент работы станций BSRN входит также регулярная калибровка приборов относительно мирового эталона в World Radiation Center (WRC) в Давосе (Швейцария).

2. Методика измерений

В табл. 1 приведены названия параметров, измеряемых и рассчитываемых в ходе работы радиационного комплекса RAD-MSU(BSRN) МО МГУ. Отметим, что такой полный комплекс измерений проводится лишь на 12 станциях сети BSRN в мире.

При анализе наблюдений используется ряд показателей, величины которых могут свидетельствовать о качестве данных. Разработана система оценки качества измерений с помощью специальных меток QC. Особенности критериев качества и их метки приведены в табл. 2. Основные используемые критерии качества соответствуют рекомендациям для станций BSRN [4, 15]. Дополнительно используются некоторые критерии, разработанные в МО МГУ.

Некоторые проблемы с качеством данных сети BSRN до сих пор окончательно не решены.

Параметры, измеряемые и рассчитываемые в процессе работы радиационного комплекса RAD-MSU(BSRN) МО МГУ, с указанием соответствующих приборов и формул

Параметр	Имя минутных данных	Аббревиатура названий файлов с данными с часовым разрешением	Приборы фирмы Kirr&Zonen	Расчетная формула
1	2	3	4	5
<i>Измеряемые параметры</i>				
Прямая радиация, приходящая на перпендикулярную поверхность	S	b11	Пиргелио-метр СНР-1	
Рассеянная радиация	D	b12	Пиранометр СМР21	
Суммарная радиация	Q	b13	Пиранометр СМР21	
Нисходящая длинноволновая радиация	PG_U	b14	Пиргеометр, CGR-4 на крыше	
Температура датчика, измеряющего S	T_S	b15		
Температура датчика, измеряющего D	T_D	b16		
Температура датчика, измеряющего Q	T_Q	b17		
Температура датчика, измеряющего PG_U	T_PG_U	b18		
УФ-радиация области А	UVA	bua	Пиранометр SUV-A	
Температура датчика UVA	T_UVA	b22		
Эритемная радиация	ER	ber	Пиранометр SUV-E	
Температура датчика ER	T_ER	b24		
Продолжительность солнечного сияния	SUN_D	bts	CSD-3 с термостатом	
Продолжительность солнечного сияния (аналоговый канал)	SUN_A	b26	CSD-3 с термостатом	
Отраженная радиация	R	b31	Пиранометр СМР21	
Температура датчика R	T_R	b32		
Длинноволновая восходящая радиация	PG_L	b33	Пиргеометр, CGR-4 на площадке	
Температура датчика PG_L	T_PG_L	b34		
<i>Рассчитываемые параметры</i>				
Синус высоты Солнца	sinh	bsh		Стандартные астрономические формулы
Прямая радиация с коррекцией на смещение*	Sc	bsp		
Рассеянная радиация с коррекцией на смещение*	Dc	bdi		
Суммарная радиация с коррекцией на смещение*	Qc	bqi		
Отраженная радиация с коррекцией на смещение*	Rc	bvi		
Расчетная суммарная радиация с коррекцией на смещение*	Qcc	bqc		$Q_{cc} = S_c \cdot \sinh + D_c$

1	2	3	4	5
<i>Рассчитываемые параметры</i>				
Отношение измеренной суммарной радиации к расчетной	Q_c/Q_{cc}	brq		Q_c/Q_{cc}
Результирующая суммарная радиация	Q_m	bqm		Q_c или Q_{cc} в зависимости от условий (см. текст)
Нисходящая длинноволновая радиация**	L_U	bln		$L_U = PG_U + 5.67E - 8(T_{PG_U} + 273,15)^4$
Восходящая длинноволновая радиация**	L_L	bls		$L_L = PG_U + 5.67E - 8(T_{PG_L} + 273,15)^4$
Альbedo поверхности	A	bab		$A = Rc/Q_m$
Коротковолновый баланс	B_{sh}	bbk		$B_{sh} = Q_m - Rc$
Длинноволновый баланс	B_{lng}	bbd		$B_{lng} = L_U - L_L$
Полный радиационный баланс	B	bba		$B = B_{sh} + B_{lng}$

* Смещение нуля происходит за счет длинноволнового излучения стеклянных колпаков термоэлектрических приборов.

** Измеряется баланс длинноволновой радиации и затем вычитается излучение пластины, рассчитанное по закону Стефана–Больцмана с учетом ее температуры.

Одним из ярких примеров является случай смещения нуля из-за инфракрасного излучения стеклянными колпаками термоэлектрических приборов [16]. За счет этого в ночное время значения коротковолновой радиации могут быть отрицательными. Чтобы уменьшить эту погрешность, датчики сети BSRN вентилируются [17] и/или нагреваются искусственно. Однако вентиляция иногда недостаточно для компенсации больших колебаний температуры. Поэтому при измерениях коротковолновой радиации проводится коррекция данных на наблюдаемые, обычно небольшие, смещения нуля ночью. Это делается единообразно, с использованием часового интервала 0–1 ч. Все другие значения обнуляются до высоты Солнца -3° . В диапазоне отрицательных высот Солнца обнуляются только те коротковолновые потоки, величины которых были отрицательными. В дневные часы для исключения погрешности в потоки коротковолновой радиации, которые не могут быть отрицательными, также вносится эта небольшая коррекция, и отрицательные значения обнуляются. Отметим, что смещение обычно невелико и составляет 1–2 Вт/м².

Для длинноволновых потоков при удовлетворительном качестве данных температура прибора T_x должна быть в определенных пределах: $T_{min} < T_x < T_{max}$. Разница температур прибора ($T_{max} - T_{min}$) не должно превышать 10 °C [15].

Суммарная радиация – наиболее важная в радиационном балансе величина – измеряется, а также вычисляется как сумма прямой радиации, приходящей на горизонтальную поверхность, и рассеянной радиации. Результаты (минутные значения суммарной радиации) записываются в дополнительный массив данных (канал Q_m). При погрешности измерений суммарной радиации (разница между измеренной и расчетной величинами) более 50 Вт/м² в массив записывается измеренное значение Q_c , по-

скольку такие расхождения обусловлены неточным наведением трекера прямой и рассеянной радиации.

Для оценки качества измерений суммарной радиации рассчитывается и визуализируется отношение измеренных и рассчитанных значений. Такие оценки применяются для высот Солнца более 5° над горизонтом, чтобы исключить погрешности, связанные с делением малых величин.

Следуя работе [15], устанавливаются критерии качества для определенных соотношений между расчетной и измеренной величинами суммарной радиации, которые кодируются разными метками Q_c . В ясные дни при устойчивых метеорологических условиях разница между измеренной суммарной радиацией и ее расчетной величиной должна быть в пределах погрешности измерений [4], т.е. $< 2\%$ (15 Вт/м^2) при высоте Солнца $> 10^\circ$ над горизонтом или $\leq 3,5\%$ (20 Вт/м^2) в иных случаях. Это наиболее качественные данные измерений, им приписывается $Q_c = 0$. Кроме этого, используются дополнительные условия для соотношений рассеянной и суммарной радиации, приведенные в табл. 2.

Параллельно при выполнении условий $Rc > 2 \text{ Вт/м}^2$, $Q_m > 20 \text{ Вт/м}^2$ рассчитывается альbedo поверхности $A = Rc/Q_m$.

Все данные наилучшего качества имеют метку $Q_c = 0$. Используются также критерии качества данных для идентификации случаев, когда значения параметров лежат за пределами реальных физических величин (соответствующие метки критерия качества $Q_c = 5$, $Q_c = 6$).

Таким образом, в результате анализа данных формируется файл качества, позволяющий в дальнейшем использовать результаты измерений наиболее оптимальным способом. В дальнейшем мы планируем продолжить исследование разработанных критериев качества измерений в соответствии с рекомендациями BSRN.

Метки качества измерений QC и их критерии

Метка качества	Критерий качества	Примечание
QC = -1	1. Суммарная радиация $Q_c < 50 \text{ Вт/м}^2$, тесты не выполняются 2. Отраженная радиация $R_c < 2 \text{ Вт/м}^2$, тесты не выполняются	Тесты также не проводятся при отрицательных высотах Солнца для коротковолновых потоков
QC = 0	Выполняются тесты: 1. Для суммарной радиации Q_{cc} по [4]: $ Q_c - Q_{cc} < 20 \text{ Вт/м}^2$ при высотах Солнца $> 10^\circ$ и $Q_c > 50 \text{ Вт/м}^2$; 2. Для рассеянной радиации D: $D_c/Q_c < 1,0$; 3. Для длинноволновых потоков L_L и L_U по [15]: разница между температурой датчиков, измеряющих длинноволновые потоки (L_L и L_U), не должна превосходить $10 \text{ }^\circ\text{C}$, а с температурой воздуха $- 20 \text{ }^\circ\text{C}$ *; 4. Для альбедо поверхности A расчет производится при $R_c > 2 \text{ Вт/м}^2$ и $Q_m > 20 \text{ Вт/м}^2$; 5. Для отраженной радиации: $R_c \leq Q_c$	Данные высокого качества
QC = 1	Тесты, описанные для QC = 0, не выполняются. Дополнительные тесты: для суммарной радиации по [15]: $0,92 < Q_c/Q_{cc} < 1,08$ при высотах Солнца $> 25^\circ$ и $Q_{cc} > 50 \text{ Вт/м}^2$; $0,85 < Q_c/Q_{cc} < 1,15$ при высотах Солнца $< 25^\circ$ и $Q_{cc} > 50 \text{ Вт/м}^2$; Для рассеянной радиации D по [15]: $D_c/Q_c < 1,05$ при высотах Солнца $> 25^\circ$ и $Q_c > 50 \text{ Вт/м}^2$; $D_c/Q_c < 1,10$ при высотах Солнца $< 25^\circ$ и $Q_c > 50 \text{ Вт/м}^2$ Если $ Q_c - Q_{cc} > 50 \text{ Вт/м}^2$, то для отраженной радиации: при $R_c < Q_c$ и $R_c > 2 \text{ Вт/м}^2$	В зависимости от конкретных тестов качество данных Sc, Dc, Qc, Qm, Rc и соответствующих расчетных величин bbk, bba понижается
QC = 2	Тесты по QC = 1 не выполняются	В зависимости от конкретных тестов качество данных Sc, Dc, Qc, Qm и соответствующих расчетных величин bbk, bba понижается
QC = 5	Первичные значения коротковолновой радиации меньше -4 Вт/м^2 . Величины УФ-радиации отрицательные. На стадии обработки эти данные всегда корректируются. Эта проверка первичных данных выявляет проблемы с приборами. Для длинноволновых потоков по [15]: $L_U < 40 \text{ Вт/м}^2$, $L_L < 40 \text{ Вт/м}^2$	Выход за пределы минимально возможных значений. Для длинноволновых потоков L_U , L_L данные заменяются @
QC = 6	Пределы (Вт/м^2) относительно солнечной постоянной S_a , приведенной к реальному расстоянию между Землей и Солнцем, по [15]: $Q_{c_{\max}} = 1,5S_a \cdot \sinh^{1,2} + 100$ Для рассеянной радиации: $D_{c_{\max}} = 0,95S_a \cdot \sinh^{1,2} + 50$; Для прямой радиации: $S_{c_{\max}} = S_a$; Для длинноволновой радиации: $L_U > 700 \text{ Вт/м}^2$, $L_L > 900 \text{ Вт/м}^2$; Для суммарной УФ-радиации**: $UVA > 80 \text{ Вт/м}^2$, $ER > 0,5 \text{ Вт/м}^2$	Выход за пределы максимально возможных значений. При этих условиях вместо данных измерений Sc, Dc, Qc, UVA, ER, Rc, L_U , L_L ставится знак отсутствия данных @
QC = 10	Отсутствие данных измерений	Кодируется как @

Примечание. Для согласования с принятой системой на сети BSRN метки имеют определенные значения.

* Разница температур с температурой воздуха меньше $20 \text{ }^\circ\text{C}$ — условие, рекомендованное в [15]. На данном этапе оно не внедрено в систему и используется только условие разницы температуры самих датчиков, что является, на наш взгляд, более жестким условием.

** Пороговые максимальные значения для УФ-потоков получены по модельным данным для условий: высота Солнца 60° , альбедо снега 100%, отсутствует аэрозоль, общее содержания озона 210 ед.Д.

3. Разработанное программное обеспечение

Программное обеспечение радиационного комплекса RAD-MSU(BSRN) написано в среде программирования Qt и предназначено для приема данных от измерительного комплекса, их визуализации

и обработки. Пакет состоит из двух программ — klog.exe и bsrn.exe, работающих под управлением операционной системы Windows.

Программа klog.exe принимает данные, приходящие на COM-порты компьютера от трех даталоггеров измерительного комплекса, и записывает их в текстовые файлы. Каждый такой файл содержит

данные за одни сутки: ровно в полночь текущий файл закрывается и генерируется новый. Имя файла имеет формат KLOGuymmddhhmmss.txt, где uymmdd – год, месяц и день, соответствующие записанным в нем данным, а hhmmss – время (час, минуты и секунды) создания файла. Кроме того, программа klog.exe выводит приходящие данные на экран в реальном времени. Данные регистрируются по местному московскому времени, в файле также представлена информация о солнечном времени.

Программа bsrn.exe предназначена для визуализации и обработки данных, содержащихся в KLOG-файлах. Она позволяет вычислять минутные и усредненные за час значения. В программе bsrn.exe реализованы расчет радиационных характеристик, а также описанные выше критерии качества данных и создание файлов, содержащих метки QC. Программа может обрабатывать как стандартные файлы, формирующиеся в процессе измерений, так

и файлы нового формата KLOGuymmddhhmmss.txt и визуализировать результаты в режиме реального времени на удаленном сервере.

Для удобства задания параметров используется конфигурационный файл, в котором указаны все особенности задания измеряемых и рассчитываемых характеристик (синус высоты Солнца, альbedo поверхности, коротковолновый, длинноволновый и полный радиационный баланс и др.). Основные параметры, используемые в конфигурационном файле, перечислены в табл. 1, включая названия минутных и часовых файлов измеряемых и расчетных характеристик. Для всех характеристик за каждый месяц рассчитываются стандартные таблицы данных со среднечасовыми значениями. Кроме того, определяются значения меток качества QC, которые формируются в отдельных файлах. Программа позволяет визуализировать минутные данные и данные с часовым усреднением. Их примеры приведены на рис. 1.

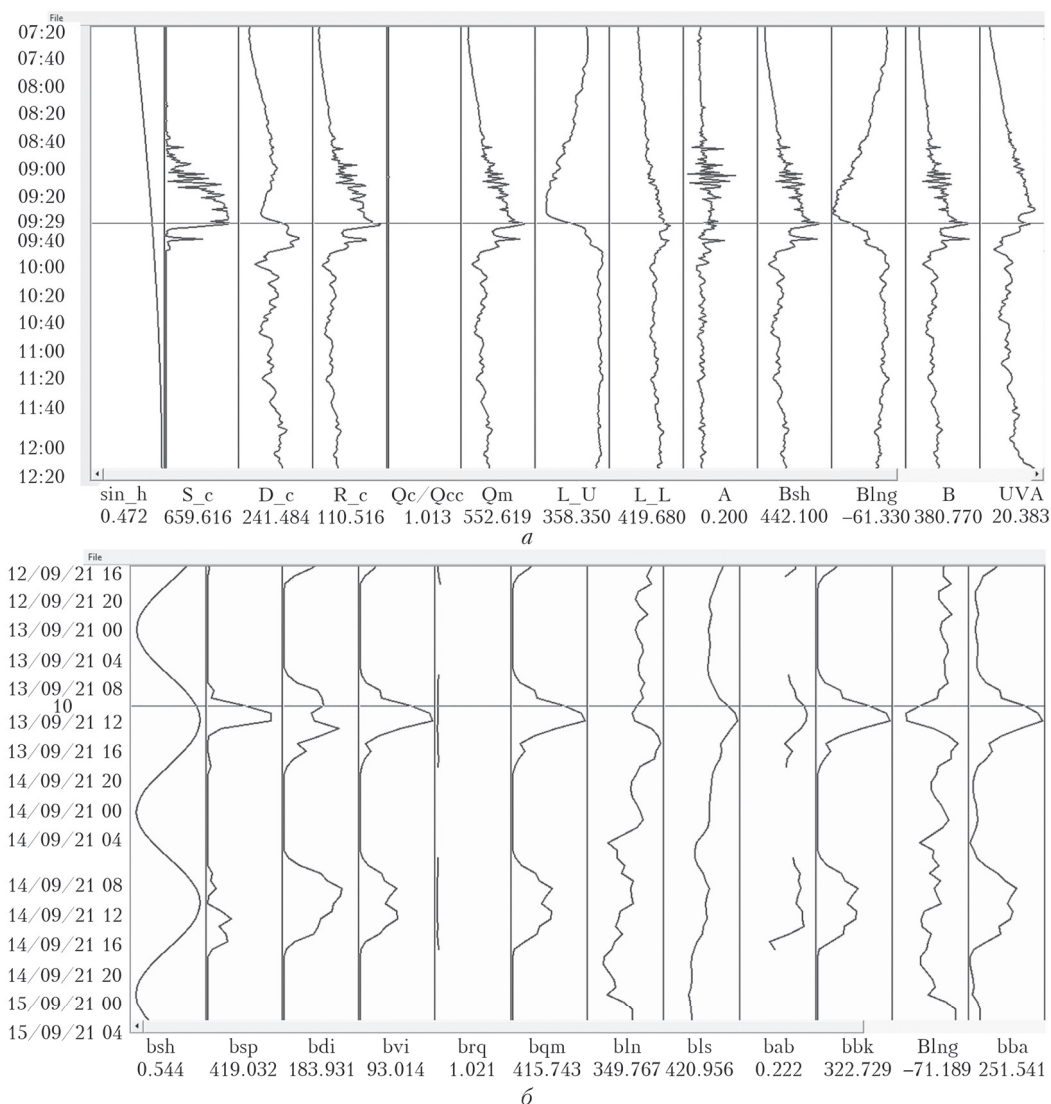


Рис. 1. Визуализация измеренных и рассчитанных радиационных величин с минутным (а) и часовым (б) разрешением для 10 сентября 2021 г. Разрывы в записи относятся к ночным данным, когда на расчеты налагаются определенные условия (см. табл. 2). Значения времени, приведенные внизу, соответствуют линии курсора. Здесь и далее названия характеристик даются в соответствии с табл. 1

Таким образом, вышеописанная методика обработки радиационных измерений комплекса RAD-MSU(BSRN) с применением специально созданного программного обеспечения позволяет получать результаты, сопоставимые по качеству с высокоточными наблюдениями сети BSRN.

4. Измерения составляющих радиационного баланса и УФ-радиации в Москве в 2021 г.

Рассмотрим некоторые особенности изменчивости компонент радиационного баланса и УФ-радиации, измеренных с помощью комплекса RAD-MSU(BSRN) за период с сентября по декабрь 2021 г.

На рис. 2 представлены средние суточные значения различных регистрируемых и рассчитываемых параметров, а также оценки критерия качества измерений суммарной радиации в виде отношения Q_c/Q_{cc} . Средние значения считаются с учетом ночных измерений, в том числе для коротковолновой радиации. Хорошо прослеживается общая тенденция уменьшения суммарной солнечной радиации, коротковолнового баланса и УФ-радиации вследствие астрономического фактора (уменьшения высоты Солнца).

Зависимость суммарной радиации в разных диапазонах спектра от высоты Солнца показана

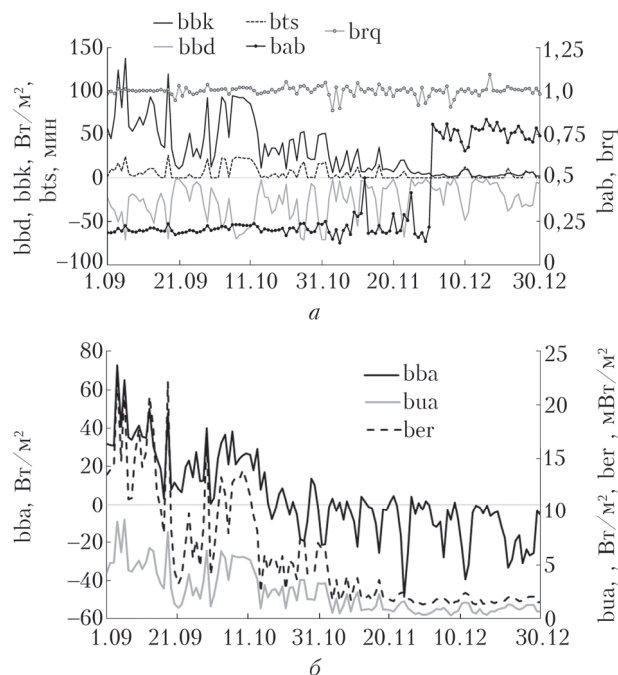


Рис. 2. Средние суточные значения коротковолнового (bbk) и длинноволнового баланса (bbd), продолжительности солнечного сияния (bts), альbedo поверхности (bab) и отношения измеренной к расчетной величине суммарной радиации (brq) (а); средние суточные значения УФ-радиации области А (bua), эритемной УФ-радиации (ber) и радиационного баланса (bba) (б) по данным нового радиационного комплекса RAD-MSU(BSRN). Москва, МО МГУ, 2021 г.

на рис. 3. Видно, что в условиях плотной облачности зависимость может нарушаться, тогда как огибающие кривые, соответствующие условиям малооблачной погоды, имеют четко выраженную зависимость от высоты Солнца. Кроме высоты Солнца и облачности ряд других факторов (аэрозоль, озон, альbedo поверхности) также оказывает воздействие на вариации коротковолновых потоков.

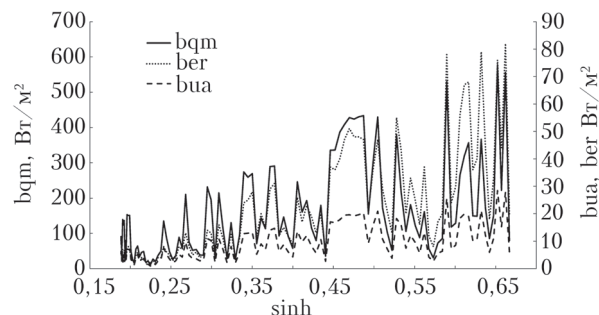


Рис. 3. Зависимость среднесуточных околосолнечных величин суммарной коротковолновой радиации (сплошная кривая), УФ-радиации области А (штриховая кривая) и эритемной УФ-радиации (пунктирная кривая) от синуса высоты Солнца. Москва, МО МГУ

На рис. 2, а показана межсуточная изменчивость одного из важных критериев качества измерений суммарной радиации — отношения измеренной суммарной радиации к ее расчетной величине, полученной как сумма прямой на горизонтальную поверхность и рассеянной радиации. Заметно, что в течение всего исследуемого периода наблюдается удовлетворительное согласие между измерениями суммарной радиации и ее расчетными значениями. Среднее значение этого отношения за весь период измерений составляет $1,001 \pm 0,027$, т.е. эти величины практически не различаются. Для нескольких дней это отношение немного больше отклонялось от единицы, но различия не превышали 10%. Отметим, что в дни с максимальными отклонениями наблюдалась облачная погода с низкой прямой солнечной радиацией. Это могло сказаться на неодновременности измерений различных компонент (прямой, рассеянной и суммарной радиации) и привести к увеличению погрешности. Следует также отметить, что у пиргелиометра СНР-1 и пиранометра СМР21 инерция сигнала составляет 5 с. Вследствие этого в условиях изменчивой облачности за счет сдвига по времени между моментами измерений этими приборами может наблюдаться отклонение среднесуточного значения отношения измеренной и расчетной суммарной радиации. В связи с этим особое внимание следует в дальнейшем уделить максимальному устранению фактора несинхронности наблюдения по времени.

Хорошо согласуются между собой данные по продолжительности солнечного сияния (ПСС) и коротковолновой радиации в разных диапазонах спектра: коэффициенты корреляции с ПСС равны 0,63 для эритемной радиации, 0,75 — для УФ-А и 0,84 — для суммарной коротковолновой радиации.

Несколько меньшие коэффициенты корреляции между УФ-потоками и продолжительностью солнечного сияния связаны с особенностями процессов рассеяния и поглощения в спектральном УФ-диапазоне и меньшей ролью прямой радиации в вариациях УФР [18].

Анализ изменчивости альbedo поверхности показал, что устойчивый снежный покров с высоким альbedo поверхности (более 70%) установился с 1 декабря 2021 г. Среднее альbedo поверхности в декабре равно 76%. Однако и в ноябре были дни (12, 20 и 25 ноября), когда альbedo также характеризовалось относительно высокими значениями вследствие снегопадов, но снег стаивал. При отсутствии снежного покрова в сентябре и октябре альbedo поверхности составляло в среднем 20–21%, меняясь в диапазоне от 17 до 24%.

Среднесуточные величины длинноволнового баланса были отрицательными практически в течение всего периода, за исключением условий мощной оптически плотной облачности и осадков, когда длинноволновый баланс был близок к нулю.

Среднесуточные величины полного радиационного баланса в сентябре были положительны, что связано с большей долей коротковолновой радиации (см. рис. 2, б). Переход через ноль наблюдался 17 октября 2021 г., когда небольшие дневные значения суммарной радиации вследствие плотной облачности и относительно низких высот Солнца уже не могли компенсировать больших отрицательных значений длинноволнового баланса в условиях ясной и холодной ночи. С 8 декабря среднесуточные значения радиационного баланса стали отрицательными вследствие низких высот Солнца, отрицательных значений температуры воздуха и высокого альbedo поверхности.

Доля УФ-радиации в суммарной радиации варьируется от 5 до 8% и несколько возрастает в декабре за счет влияния альbedo поверхности. Эритемная УФ-радиация, на которую особое влияние оказывает озон, составляет лишь 0,2–0,3% от УФ-А-радиации. Коэффициент линейной корреляции Пирсона между этими величинами составляет ~0,97. Наибольшие УФ-индексы, которые определяются по нормированным значениям эритемной УФ-радиации, наблюдались в первой половине сентября. В частности, 2, 4, 6, 10, 13 и 18 сентября они были выше 3, что требовало защиты от Солнца для человека со вторым типом кожи по Фитцпатрику [19]. Максимальная величина UVI = 4,2 отмечена 13 сентября в условиях переменной облачности и общего содержания озона, равного 260 ед.Д., пониженного относительно среднегодового значения (290 ед.Д.) согласно спутниковым данным OMPS.

Заключение

В Метеорологической обсерватории МГУ в 2021 г. установлен и включен в процесс мониторинга новый радиационный комплекс RAD-MSU (BSRN). Разработаны методические основы работы

комплекса, реализованы оценки качества наблюдений по типу BSRN, создано программное обеспечение, позволяющее визуализировать результаты измерений и проводить их обработку. Эта методика и программное обеспечение могут быть использованы и на других станциях, где проводятся радиационные измерения.

Анализ полученных данных показал их высокое качество, надежную работу комплекса практически в автономном режиме, а также выявил некоторые интересные закономерности. В частности, получены более тесные связи между продолжительностью солнечного сияния и суммарной коротковолновой радиацией по сравнению с УФ-радиацией. Оценены особенности изменения длинноволнового и коротковолнового баланса и вариации альbedo поверхности в этот период. Выявлено соотношение эритемной УФ-радиации и УФ-радиации в области А. Показано, что в сентябре 2021 г. в некоторые дни отмечались довольно высокие уровни эритемной УФ-радиации, опасные для здоровья.

Финансирование. Установка аппаратуры и разработка программного обеспечения выполнено при поддержке госбюджетной темы «Погодные и климатические процессы различных пространственно-временных масштабов в условиях антропогенного воздействия», соглашение №1.11, номер г/б темы в ЦИТИС 121051400081–7 в рамках работы Центра коллективного пользования МГУ «Мониторинг атмосферной радиации» (идентификатор № 460191494). Приборы закуплены по контракту № 1585–44-2020 от 28.12.2020 (соглашение № 27). Анализ результатов выполнен при поддержке Министерства образования и науки РФ, мегагрант № 075-15-2021-574.

Список литературы

1. Chylek P., Lohmann U., Dube M., Mishchenko M., Kahn R., Ohmura A. Limits on climate sensitivity derived from recent satellite and surface observations // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. P. D24S04.
2. Wild M., Folini D., Schär C., Loeb N., Dutton E.G., König-Langlo G. The global energy balance from a surface perspective // *Clim. Dynam.* 2013. V. 40, N 11. P. 3107–3134.
3. Wild M., Ohmura A., Schär C., Müller G., Folini D., Schwarz M., Hakuba M.Z., Sanchez-Lorenzo A. The Global Energy Balance Archive (GEBA) version 2017: a database for worldwide measured surface energy fluxes // *Earth Syst. Sci. Data.* 2017. V. 9, N 2. P. 601–613.
4. McArthur L.J.B. World Climate Research Programme-Baseline Surface Radiation Network (BSRN)-Operations Manual Version 2.1. WCRP-121. WMO/TD-No. 1274. Canada: Experimental Studies Division, 2005. 176 p.
5. Driemel A., Augustine J., Behrens K., Colle S., Cox C., Cuevas-Agully E., Denn F., Duprat T., Fukuda M., Grobe H., Haefelin M., Hodges G., Hyett N., Ijima O., Kallis A., Kna W., Kustov V., Long C., Longenecker D., Lupi A., Maturilli M., Mimouni M., Ntsangwane L., Ogihara H., Olano X., Olefs M., Omori M., Passamani L., Pereira E.B., Schmidthusen H., Schumacher S., Sieger R., Tamlyn J., Vogt R., Vuilleumier L., Xia X., Ohmura A., König-Langlo G. Baseline Surface Radiation Network (BSRN): structure and data

- description (1992–2017) // *Earth Syst. Sci. Data*. 2018. V. 10, N 3. P. 1491–1501.
6. *Lanconelli C., Busetto M., Dutton E.G., König-Langlo G., Maturilli M., Sieger R., Vitale V., Yamanouchi T.* Polar baseline surface radiation measurements during the International Polar Year 2007–2009 // *Earth Syst. Sci. Data*. 2011. V. 3, N 1. P. 1–8.
 7. *Pinker R.T., Zhang B., Dutton E.G.* Do satellites detect trends in surface solar radiation? // *Science*. 2005. V. 308, N 5723. P. 850–854.
 8. *Long C.N., Dutton E.G., Augustine J.A., Wiscombe W., Wild M., McFarlane S.A., Flynn C.J.* Significant decadal brightening of downwelling shortwave in the continental US // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. P. D00D06.
 9. *Volpert E.V., Chubarova N.E.* Long-term changes in solar radiation in Northern Eurasia during the warm season according to measurements and reconstruction model // *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2021. V. 46, N 8. P. 507–518.
 10. *Наставление гидрометеостанциям и постам.* М.: Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 1997. Вып. 5, часть 1. 221 с.
 11. *Ohmura A., Dutton E.G., Forgan B., Fröhlich C., Gilgen H., Hegner H., Heimo A., König-Langlo G., McArthur B., Müller G., Philipona R., Pinker R., Whitlock C.H., Dehne K., Wild M.* Baseline surface radiation network (BSRN/WCRP): New precision radiometry for climate research // *B. Am. Meteorol. Soc.* 1998. V. 79, N 10. P. 2115–2136.
 12. *Chubarova N.Y., Nezval Y.I., Verdebout J., Krotkov N., Herman J.* Long-term UV irradiance changes over Moscow and comparisons with UV estimates from TOMS and METEOSAT // *Proc. SPIE*. 2005. V. 5886. P. 63–73.
 13. *Chubarova N., Yurova A., Krotkov N., Herman J., Bhartia P.K.* Comparisons between ground measurements of broadband UV irradiance (300–380 nm) and TOMS UV estimates at Moscow for 1979–2000 // *Opt. Engin.* 2002. V. 41, N 12. P. 3070–3081.
 14. *Чубарова Н.Е., Рублев А.Н., Троценко А.Н., Трембач В.В.* Вычисление потоков солнечного излучения и сравнение с результатами наземных измерений в безоблачной атмосфере // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана*. 1999. Т. 35, № 2. С. 222–239.
 15. *Long C.N., Shi Y.* An automated quality assessment and control algorithm for surface radiation measurements // *Open Atmos. Sci. J.* 2008. V. 2, N 1. P. 23–37.
 16. *Dutton E.G., Michalsky J.J., Stoffel T., Forgan B.W., Hickey J., Nelson D.W., Alberta T.L., Reda I.* Measurement of broadband diffuse solar irradiance using current commercial instrumentation with a correction for thermal offset errors // *J. Atmos. Ocean. Tech.* 2001. V. 18, N 3. P. 297–314.
 17. *Michalsky J., Kutchenreiter M., Long C.N.* Significant Improvements in Pyranometer Offsets Using Ventilation Strategies // *J. AO Tech.* 2017. V. 34, N 6. P. 1323–1332.
 18. *Абакумова Г.М., Незваль Е.И., Шиловцева О.А.* Влияние кучевой облачности на рассеянную и суммарную ультрафиолетовую, фотосинтетически активную и интегральную солнечную радиацию // *Метеорол. и гидрол.* 2002. № 7. С. 29–40.
 19. *Fitzpatrick T.B.* The validity and practicality of sun-reactive skin types I through VI // *Arch. Dermatol.* 1988. V. 124, N 6. P. 869–871.

N.E. Chubarova, V.A. Rosental, E.Yu. Zhdanova, A.A. Poliukhov. New radiation complex at the Moscow State University Meteorological Observatory of the BSRN standard: methodological aspects and first measurement results.

The operational features of the new RAD-MSU(BSRN) robotic radiation complex, mounted at the MSU Meteorological Observatory in 2021, are discussed. Though the RAD-MSU(BSRN) complex is not a part of BSRN (Baseline Surface Radiation Network), it is equipped with a full set of instruments recommended by the BSRN, including for measurements of all components of net radiation, UVA radiation, erythemal UV radiation, and sunshine duration. The specially developed software for visualization and processing of measurement data, including evaluation of data quality criteria, is described. The main features of variability of the components of net radiation and UV radiation in 2021 are analyzed.