

Связь шкал измерителей коротковолновой отраженной радиации ИКОР-М ИСЗ «Метеор-М» № 1 и № 2

М.Б. Богданов, В.А. Воробьев, А.И. Котума, М.Ю. Червяков

*Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
Саратов, 410012, Россия
E-mail: kafmeteo@sgu.ru*

Радиометр ИКОР-М предназначен для измерения с ИСЗ отраженной коротковолновой радиации в диапазоне 0,3–4,0 мкм, что позволяет получать значения альbedo и поглощенной солнечной радиации. Этот радиометр проработал на борту ИСЗ «Метеор-М» № 1 в течение пяти лет, вплоть до завершения активного существования спутника в сентябре 2014 г. Нами исследован эффект старения этого прибора, вызывающий уменьшение его чувствительности. Найдены параметры линейных трендов альbedo областей поверхности Земли с приблизительно неизменными значениями данной характеристики, и получена оценка изменения чувствительности измерителя со временем. Аналогичный радиометр ИКОР-М установлен на борту ИСЗ «Метеор-М» № 2, запущенного 8 августа 2014 г., и оба измерителя проработали вместе около месяца. Связь шкал измерителей на этих спутниках найдена при сравнении карт глобального распределения среднемесячных значений альbedo.

Ключевые слова: коротковолновая радиация, альbedo, алгоритмы, радиометры, шкала измерений, спутники

*Одобрена к печати: 20.06.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-252-260*

Введение

Измерение составляющих радиационного баланса Земли – прямой солнечной радиации, отраженной коротковолновой и уходящей длинноволновой радиации, представляет большой интерес для изучения земной климатической системы (Скляров и др., 2009). Именно с изменениями компонентов радиационного баланса связывается наблюдаемое в настоящее время глобальное изменение климата (IPCC, 2013). Очевидно, что наиболее детальные данные о глобальных распределениях этих характеристик могут быть получены только по измерениям с борта искусственных спутников Земли (ИСЗ).

Разработка космической аппаратуры для измерения составляющих радиационного баланса Земли проводилась в Саратовском государственном университете на протяжении многих лет под руководством профессора Ю.А. Склярова (1931–2014). В частности, был разработан и создан измеритель отраженной коротковолновой радиации ИКОР-М, анализ данных измерений которого позволяет строить карты глобальных распределений альbedo и поглощенного потока солнечного излучения. Конструкция измерителя детально описана Скляровым и др. (2012а). Описания алгоритмов обработки и компьютерных программ также опубликованы (Скляров и др., 2012б). Примеры получаемых карт глобальных распределений альbedo и поглощенного потока излучения можно найти в работах Склярова и др. (2013а, 2013б).

Прибор ИКОР-М в течение пяти лет без каких-либо сбоев проработал в составе гелиогеофизического аппаратного комплекса ГГАК-М ИСЗ «Метеор-М» № 1 (с сентября 2009 г. по сентябрь 2014 г.), каждую секунду проводя измерения потока отраженной коротковолновой радиации. Передача информации прекратилась только с потерей ориентации спутника. Полученные результаты частично опубликованы, а глобальные карты средне-

сячных распределений альbedo и поглощенного потока излучения находятся в открытом доступе на странице лаборатории исследования составляющих радиационного баланса Земли Саратовского университета в сети Интернет (<http://www.sgu.ru/structure/geographic/metclim/balans>).

Особенностью этого экземпляра измерителя ИКОР-М явилась довольно заметная величина нижнего порога входного окна системы регистрации показаний. Когда сигнал становился меньше этого порога, система выдавала нулевое значение. В результате измерения ночного нулевого уровня потока и потоков вблизи терминатора были невозможны. Другой особенностью, отмеченной в работе Складорова и др. (2013а), явилось медленное уменьшение чувствительности измерителя, происходящее, по-видимому, под воздействием факторов космического пространства.

В августе 2014 г. был произведен запуск ИСЗ «Метеор-М» № 2 с установленным на борту аналогичным измерителем ИКОР-М, который в отличие от первого не имеет никаких проблем с системой регистрации. Около месяца оба измерителя проработали совместно, что позволяет установить соответствие шкал этих приборов при сравнении карт распределения альbedo. Необходимо отметить соответствие измеряемых величин радиометров ИКОР-М измерениям отраженной коротковолновой радиации на зарубежных спутниках.

Целью настоящей работы является исследование эффекта старения измерителя ИКОР-М на ИСЗ «Метеор-М» № 1 и нахождение связи его шкалы со шкалой работающего в данное время аналогичного прибора.

Возможные причины изменения характеристик измерителя

Конструкция измерителя ИКОР-М отличается простотой и устойчивостью к возможному воздействию факторов космического пространства (Складорова и др., 2012а). Система регистрации показаний прибора выполнена в основном на элементах цифровой электроники и укрыта от действия проникающей радиации в металлическом корпусе. Измеритель направлен в надир и поэтому дополнительно экранируется от радиации из верхней полусферы корпусом и другой аппаратурой ИСЗ. Можно предполагать, что наблюдаемое изменение характеристик измерителя не связано с деградацией радиоэлектронных компонентов.

Возможным источником старения ИКОР-М является снижение прозрачности стеклянного фильтра в результате загрязнения его поверхности пылью или другими продуктами собственной атмосферы космического аппарата. Чаще всего такая атмосфера создается выбросами двигателей, в том числе и входящих в систему ориентации. Однако в данном случае двигатели отсутствуют, так как система ориентации ИСЗ «Метеор-М» № 1 использовала силовые гироскопы. Тем не менее нельзя исключить осаждение на поверхность фильтра продуктов сублимации с другой аппаратуры спутника.

Зачерняющее покрытие приемного элемента выполнено с использованием лака на основе аморфного углерода и должно быть устойчивым к воздействию жесткого электро-

магнитного излучения. До вывода на орбиту ИСЗ приемный элемент находился длительное время в условиях высокого вакуума, но, несмотря на это, сохранял неизменными характеристики покрытия.

Еще одним возможным источником старения измерителя является объемное радиационное окрашивание стекла, используемого в качестве фильтра. Этот эффект возникает под действием жесткого ультрафиолетового и рентгеновского излучения, приводит к уменьшению прозрачности стекла в видимом диапазоне спектра и проявляет себя в уменьшении альbedo всех участков поверхности Земли. Нельзя также исключить, что некоторые из рассмотренных причин изменения характеристик измерителя действовали одновременно.

Оценка изменения чувствительности измерителя со временем

Относительно малая величина эффекта старения измерителя ИКОР-М позволяет надеяться на возможность его оценки и учета при проведении обработки наблюдательных данных. Такая оценка возможна по наблюдениям участков земной поверхности с неизменными значениями альbedo. В качестве подобных тестовых участков нами были выбраны район в пустыне Сахара (22° с.ш. 4° з.д.) и два участка в акваториях Атлантического (22° с.ш. 62° з.д.) и Тихого (9° с.ш. 115° з.д.) океанов (в скобках указаны центры выбранных областей). Для всех трех участков были рассчитаны среднемесячные значения альbedo с ноября 2009 г. по август 2014 г., показанные кружками на *рис. 1*. Как видно из рисунка, в изменениях альbedo четко прослеживаются регулярные уменьшения, которые в первом приближении могут быть представлены линейными трендами.

В дальнейшем будем измерять время с использованием юлианских дат JD , принимая за моменты наблюдений даты середины соответствующего месяца. Наблюдаемые линейные тренды альbedo $a(JD)$ могут быть представлены выражением:

$$a(JD) = b(JD - 2455100) + c, \quad (1)$$

параметры которого b и c определялись методом наименьших квадратов. Полученные значения параметров трендов вместе с их стандартными отклонениями приведены в *табл. 1*, а сами тренды показаны сплошными линиями на *рис. 1*. Анализ первого столбца *табл. 1* показывает, что угловые коэффициенты трендов b отличаются от нуля более чем на три стандартных отклонения. Поэтому гипотезы о равенстве коэффициентов b нулю (отсутствие тренда) отвергаются на уровне значимости $\alpha = 0,01$, и найденные линейные тренды являются статистически значимыми.

Как видно на *рис. 1*, в отклонениях значений альbedo от линейных трендов все-таки присутствуют сезонные изменения и исходное предположение о постоянстве альbedo этих участков земной поверхности, строго говоря, не выполняется. Тем не менее среднее значение сезонных изменений близко к нулю. В этом случае требование конечности дисперсии

сезонных изменений альbedo является достаточным для того, чтобы метод наименьших квадратов давал несмещенные оценки параметров линейных трендов (Худсон, 1970).

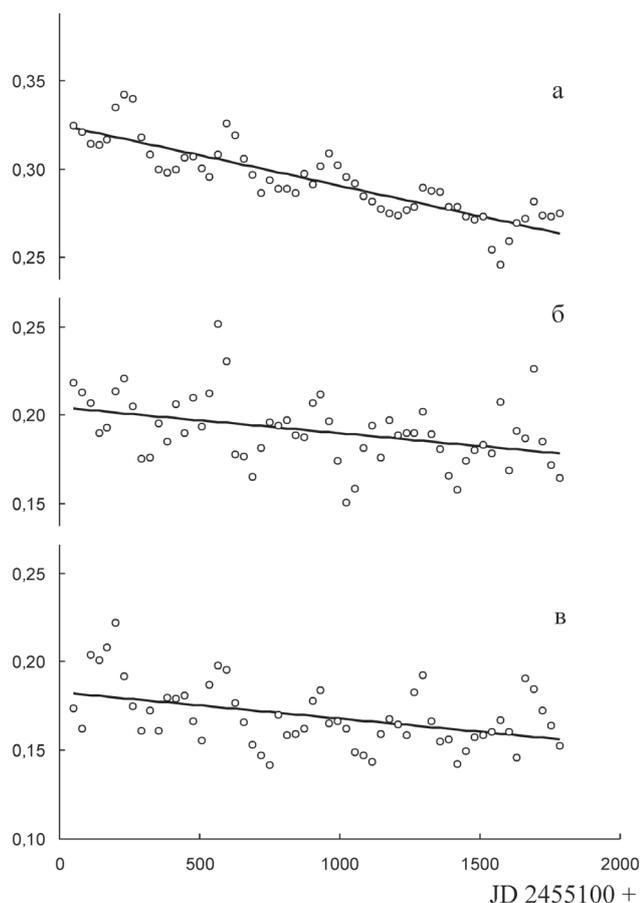


Рис. 1. Изменение среднемесячных значений альbedo участков поверхности Земли, расположенных в Сахаре (а), акваториях Атлантического (б) и Тихого (в) океанов. Сплошными линиями показаны линейные тренды

Таблица 1. Параметры линейных трендов альbedo различных областей Земли и коэффициент уменьшения чувствительности ИКОР-М ИСЗ «Метеор-М» № 1

Область	$b, 10^{-5} \text{ сут}^{-1}$	c	$k, 10^{-4} \text{ сут}^{-1}$
Сахара	$- 3,44 \pm 0,27$	$0,3249 \pm 0,0028$	$- 1,059 \pm 0,083$
Атлантика	$- 1,46 \pm 0,46$	$0,2045 \pm 0,0048$	$- 0,713 \pm 0,223$
Тихий океан	$- 1,49 \pm 0,41$	$0,1829 \pm 0,0043$	$- 0,816 \pm 0,227$

По нашему предположению, наличие линейных трендов альbedo рассмотренных участков поверхности связано с уменьшением чувствительности измерителя ИКОР-М, которое можно рассматривать как уменьшение переводного множителя прибора $A(JD)$, определенного при его наземной калибровке. При постоянстве чувствительности $A(JD) = 1$ и альbedo каждого участка $a(JD) = c$. При изменении чувствительности, вызванным старением измерителя

$$a(JD) = cA(JD). \quad (2)$$

Сравнение выражений (1) и (2) дает:

$$A(JD) = 1 + k(JD - 2455100), \quad (3)$$

где коэффициент $k = b/c$ характеризует свойства измерителя и должен быть одинаковым для каждого линейного тренда.

Значения коэффициентов k вместе с их стандартными отклонениями приведены в последнем столбце *табл. 1*. Как видно из таблицы, эти значения несколько различаются, но в пределах погрешностей согласуются друг с другом. Гипотеза о равенстве коэффициентов k не может быть отброшена даже на уровне значимости $\alpha = 0,10$.

Для объединения информации о старении измерителя по всем трем участкам земной поверхности нужно найти среднее взвешенное значение коэффициента:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^N w_i k_i}{\sum_{i=1}^N w_i}. \quad (4)$$

Оптимальный выбор весов, обеспечивающий минимальную дисперсию средней взвешенной оценки, имеет вид: $w_i = \sigma_i^{-2}$, где σ_i^2 – дисперсия выборочной оценки с номером i , а N – объем выборки (Худсон, 1970). При этом дисперсия средней взвешенной оценки равна:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N w_i^2 \sigma_i^2}{\left(\sum_{i=1}^N w_i\right)^2}. \quad (5)$$

Применение формул (4) и (5) к данным последнего столбца *табл. 1* дает окончательное значение $k = (-0,996 \pm 0,074) \times 10^{-4} \text{ сут}^{-1}$.

Проведенное исследование эффекта старения измерителя показывает, что изменение его чувствительности достаточно хорошо представляется линейным трендом. Для получения исправленных величин альbedo измеренные значения потока отраженной коротковолновой радиации для юлианской даты JD необходимо разделить на фактор $A(JD)$, даваемый выражением (3). Входящий в это выражение коэффициент, характеризующий уменьшение чувствительности ИКОР-М, имеет значение $k = (-0,996 \pm 0,074) \times 10^{-4} \text{ сут}^{-1}$. Применение данной процедуры позволит существенно повысить точность оценок альbedo и поглощенного потока солнечной радиации.

Сравнение шкал измерителей ИКОР-М

Как уже отмечалось выше, с августа 2014 г. аналогичный измеритель ИКОР-М работает на борту ИСЗ «Метеор-М» № 2. За прошедшие после включения прибора полтора года никаких проблем с регистрацией и передачей данных не возникало, и измерения потока

отраженной коротковолновой радиации проводятся каждую секунду. Методика обработки результатов и построения карт распределений остается неизменной. На картах со средними размерами ячеек по широте и долготе $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ приводятся среднемесячные оценки альбедо и поглощенного потока солнечной радиации.

В августе 2014 г. оба измерителя проработали совместно, что позволяет установить соответствие шкал этих приборов при сравнении карт распределения альбедо. Обозначим через $a_{1,i}$ значение альбедо в ячейке карты с номером i по наблюдениям с ИСЗ «Метеор-М» № 1, а через $a_{2,i}$ – аналогичные значения по наблюдениям со второго спутника. При этом значения $a_{1,i}$ исправлены из-за влияния уменьшения чувствительности измерителя с использованием формул, приведенных в предыдущем разделе. Значения альбедо пропорциональны переводным множителям измерителей (Скляров и др., 2012б). Так как измерители ИКОР-М изготовлены идентично, то можно ожидать, что их шкалы будут отличаться только некоторым постоянным коэффициентом K . Будем для определенности считать, что коэффициент K есть отношение показания измерителя с ИСЗ № 2 к показаниям измерителя с ИСЗ № 1 для одного и того же потока коротковолновой радиации.

Справедливость данного предположения можно проверить, построив корреляционную диаграмму по ячейкам карт с ненулевыми значениями альбедо. Такая диаграмма показана на *рис. 2*. По оси абсцисс отложены значения $a_{1,i}$, а по оси ординат – величины $a_{2,i}$. Всего использовано 4257 ячеек. Как видно из *рис. 2*, рассеяние точек на корреляционной диаграмме довольно велико. Следует отметить, что это рассеяние отражает все возможные источники погрешности среднемесячных значений альбедо: случайную погрешность

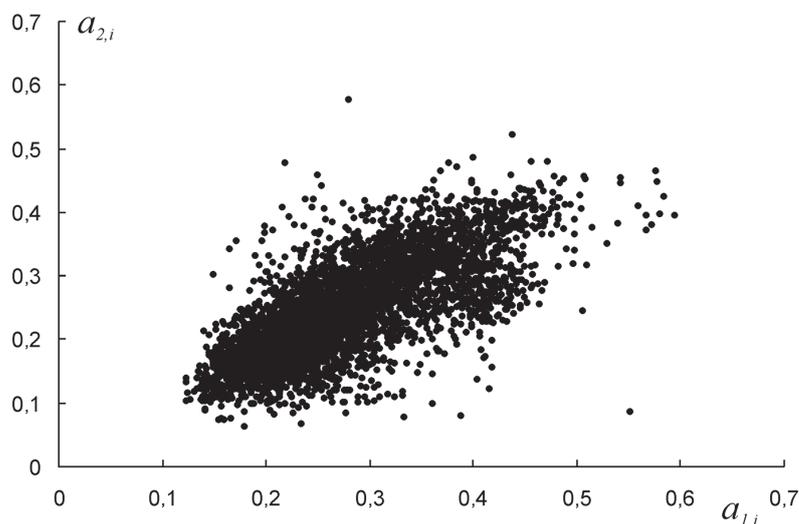


Рис. 2. Корреляционная диаграмма среднемесячных значений альбедо, построенная по ячейкам карт за август 2014 г.

измерения потоков радиации, влияние порога регистрации для измерителя с ИСЗ № 1 и погрешности методики расчета альбедо. Тем не менее точки на *рис. 2* в среднем хорошо ложатся на прямую линию и какие-либо нелинейные эффекты не заметны. Коэффициент линейной корреляции значений альбедо равен $0,7309 \pm 0,0071$.

Представляет интерес более детально проанализировать величины $K_i = a_{2,i}/a_{1,i}$. Очевидно, что распределение K_i не может совпадать с нормальным, так как нормальное распределение предполагает бесконечный интервал возможных значений случайной величины, а интервалы изменения альbedo ограничены. На *рис. 3* показан полигон частот, являющийся выборочной оценкой плотности вероятности. Видно, что по сравнению с нормаль-

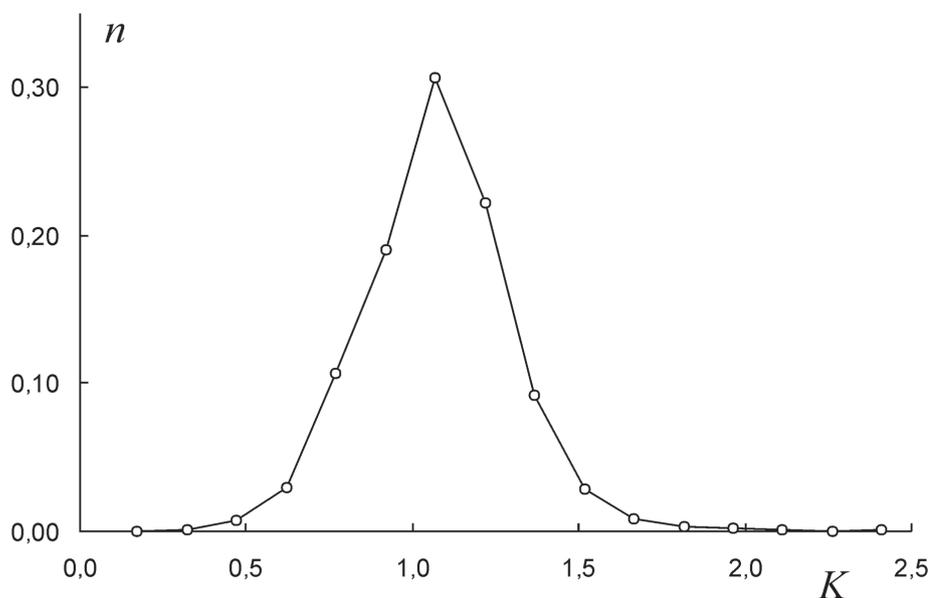


Рис. 3. Полигон частот для отношений среднемесячных значений альbedo соответствующих ячеек карт $K_i = a_{2,i} / a_{1,i}$

ным распределением он имеет более острую вершину. Величина эксцесса оказывается равной $2,412 \pm 0,075$. Для оценки вероятности совпадения распределения с нормальным мы использовали критерий Колмогорова–Смирнова. Максимальная по модулю разность функций распределений составила 0,0375, и при нашем объеме выборки 4257 вероятность совпадения распределения с нормальным не превосходит $1,3 \times 10^{-5}$.

Таким образом, предположение о связи шкал измерителей постоянным коэффициентом K вполне допустимо. Величина этого коэффициента может быть найдена из требования, состоящего в том, чтобы сумма квадратов уклонений значений альbedo для ячеек карт была минимальной:

$$\sum_{i=1}^N (Ka_{1,i} - a_{2,i})^2 = \min, \quad (6)$$

где N – число ненулевых ячеек карт. Дифференцирование выражения (6) по K и приравнение производной нулю дает очевидное соотношение:

$$K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{a_{2,i}}{a_{1,i}}. \quad (7)$$

Применение формулы (7) к анализируемым картам альbedo дает $K = 0,9071 \pm 0,0031$.

Для приведения величин потоков отраженной коротковолновой радиации и значений альbedo, полученных по измерениям ИКОР-М первого спутника, к шкале измерителя ИКОР-М ИСЗ «Метеор-М» № 2 они после учета эффекта старения должны быть умножены на коэффициент K .

Заключение

Проведенное исследование эффекта старения измерителя ИКОР-М ИСЗ «Метеор-М» № 1 показывает, что изменение его чувствительности достаточно хорошо представляется линейным трендом и может быть легко учтено. Принимая во внимание идентичность измерителей, аналогичный состав другой аппаратуры и близость элементов орбит спутников, подобный эффект старения можно ожидать и для ИКОР-М ИСЗ «Метеор-М» № 2. Для проверки этого предположения необходимы дальнейшие исследования.

С учетом относительно небольшого времени, прошедшего с момента наземной калибровки измерителя ИКОР-М ИСЗ «Метеор-М» № 2, его шкала представляется более надежной. Поэтому можно рекомендовать приводить к этой шкале данные наблюдений, полученные измерителем первого спутника.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки России в рамках базовой части (код проекта 2179).

М.Ю. Червяков благодарит также РФФИ за финансовую поддержку в рамках научного проекта № 16-35-00284 мол_а.

Литература

1. *Скляр Ю.А., Бричков Ю.И., Семенова Н.В.* Радиационный баланс Земли. Введение в проблему. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2009. 188 с.
2. *Скляр Ю.А., Воробьев В.А., Котума А.И., Червяков М.Ю., Фейгин В.М.* Измерения компонентов радиационного баланса Земли с ИСЗ «Метеор-М» № 1. Аппаратура ИКОР-М // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012а. Т. 9. № 2. С. 173–180.
3. *Скляр Ю.А., Воробьев В.А., Котума А.И., Червяков М.Ю., Фейгин В.М.* Алгоритм обработки данных наблюдений уходящей коротковолновой радиации с ИСЗ «Метеор-М» № 1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012б. Т. 9. № 3. С. 83–90.
4. *Скляр Ю.А., Червяков М.Ю., Воробьев В.А., Котума А.И., Фейгин В.М.* Особенности распределения поглощенной солнечной радиации в 2010–2012 гг. по данным ИСЗ «Метеор-М» № 1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013а. Т. 10. № 2. С. 272–283.
5. *Скляр Ю.А., Червяков М.Ю., Воробьев В.А., Котума А.И., Фейгин В.М.* Некоторые результаты обработки данных поглощенной солнечной радиации и альbedo, полученных с помощью аппаратуры ИКОР-М // Известия Саратовского университета. Серия Науки о Земле. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2013б. Т. 13. Вып. 2. С. 30–33.
6. *Худсон Д.* Статистика для физиков. М.: Мир, 1970. 295 с.
7. *Intergovernmental Panel on Climate Change.* Climate change 2013: The physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.

Scaling factor between reflected shortwave radiation measured by IKOR-M on board the Meteor-M No. 1 and 2 satellites

M.B. Bogdanov, V.A. Vorobyov, A.I. Kotuma, M.Yu. Chervyakov

Saratov State University, Saratov, 410012, Russia
E-mail: kafmeteo@sgu.ru

The IKOR-M radiometer is a satellite instrument that measures reflected shortwave radiation (0.3–4.0 μm). Such measurements can be used to derive the Earth's surface albedo and absorbed solar radiation. This radiometer worked on board the Meteor-M No. 1 satellite for five years, from September 2009 until the end of the satellite operation in September 2014. We investigated the effect of aging of this instrument, which was found to cause a decrease in sensitivity. Linear trend parameters of measured albedo are estimated for the Earth's surface areas with approximately constant values of this characteristic. The estimated change in radiometer sensitivity over time is obtained. A twin radiometer IKOR-M was installed on board the Meteor-M No. 2 satellite launched on August, 8, 2014. Both radiometers worked simultaneously for approximately a month. A scaling factor between the two radiometers was found by comparing of the global distribution maps of monthly averaged albedo values.

Keywords: shortwave radiation, albedo, algorithms, radiometers, satellites

Accepted: 20.06.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-252-260

References

1. Sklyarov Yu.A., Brichkov Yu.I., Semenova N.V., *Radiatsionnyi balans Zemli. Vvedenie v problemu* (Radiation balance of the Earth: introduction to the problem), Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 2009, 188 p.
2. Sklyarov Yu.A., Vorobyov V.A., Kotuma A.I., Chervyakov M.Yu., Feigin V.M., Izmereniya komponentov radiatsionnogo balansa Zemli s ISZ "Meteor-M" No. 1. Apparatura IKOR-M (The measurement of the radiation balance component from "Meteor-M" No. 1 satellite. The IKOR-M radiometer), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 173–180.
3. Sklyarov Yu.A., Vorobyov V.A., Kotuma A.I., Chervyakov M.Yu., Feigin V.M., Algoritm obrabotki dannykh nablyudenii ukhodyashchei korotkovolnovoi radiatsii s ISZ "Meteor-M" No. 1 (The algorithms for the processing of outgoing shortwave radiation measurements from "Meteor-M" No. 1 satellite), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 3, pp. 83–90.
4. Sklyarov Yu.A., Chervyakov M.Yu., Vorobyov V.A., Kotuma A.I., Feigin V.M., Osobennosti raspredeleniya pogloshchennoi solnechnoi radiatsii v 2010–2012 gg. po dannym ISZ "Meteor-M" No. 1 (The features of distribution of absorbed solar radiation in 2010–2012 by data from "Meteor-M" No. 1 satellite), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 2, pp. 272–283.
5. Sklyarov Yu.A., Chervyakov M.Yu., Vorobyov V.A., Kotuma A.I., Feigin V.M., Nekotorye rezul'taty obrabotki dannykh pogloshchennoi solnechnoi radiatsii i al'bedo, poluchennykh s pomoshch'yu apparatury IKOR-M (Some results of data processing of absorbed solar radiation and albedo from radiometer IKOR-M), *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Seriya Nauki o Zemle*, Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 2013, Vol. 13, Issue 2, pp. 30–33.
6. Hudson D. *Statistika dlya fizikov* (Statistics for physicists), Moscow, Mir, 1970, 295 p.
7. Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate change 2013: The physical science basis*, Cambridge: Cambridge University Press, 2013, 1535 p.