

Алгоритм обработки данных наблюдений уходящей коротковолновой радиации с ИСЗ «Метеор-М» №1

Ю.А. Скляров¹, В.А. Воробьёв¹, А.И. Котума¹, М.Ю. Червяков¹, В.М. Фейгин²

¹ Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
410012, Саратов, Астраханская, 83,
e-mail: kafmeteo@sgu.ru

² Научный центр оперативного мониторинга Земли Роскосмоса

Приводится детальное описание алгоритмов обработки наблюдений аппаратурой ИКОР-М с ИСЗ «Метеор-М» № 1. Эти алгоритмы используются в программах, которые последовательно обеспечивают всю процедуру обработки и представления результатов. Имеется возможность визуального контроля и предварительного анализа мгновенных отчётов на фоне географической карты, а также возможность масштабирования нужного участка трека орбиты и карты. Окончательный продукт выдаётся в виде глобальных карт уходящей коротковолновой радиации, альбедо и поглощённой солнечной радиации. Разрешение на картах обеспечивается сеткой площадок $2,5 \times 2,5^\circ$. Подробно излагается методика получения среднемесячных величин уходящей коротковолновой радиации (УКР), альбедо и поглощённой солнечной радиации. Аппаратура ИКОР работает без сбоев и перерывов более двух лет с частотой отсчётов 1/с. Разработанная методика обработки позволит единообразно обрабатывать наблюдаемый материал и проводить намеченные исследования связей климата и компонентов радиационного баланса Земли.

Ключевые слова: радиометр, уходящая коротковолновая радиация, альбедо, поглощённая радиация, шкала измерений, погрешности измерений.

Введение

ИСЗ «Метеор-М» № 1 выведен на орбиту 16 сентября 2009 г. В составе аппаратуры гелио-геофизического аппаратурного комплекса (ГГАК-М) на этом ИСЗ после запуска и по настоящее время успешно функционирует радиометр ИКОР-М. Радиометр работает в штатном режиме, т. е. 24 ч в сутки производит измерения с частотой 1/с. С момента ввода ИКОР в эксплуатацию (1 ноября 2009 г.) не зафиксировано никаких сбоев в работе радиометра ИКОР. Перерывы в приеме и накоплении информации также отсутствуют за исключением плановых «каникул» с 31 декабря 2009 г. по 11 января 2010 г. Особенности устройства, условия наблюдений и оценки погрешностей измерений детально рассмотрены в (Скляров и др., 2012).

Приём данных информации с ИСЗ «Метеор-М» № 1 производится в Научном центре оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ). Дважды в сутки производится «сброс» со спутника и декодирование этой информации, после чего информация записывается на ftp-сервер НЦ ОМЗ (<ftp://ftp.ntsomz.ru>) в виде заархивированных двоичных файлов, с данными ИКОР, которые являются данными нулевого уровня обработки. Доступ к этому серверу производится только авторизованными пользователями. Каждый такой архивный файл содержит двоичный файл (размером порядка 600 КБ) с «сырыми» данными аппаратуры ИКОР, которые содержат информационные кадры ИКОР, включающие в себя показания измерений уходящей коротковолновой радиации, температуру прибора и дополнительную служебную информацию с частотой одно измерение в секунду. В каждом файле записана информация приблизительно за сутки работы спутника, а каждый следующий файл данных включает приблизительно 50 % информации от предыдущих суток, обеспечивая её перекрытие. На этом сервере доступны текущие телеметрические данные в виде заархивированных текстовых файлов, в которых содержатся: бортовое время (посекундное), а также соответствующие этому времени широта и долгота подспутниковой точки, высота ИСЗ. Каждый такой текстовый файл обычно содержит в себе данные за 5...7 сут, а его размер составляет приблизительно 30...50 МБ.

Алгоритм расчётов мгновенных, среднесуточных и среднемесячных величин УКР и альбедо

В Саратовском госуниверситете осуществляется регулярный прием и накопление данных радиометра ИКОР с FTP-сервера НЦ ОМЗ. Поступающие «сырые» данные обрабатываются при помощи разработанного специалистами Саратовского госуниверситета программного обеспечения (ПО). На первом этапе обработки с помощью ПО “SSU Decoder” (Воробьёв, Скляров, 2011), производится декодирование данных, записанных на ИСЗ при помощи «Блока накопления данных», который разработан специалистами Специального конструкторского бюро космического приборостроения (СКБ КП) ИКИ РАН и отвечает за накопление гелио-геофизических данных на спутнике, т. е. разбирает информационные кадры «Блока накопления данных», проверяет их соответствие контрольным суммам (при необходимости). Затем, производится первичная отбраковка данных, декодируются информационные кадры радиометра ИКОР, которые сортируются в хронологическом порядке при сбоях, связанных с помехами при передаче данных со спутника, а также производится привязка всех измерений ИКОР к бортовым дате и времени. В результате обработки формируется текстовый файл (размером около 6 МБ) в котором содержится следующая ежесекундная информация: номер информационного кадра блока накопления данных, номер информационного кадра радиометра ИКОР, бортовые дата и время каждого измерения, номер пакета данных ИКОР, результаты измерения потока отражённой коротковолновой радиации и температуры прибора.

Для дальнейшего использования на втором этапе обработки данных производится привязка каждого измерения к телеметрической информации. Для этих целей в Саратовском госуниверситете была разработана программа “CoordReader”, которая считывает файлы данных первого уровня обработки и телеметрические данные (файлы с бортовым временем, координатами подспутниковой точки и текущей высотой спутника), затем для каждого измерения ИКОР производится поиск соответствующих ему телеметрических данных, осуществляется привязка данных к Гринвичскому времени. Эти данные сохраняются в виде двоичных файлов в банк данных. Каждый такой файл содержит в себе одни сутки (с 00:00 до 23:59 по гринвичскому времени) ежесекундных измерений, а его размер за каждые сутки составляет приблизительно 2,7 МБ. Банк данных представляет собой автоматически формируемый и структурированный набор каталогов и файлов данных, а также дополнительных файлов, содержащих вспомогательную информацию о хранимой в банке данных информации для удобства анализа и доступа к данным.

Третий этап обработки данных производится с помощью ПО “IKOR Archive Viewer for Meteor-M Satellite”, которое использует в качестве источника банк данных, формируемый на предыдущем этапе. На этом этапе производится получение мгновенных физических величин УКР и альбедо, привязанных к уровню верхней границы атмосферы (ВГА). Подробности получения указанных величин описаны нами ранее (Котума, 1998; Семёнова, 2003; Скляров и др., 1996, 1999, 2009). Затем производится расчет среднесуточных и среднемесячных величин альбедо, поскольку они являются климатологически значимыми. Альбедо практически всех сцен имеют большую зависимость от величины зенитного угла Солнца (ЗУС). Измерение производится при конкретном значении ЗУС, а над любой площадкой в течение суток (от восхода до захода Солнца) величина ЗУС изменяется в широких пределах. Нами разработана методика учёта этого «суточного фактора» для получения среднесуточного значения альбедо из мгновенных величин альбедо. Данная методика подробно изложена в следующих работах (Скляров и др., 2005, 2009; Фомина, 2009; Котума и др., 2009). Все указанные выше величины рассчитываются в динамике и не хранятся в банке данных. Для их предварительного просмотра и анализа в ПО имеется возможность просмотра мгновенных данных (рис. 1). Для этого, выбираются необходимые сутки, затем в окне просмотра суточных данных отображается любой выбранный виток. На рис. 1 красной линией на фоне карты Земли изображен выбранный виток (построенный по ко-

ординатам подспутниковой точки). На этой линии можно выбрать любую конкретную точку измерения, которая отображается фиолетовым эллипсом, соответствующим по форме и размерам полю зрения ИКОР. Для данной (текущей) точки также рассчитывается и отображается текущее положение подсолнечной точки (на карте подсолнечная точка изображена в виде красной точки). Под картой располагается график температуры прибора (синяя линия), умноженной на 10 (чтобы шкала измерений ИКОР и шкала температуры совпадали) и график «сырых» показаний прибора на уровне ИСЗ, на котором желтым цветом показана текущая выбранная точка, для которой в отдельном окне приведены мгновенные данные УКР и альбедо на уровне ВГА, а также прочие вспомогательные параметры. Следует отметить, что график под картой соответствует не долготам на карте, а времени от начала текущего витка. Также для удобства анализа ПО “IKOR Archive Viewer for Meteor-M Satellite” позволяет произвольным образом увеличить анализируемую область, как на карте, так и на графике, что позволяет изучить каждый конкретный ежесекундный отсчет. Так, на рис. 2 видно, что график измерений состоит из дискретных точек с возможностью выбора в качестве текущей (крупная желтая точка на рис. 2) любой из них. При смене текущей точки также перерисовывается соответствующее ей поле зрения ИКОР на карте.

На данном этапе обработки также производится расчет среднемесячных данных УКР, альбедо и поглощенной радиации на уровне ВГА. Для этого, используется массив ячеек равных по площади, на которые разбивается вся поверхность Земли. Обычно применяются ячейки $5 \times 5^\circ$ или $2,5 \times 2,5^\circ$ (около экватора). С увеличением широты количество ячеек в каждой широтной зоне уменьшается (например, с 72 ячеек у экватора до трех в приполярной зоне для сетки ячеек $5 \times 5^\circ$). Далее ПО анализирует все мгновенные измерения в течение месяца и определяет, к какой ячейке относится центр поля зрения данного мгновенного измерения. В результате, для каждой ячейки накапливается массив мгновенных измерений, которые затем усредняются за месяц. Здесь мы использовали свойство гелиосинхронного ИСЗ. В сутках не укладывается целого числа витков, поэтому первый виток новых суток начинается либо раньше, либо позже завершения суток. Это приводит к сдвигу всей системы витков так, что через несколько дней второй виток оказывается на месте первого и т. д. Для ИСЗ «Метеор-М» № 1 этот период равен 4,67 сут, так что при осреднении наблюдений за месяц угловое расстояние между витками ($27,3^\circ$ на экваторе) покрывается 5,4 раза. В качестве среднего принимается средний результат всех мгновенных ежесекундных отсчетов, центр поля зрения которых попадает в каждую конкретную ячейку. Этим автоматически учитывается месячный ход склонения Солнца и изменений расстояния Земля – Солнце. В итоге, получаются среднемесячные данные по ячейкам для УКР и среднесуточных альбедо.

Расчёт величин поглощённой радиации

В эту задачу естественно входит задача получения среднемесячных величин альбедо, которая отражает суммарное влияние всех относящихся к делу переменных. Если получена среднемесячная величина альбедо α_m , то среднемесячная поглощённая радиация E_a на ту же ячейку равна

$$E_a = E_m (1 - \alpha_m),$$

где E_m — среднемесячная радиация, приходящая на горизонтальную поверхность на ВГА, которая получается из известного выражения М. Миланковича

$$E = \frac{E_0 T_0}{r^2 \pi} (t_s \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin t_s)$$

где E_0 — солнечная постоянная; T_0 — продолжительность суток (в с); r — текущее расстояние Земля – Солнце (в а.е.); ϕ — широта ячейки; δ — склонение Солнца; t_s — часовой угол Солнца в момент восхода или захода (в рад).

Эта формула даёт суточную сумму приходящей радиации на горизонтальную поверхность [Дж/м²]. Для получения среднесуточной мощности на единицу поверхности величину E надо разделить на число секунд в сутках (T_0), и для приходящей радиации получится выражение E_d/T_0 , т. е.:

$$E_d = \frac{E_0}{r^2 \pi} (t_s \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin t_s) ,$$

Для случаев полярного дня, т. е. при круглосуточном освещении площадки $\delta \geq 90 - |\varphi|$ предыдущая формула принимает упрощенный вид. Поскольку для условий полярного дня $t_s = \pi$, то E_d получается из выражения:

$$E_d = \frac{E_0}{r^2} \sin \varphi \cdot \sin \delta .$$

Из формулы Миланковича следует, что инсоляцию данной площадки на ВГА определяют только три параметра: солнечная постоянная E_0 , расстояние Земля – Солнце r (в а.е.) и величина склонения Солнца δ (t_s зависит от δ). При этом δ в некоторые месяцы изменяется до 10° и более (например, вблизи дней равноденствий). После ряда проб, мы остановились на следующем варианте: считаем среднесуточные величины E_d для каждого дня месяца при реальных значениях r и δ (отклонение от среднего в пределах суток уже не даёт заметного изменения потока). Получаем набор среднесуточных величин E_d для каждой ячейки на карте (для текущего месяца). Общая сумма этих суточных потоков, делённая на количество дней в месяце, даёт очень близкие к истинным значения среднемесячных величин приходящей радиации E_m для каждой ячейки. Далее по всем ячейкам получаем величины поглощённой радиации на ВГА E_a , которая рассчитывается по формуле $E_a = E_m (1 - \alpha_m)$. На наш взгляд такой подход является единственным правильным решением.

Результаты расчетов среднемесячных данных (УКР, альbedo и поглощенной радиации) по ячейкам автоматически сохраняются в банке данных в виде текстовых файлов данных (каждый вид продукта сохраняется в свой файл) удобных для их использования в стороннем ПО обработки и анализа этих данных.

Изначально при расчетах среднемесячных данных по ячейкам мы применяли сетку ячеек 5×5°, но затем ПО было доработано таким образом, чтобы можно было использовать и другие размеры ячеек. Так, на рис. 3, 4 приведены карты альbedo за один и тот же месяц, но с разными размерами ячеек. По этим рисункам наглядно видно, что оптимальной по детализации является сетка ячеек 2,5×2,5°, которая обеспечивается достаточно большим количеством усредняемых точек (100 и более мгновенных измерений на каждую ячейку), а при использовании более мелкой сетки обеспеченность средними уменьшается, в результате чего на карте проявляются отдельные витки. На рис. 5–7 представлены полученные продукты за один и тот же месяц октябрь 2011 г.

Помимо получения среднемесячных данных по сетке ячеек в ПО реализована возможность получения зональных средних (по 2,5 градусным широтным зонам) по каждому виду продукта, а также полушарных и глобальных средних значений.

На настоящий момент накоплен и продолжает регулярно пополняться большой архив однородных климатических данных по перечисленному выше ряду компонентов радиационного баланса Земли, полученных в результате работы ИКОР. В настоящее время ведется работа по организации общего доступа в сети Интернет для широкой научной общественности к полученным в ходе настоящего эксперимента продуктам в виде карт распределения компонентов радиационного баланса Земли. На создаваемом сайте будут публиковаться результаты наших собственных исследований реакции климатической системы на вариации компонентов радиационного баланса Земли.

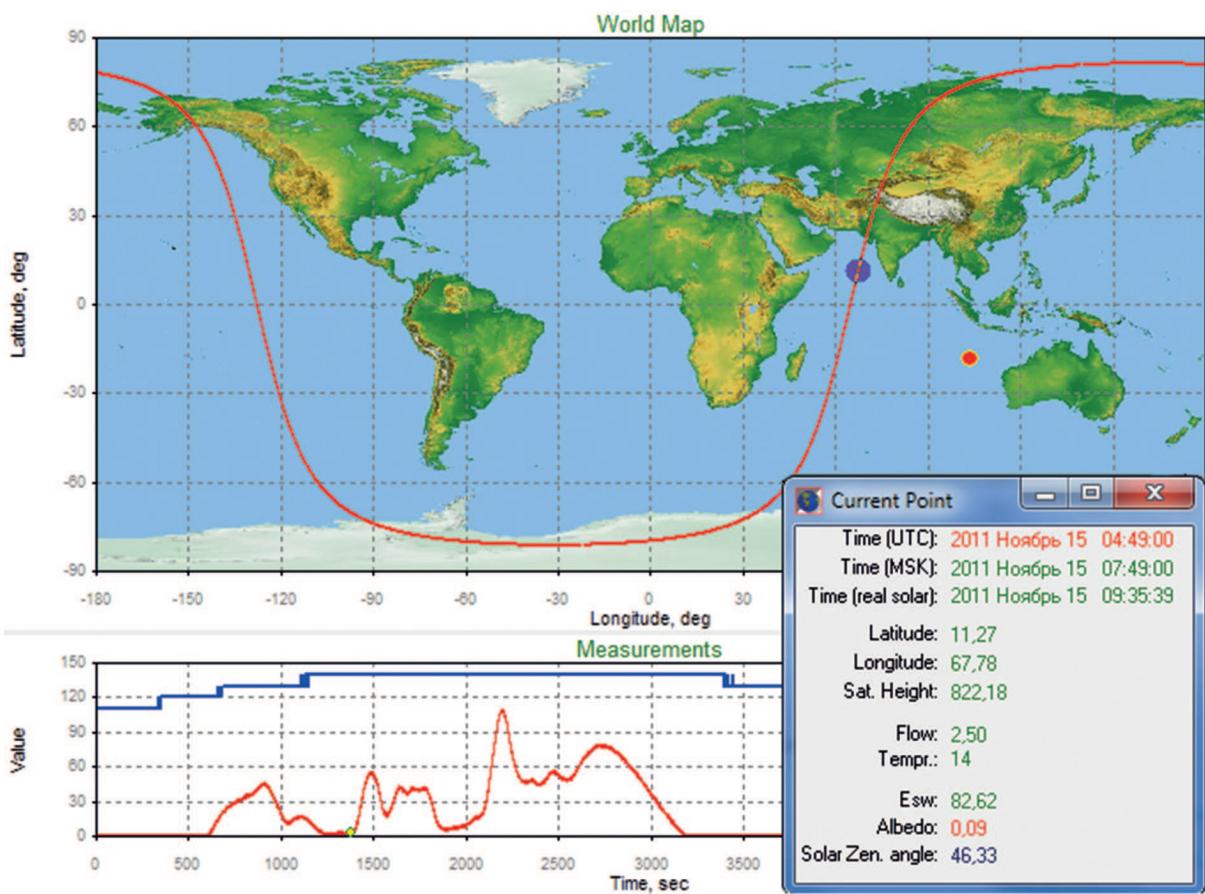


Рис. 1. Форма отображения мгновенных данных за конкретный виток ИСЗ

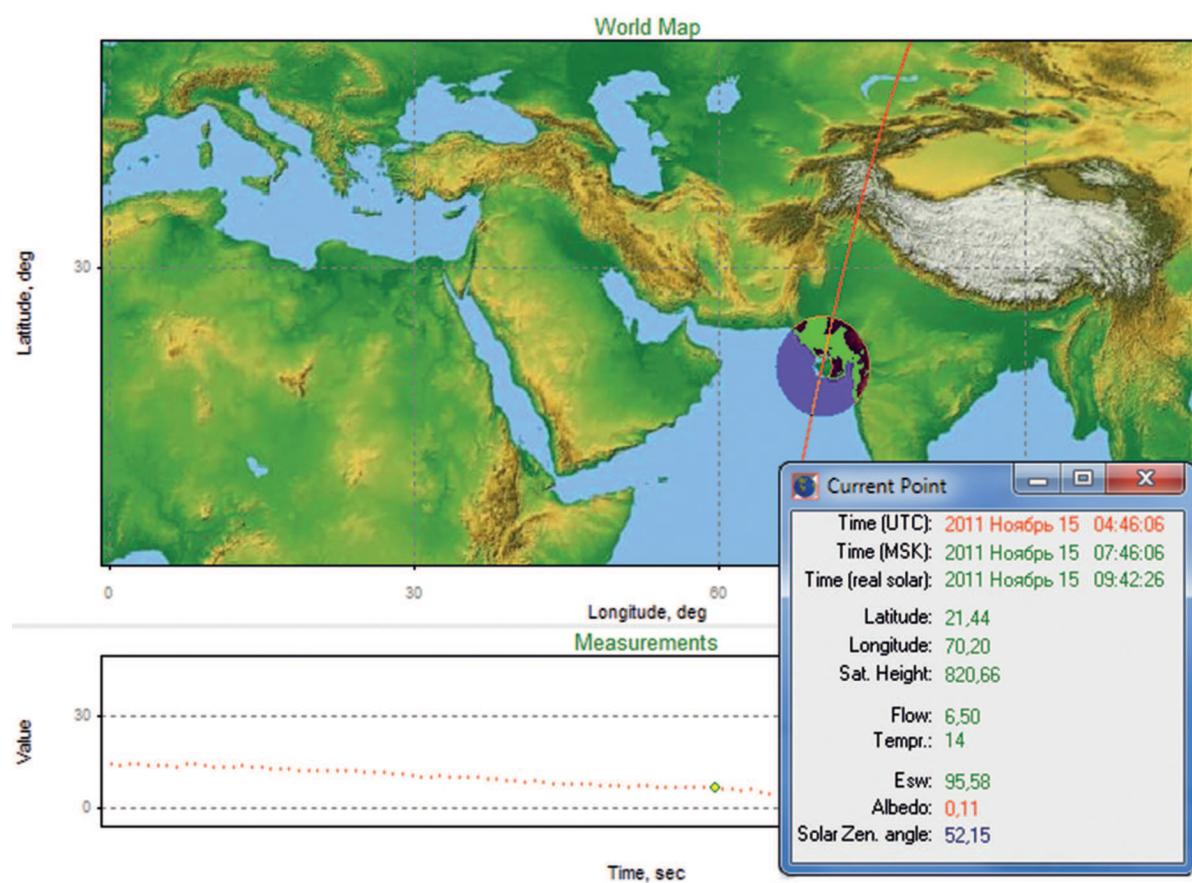


Рис. 2. Форма отображения мгновенных данных. Анализ ежесекундных измерений

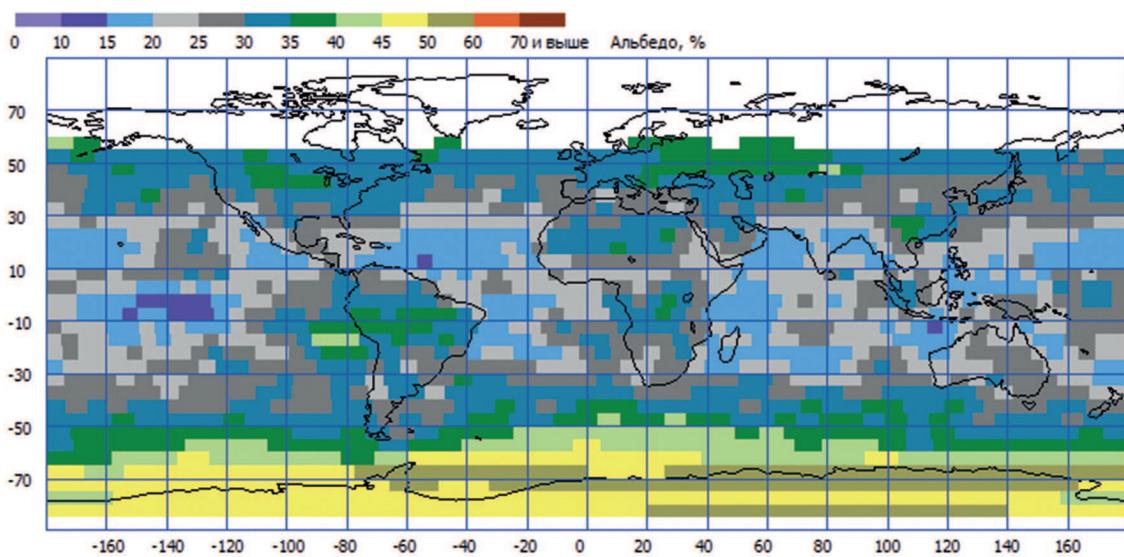


Рис. 3. Карта распределения среднемесячных величин альбедо в ячейках $5 \times 5^\circ$ (декабрь 2009 г.)

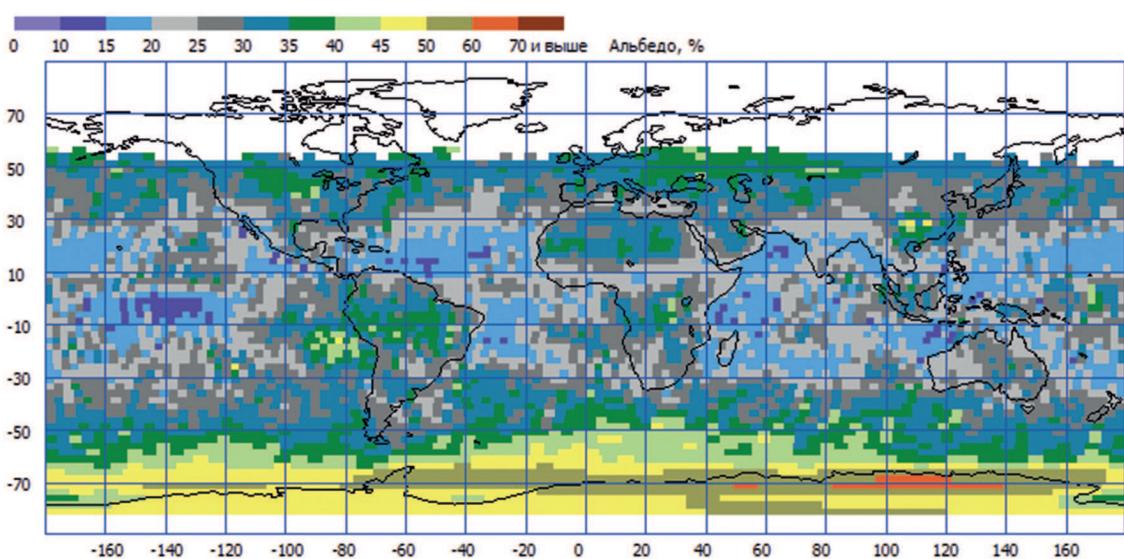


Рис. 4. Карта распределения среднемесячных величин альбедо в ячейках $2.5 \times 2.5^\circ$ (декабрь 2009 г.)

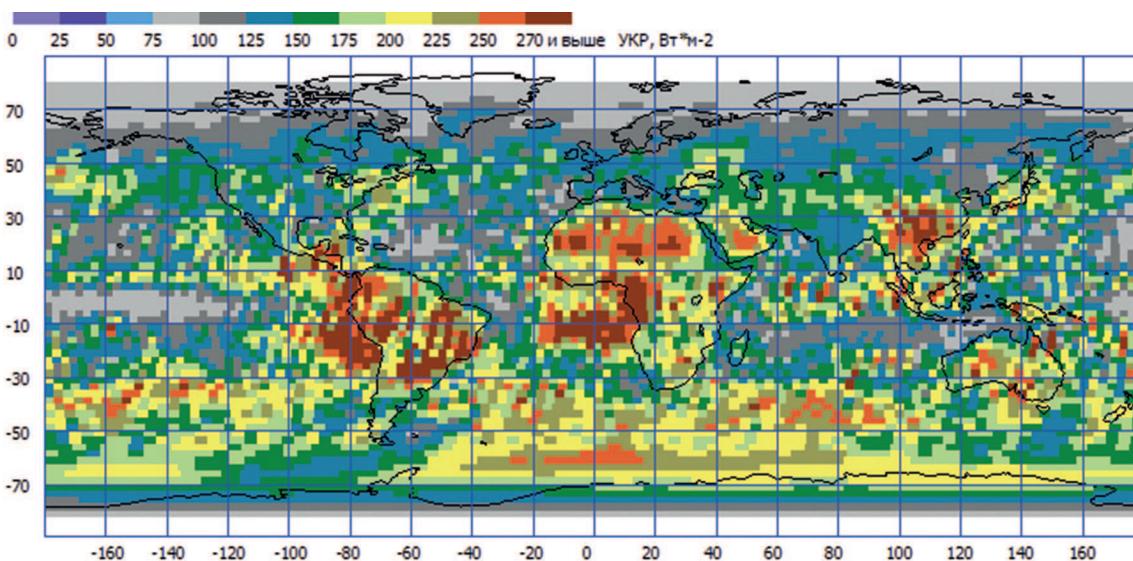


Рис. 5. Карта распределения среднемесячных величин УКР (октябрь 2011 г.)

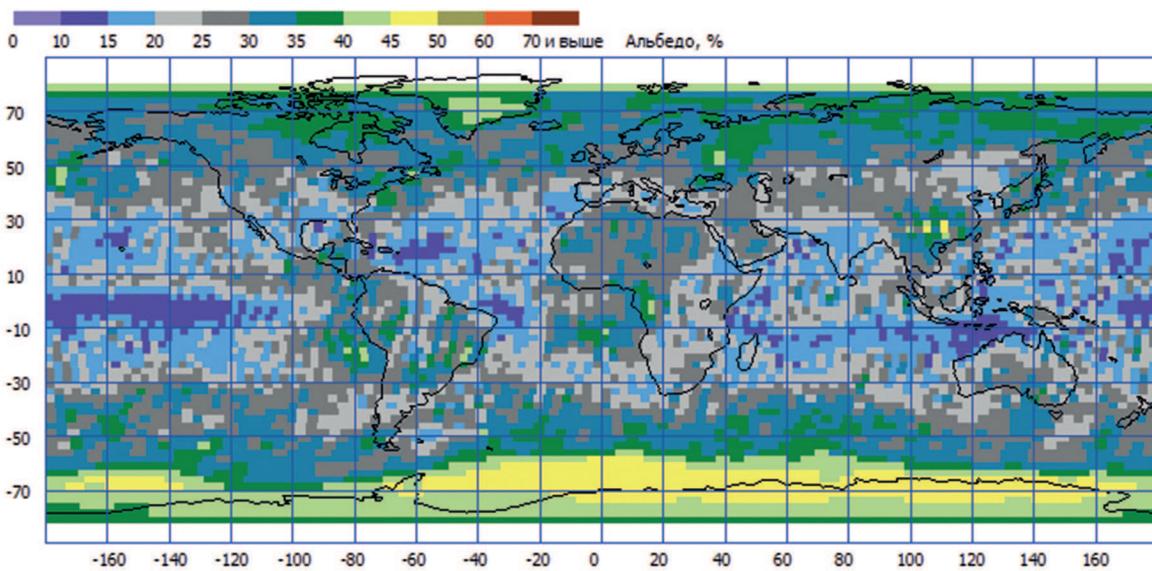


Рис. 6. Карта распределения среднемесячных величин альбедо (октябрь 2011 г.)

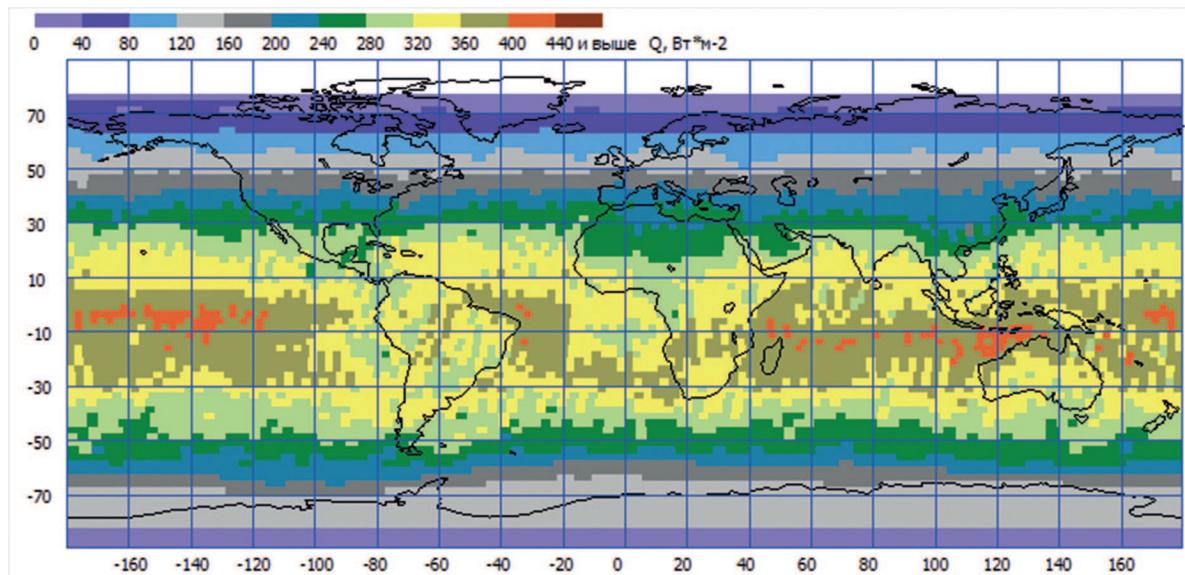


Рис. 7. Карта распределения среднемесячных величин поглощенной радиации (октябрь 2011 г.)

Литература

1. Воробьев В.А., Скляров Ю.А. Программа декодирования данных радиометра ИКОР “SSU Decoder”. Св-во № 2011610921 от 24 января 2011 г.
2. Котума А.И. Уходящая коротковолновая радиация и альбено системы Земля-атмосфера с ИСЗ «Метеор-3» № 7: Дис. ... канд. географ. наук. Саратов, 1998.
3. Котума А.И., Скляров Ю.А., Фомина Н.В. Программа расчета среднесуточного альбено АЛЬБЕДОМЕТР. Св-во № 2009612384 от 12 мая 2009 г.
4. Семенова Н.В. Уходящая коротковолновая радиация и альбено на верхней границе атмосферы по наблюдениям с гелиосинхронного ИСЗ «Ресурс-01» № 4: Дис. ... канд. географ. наук. Саратов, 2003.
5. Скляров Ю.А., Бричков Ю.И., Воробьев В.А., Котума А.И. Измерения уходящего коротковолнового излучения и альбено радиометром ИКОР с ИСЗ «Метеор-3» № 7 // Исслед. Земли из космоса. 1999. № 2. С. 15–26.
6. Скляров Ю.А., Бричков Ю.И., Воробьев В.А., Котума А.И. Об обработке данных спутниковых измерений уходящих радиационных потоков широкоугольными радиометрами // Исслед. Земли из космоса. 1996. № 3. С. 48–56.

7. Скляров Ю.А., Бричков Ю.И., Семенова Н.В. Радиационный баланс Земли. Введение в проблему. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2009. 185 с.
8. Скляров Ю.А., Бричков Ю.И., Фомина Н.В., Котума А.И., Семенова Н.В. Определение среднесуточных величин альбедо с использованием спутниковых направленных моделей // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 3. С. 13–21.
9. Скляров 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. 2012. Т. 9. № 2. С. 173–180.
10. Фомина Н.В. Глобальное распределение составляющих радиационного баланса Земли по данным ИСЗ России и США: Дис. ... канд. географ. наук. Саратов, 2009.

The algorithms for the processing of outgoing shortwave radiation measurements from “Meteor- M” N. 1 satellite

Yu.A. Sklyarov¹, V.A. Vorobiov¹, A.I. Kotuma¹, M.Yu. Chervyakov¹, V.M. Feigin²

¹*Saratov State University,
410012, Saratov, Astrakhanskaya, 83,*

e-mail: kafmeteo@sgu.ru

²*Research Center for Earth Operative Monitoring, Moscow*

The detailed description of the algorithms for processing of the IKOR radiometer observations from “Meteor-M” N. 1 satellite are given. This algorithms are used in programs which consecutively support all procedure of the processing and results presentation. The possibility for visual control and preliminary analysis of the instant readings on the geographical map background and scaling possibility of the selected section of the map or orbit tracks is presented. The final product is represented as a global maps of outgoing shortwave, albedo and absorbed solar radiation. The resolution on the maps is given by the grid $2.5 \times 2.5^\circ$ in geocentric coordinates. The method of receiving of the monthly averaged values of outgoing shortwave radiation, albedo and absorbed solar radiation are given in detailles. Apparatus IKOR is working without wrongs and interruptions more than 2 years with rate of 1/s. The developed in Saratov State University methods make it possible uniformly process all observational material and investigate climate — components of Earth radiation balance connections.

Keywords: radiometer, outgoing short wave radiation, albedo, absorbed radiation, scale of measurements, errors of measurements.