

Измерения компонентов радиационного баланса Земли с ИСЗ «Метеор-М» №1. Аппаратура ИКОР-М

Ю.А. Скляр¹, 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 краткая справка о работах по созданию в Саратовском государственном университете радиометров «Измеритель коротковолновой отражённой радиации» (ИКОР) трёх поколений. Аппаратура предназначена для измерений уходящей коротковолновой радиации (УКР), что позволяет определить мгновенное и среднесуточное значения величин альbedo, поглощённой солнечной радиации, а также среднемесячные значения этих величин. Подробно излагаются принцип действия, конструкция, метод градуировки и другие данные, касающиеся радиометра третьего поколения ИКОР-М. Этот радиометр работает с конца 2009 г. на ИСЗ «Метеор-М» №1. Информация поступает с ноября 2009 г., частота отсчётов 1/с. Прибор работает без сбоев. В статье приводятся различные оценки погрешностей измерений. Общий вывод – полученные данные соответствуют шкалам измерений общеизвестных зарубежных радиометров.

Ключевые слова: радиометр, пиргелиометр, уходящая коротковолновая радиация, альbedo, поглощённая радиация, болометрический приёмник, шкала измерений, погрешности измерений.

Введение

Измерения уходящей коротковолновой радиации (УКР) аппаратурой ИКОР имеют уже довольно долгую историю. В конце 70-х годов прошлого века по заказу штаба ВВС страны в Саратовском государственном университете начались работы по созданию аэростатной аппаратуры для измерений УКР с высотных аэростатов (высота полёта до 35 тысяч метров), было создано несколько модификаций радиометра ИКОР. Состоялся ряд подъёмов аппаратуры с публикацией результатов измерений. Подробности и итоги подведены в статье (Скляр и др., 1994). Совершенствование аппаратуры продолжалось. В 1994-95 гг. аппаратура ИКОР с объединёнными цепями питания с нашим солнечным радиометром ИСП (измеритель солнечной постоянной) работала на ИСЗ «Метеор-3» №7 в составе российско-французского эксперимента ScaRaV. Результаты публиковались как в России (Скляр и др., 1996, 1999, 2009) так и за рубежом (Sklyarov et al., 1994, 1996, 1998, 2001). Бортовые сличения французской сканирующей аппаратуры ScaRaV и ИКОР показали вполне удовлетворительное совпадение шкал обоих радиометров, их близость к результатам американских приборов (Скляр и др., 1999). Спутник проработал немногим более года.

В 1998-99 гг. аналогичная аппаратура на этот раз с единым блоком электроники (также с радиометром ИСП-2) работала на ИСЗ «Ресурс-01» №4. Спутник в течении активного периода работал в режиме отладки. Тем не менее, был получен значительный материал наблюдений, выполнена их обработка (Скляр, 1990; Скляр и др., 2001, 2002, 2003, 2005). Все указанные модификации радиометра ИКОР отличались одной особенностью. Блок электроники и управления размещался в герметичном отсеке космических аппаратов, снаружи находился только блок приёмников излучения. По материалам, полученным с названных ИСЗ, в МГУ и Казанском ГУ были успешно защищены 3 диссертации (Котума, 1998; Семёнова, 2003; Фомина, 2009).

В 2003 г. научному коллективу Ю.А. Склярова (главный конструктор) было предложено создать полностью автономный радиометр, получивший название ИКОР-М. На ИСЗ нового поколения «Метеор-М» №1 не планировалась установка электронного модуля управления в герметичном отсеке. Весь радиометр должен был размещаться в едином наружном блоке.

Наличие новейшей электронной техники и соответствующих технологий позволили решить эту задачу. Вывод на орбиту КА «Метеор-М» №1 состоялся 16 сентября 2009 г. Полноценная информация стала поступать с ноября 2009г. До сих пор в работе ИКОР-М не было ни одного сбоя, за исключением плановых кратких «каникул» для ИСЗ с 1 по 11 января 2010. Если учесть, что отсчёты измеряемых потоков производятся каждую секунду - можно понять какой огромный массив информации уже получен.

Радиометр третьего поколения ИКОР-М

Аппаратура ИКОР-М (рис.1а, 1б). предназначена для измерений уходящей коротковолновой радиации (УКР) на верхней границе атмосферы. Это дает возможность получать значения альбедо и поглощенной солнечной радиации, как составляющих радиационного баланса Земли, и осуществлять их мониторинг. Данный прибор третьего поколения создан в виде единого автономного блока, включающего в себя собственно приемник излучения и электронную систему управления.

В радиометре третьего поколения ИКОР-М используются болометрические приемные элементы (ПЭ) с встроенными компенсационными нагревателями – рабочий и опорный. Первый через оптический фильтр обращен в сторону входной апертуры, второй, идентичный рабочему, затенен, направлен в противоположную сторону и служит для компенсации изменений температуры корпуса прибора (рис. 1б).

Оба ПЭ изготовлены по возможности идентичными и представляют собой круглые однослойные спирали бифилярной намотки, собранные на круглом металлическом основании. Толщина спиралей 0,05 мм, основания – 0,1 мм. Прилегающая к основанию спираль является болометром, выполнена из медной проволоки (большой температурный коэффициент сопротивления ТКС). Спираль нагрева смонтирована на болометре, изготовлена из манганиновой проволоки (ничтожный ТКС), чтобы избежать проблем с изменением её сопротивления при изменениях её температуры. Оба пакета в каждом ПЭ размещены на металлических теплоотводах. Теплоотводы изготовлены по возможности идентично, являются одинаковой термической нагрузкой для ПЭ и смонтированы на едином теплостоке, роль которого выполняет план-шайба (рис. 1б), передающая генерируемые тепловые потоки от обоих ПЭ к корпусу радиометра. План-шайба выполнена из чистой меди, имеет хороший тепловой контакт с корпусом радиометра (также изготовлен из чистой меди) и постоянно принимает температуру корпуса. Таким образом, оба ПЭ через теплоотводы при изменении подаваемой в них мощности получают приращение температуры ΔT относительно одного и того же элемента конструкции – план-шайбы (и корпуса). При массе ПЭ ≈ 1 г и массе корпуса 2 кг понятно, что выравнивание температуры ПЭ не вносит возмущений в температуру корпуса.

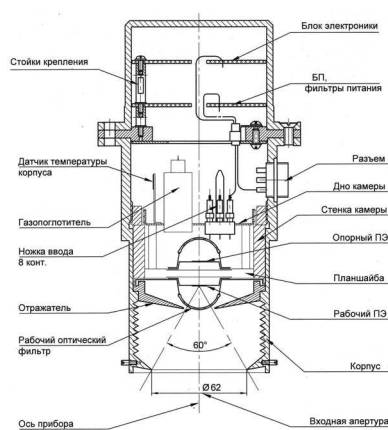


Рис. 1 Радиометр ИКОР-М а) внешний вид; б) схематический разрез

Оба болометра ПЭ включены в плечи измерительного моста сопротивлений. Структурно ИКОР-М состоит из приемника излучения, устройства управления, устройства вывода информации и блока питания (рис. 2, 3).

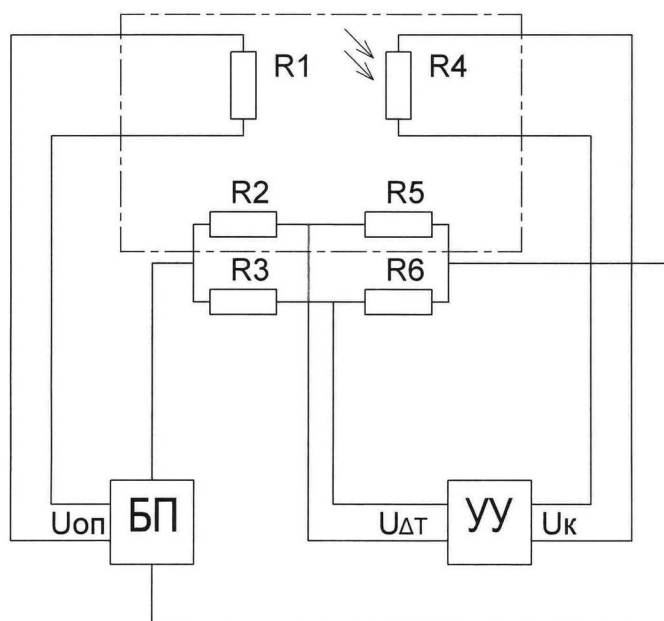


Рис. 2. Приёмник излучения ИКОР-М. Схема эквивалентная

Условные обозначения: УУ – устройство управления; БП – блок питания; R1 и R4 – резисторы электрических нагревателей; R2, R3, R5, R6 – резисторы моста (R1 и R2 – входят в состав опорного ПЭ, R4 и R5 – в состав рабочего ПЭ); Uоп, UΔT, Uк – рабочие напряжения. Детали, входящие в опорный и рабочий ПЭ (R1, R2 и R4, R5 соответственно) вместе со средствами крепления и тепловодами размещены в вакуумной камере и образуют приёмник излучения.

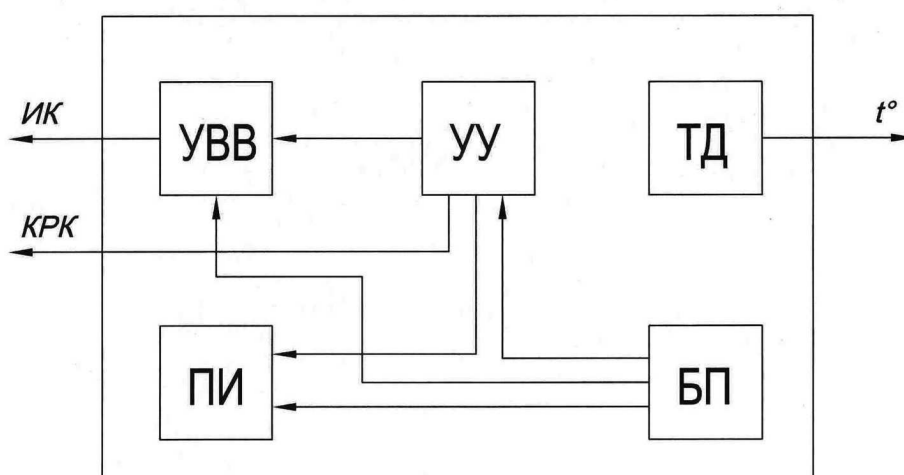


Рис. 3. ИКОР-М. Схема структурная

Условные обозначения: УВВ – устройство ввода-вывода; УУ – устройство управления; ТД – температурный датчик; ПИ – приёмник излучения; БП – блок питания; ИК – информационный канал; КРК – контроль радио-команд

Весь датчик в сборе смонтирован в камере, вакуумированной до давления 1×10^{-4} мм.рт.ст. Входной оптический фильтр является частью этой камеры (сварен с ней). Вакуумная камера и весь блок электроники размещены в общем металлическом теплоемком корпусе. Радиометр расположен на ИСЗ так, что его оптическая ось постоянно направлена в надир.

При включении радиометра, в отсутствие радиации, в нагреватель опорного ПЭ подается заданное напряжение $U_{оп}$, мощность которого с большой точностью сохраняется неизменной. Измерительный мост настроен так, что устройство управления одновременно подает напряжение в нагреватель рабочего ПЭ, мощность которого балансирует мост (рис.2). Обе эти мощности практически равны (приемные элементы по возможности идентичны и размещены на едином теплостоке). При освещении рабочего ПЭ напряжение разбаланса в диагонали моста УДТ измеряется с помощью прецизионного аналого-цифрового преобразователя и подается в микроконтроллер устройства управления. Здесь производится формирование управляющего воздействия. С помощью встроенного в микроконтроллер цифро-аналогового преобразователя формируется напряжение U_k , которое через согласующий усилитель подается в нагреватель рабочего ПЭ, обеспечивая балансировку моста. При этом температура рабочего ПЭ с требуемой точностью поддерживается равной температуре опорного ПЭ. Разность мощностей электрического тока, выделяемых в нагревателях, пропорциональна мощности падающего на рабочий ПЭ излучения. Значения сопротивлений нагревателей известны и хранятся в энергонезависимой памяти микроконтроллера устройства управления. Вычисление результата измерений сводится к определению мощности электрического тока в нагревателе рабочего ПЭ, что осуществляется под управлением программы в микроконтроллере. Результаты измерений подвергаются фильтрации и масштабированию, после чего под управлением микроконтроллера через УВВ передаются во внешний накопитель данных. Кроме того, одновременно выводится температура корпуса ИКОР-М, что позволяет в дальнейшем с помощью математической обработки устранить возможный долговременный температурный дрейф рядов измерений УКР.

Градуировка ИКОР-М производится по прямой солнечной радиации с использованием прецизионных пиргелиометров, привязанных к эталону. Метод калибровки – «на перпендикулярную поверхность», применяемый для калибровки пиранометров. Для этого радиометр ИКОР-М вставляется в специальную актинометрическую трубу, имеющую входную апертуру, равную апертуре применяемого пиргелиометра (чем снимается возможная погрешность из-за влияния околосолнечного ореола). Вакуумирование приемника излучения позволяет полностью избежать взаимного влияния приемных элементов из-за конвективных потоков при изменении положения корпуса радиометра (в особенности, при его калибровке). Известно, что у обычных пиранометров требуемая точность соблюдения горизонтальной установки порядка двух градусов. ИКОР-М в принципе не меняет установившихся показаний при любом направлении его оси.

Технические характеристики ИКОР-М:

Энергетический диапазон – 50–500 Вт/м², спектральный диапазон – 0,3–4,0 мкм, относительная погрешность измерений – не более $\pm 1\%$, постоянная времени – не более 10 с, угол обзора - 60°, режим работы – непрерывный, скорость отсчетов 1/с.

Погрешности измерений и ограничения

Погрешности измерения конечного продукта (альbedo, поглощённая радиация) складываются из погрешностей всех звеньев измерительной цепочки. Прежде всего – это погрешность отсчётов радиометра. Приведённая выше величина $\pm 1\%$ получена нами из оценок конструктивных особенностей прибора. Теперь, после двух лет работы, есть возможность оценить погрешности отсчётов из реального ряда ежесекундных отсчётов. Радиометр ИКОР-М даёт отсчёты из четырёх значащих цифр кодовых величин рабочих напряжений. В таком случае погрешность отсчёта не превосходит 0,1%. Далее следует погрешность калибровки. При средних условиях погоды и требованиях к процедуре калибровки (отсутствие облаков в пределах 10° от солнечного диска, также малая мутность атмосферы, отсутствие ветра,

либо его минимальные величины, по возможности стабильная температура окружения) получены за несколько дней сличения показаний радиометра и прецизионного пиргелиометра. Наша группа прецизионных пиргелиометров на протяжении 20 лет получала свидетельства от ГГО им. А.И. Воейкова о поддержании шкалы на уровне средств измерений I разряда, т.е. в пределах 0,1–0,2 %. Сама погрешность привязки радиометра ИКОР-М и контрольного пиргелиометра составила: СКО равно $\pm 0,2$ % по протоколу сличений.

Таким образом, погрешность отсчётов радиометра не превосходит 1%. Заметим также, что метод калибровки по Солнцу имеет ещё одно важное преимущество. Если бы радиометром ИКОР-М измерили солнечный поток, то влияния «фактора цвета» практически не ощущалось бы. Этот фактор возникает, когда сцена имеет спектр отличный от спектра Солнца. На деле это именно так, и всё же спектр большинства измеряемых сцен не очень сильно отличается от солнечного, природа света одна и та же (сравните спектр лампочки с температурой нити 2,8 тыс. градусов и Солнца, температура поверхности которого 5,8 тыс. градусов). Кроме того, функция чувствительности приёмника ИКОР-М практически плоская – значения близки к 0,9 (в диапазоне 0,35 – 2,6 мкм) и только на концах спектра снижена. Следовательно, приёмник ослабляет поступающее излучение практически одинаково. Мы обсуждали этот вопрос (Скляров и др., 1994) и нашли, что влияние цветового фактора незначительно.

Конечно, наибольший интерес представляет погрешность всего измерительного тракта, т.е. погрешность получения конечного продукта от «сырых» данных на орбите в кодах напряжения до требуемых величин (альbedo, поглощённая радиация). В этом случае вводится множество допущений (анизотропия отражённого от сцены потока, или её специфическая форма; выбор модели зависимости альbedo от зенитного угла Солнца, которая в реальности является статистически осреднённой; выбор суточной модели альbedo; деление подстилающей поверхности на ячейки; соглашение о том, что считать за отсчёт от данной сцены и т.д.). Этим вопросам мы уделяли большое внимание (Скляров, 1990; Скляров и др., 1993, 1996, 2005). Описание работы программ расчётов нового поколения, разработанных нашим коллективом, можно найти в статье (Скляров и др., 2012, в печати). Здесь же мы ограничимся некоторыми общими результатами.

Мы уже упоминали, что параллельные сличения на одном и том же ИСЗ «Метеор-3» №7 французской аппаратуры ScaRaV и нашего ИКОР дали неплохо коррелирующиеся результаты (коэффициент корреляции 0,97; разница показаний 2,5 Вт/м²).

Однако есть и другие ориентиры. Из нашего и международного опыта известно, что наиболее устойчивыми в течение длительного времени являются среднемесячные значения альbedo в приэкваториальной зоне +30°... -35° по обе стороны от экватора. Картинка от месяца к месяцу от года к году здесь меняется мало. Этот результат отражает все особенности методов получения и обработки информации. Для примера приводим результаты среднемесячных величин альbedo за одни и те же месяцы со спутника «Nimbus-7» США за 1987 год и нашего «Метеор-М» №1 (ИКОР-М) за 2010 год (рис.4). Видно, что некоторые различия есть (мы ещё вернёмся к обсуждению этого), но бросается в глаза общий ход, почти совпадающие величины и т.п. Во всяком случае можно считать, что измерения ведутся практически в одной и той же шкале с ожидаемой погрешностью около 3 % (будет уточняться).

Теперь об ограничениях наблюдений. Мы рассматривали проблему наблюдаемости с гелиосинхронных ИСЗ с произвольной ориентацией плоскости орбиты по отношению к солнечному меридиану (Скляров и др., 2005, 2009). У ИСЗ «Метеор-М» №1 плоскость орбиты ориентирована как и у «Ресурса -01» №4. Разница всего в несколько градусов. Мы нашли, что спутники с такой ориентацией плоскости орбиты существенно лучше и дольше наблюдают северное полушарие (СП). Конкретно для «Ресурс-01» №4 продолжительность (общая) наблюдений СП равна 208 суткам, а южное полушарие (ЮП) – 157. Это же мы отметили и для «Метеор-М» №1. Однако, в работе ИКОР-М обнаружили дополнительные

ные ограничения. По не совсем понятным причинам ИКОР, работая в непрерывном режиме, выдаёт нулевые измерения потока радиации на высоких северных широтах. Такое явление продолжается некоторое время после расчётного момента перехода линии терминатора при выходе спутника из теневой части. Аналогично, несколько раньше он прекращает выдавать информацию ещё до захода за терминатор в ЮП. Особенно резко это проявляется в летние дни СП. Здесь покрытие наблюдениями полное, практически до полюса (точнее до 85° северной широты, что и следует из анализа условий наблюдений). Зато в ЮП зима, у полюса и до 67° южной широты полярная ночь. А в этот период (июнь, июль) ИКОР выдаёт ненулевые показания в диапазоне широт южного полушария от экватора до 40° южной широты. Аналогичная картина в СП в зимний период (ноябрь-январь), но покрытие наблюдениями после выхода из-за терминатора начинается с 50°-55° северной широты. И это дополнительное ограничение держится устойчиво за всё время наблюдений. Это может быть следствием постоянного сдвига в работе электронной системы, в результате которого «обрезается» нижняя граница диапазона измерений, то есть диапазон шкалы измерений напряжения установился таким образом, что измерения минимальных фиксируемых величин (при передаче информации с ИСЗ, в силу ограниченности канала связи) при кодировании получаются равными нулю. Что сказывается в высоких южных и северных широтах, когда результаты измерений действительно имеют минимальные значения. Как бы то ни было, мы должны учитывать сложившуюся ситуацию.

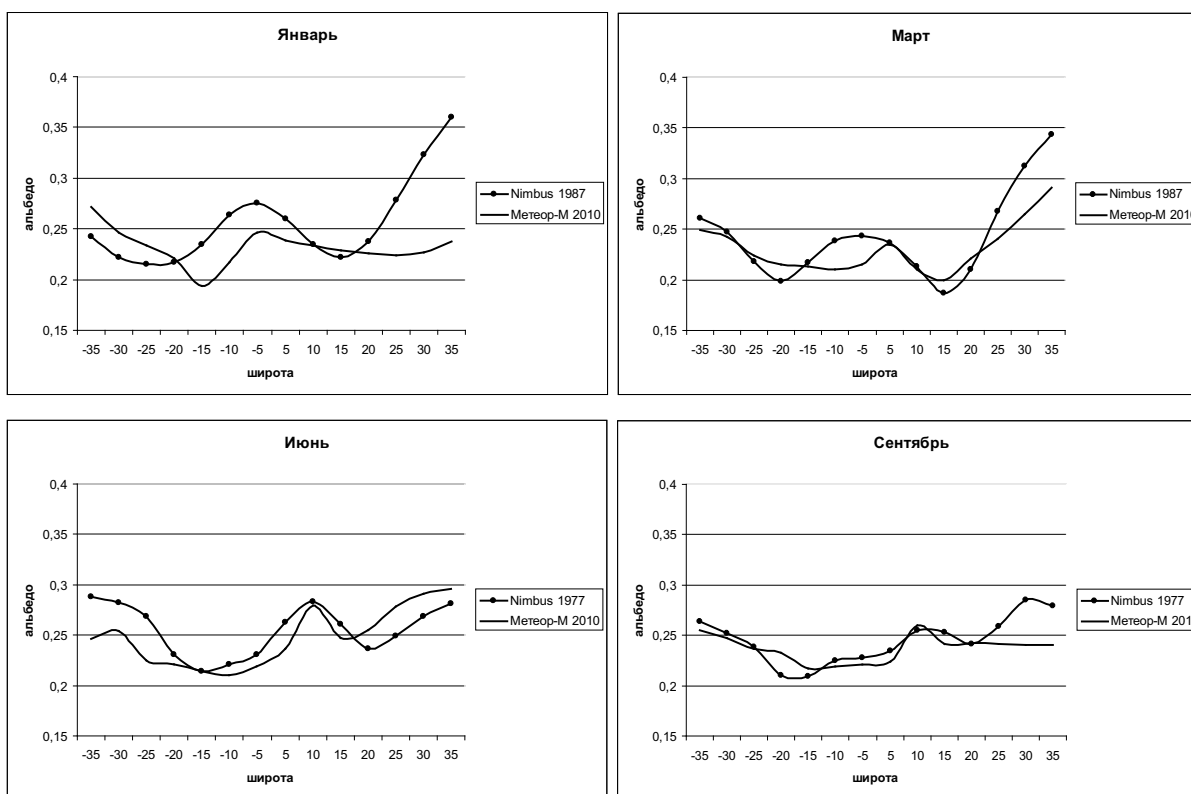


Рис. 4. Величины среднемесячных альбедо по измерениям с ИСЗ Nimbus-7 и «Метеор-М» №1 в различные месяцы

На рис. 5 приближённо изображён диапазон широт по месяцам, покрываемых наблюдениями. Если учесть, что площадь поверхности Земли между параллелями $\pm 30^\circ$ равна 0,5 общей площади земной поверхности, то можно видеть, что покрываемая наблюдениями территория всё же достаточно велика и позволяет решать целый ряд проблем, не только локальных, но и практически глобальных.

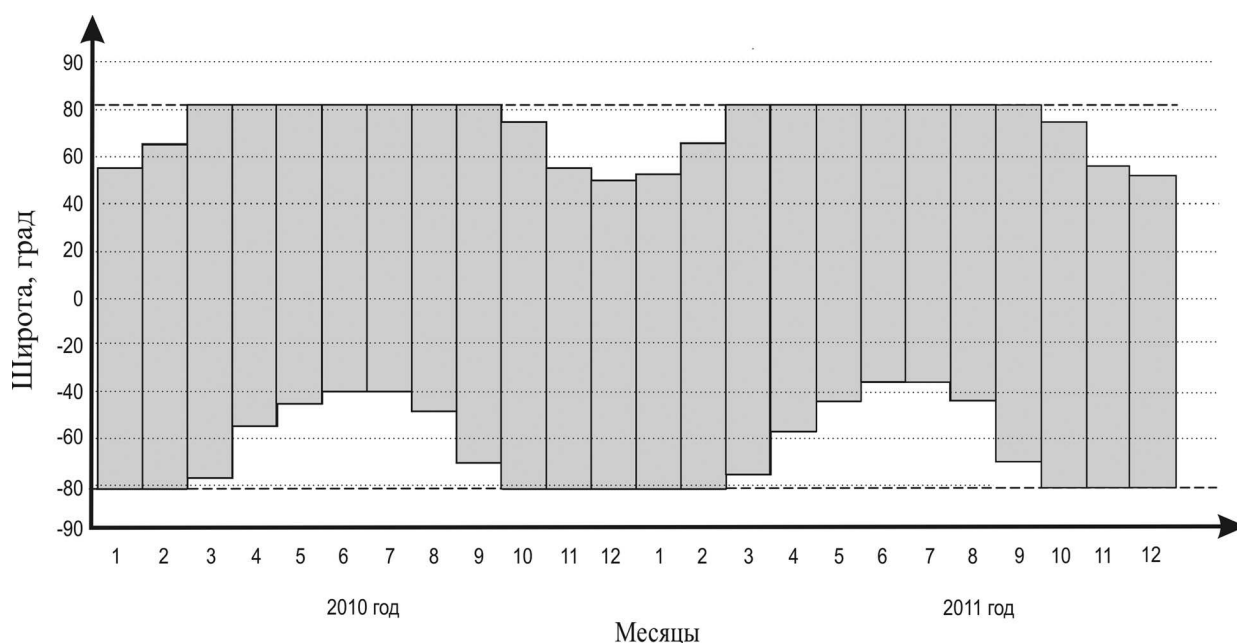


Рис. 5. Диапазон широт, покрываемый наблюдениями радиометром ИКОР-М по месяцам

Литература

1. Котума А.И. Уходящая коротковолновая радиация и альbedo системы Земля-атмосфера с ИСЗ «Метеор-3» №7. Диссертация канд. географ. наук. Саратов., 1998.
2. Семенова Н.В. Уходящая коротковолновая радиация и альbedo на верхней границе атмосферы по наблюдениям с гелиосинхронного ИСЗ «Ресурс-01» №4. Диссертация канд. географ. наук. Саратов., 2003.
3. Скляр Ю.А. Астрономические методы в географии и метеорологии // Саратов: Изд-во Саратов. Ун-та, 1990. 36 с.
4. Скляр Ю.А., Бричков Ю.И., Воробьев В.А. О двух методах спутниковых измерений уходящих радиационных потоков // Исследование Земли из космоса, 1993. №6. С.3-11.
5. Скляр Ю.А., Бричков Ю.И., Воробьев В.А., Котума А.И. Измерения уходящего коротковолнового излучения и альbedo радиометром ИКОР с ИСЗ «Метеор-3» № 7 // Исследование Земли из космоса, 1999. №2. С.15–26.
6. Скляр Ю.А., Бричков Ю.И., Воробьев В.А., Котума А.И. Об обработке данных спутниковых измерений уходящих радиационных потоков широкоугольными радиометрами // Исследование Земли из космоса, 1996. №3. С.48–56.
7. Скляр Ю.А., Бричков Ю.И., Воробьев В.А., Попова Е.П., Сазонов Л.Б. Аэростатные измерения уходящей коротковолновой радиации // Исследование Земли из космоса, 1994. №1. С.11-20.
8. Скляр Ю.А., Бричков Ю.И., Воробьев В.А., Сазонов Л.Б. Спутниковый измеритель коротковолновый отраженной радиации и его исследования // Метеорология и гидрология, 1992. №6. С.106–110.
9. Скляр Ю.А., Бричков Ю.И., Котума А.И., Фомина Н.В. Исследования уходящего коротковолнового излучения и альbedo с ИСЗ «Ресурс-01» №4 // Тр. Междун. конф. «Математические и физические методы в экологии и мониторинг природной среды». М.: Изд-во МГУЛ, 2001. С.176–182.
10. Скляр Ю.А., Бричков Ю.И., Семенова Н.В. Радиационный баланс Земли. Введение в проблему // Саратов: Изд-во Саратов. Ун-та, 2009. 185 с.
11. Скляр Ю.А., Бричков Ю.И., Фомина Н.В., Котума А.И., Семенова Н.В. Определение среднесуточных величин альbedo с использованием спутниковых направленных моделей // Исследование Земли из космоса, 2005. №3. С.13–21.

12. *Скляр Ю.А., Воробьёв 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
13. *Скляр Ю.А., Котума А.И., Семенова Н.В., Бричков Ю.И., Скляр В.П.* О построении карт глобального распределения альbedo по наблюдениям Радиометра ИКОР с гелиосинхронного ИСЗ «Ресурс-01» №4. // Исследование Земли из космоса, 2003. №3
14. *Скляр Ю.А., Семенова Н.В., Котума А.И.* Оценка условий наблюдений земной поверхности среднеугольным радиометром ИКОР с орбиты гелиосинхронного ИСЗ «Ресурс-01» №4. // Исследование Земли из космоса, 2002. №4 С.14–20.
15. *Фомина Н.В.* Глобальное распределение составляющих радиационного баланса Земли по данным ИСЗ России и США. Диссертация канд. географ. наук. Саратов., 2009.
16. *Sklyarov Yu.A., Brichkov Yu.I., Vorobyov V.A., Kotuma A.I.* Concerning the processing of the outgoing radiation fluxes satellite measurements by wide field of view radiometers // Minutes of the Third International ScaRaB Science Working Group Meeting. Budapest, Hungary. November 6-8, 1996. Annex 9.5. P.1–3.
17. *Sklyarov Yu.A., Brichkov Yu.I., Vorobyov V.A., Kotuma A.I., Sazonov L.B.* Satellite Short-wave Outgoing Radiation Monitor // International Workshop on VUV and X-Ray Radiometry for Space-Based Instruments. Proceedings. Berlin. PTB. 22-23 Sept., 1994. P.73–76.
18. *Sklyarov Yu.A., Brichkov Y.I., Vorobyov V.A., Kotuma A.I., Fomina N.V.* Radiometric measurements from Russian satellites «Meteor-3» №7 and «Resurs-01» №4 // In: IRS-2000: Current problems in atmospheric radiation. / Proc. Int. Radiation Symp. St. Petersburg. 2000. Ed. W.L.Smith, Yu.M.Timofeyev. Deepak Publ. Hampton. Va. USA, 2001. P.571–574.
19. *Sklyarov Yu.A., Brichkov Yu.I., Kotuma A.I.* Some results of measurements received by IKOR Radiometer from «Meteor-3» №7 Satellite. Proceeding of the Fifth International ScaRaB Science Working Group Meeting. Paris, France, 1998, Annex 3.

The measurement of the radiation balance component from “Meteor-M” satellite. The IKOR-M radiometer

Yu.A. Sklyarov¹, V.A. Vorobyov¹, A.I. Kotuma¹, M.Yu. Chervyakov¹, V.M. Feigin²

*¹Saratov State University
410012 Saratov, 83 Astrakhanskaya st.
E-mail: kafmeteo@sgu.ru*

²Research Center for Earth Operative Monitoring, Moscow

A brief summary about works concerning the development in Saratov State University some radiometers «Short-wave outgoing radiation monitor» (IKOR) of three generations is given. This apparatus are intended for measurement from satellites of outgoing shortwave radiation (OSR) that gives possibilities to receive instant and daily averaged albedo values, absorbed solar radiation, and also monthly averaged values. The principle of work, the design, the calibration method and other data concerning the radiometer of third generation IKOR-M are given in details. This radiometer is working from the 2009 on «Meteor-M» №1 satellite. The scientific information is received from the November 2009, with the 1/s rate. The radiometer has no interruption in work. This paper contains the different evaluation of main errors of the measurements. The scale of measurements are close enough to the well-known scales of other radiometers.

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