

Экспериментальные исследования и перспективы развития системы валидационных подспутниковых наблюдений

И. Г. ЖУРКИН, Г. Г. СЫЧЕВ, Л. Н. ЧАБАН, В. С. ГРУЗИНОВ

Московский государственный университет геодезии и картографии,
Москва, Россия, e-mail: zhurkin@miigaik.ru

Разработаны тест-объекты и программно-методическое обеспечение для измерений пространственного разрешения материалов, используемых в аэрокосмической съемке в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Рассмотрены результаты экспериментальной апробации методики измерений, а также перспективы дальнейшего использования комплексного тестового полигона для валидации спектрометрических характеристик съемочной аппаратуры космических комплексов дистанционного зондирования Земли.

Ключевые слова: наземная инфраструктура, валидация, космические системы, дистанционное зондирование, тестовый полигон, пространственное разрешение.

The article contains the description of the developed test-objects and of the methodical software for measuring the spatial resolution of aerospace imaging in VNIR range. The results of experimental approbation of measurement procedure and the prospects of further use of complex testing area of MIIGAik for validation of spectrometric characteristics of space remote sensing of Earth are considered.

Key words: ground infrastructure, validation, space systems, remote sensing, testing area, spatial resolution.

Надежная работа космических комплексов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) достигается при их регулярной валидации, т. е. определении технических параметров съемочной аппаратуры в режиме орбитальной эксплуатации. Космические комплексы ДЗЗ можно рассматривать как измерительные, тогда процесс валидации включает проверку съемочной аппаратуры в процессе ее использования.

Валидация космических систем ДЗЗ связана с необходимостью контроля таких технических параметров съемочной аппаратуры, как пространственно-частотные, координатно-измерительные и спектрометрические характеристики.

Для отслеживания контролируемых параметров используют как бортовые, так и внешние средства проверки. Важным инструментом является система валидационных подспутниковых наблюдений (СВПН), назначение которой — контроль характеристик получаемой из космоса информации, повышение качества результатов функционирования целевой аппаратуры космических комплексов ДЗЗ при анализе результатов наблюдений и подготовки данных для калибровки и настройки бортовой съемочной аппаратуры, а также средств приема и обработки информации [1].

Составная часть СВПН — тест-объекты, расположенные на экспериментальных участках и учебных геополигонах МИИГАиК в Московской области. Тест-объекты представляют радиальные миры, которые можно использовать как для контроля пространственно-частотных характеристик, так и для координатных измерений. Радиальные миры имеют непрерывный характер изменения пространственной частоты и поэтому позволяют более гибко оценивать разрешающую способность аппаратуры. Наземная инфраструктура геополигонов для выполнения необходимого комплекса регулярных подспутниковых наблюдений позволяет задействовать их для валидации спектрометрических характеристик.

Комплект радиальных мир в составе СВПН включает три тест-объекта: стационарную радиальную миру (СРМ); пере-

носную пневматическую радиальную миру (ППМ) [2]; секторную стационарную радиальную миру (ССРМ).

Каждый из тест-объектов в виде миры имеет поверхность с нанесенным рисунком, с контрастом выше 0,6, и обеспечивает диффузное неселективное отражение солнечного излучения в спектральном диапазоне 400—1000 нм. Значения интегрального коэффициента отражения не меняются более чем на 10 % при проведении измерений под углами $\pm 45^\circ$ от вертикали при угловых направлениях на Солнце 0, 90, 270° .

Радиальные миры [2, 3] предназначены для определения линейного разрешения и разрешающей способности целевой аппаратуры космического комплекса ДЗЗ видимого диапазона, позволяют контролировать указанные характеристики в диапазоне пространственного разрешения 0,5—3,0 м и представляют правильный 16-угольник с чередующимися черными и белыми треугольниками, размер внешней стороны которого составляет $3 \pm 0,1$ м. В угловых участках квадратного полотнища с изображением миры СРМ нанесены дополнительные цветные поля. Вес изделия ППМ не превышает 250 кг, и его установку на местности можно выполнить в течение одного часа.

Секторная стационарная радиальная мира обеспечивает контроль указанных характеристик в диапазоне 0,5—3,6 м. Эта мира представляет многоугольник, образованный девятью чередующимися черными и белыми равнобедренными треугольниками, размер основания треугольника составляет $3,6 \pm 0,1$ м, а боковая сторона — 18,3 м.

Для измерения и контроля фотометрических характеристик на поверхности мир имеются съемные контрольные образцы-свидетели соответствующих цветов (по восемь темных и светлых образцов). Размеры контрольных образцов-свидетелей — не менее 100×100 мм.

Испытания тест-объектов проводили на экспериментальных участках на территориях МИИГАиК и его Заокского геополигона. В ходе испытаний проведены космические

съемки тест-объектов средствами современных российских («Ресурс-П», «Канопус-В») и зарубежных космических комплексов ДЗЗ и вычислены характеристики пространственного разрешения полученных материалов.

Исследования по разработке комплекса радиальных мир и программно-методического обеспечения для контроля характеристик целевой аппаратуры видимого диапазона выполняли при участии Научного центра оперативного мониторинга Земли ОАО «Российские космические системы».

Метод измерений разрешающей способности и линейного разрешения на местности (ЛРМ) по изображению радиальной миры основан на том, что для заданного значения порогового контраста K_n и каждого направления α находится такая наименьшая окружность радиусом R_0 , за центр которой принимается геометрический центр миры, вдоль которой контраст ее изображения в пределах углового периода не меньше порогового значения [3]. Контраст для различных R , α рассчитывается по формуле

$$K = (B_{\max} - B_{\min}) / (B_{\max} + B_{\min}),$$

где $B_{\max}$, $B_{\min}$ — наибольшее и наименьшее значения оптического сигнала для изображения равномерно распределенных точек дуги окружности радиуса R в пределах углового периода миры.

Координаты точек изображения миры определяют по формулам их трансформирования на плоскость полученного изображения. Вычисляемые значения контраста $K(R, \alpha)$ позволяют найти для всех значений α такие наименьшие радиусы $R_0(\alpha)$, для которых $K(R_0, \alpha) \geq K_n$.

Для углового размера секторной миры Φ и количества секторов n_s длина дуги $L = \Phi R_0 / n_s$, вырезаемой сектором

миры из найденной окружности, равна значению ЛРМ, а значение $N = 1/(2L)$ — разрешающей способности на местности.

Для круговой миры $\Phi = 2\pi$, каждому направлению α , в котором определяют разрешение, соответствуют два значения радиуса R_0 : $R_0(\alpha)$ и $R_0(\alpha + 180^\circ)$, а за окончательное значение $R_0(\alpha)$ принимают их среднее значение.

Метод измерения разрешающей способности включает оценку точности определения этого параметра и ЛРМ, которая предусматривает возможность вычисления точностных характеристик процесса измерения по одному снимку на основе статистической обработки значений, имеющих для различных направлений. Для каждой измеряемой величины X (разрешающей способности или ЛРМ) вычисляют сред-

ние значения $X_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ и стандартные отклонения σ :

$$\sigma = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_0)^2}{n-1} \right]^{1/2},$$

где n — количество направлений, по которым определены разрешающая способность и ЛРМ; i — номер направления.

По найденным значениям вычисляют относительную погрешность измерения $\sigma_{\text{отн}} = \sigma/X_0$. Если значение $\sigma_{\text{отн}}$ не превышает 15 %, то точность определения разрешающей способности и ЛРМ является удовлетворительной.

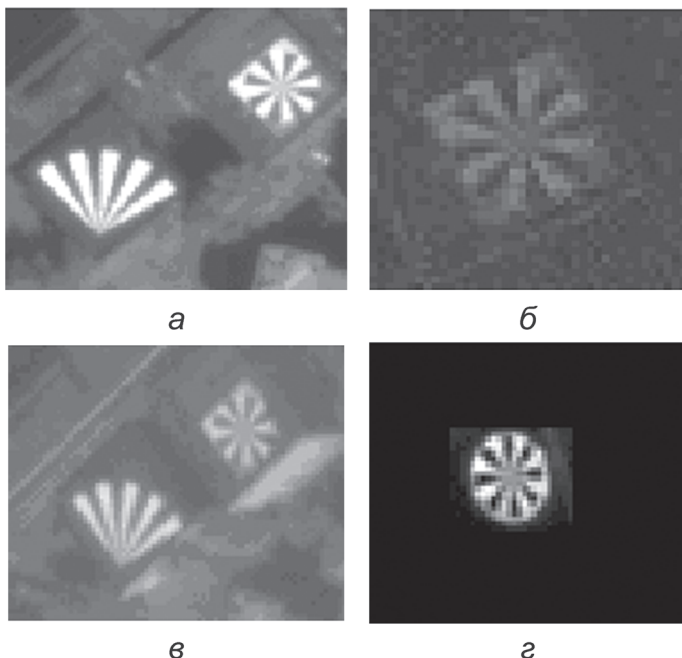
По изложенной выше методике были проведены экспериментальные исследования с использованием специального программного обеспечения [4] для оценки разрешающей способности съемочных систем, установленных на борту космического аппарата в процессе орбитальной эксплуатации. Приведем некоторые результаты исследований для съемочных систем, установленных на спутниках «Ресурс-П» и «Ikonos».

Изображения СРМ, ССРМ и ППМ, полученные с данных спутников, показаны на рисунке. Исходные данные условий съемки мир с указанных спутников и геометрические параметры этих мир приведены в табл. 1. Снимки а, в сделаны в разные дни и при различных наклонах съемочной камеры. На снимке б приведено изображение миры СРМ со спутника «Ikonos», а на снимке г — изображение миры ППМ, снятое аппаратурой спутника «Ресурс-П». В табл. 2 даны результаты расчета разрешающей способности и ЛРМ, выполненных по изложенной выше методике для значений порогового контраста 0,1 и 0,05.

На основании анализа результатов экспериментальных исследований авторами были сделаны выводы, что точность определения пространственно-частотных параметров космических комплексов ДЗЗ по радиальной миры зависит от качества и типа тестового объекта, заданного порогового контраста, геометрических и метеорологических условий съемки, точности задания исходных данных, а также от точности определения координат центра изображения миры.

Успешный запуск 25 июня 2013 г. космического комплекса «Ресурс-П» № 1 доказал актуальность проблемы валидации спектрорадиометрических характеристик космической съемочной аппаратуры.

Для проведения мероприятий по валидации яркостных радиометрических характеристик гиперспектральной аппаратуры необходимо использовать крупные наземные эталоны с высокой отражательной способностью (пески, соляные озера и т. п.). На территории полигонов МИИГАиК такие



Изображения мир, полученные со спутников:

а, в — «Ресурс-П» (стационарная радиальная миры и секторная стационарная радиальная миры);

б — «Ikonos» (стационарная радиальная миры);

г — «Ресурс-П» (переносная пневматическая радиальная миры)

Таблица 1

Условия съемки и параметры мир

Изображение	Космический аппарат	Высота съемки, км	Фокусное расстояние, м	Угол наклона камеры, °	Типы мир	Параметры мир		
						количество секторов	радиус, м	угловой размер
а	«Ресурс-П»	465	4	2,4	СРМ ССРМ	16 9	7,5 18,3	360° 101°15'
б	«Ikonos»	680	10	4	СРМ	16	7,5	360°
в	«Ресурс-П»	467	4	34,5	СРМ ССРМ	16 9	7,5 18,3	360° 101°15'
г	«Ресурс-П»	467	4	34,5	ППМ	16	7,5	360°

Таблица 2

Результаты расчета разрешающей способности (РС) и линейного разрешения на местности

Изображение	Космический аппарат	Контраст	Минимум		Максимум		Средние значения		Стандартные отклонения		Относительная погрешность	
			РС, м ⁻¹	ЛРМ, м	РС, м ⁻¹	ЛРМ, м	РС, м ⁻¹	ЛРМ, м	РС, м ⁻¹	ЛРМ, м	РС	ЛРМ
а	«Ресурс-П» Мира СРМ	0,1	0,48	0,89	0,56	1,04	0,52	0,97	0,03	0,05	0,06	0,06
		0,05	0,56	0,60	0,83	0,89	0,67	0,76	0,10	0,11	0,15	0,14
б	«Ikonos» Мира СРМ	0,1	0,43	0,87	0,57	1,16	0,50	1,01	0,06	0,12	0,11	0,12
		0,05	0,58	0,27	1,83	0,86	0,98	0,61	0,53	0,22	0,54	0,36
в	«Ресурс-П» Мира СРМ	0,1	0,32	1,25	0,40	1,56	0,37	1,35	0,03	0,11	0,08	0,08
		0,05	0,42	0,93	0,54	1,20	0,48	1,06	0,05	0,11	0,10	0,10
г	«Ресурс-П» Мира ССРМ	0,1	0,32	0,48	1,04	1,55	0,46	1,22	0,24	0,33	0,51	0,27
		0,05	0,37	0,28	1,82	1,34	0,61	1,05	0,49	0,33	0,81	0,32
д	«Ресурс-П» Мира ППМ	0,1	0,53	0,72	0,69	0,94	0,61	0,82	0,06	0,08	0,10	0,10
		0,05	0,65	0,58	0,86	0,77	0,76	0,66	0,08	0,07	0,11	0,11

объекты отсутствуют, однако их можно применять для выполнения спектральной калибровки.

Данные спектральной калибровки включают положение центров каналов (и их ширину) на шкале длин волн электромагнитного спектра регистрируемого излучения. Высокая точность спектральной калибровки является специфическим требованием к техническим характеристикам гиперспектральной аппаратуры, в том числе и установленной на комплексе «Ресурс-П». Поскольку основное преимущество гиперспектральных снимков состоит в получении детальной зависимости спектральной яркости пиксела от длины волны, даже небольшое смещение истинного положения каналов от данных предполетной калибровки может привести к значительным погрешностям при решении прикладных задач.

Низкая точность спектральной калибровки проявляется при выполнении атмосферной коррекции гиперспектральных снимков. Атмосферная коррекция необходима для приведения анализируемых спектральных кривых к единой шкале, в частности при поиске определенных типов объектов по их эталонам из спектральных библиотек. В результате смещения центров каналов при пересчете значений яркости к коэффициентам отражения в тех диапазонах длин волн, где

присутствуют полосы поглощения излучения водяными парами и другими компонентами атмосферы, на кривой спектрального альбеда образуются ложные выбросы-пики. Смещение спектральной калибровки отрицательно сказывается и на расчете узкополосных вегетационных индексов, и на результатах тематической классификации гиперспектральных изображений.

Опыт штатной эксплуатации космических гиперспектральных систем, в частности аппаратуры Hyperion (EO-1, США, 2000 г.), показывает, что спектральные калибровочные характеристики наиболее чувствительны к экстремальным условиям функционирования аппаратуры на орбите. К факторам, вызывающим изменение спектральных характеристик системы, относятся дегазация, старение оптических и электронных компонентов, перекосы из-за механических колебаний. Последний фактор может оказывать влияние и на калибровочные характеристики авиационной гиперспектральной аппаратуры. Все это требует систематического контроля спектральной калибровки аппаратуры в процессе ее эксплуатации.

Особенности конструкции гиперспектральной аппаратуры и ее функционирования приводят к смещению центров каналов для различных пикселей в строке (поперек

направления съемочного трека). Это явление вызвано отклонением луча в оптической системе от расчетного и может иметь различное происхождение. Из-за нелинейной зависимости смещения от номера пиксела в строке его иногда называют «смайлингом» [5]. Обычно такое смещение невелико (в пределах 2 нм) и при ширине каналов около 10 нм для ряда задач не имеет принципиального значения. Однако, как показывает практика, этот эффект проявляется на объектах, имеющих участки быстрого изменения зависимости спектральной яркости пиксела от длины волны (спектральной кривой). В частности, он ярко выражен на спектральных кривых растительности в районе так называемого «красного края» — резкого подъема спектральной кривой на границе видимого и ближнего инфракрасного диапазонов. Поскольку положение «красного края» на спектральных кривых растительного покрова используется при ранней диагностике стрессовых состояний растительности, учет «смайлинга» в этой группе задач совершенно необходим.

В существующих методах орбитальной спектральной калибровки можно выделить два основных подхода: на основе анализа отснятых сцен и с использованием бортовых аппаратных средств. В том и другом подходе используют полосы поглощения солнечного излучения известными газовыми компонентами атмосферы.

Примером первого подхода может служить метод, разработанный членами Американского оптического общества (OSA) [6], который основывается на минимизации упомянутых выше ложных выбросов в окрестности полос поглощения, возникающих при смещении центров каналов. Для решения задачи данных на изображении выбирают известные объекты с гладким спектром отражения в рабочем диапазоне аппаратуры, измеренным лабораторным или полевым спектрорадиометром.

Определение точного положения центров каналов состоит из двух основных процедур:

атмосферной коррекции изображения эталонного объекта земной поверхности на основе модели переноса излучения (пакет MODTRAN);

одномерной итерационной оптимизации положения центров каналов, обеспечивающей максимально точное совпадение кривой рассчитанного по ее атмосферной модели спектрального альbedo с эталонным образцом.

Метод был апробирован на данных с авиационной (HyMap, AVIRIS, ROSIS) и космической (PROBA/CHRIS) гиперспектральной аппаратуры, погрешности во всех случаях были успешно удалены или минимизированы.

Успешное использование данного метода во многом зависит от адекватности модели переноса излучения текущим условиям съемки. На момент получения изображения тестовых объектов с максимальной точностью должны быть определены все необходимые параметры модели. Следовательно, точность оптимизации в значительной степени будет зависеть от текущего состояния атмосферы и возможности выполнения соответствующей серии измерений.

При запуске космической аппаратуры Hyperion (242 канала в диапазоне 400—2500 нм), установленной на спутнике EO-1, были предусмотрены бортовые средства выполнения орбитальной калибровки, в том числе специальный прибор для измерения текущих параметров атмосферы: LEISA (Linear Etalon Imaging Spectral Array) Atmospheric Corrector. Кроме этого, на внутреннюю крышку окуляра прибора была нанесена белая диффузная краска с известными линиями поглощения в диапазонах 1600—1800 и 2200—2500 нм. Для выполнения орбитальной калибровки [7] аппаратурой

Hyperion выполняют три вида съемок. Сначала снимают спектр солнца поверх атмосферы, затем аппаратура разворачивается, и в определенные моменты времени с интервалом в 12 с фотографирует солнце через различные слои атмосферы. После этого фотографируют крышку прибора в полузакрытом состоянии под углом 37°. На основе полученных данных калибровку выполняют следующим образом:

рассчитывают профили атмосферы и спектры с аппаратуры Hyperion с учетом эффектов отражения от крышки прибора в пакете MODTRAN;

эталонный спектр краски, полученный со спектральным разрешением 0,5 нм, адаптируют к спектру Hyperion путем линейной гауссовой фильтрации;

для каждого пиксела в строке (с учетом «смайлинга») рассчитывают корреляцию локальных особенностей (минимумов и максимумов) эталонных и вычисленных спектров. Местоположения минимумов и максимумов определяют как локальные экстремумы кубических сплайнов;

интерполируют результаты на весь рабочий диапазон с использованием полиномов низкого порядка.

Недостаток данной методики состоит в том, что характерные особенности спектров атмосферных профилей и краски сосредоточены преимущественно в коротковолновом инфракрасном диапазоне (1200—2500 нм). Интерполяция в этом интервале обеспечивает точность определения положения каналов 1,1 нм, которая не позволяет полностью устранить эффект «смайлинга», что показывают как результаты калибровки отдельных каналов, приведенные в [7], так и результаты выполнения атмосферной коррекции методом FLAASH (пакет ENVI), включающим алгоритм NODD коррекции «смайлинга» [5]. Однако для задач, связанных с поиском материалов и минералов, имеющих характерные свойства спектров отражения в диапазоне 1200—2500 нм, этой точности оказывается достаточно [5].

Проблема орбитальной калибровки видимого и ближнего инфракрасного диапазонов остается открытой. В описанной выше методике [7] для этой цели были использованы всего две линии: линия поглощения кислородом (762,5 нм) и линия солнечного спектра на длине волны 520 нм. При этом результаты, полученные для канала 762,5 нм, заметно расходятся с результатами предполетной калибровки как по положению канала в целом, так и по вкладу эффекта «смайлинга». Вопрос влияния этого эффекта и его устранения требует дальнейшего изучения [5].

С учетом этих недостатков методика спектральной калибровки по отснятым аппаратурой сценам является более надежной, но для ее успешного применения и дальнейшего совершенствования необходим тщательный выбор тестовых объектов. В отличие от тестовых объектов, используемых для энергетической калибровки, спектральные кривые тестовых объектов, предназначенных для спектральной калибровки, должны иметь характерные особенности (минимумы и максимумы) в рабочем диапазоне гиперспектральной аппаратуры. Для спектральной калибровки аппаратуры, работающей в диапазоне длин волн 400—1000 нм, наиболее подходящий тип таких объектов — растительность. Здоровая растительность определенного состава в видимом диапазоне имеет четко выраженные особенности, обусловленные поглощением излучения основными типами пигментов. В ближнем инфракрасном диапазоне у нее высокий коэффициент отражения, поэтому провал спектральной кривой, обусловленный поглощением излучения кислородом, выражен четко и также может быть использован в качестве характерной особенности.

Организация тестовых объектов такого типа требует проведения ряда подготовительных работ, а именно:

создания или поиска тестовых площадок размером не меньше $3l$, где l — линейное пространственное разрешение аппаратуры, и с проектным покрытием растительностью около 100 %;

выполнения полевого спектрометрирования объектов на протяжении всего сезона вегетации для оценки устойчивости локальных особенностей спектра отражения и определения наиболее подходящих периодов для выполнения спектральной калибровки;

разработки и опробования методик спектральной калибровки.

При существовании тестовых объектов, удовлетворяющих перечисленным требованиям, возможна разработка методик, исключающих атмосферную коррекцию, что позволит избежать погрешностей, связанных с недостатком данных по состоянию атмосферы или погрешностями самой модели переноса излучения.

Л и т е р а т у р а

1. Долженко А. П., Жиличкин А. Г., Коваленко В. П., Кондратов А. В., Смирнов С. В., Тихонычев В. В., Федорченко А. М., Худяков А. В. Подтверждение характеристик КК ДЗЗ «Ресурс-П» № 1 в процессе орбитальной эксплуатации с использованием системы валидации. [Электрон. ресурс]. http://www.ntsomz.ru/files/kondratov%20a._15.11.2013.pdf (дата обращения 15.08.2014 г.).

2. Пат. 2457435 РФ. Фотограмметрическая мира / И. Г. Журкин, Г. Г. Сычев, А. Т. Калинин // Изобретения. Полезные модели. 2012. № 21.

3. Журкин И. Г., Сычев Г. Г., Грузинов В. С. Методика измерения разрешающей способности космических систем дистанционного зондирования с помощью искусственных объектов // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2012. № 3. С. 81—84.

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013613954. Программа для определения разрешающей способности «MIRA16 v.1» / Г. Г. Сычев, И. Г. Журкин // Программа для ЭВМ, базы данных, топологии интегральных микросхем. 2013. № 2. Ч. 2. С. 410—411.

5. Kawishwar P. Atmospheric Correction Models for Retrievals of Calibrated Spectral Profiles from Hyperion EO-1 Data / Int. Institute for Geo-Information Sci. Earth Observation. Master Thesis. Enschede, Netherlands, 2007.

6. Guanter L., Segl K., Sang B., Alonso L., Kaufmann H., Moreno J. Scene-based spectral calibration assessment of high spectral resolution imaging spectrometers // Opt. Express. 2009. V. 17. N. 14. P. 11594—11606.

7. P. S. Barry, J. Shepanski, C. Segal. Hyperion On-Orbit Validation of Spectral Calibration using Atmospheric Lines and an On-board System // Proc. SPIE. 2002. V. 4480. P. 231—235.

Дата принятия 21.11.2014 г.

551.550:519.26

Калибровка фотометрических систем атмосферных измерений с использованием нечетких множеств

Р. О. ГУСЕЙНОВА

Азербайджанский архитектурно-строительный университет,
Баку, Азербайджан, e-mail: renahuseynova55@gmail.com

Предложено усовершенствование метода калибровки солнечных фотометров при различных оптических воздушных массах. Получено аналитическое условие обеспечения стабильного проведения периодической калибровки этих фотометров с учетом случайных временных изменений атмосферного аэрозоля. Показан пример реализации калибровки на базе нечетких множеств.

Ключевые слова: солнечный фотометр, нечеткие множества, калибровка, атмосфера, аэрозоль.

The modification of the known method of calibration of sun photometers at different optical air masses is suggested. The analytical condition for providing the stable periodic calibration of sun photometers taking into account the random temporal variation of atmospheric aerosol is derived. The example for realization of fuzzy calibration of sun photometer is shown.

Key words: sun photometer, fuzzy sets, calibration, atmosphere, aerosol.

Точность проводимых атмосферных измерений в видимом диапазоне электромагнитных волн ограничивается воздействием атмосферного аэрозоля. Механизм воздействия аэрозоля на распространение оптического излучения достаточно разнообразен и включает такие свойства, как поглощение, отражение и рассеяние, которые приводят к суще-

ственной погрешности результатов измерений, проводимых наземными фотометрами. Для частичного устранения указанных погрешностей разработаны различные многоволновые методы [1].

Наиболее важным, с точки зрения классической теории измерительной техники, является метод по устранению вли-