

# Исследование возможности дифференциации вариаций восходящего излучения САП в оптическом диапазоне длин волн. Предварительные результаты

Е.М. Козлов

*Институт космических исследований РАН  
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32  
E-mail: [ekozlov@iki.rssi.ru](mailto:ekozlov@iki.rssi.ru)*

Проведены исследования спектров вариаций восходящего излучения системы атмосфера-поверхность в оптическом диапазоне длин волн, принадлежащих ее различным компонентам. Для 22 пространственных частот в интервале .6-52 рад/км, были восстановлены вариации, принадлежащие семи компонентам САП, характеризуемым положением на оси частот максимумов наблюдаемых реакций взаимодействия с солнечным излучением.

В качестве исходных данных использовались надирные спектральные измерения восходящего излучения САП в двенадцати спектральных интервалах оптического диапазона 486-880нм. Измерения были проведены с помощью трассового спектрометра МКС-М над шельфовой зоной Карибского моря с борта самолета-лаборатории с высоты 3,5 км во время международного многоуровневого эксперимента "Карибэ-88".

Исследования показали, что при высоких измерительных данных спектрометра МКС-М (блок БС), отношения сигнал/помеха во время проводимого эксперимента носили селективный характер. Они характеризовались максимальными значениями в интервале от  $2,53e+01$  до  $1,41e+02$ . Оценка достоверности восстановления спектров дифференцированных вариаций в этих условиях, которая характеризовалась точностью восстановления спектральной дисперсии, не превышала 2%.

**Ключевые слова:** дифференциация компонентов, взаимные спектральные образы, спектры дифференцированных вариаций, наблюдаемая реакция, отношение сигнал/помеха, пространственная частота, селективность, достоверность, ошибки.

## Введение

В [1] была предпринята попытка разделения вкладов коэффициентов спектральной яркости атмосферной дымки  $\rho_a(\lambda)$  и водной поверхности  $\rho_p(\lambda)$  по данным самолетных измерений восходящего излучения  $I_\lambda(x)$  системы атмосфера-поверхность (САП), где  $x$  - горизонтальная координата наблюдений. При решении задачи использовался спектральный подход, который позволяет дифференцировать спектры вариаций  $S_r(\lambda_{r0}, \Omega)$ , сформированные образующими систему атмосфера-поверхность компонентами, различающимися характером их реакций взаимодействия с солнечным излучением  $r(\lambda)$  (далее, просто реакция), где  $\lambda_{r0}$  - идентифицирующий компоненты параметр (например, длина волны максимума реакции).

Сам метод дифференциации компонентов (ДК) на основе спектрального подхода заключается в использовании особенностей реакций  $r(\lambda)$  и спектров вариаций восходящего излучения  $S_r(\lambda_{r0}, \Omega)$ . Носителями этих особенностей являются регистрируемые вариации восходящего излучения  $\Delta I_\lambda(x)$ , а их индикатором в пространстве  $\lambda, \Omega$ , могут служить взаимные

спектральные образы  $S_{\Omega}(\lambda_i, \lambda_j)$  [2]. Применение к ансамблям, образованным измерениями спектральной яркости  $I_{\lambda}(x)$ , комплекса фильтрующих процедур [3], позволяет выделить информацию, которая принадлежит компонентам исследуемой системы (например, атмосфере и поверхности).

Предварительные результаты использования такого подхода в [1] позволяют предполагать о принципиальной возможности применимости этого метода для решения задач ДК САП при дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ). Более полное же представление о возможностях метода можно получить только на основе рассмотрения соответствующих количественных характеристик.

### Постановка задачи

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы получить данные оценочного характера, которые позволили бы судить в целом о потенциальных возможностях дифференциации вариаций восходящего излучения САП в оптическом диапазоне длин волн на основе использования спектрального подхода.

Измеряемые в процессе наблюдений значения  $I_{\lambda}(x)$  отягощены преобразующими эффектами САП, поэтому, приводимые ниже результаты исследований относятся к наблюдаемым спектрам дифференцированных вариаций  $S_m(\lambda_{m0}, \Omega)$ , которые, в свою очередь, характеризуются соответствующими наблюдаемыми реакциями  $rn(\lambda)$ . Несомненно, что это обстоятельство приводит к искажению реальной картины. Тем не менее, такие исследования позволяют получить общие представления, как об уровне совокупности мешающих факторов, так и о некоторых их особенностях, которые позволяют определиться в целесообразности перехода к более глубокому анализу, который позволил бы получить недостающую информацию.

В практике спектральных исследований широко используется такое понятие, как отношение сигнал/помеха [4]. Поэтому, в работе основное внимание уделено именно этой характеристике поля вариаций, которая определялась из соотношения

$$osh_m(\lambda_{m0}, \Omega) = D_m(\lambda_{m0}, \Omega) / ( D_s(\lambda_{m0}, \Omega) - D_m(\lambda_{m0}, \Omega) ), \quad (1)$$

где  $D_m(\lambda_{m0}, \Omega)$  - спектральная дисперсия дифференцированных вариаций;  $D_s(\lambda_{m0}, \Omega)$  - суммарная дисперсия вариаций в анализируемой полосе частот  $\prod_{\Omega}$ , центрированных около пространственной частоты  $\Omega$ .

Для оценки достоверности восстановления вариаций, использовался коэффициент вариаций восстановления спектральной дисперсии

$$kv_m(\lambda_{m0}, \Omega) = \Delta D_m(\lambda_{m0}, \Omega) / D_m(\lambda_{m0}, \Omega), \quad (2)$$

где  $\Delta D_m(\lambda_{m0}, \Omega)$  - среднеквадратическое отклонение восстановления  $D_m(\lambda_{m0}, \Omega)$ .

### Описание исходного материала

В качестве экспериментального материала, для исследований  $S_m(\lambda_{m0}, \Omega)$ , были использованы надирные измерения восходящего излучения САП  $I_{\lambda}(x)$  в двенадцати спектральных интервалах оптического диапазона  $\lambda$ , которые были нормированы на солнечную постоянную  $I_0(\lambda)$ .

Измерения проводились 15.04.1988 г во время международного многоуровневого эксперимента "Карибэ-88" над акваторией залива Батабано вдоль трассы протяженностью 90 км с

борта самолета-лаборатории на высоте 3 500 м аппаратурой МКС-М (блок БС) [5] при зенитном расстоянии Солнца  $\theta = 25^\circ$ . Массив исходных данных содержит свыше  $N = 4200$  распределений  $I_\lambda$ .

Проводимый во время эксперимента контроль оптической погоды, показал, что условия во время наблюдений характеризовались изменчивостью спектральной оптической толщины атмосферы, которая составляла 20-25%.

### Спектры дифференцированных вариаций $S_m(\lambda_{m0}, \Omega)$

Спектры дифференцированных вариаций  $S_m(\lambda_{m0}, \Omega)$  восходящего излучения САП на 22-х пространственных частотах в интервале 0,61 – 53,2 рад/км представлены на рис. 1. Они характеризуются значениями спектральной плотности в интервале  $1,75\text{e-}11$  ( $\lambda_{m0} = 680\text{нм}$ ;  $\Omega = 39,9$  рад/км) –  $2,48\text{e-}03$  ( $\lambda_{m0} = 486\text{нм}$ ;  $\Omega = 0,61$  рад/км) и демонстрируют особенности пространственных вариаций, принадлежащих различным компонентам, которые были идентифицированы по положению на оси длин волн  $\lambda_{m0}$  - максимумов наблюдаемых реакций  $m(\lambda)$ .

Число компонентов, выявленных в результате обработки  $n_m = 7$ , меньше числа спектральных интервалов диапазона длин волн, в котором проводились наблюдения. Обнаруженные компоненты различаются степенью заселенности пространственных частот. В то время как дифференцированные вариации с идентификатором  $\lambda_{m0} = 486\text{нм}$ , наблюдаются на всех анализируемых частотах, вариации же для компонента с  $\lambda_{m0} = 680\text{нм}$  восстановлены лишь на трех частотах в диапазоне 31,9 – 53,2 рад/км. Заселенность остальных компонентов имеет промежуточное значение. Обращает на себя внимание, что уменьшение заселенности преимущественно происходит за счет низкочастотной области диапазона анализируемых частот, в котором проводились исследования.

Восстановленные спектры  $S_m(\lambda_{m0}, \Omega)$  имеют свои структурные особенности, которые от компонента к компоненту различны.

Сравнение спектров дифференцированных вариаций  $S_m(\lambda_{m0} = 486\text{нм}; \Omega)$  (сплошная линия) со спектрами суммарных вариаций  $S(\lambda_{486\text{нм}}, \Omega)$  (кривая S486), которые представлены на рис. 2, обнаруживает более контрастно выраженные структурные особенности первых по сравнению со вторыми, притом,

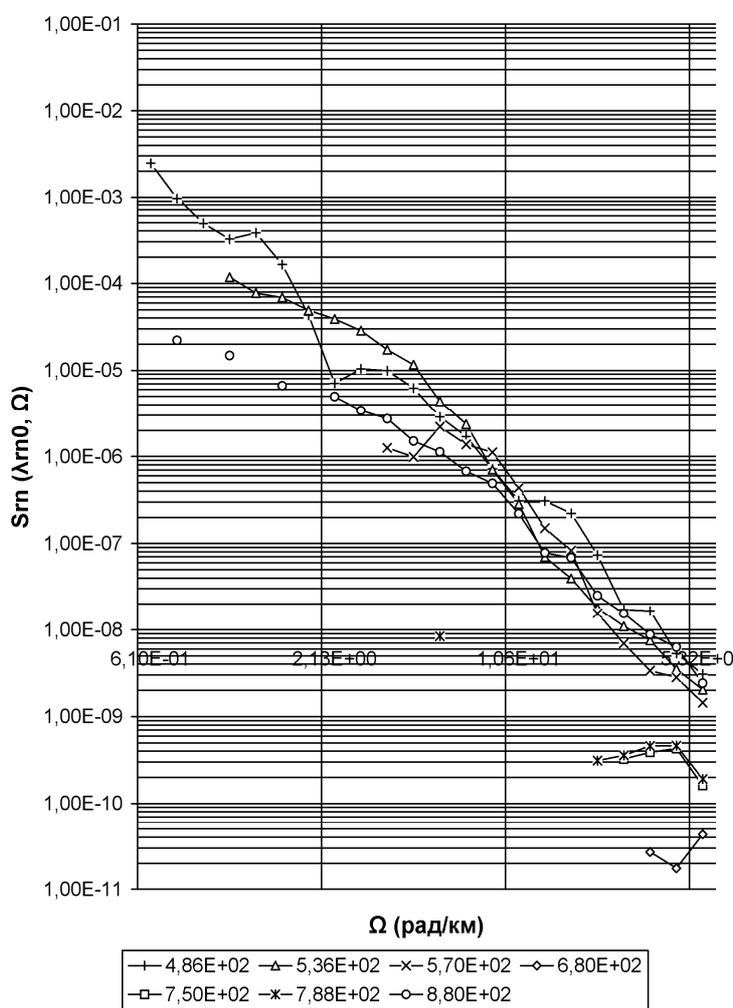


Рис. 1.

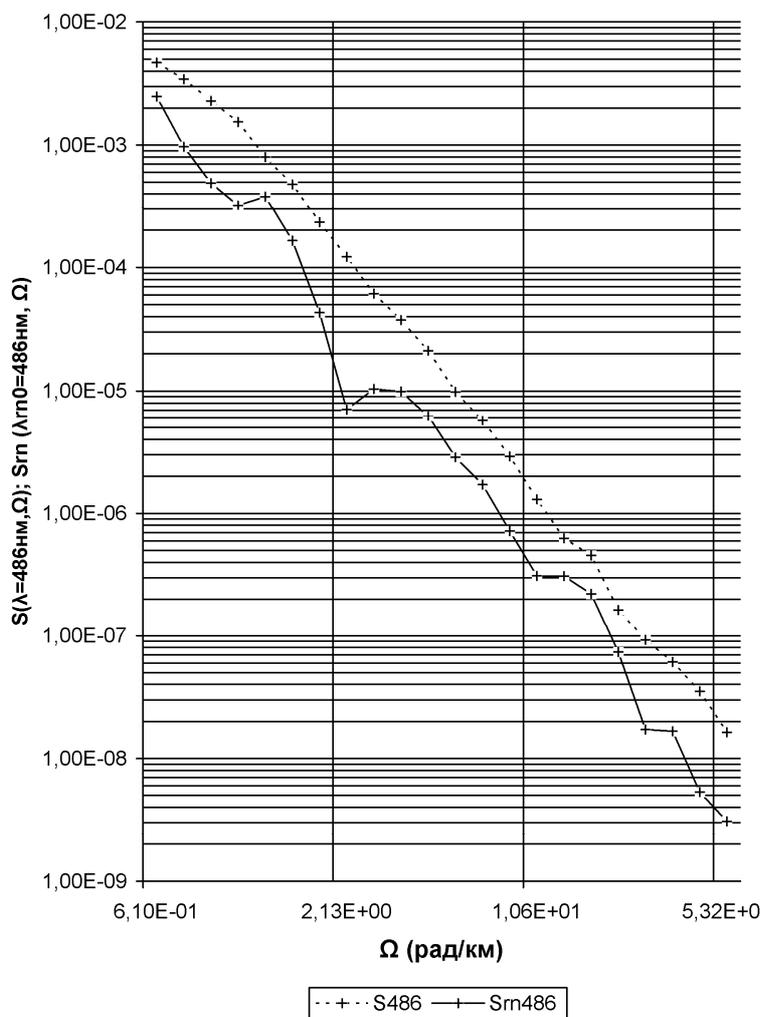


Рис. 2.

факторами, может служить отношение сигнал/помеха  $osh_m(\lambda_{m0}, \Omega)$ . При этом, ее особенности в зависимости от пространственной частоты  $\Omega$ , возможно, выявить только для компонентов, обладающих достаточно высокой степенью заселенности частотного пространства. К таким компонентам относятся вариации, характеризуемые значениями идентификатора  $\lambda_{m0} = 486; 536; 570$  и  $880$  нм.

### Отношение сигнал/помеха $osh_m(\lambda_{m0}, \Omega)$

Возможности восстановления дифференцированных вариаций  $S_m(\lambda_{m0}, \Omega)$ , в известной степени, зависят от шумовых свойств измерительной аппаратуры, с помощью которой проводились измерения. Эти свойства для спектрометра МКС-М, демонстрируются распределениями отношений сигнал/шум измерительного тракта  $osh_0(\lambda_{m0}, \Omega)$ , которые представлены на рис. 3. Их характер зависит от компонентов, которым они принадлежат, тем самым отображая особенности соотношений между сигналом и шумами измерительных трактов в зависимости от пространственной частоты  $\Omega$ . Для диапазона восстановленных значений  $S_m(\lambda_{m0}, \Omega)$ , эти отношения характеризуются максимальными величинами в интервале от  $8,27e+01$  ( $\lambda_{m0} = 570$  нм;  $\Omega = 10,6$  рад/км) до  $1,95e+03$  ( $\lambda_{m0} = 880$  нм;  $\Omega = 2,13$  рад/км). Что свидетельствует о достаточно высоких измерительных свойствах аппаратуры. Особенно это относится к вариациям, с идентификаторами  $\lambda_{m0} = 880$  и  $536$  нм.

что, в целом, эти особенности проявляются и на спектрах суммарных вариаций, но здесь они значительно менее контрастны.

Восстановленные в пространстве  $\lambda, \Omega$  вариации  $S_m(\lambda_{m0}, \Omega)$  отягощены, как явлениями, связанными с трансформацией в САП падающего излучения  $I_0(\lambda)$ , так и, собственно, ошибками их восстановления за счет различных мешающих факторов. К их числу относятся:

- шумы измерительных трактов;
- помеха, связанная с одновременной регистрацией вариаций, принадлежащих различным компонентам САП;
- эффекты, обусловленные интегрирующими свойствами атмосферы;
- степень корректности учета эффекта Шенона для дискретно-заданных измеренных значений регистрируемого излучения и пр.

Характеристикой, отображающей соотношение между восстановленными вариациями и суммарными мешающими

О соотношении между восстановленными вариациями и суммарной помехой  $osh_m(\lambda_{m0}, \Omega)$ , можно судить по распределениям, которые на рис. 4 отмечены маркерами. Их максимальные значения лежат в интервале от  $2,53e+01$  ( $\lambda_{m0} = 570\text{нм}$ ,  $\Omega = 10,6\text{рад/км}$ ) до  $1,41e+02$  ( $\lambda_{m0} = 486\text{нм}$ ,  $\Omega = 1,23\text{рад/км}$ ) при том, что соотношение между помехой и шумами измерительных трактов находится в диапазоне от  $7,38e-01$  ( $\lambda_{m0} = 486\text{нм}$ ;  $\Omega = 1,23\text{рад/км}$ ) до  $1,96e+01$  ( $\lambda_{m0} = 880\text{нм}$ ;  $\Omega = 6,39\text{рад/км}$ ). Также как и  $osh_0(\lambda_{m0}, \Omega)$ , отношения сигнал/помеха, имеют заметный разброс, вызванный ошибками их определения.

Применение к распределениям  $osh_m(\lambda_{m0}, \Omega)$ , процедуры сглаживания путем линейной фильтрации по двум точкам (утолщенные линии), выявляет их селективные особенности. При этом положение максимумов  $osh_m(\lambda_{m0}, \Omega)$  на оси пространственных частот зависит от идентификатора  $\lambda_{m0}$ .

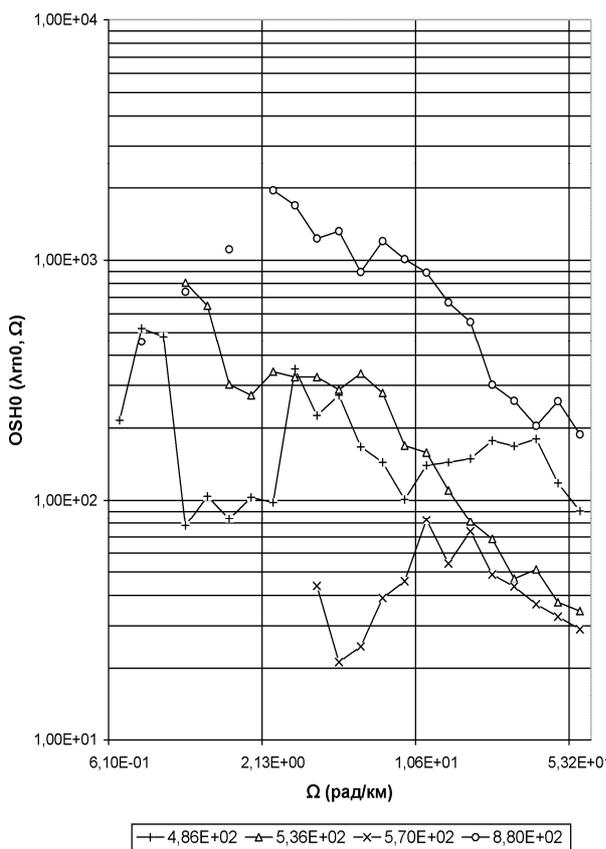


Рис. 3.

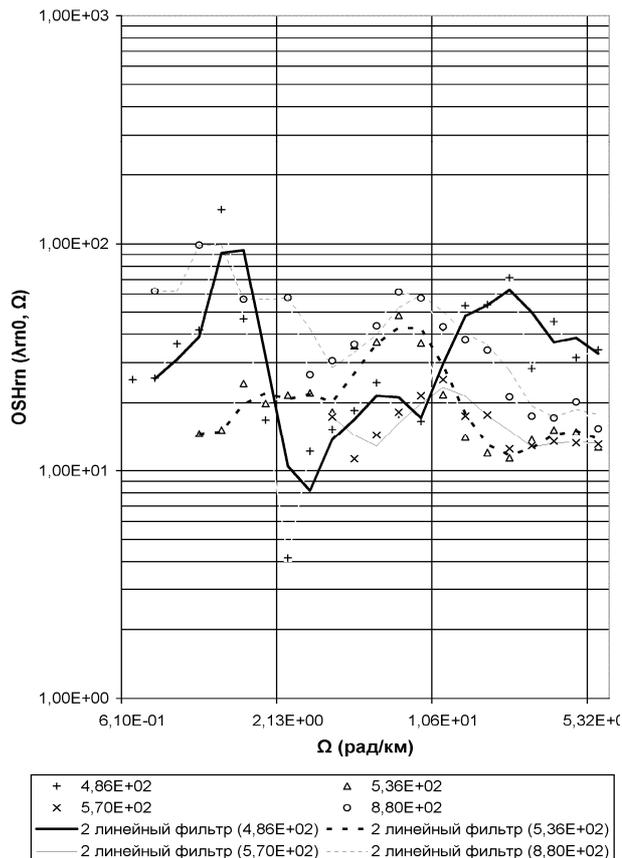


Рис. 4.

### О достоверности восстановления дифференциальных спектров вариаций $S_m(\lambda_{m0}, \Omega)$

Результат влияния совокупности помехообразующих факторов на восстановление дифференцированных вариаций  $S_m(\lambda_{m0}, \Omega)$ , можно оценить с помощью коэффициентов вариаций восстановления спектральной дисперсии  $kv_m(\lambda_{m0}, \Omega)$ , которые представлены на рис.

5. Диапазон значений  $kv_m(\lambda_{m0}, \Omega)$  занимает интервал от  $4,13e-03$  ( $\lambda_{m0} = 880\text{нм}$ ,  $\Omega = 2,13\text{рад/км}$ ) до  $3,10e-01$  ( $\lambda_{m0} = 486\text{нм}$ ;  $\Omega = 2,13\text{рад/км}$ ). Частотные координаты их минимальных величин, совпадают с координатами максимальных значений отношений сигнал/помеха  $osh_m(\lambda_{m0}, \Omega)$  для соответствующих компонентов, и лежат в области от  $4,13e-03$  ( $\lambda_{m0} = 880\text{нм}$ ,  $\Omega = 2,13\text{рад/км}$ ) до  $1,86e-02$  ( $\lambda_{m0} = 570\text{нм}$ ;  $\Omega = 10,6\text{рад/км}$ ), тем самым определяя высокую степень достоверности восстановления спектров  $S_m(\lambda_{m0}, \Omega)$ , ошибки которых не превышают 2%. Для всех приведенных

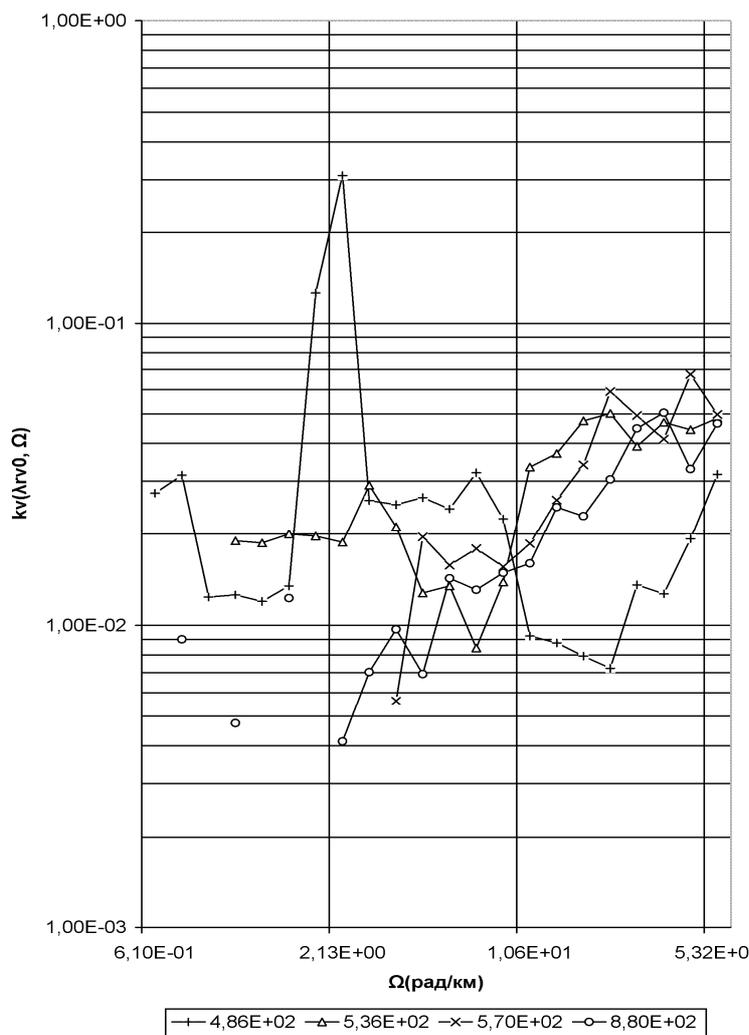


Рис. 5.

компонентов, прослеживается тенденция увеличения значений  $kv_m(\lambda_{m0}, \Omega)$  по мере смещения в высокочастотную область анализируемого диапазона частот, где они принимают максимальные величины от  $3,16e-02$  ( $\lambda_{m0} = 486\text{нм}$ ,  $\Omega = 53,2\text{рад/км}$ ) до  $6,73e-02$  ( $\lambda_{m0} = 570\text{нм}$ ;  $\Omega = 39,9\text{рад/км}$ ).

### Заключение

Таким образом, проведенные исследования показывают, что при высоких измерительных данных спектрометра МКС-М (блок БС), отношения сигнал/помеха  $osh_m(\lambda_{m0}, \Omega)$  во время проводимого эксперимента характеризовались максимальными значениями в интервале от  $2,53e+01$  до  $1,41e+02$  и обладали селективными свойствами. Оценка достоверности восстановления спектров дифференцированных вариаций в этих условиях, которая характеризовалась точностью восстановления спектральной дисперсии, не превышала 2%.

### Литература

1. Козлов Е.М. О дифференциации компонентного состава САП на основе спектрального подхода по спектральным измерениям в оптическом диапазоне длин волн в международном эксперименте Карибэ-88 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. Сб. научн. статей. М.: ООО «Азбука-2000», 2008. Вып. 5. Т. I. С.126-131.
2. Козлов Е.М. Разработка методов спутникового зондирования системы «атмосфера-поверхность». Отчет ИКИ РАН по НИР, раздел 4.4.10 темы «Атмосфера». 2005. 32 с.
3. Макс. Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. М.: Мир, 1983. Т. 1. 311 с.
4. Справочник по теоретическим основам радиоэлектроники / Под общей редакцией А.А. Куликовского. М.: Энергия, 1977. Т.2. 471 с.
5. Zimmermann G., Badaew W.W., Malkevich M.S., Piesik B. The MKS-M remote sensing experiment for determination of ocean and atmospheric parameters from SALUT-7. Acta Astronautica, 1985, v. 12, N 7/8, pp. 475-483.

# Study of the possibility of the differentiation of variations the ascending emission SAP in the optical wavelength range. Preliminary results

**E.M. Kozlov**

*Space Research Institute, Russian Academy of the Sciences  
117997, Moscow, str. Trade-union, 84/32  
E-mail: [ekozlov@iki.rssi.ru](mailto:ekozlov@iki.rssi.ru)*

The Organized studies spectrum variations of the ascendant radiation of the system atmosphere-surface in optical range of the lengths of the waves, belonging to its different component. For 22 spatial frequencies in the interval of .6-52 rad/km, were restored variations, belonging to seven components of the SAP. They characterized by position on the axis of the frequencies of the maximums of the observed reactions of interaction with the solar radiation.

As the initial data were used the nadiral spectral measurements of the ascending emission SAP in twelve spectral intervals of the optical range 486-880nm. The Measurements were organized by means of route of the spectrometer MKS-M on shelf by zone Caribbean sea with board of the plane-laboratory with heights 3, 5 km during international layered experiment "Karibe-88".

The Studies have shown that under high measuring spectrometer data MKS-M (the block BS), relations signal/hindrance during conducted experiment carried selection nature. They were characterized by maximum importances in interval from 2, 53e+01 before 1, 41e+02. The Estimation to validity of the reconstruction spectrum differentiated variations in this condition, which was characterized by accuracy of the reconstruction to spectral dispersion, did not exceed 2%.

**Keywords:** separation of the components; the mutual spectral images; the spectrums differentiated variations ; the observed reaction; the attitude signal/hindrance; the spatial frequency; selection; validity; the mistakes.