

О передаточной характеристике системы “водная толща - поверхность - атмосфера” в оптическом диапазоне длин волн в эксперименте Карибэ-88

Е.М. Козлов

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

Введение

Практически вся информация о земной поверхности и атмосфере содержится в вариациях яркости системы атмосфера - земная поверхность (САП) в широком диапазоне электромагнитных волн, отображая разнообразие процессов трансформации энергии Солнца в САП [1]. В свою очередь, благодаря своей универсальности, использование линейно - системного подхода [2] при исследованиях восходящего излучения САП, потенциально, может позволить получить ряд характеристик, которые являются носителями объективной информации как о процессах и явлениях происходящих в ней, так и ее компонентном составе. Очевидная сложность задачи, прежде всего, состоит во множестве процессов трансформации излучения Солнца, бесконечного разнообразия возможных объектов наблюдения, степени контроля условий наблюдений и т.д. В рамках изучения механизма трансформации восходящего излучения САП в реальных условиях, некоторые из этих трудностей могут быть преодолены за счет комплексности ставящихся для этих целей экспериментов их высокой степени оснащенности необходимыми сопутствующими наблюдениями в сочетании с одновременным многоуровневым характером измерений с использованием однотипной аппаратуры.

Наибольшей комплексностью по оснащенности техническими средствами выделяются эксперименты “Черное море-83” и “Карибэ-88”. В этих экспериментах, одновременно со спутниковыми измерениями оптических параметров атмосферы и поверхности, использовалась информация с самолетов – лабораторий, полученная с помощью многоканальной (МКС-М) и многозональной (МКФ-6) аппаратуры, а также, данные о спектрометрических, биометрических и гидрофизических наблюдениях на береговых станциях и научно-исследовательских судах (НИС) [3].

В нстоящей работе, в рамках изучения особенностей трансформации восходящего излучения САП, предпринята попытка оценки ее передаточных характеристик в реальных условиях наблюдений, на основе анализа вариаций яркости восходящего излучения в двенадцати спектральных интервалах оптического диапазона, измеренных во время международного многоуровневого эксперимента Карибэ-88 с помощью трассового спектрометра МКС-М (блок б).

Постановка задачи и возможные пути ее решения

При описании пространственных вариаций поля уходящего вертикально вверх излучения $\tilde{I}_\lambda(x)$ можно воспользоваться выражениями для горизонтально-однородной атмосферы [4], в которых они определяются вариациями альбеда подстилающей поверхности $\tilde{q}(x)$ и пространственно-частотной характеристикой (ПЧХ) атмосферы $W(\Omega) = \Lambda^{-1} + \chi(\Omega)$

$$\tilde{I}_\lambda(x) = \Phi_0 + E_0 \left[\Lambda^{-1} \tilde{q}(x) + \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \chi(\Omega) q(\Omega) e^{-i\Omega x} d\Omega \right], \quad (1)$$

где Φ_0 - атмосферная дымка; $\Lambda^{-1} = \exp[-\tau_\lambda^*]$; $\chi(\Omega)$ - диффузная составляющая ПЧХ, в данном случае совпадающая с амплитудно-частотной характеристикой, E_0 - освещенность поверхности, $\tilde{q}(\Omega)$ - Фурье-образ вариаций альбеда. В соответствии с формулой (1) спектральная плотность вариаций

$$S(\Omega) = \Phi_0 + E_0 W(\Omega) \tilde{q}(\Omega) = \Phi_0 + E_0 \left[\Lambda^{-1} + \chi(\Omega) \right] \tilde{q}(\Omega). \quad (2)$$

Функция $\chi(\Omega)$ достаточно быстро убывает при $\Omega \Rightarrow \infty$ вследствие интегрирующего эффекта многократного рассеяния света в системе подстилающая поверхность-атмосфера. Поэтому, в области больших пространственных частот Ω , можно считать справедливым следующее соотношение

$$S(\Omega) \cong \Phi_0 + E_0 \Lambda^{-1} \tilde{q}(\Omega). \quad (3)$$

В реальных условиях наблюдений, т.е. для горизонтально-неоднородной атмосферы, Φ_0 и Λ^{-1} тоже являются функциями горизонтальной координаты x . Строго говоря, это относится и к $\chi(\Omega)$.

При оценке передаточных свойств САП в слое dh , ограниченном высотами h_0 и h_1 , необходима информация, полученная как на нижнем уровне h_0 , так и на высоте h_1 . Для этих целей могут быть использованы данные, полученные в многоуровневых экспериментах над однородными поверхностями с неизменными атмосферными условиями наблюдений, с применением однотипной измерительной аппаратуры [5]. На практике приходится иметь дело с материалом, полученным в реальных условиях наблюдений, характеризуемых практически всегда существующей горизонтальной неоднородностью, как поверхности, так и атмосферы. Для повышения в этих условиях чистоты эксперимента требуется, чтобы измерения на всех уровнях наблюдений проводились с одинаковым разрешением на местности при их строгой синхронности, что практически не возможно осуществить.

Как было отмечено в [2], спектральные плотности $S(\Omega)$ в выражениях (2) и (3) являются диагональными элементами матриц, образованных действительной и мнимой составляющими взаимных спектров, которые в свою очередь, наиболее полно и объективно отображают свойства поля восходящего излучения, регистрируемого измерительной аппаратурой. При определенных условиях взаимные спектры могут быть использованы для оценки передаточных свойств САП с существенным смягчением требований к постановке эксперимента, а вместе с этим и повышением достоверности конечного результата - особенностей трансформации восходящего излучения САП.

Использование взаимных спектральных образов [2], позволяет выделить именно те компоненты или производные от них, которые содержатся только в опорном канале (канале сравнения) и тем самым несут информацию о передаточных свойствах САП в пространстве λ, Ω по отношению к каналу сравнения. Иными словами, взаимные спектры $S_{\lambda_i, \lambda_i}(\Omega)$ - их действительная и мнимая составляющие, отображают относительные передаточные свойства САП во время проводимого эксперимента. Исключение зависимости от длины волны падающего солнечного излучения и подавление влияния пространственной структуры поверхностных эффектов, при этом достигается за счет их нормирования на произведение соответствующих солнечных постоянных (для $\lambda_{i\bar{i}}$ и λ_i) и спектральной плотности вариаций канала сравнения $S_{\lambda_{i\bar{i}}}(\Omega)$.

Для упрощения задачи и повышения достоверности, к опорному каналу предъявляется требование минимума параметров, на которые он должен реагировать, что достигается за счет соответствующего выбора как самого канала сравнения, так условий и места наблюдений.

Описание условий наблюдений

Оценка передаточной характеристики САП была проведена по надирным измерениям восходящего излучения в двенадцати спектральных интервалах в диапазоне 415 – 880 нм при зенитном расстоянии Солнца $Z_0 = 25^\circ$, которые были выполнены с борта самолета-лаборатории, оснащенного спектрометром МКС-М [6] (блок БС). Наблюдения велись с высоты 3,5 км над водной поверхностью вдоль трассы протяженностью 75 км. Скорость приводного ветра составляла величину $v=3-5$ м/сек. Диапазон измеренных с Земли значений оптической толщины атмосферы τ_{λ_0} в начале трассы в течение 2-х часов, находился в пределах 0,17-0,29 [7].

Для оценки относительной реакции САП в слое dh в эксперименте Карибэ-88 были использованы взаимные спектры вариаций яркости восходящего излучения $S_{\lambda=880, \lambda_i}(\Omega)$ в диапазоне пространственных частот $\Omega = 3-63$ рад/км [2] относительно наиболее длинноволнового “окна” прозрачности в ближней ИК-области оптического диапазона, центрированного около $\lambda_j = 880$ нм.

Выбранный канал сравнения характеризуется минимальным вкладом молекулярной составляющей рассеяния атмосферы [8]. Результаты предварительных исследований [7] показали, что на длине волны $\lambda_j = 880$ нм во время наблюдений, аэрозольная компонента атмосферы преимущественно проявлялась через ослабление падающего излучения, т. е., канал сравнения содержал информацию, практически, определяемую выражением (3). Поверхностные эффекты на этой длине волны главным образом определяются френелевским отражением от взволнованной поверхности [7], вклад же рассеянной составляющей водной толщи пренебрежимо мал [9].

Обсуждение результатов

При исследовании относительных передаточных свойств САП во время эксперимента Карибэ-88 были использованы следующие характеристики САП:

- относительная амплитудно-частотная характеристика (ОАЧХ) САП

$$A(\lambda, \Omega) = M(\lambda, \Omega) / (s_{0\lambda_j} * s_{0\lambda_i} * S_{\lambda_j=880}(\Omega)), \quad (4)$$

где $M(\lambda, \Omega)$ - модуль взаимного спектра вариаций яркости для λ , относительно вариаций на опорной длине волны $\lambda_{j=880}$ на пространственной частоте Ω ; s_0 - солнечная постоянная; $S_{\lambda_j=880}(\Omega)$ - спектральная плотность вариаций яркости канала сравнения на анализируемой пространственной частоте Ω .

- относительная фазо-частотная характеристика

$$\varphi_{\lambda=880, \lambda_i}(\Omega) = \text{arctg} \{ \text{Im}[S_{\lambda=880, \lambda_i}(\Omega)] / \text{Re}[S_{\lambda=880, \lambda_i}(\Omega)] \}, \quad (5)$$

где $\text{Re}[S_{\lambda=880, \lambda_i}(\Omega)]$ и $\text{Im}[S_{\lambda=880, \lambda_i}(\Omega)]$ - действительная и мнимая составляющие взаимных спектров.

При исследованиях характера связей между вариациями в анализируемых участках оптического диапазона использовались функции когерентности, определяемые выражением

$$\Gamma_{\lambda_j, \lambda_i}(\Omega) = \frac{|S_{\lambda_j=880, \lambda_i}(\Omega)|^2}{S_{\lambda_j=880}(\Omega) S_{\lambda_i}(\Omega)}. \quad (6)$$

Амплитудно-частотная характеристика САП

Относительная амплитудно-частотная характеристика (ОАЧХ) САП во время эксперимента Карибэ-88 приведена на рис. 1. Распределения $A(\lambda, \Omega)$ образуют две группы данных. Первая из них представлена значениями для коротковолновой области оптического диапазона $\lambda = 416 - 621$ нм. Распределения этой группы имеют явно выраженную неоднородную структуру. На низких пространственных частотах они имеют форму колоколообразных импульсов с максимальным значением $A(\lambda = 488; \Omega = 0,4) = 3,6$. Начиная с $\Omega \sim 1,2$ рад/км ОАЧХ принимает затухающий колебательный характер. С увеличением пространственной частоты амплитуда колебаний уменьшается, а текущие средние значения $A(\lambda, \Omega)$ асимптотически стремятся к величинам, определяемым вторым членом выражения (3). Обращает на себя внимание поведение положений экстремумов $A(\lambda, \Omega)$ на оси пространственных частот в интервале $\Omega = 0,7 - 1,9$ рад/км. Для фиолетовой границы измерительной аппаратуры, которая приходится на длину волны $\lambda = 416$ нм, экстремум $A(\lambda, \Omega)$ расположен на пространственной частоте $\Omega_a = 1,4$ рад/км. По мере продвижения к красной границе оптического диапазона происходит смещение координаты экстремума в область высоких пространственных частот, принимая при $\lambda = 570$ нм, значение $\Omega_a = 1,8$ рад/км. Начиная с этой длины волны, по мере ее дальнейшего увеличения, смещение меняет первоначальное направление, и при $\lambda = 713$ нм координата экстремума приходится уже на пространственную частоту $\Omega_a = 0,7$ рад/км, оставаясь неизменной на протяжении всей длинноволновой области.

Вторая группа $A(\lambda, \Omega)$, которая отображает передаточные свойства САП в длинноволновой области $\lambda = 680 - 822$ нм, характеризуется граничными значениями $A(\lambda, \Omega) = 0,7$ и $0,92$ с пределами изменений $\pm 3\% - \pm 5\%$, при наибольшей вариабельности на низких пространственных частотах от $\Omega = 0,3$ до $\Omega \sim 5$ рад/км. Здесь, также как и в первой группе, прослеживается неоднородность передаточных свойств САП в зависимости от пространственной частоты, которая наиболее контрастно проявляется на низких пространственных частотах, но здесь она значительно меньше, чем в первой группе. Начиная с частоты $\Omega = 40$ рад/км, из-за уменьшения в этой области пространственных частот отношения сигнала к шуму, значения $A(\lambda, \Omega)$ уменьшаются.

Сопоставление поведения распределений $A(\lambda, \Omega)$ первой и второй групп в зависимости от пространственной частоты, на низких пространственных частотах $\Omega = 0,4$ и $1,6$ рад/км обнаруживает их отрицательную корреляцию, которая свидетельствует о различном характере проявления атмосферных эффектов для этих групп.

Рассмотрение особенностей распределений $A(\lambda, \Omega)$ от длинноволновой области оптического диапазона на высоких пространственных частотах к коротковолновой его части на низких пространственных частотах, обнаруживает существенную трансформацию ОАЧХ, которая обусловлена различным относительным вкладом атмосферной и поверхностной составляющих. Изменение свойств атмосферной дымки в зависимости от длины волны, приводит к соответствующей деформации поля яркости САП на низких пространственных частотах в коротковолновой области оптического диапазона. Поскольку наблюдения проводились над однородной поверхностью, то имеющую место неоднородность ОАЧХ можно объяснить именно горизонтальной неоднородностью атмосферы во время эксперимента.

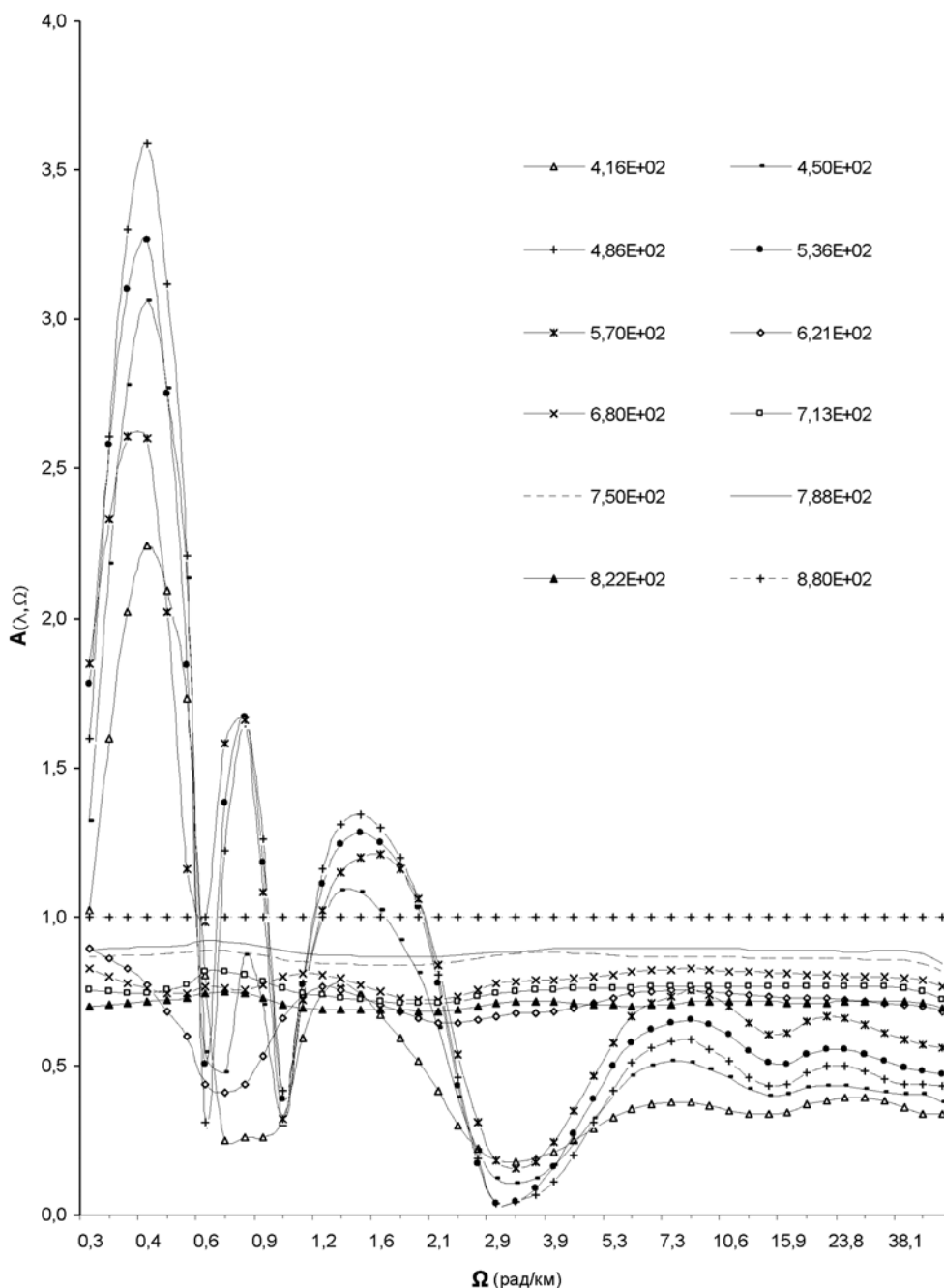


Рис. 1. Относительная амплитудно-частотная передаточная характеристика САП

Фазо-частотная характеристика САП

На рис. 2 представлены распределения $\varphi_{\lambda=880, \lambda_i}(\Omega)$, которые демонстрируют фазовые особенности зарегистрированных с высоты 3,5 км вариаций восходящего излучения САП во время эксперимента в зависимости от пространственной частоты для различных участков оптического диапазона по отношению к вариациям на опорной длине волны $\lambda = 880$ нм. Распределения $\varphi_{\lambda=880, \lambda_i}(\Omega)$, на фоне нулевых фазовых углов, имеют две области пространственных частот, центрированных около $\Omega_{\tilde{n}}=0,9$ и 3,4 рад/км, где их абсолютные значения существенно отличаются от фоновых значений. Область с $\Omega_{\tilde{n}}=0,9$ рад/км характеризуется отрицательными значениями фаз φ . Наибольшее по абсолютной величине значение $\varphi = -3$ рад для этой области приходится на

$\lambda = 570$ нм, которое она скачком принимает при $\Omega \sim 0,65$ рад/км. Значения фаз для остальных участков оптического диапазона постепенно убывают по мере смещения в его коротковолновую область, с одновременным смещением (для $\lambda = 570-488$ нм) экстремальных координат в высокочастотную область пространственных частот.

Вторая группа характеризуется положительными значениями фазовых углов, которые возрастают по мере смещения в длинноволновую область оптического диапазона, принимая при $\lambda = 488$ нм и $\Omega \sim 3,2$ рад/км максимальное значение $\varphi = 1,9$ рад. Последующее продвижение сопровождается их уменьшением, а при $\lambda = 621$ нм они приобретают практически нулевые значения. С увеличением пространственной частоты, начиная с $\Omega \sim 3,2$ рад/км, значения фаз монотонно убывают, стремясь к 0.

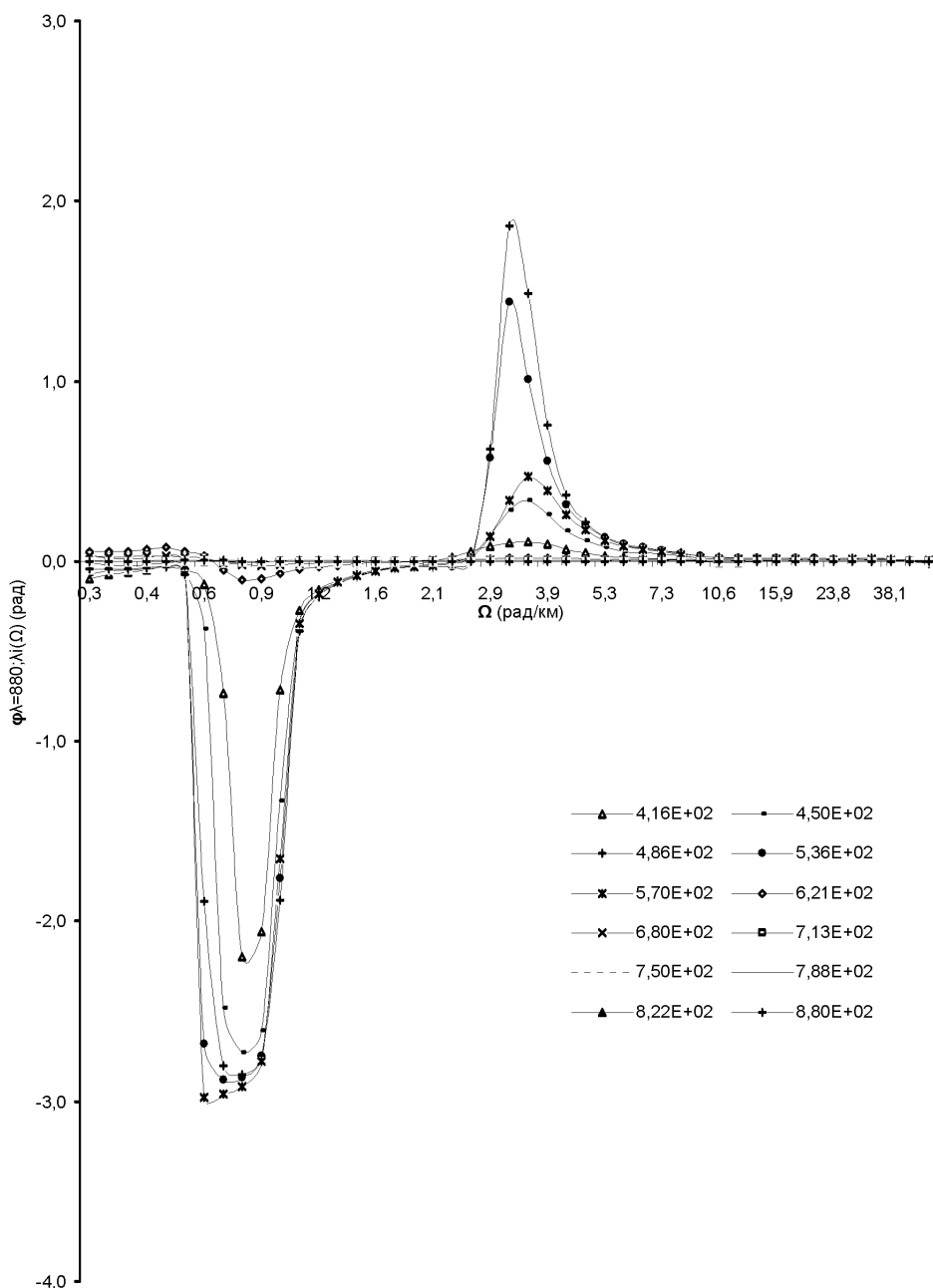


Рис. 2. Относительная фазо-частотная характеристика САП

Характеристика связей (Когерентная характеристика САП)

Представленную картину передаточных свойств САП, нельзя считать полной, не проведя хотя бы оценочный анализ характера связей между вариациями в различных спектральных интервалах оптического диапазона и их зависимости от пространственной частоты. Подобная оценка может быть проведена на основе анализа распределений когерентности $\Gamma_{\lambda=880, \lambda_i}(\Omega)$, представленных на рис. 3, которые показывают, что как для первой и второй групп длин волн, выделенных при анализе ОАЧХ, так и между ними, характер связей различен и отличается существенной неоднородностью. Для второй группы, во всем интервале пространственных частот, для интервала $\lambda = 712,7-880$ нм имеет место связь, характеризуемая значениями когерентности, близкими 1. По мере продвижения в высокочастотную область, в эту группу, начиная с $\Omega=1,6$ рад/км, попадает длина волны $\lambda = 680$ нм, а на граничных высоких частотах в районе $\Omega \sim 50$ рад/км к ней присоединяется и спектральный интервал $\Gamma_{\lambda=880, \lambda_i}(\Omega)$ оптического диапазона центрированный около $\lambda = 621$ нм. Подобная тенденция наблюдается и для $\lambda = 416$ нм, но присоединение к этой группе, вероятно, следует ожидать лишь на пространственных частотах, значительно превышающих верхнюю граничную частоту, на которой позволяли проводить наблюдения возможности, используемой в эксперименте, измерительной аппаратуры.

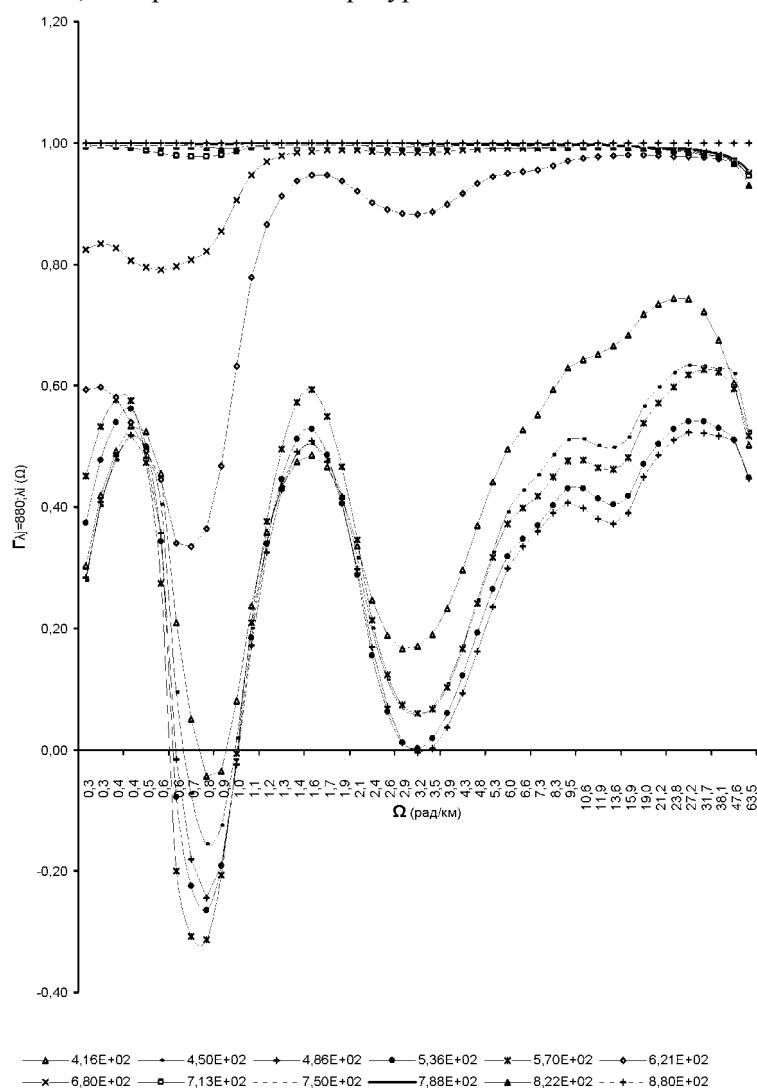


Рис. 3. Когерентно-частотная характеристика вариаций восходящего излучения САП

Главной особенностью первой группы распределений $\Gamma_{\lambda=880, \lambda_i}(\Omega)$, как и для ОАЧХ, является их существенная неоднородность, которая проявляет горизонтальную неоднородность атмосферной дымки, имевшую место во время измерений. Значения когерентности $\Gamma_{\lambda=880, \lambda_i}(\Omega)$ группы длин волн $\lambda = 416-570$ нм, находятся в диапазоне $-0,32$ (для $\lambda = 570$ нм и $\Omega = 0,8$ рад/км)

- 0,72 (для $\lambda = 416\text{нм}$ и $\Omega = 25$ рад/км). Тем самым, с одной стороны, отображая неоднородность структуры относительного вклада атмосферной и поверхностной составляющих САП во время проводимых наблюдений, а с другой, особенности трансформации вариаций восходящего излучения в исследуемом слое САП в коротковолновой области оптического диапазона для интервала пространственных частот от 0,3-63,5 рад/км.

Заключение

Таким образом, рассмотренные характеристики САП использующие взаимные спектры вариаций восходящего излучения в двенадцати спектральных интервалах оптического диапазона, которые были измерены с высоты 3,5 км многоканальным спектрометром МКС-М (блок б), с одной стороны, демонстрируют динамичность передаточных свойств САП в реальных условиях горизонтально-неоднородной атмосферы, а с другой, показывают особенности трансформации поля вариаций восходящего излучения в пространстве λ, Ω при этих условиях наблюдений.

Литература

1. Малкевич М.С. Оптические исследования атмосферы со спутников // "Наука". Москва 1973. С. 303.
2. Козлов Е.М. Отчет по исследованиям взаимных спектров вариаций яркости восходящего излучения системы "водная толща-поверхность-атмосфера" в оптическом диапазоне длин волн по материалам международного многоуровневого эксперимента Карибэ-88. // Отчет 505. ИКИ. Москва. 2005. С. 3-35.
3. Кондратьев К.Я., Бузников А.А., Васильев О.Б. и др. Некоторые результаты совмещенного комплексного подспутникового геофизического эксперимента // Докл. АН СССР. 1971. Т. 196. №6. С. 1066-1069.
4. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Иолтуховский А.А. Метод характеристик в задачах атмосферной оптики. М."Наука". 1990. С. 296.
5. Козлов Е.М., Терехин Г.И. Некоторые результаты анализа измерений спектральной яркости системы морская поверхность-атмосфера. // Исслед. Земли из космоса. 1989. №6. С. 70-78.
6. 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. № 7/8. P. 475-483.
7. Бадаев В.В., Васильев Л.Н., Козлов Е.М., Мулдашев Т.З. О масштабной дифференциации компонентов системы "водная толща - поверхность - атмосфера" при дистанционном зондировании в видимой области спектра. // Исслед. Земли из космоса. 2003. № 5. С. 86-93.
8. Penndorf R. Tables of the refractive index for standard air and the Rayleigh scattering coefficient for the spectral region between 0,2 and 20 and their application to atmospheric optics. // J.Opt/Soc. America. 1957. 47. 2.
9. Новогрудский Б.В., Скляр В.Е., Федоров К.Н., Шифрин К.С. Исследование океана из космоса // Новости и проблемы науки. Ленинград. Гидрометеиздат. 1978. С. 54.