

О дифференциации компонентного состава САП на основе спектрального подхода по спектральным измерениям в оптическом диапазоне длин волн в международном эксперименте Карибэ-88

Е.М. Козлов

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

В работе приводится краткое описание сути метода дифференциации компонентного состава САП с применением спектрального подхода. На примере обработки измерений спектральной яркости восходящего излучения, которые были выполнены над водной поверхностью с высоты 3,5 км аппаратурой МКС-М (блок БС) с борта самолета-лаборатори во время международного многоуровневого эксперимента Карибэ-88, демонстрируются предварительные результаты применения рассмотренного метода при восстановлении спектральной яркости атмосферной дымки и выходящего из водной толщи излучения. Восстановление проведено для интервала длин волн $\lambda = 416-570$ нм.

Введение

Результаты проведенных в [1, 2] исследований позволяют утвердиться во мнении, что наблюдаемая анизотропия вариаций спектральной яркости восходящего излучения в пространстве λ, Ω является следствием проявления компонентов, образующих систему атмосфера-поверхность (САП). Отмеченное обстоятельство, позволяет прийти к выводу, что компоненты САП в пространстве λ, Ω могут характеризоваться взаимными спектральными (или би-спектральными) образами $VS_k(\Omega, \lambda)$. Таким образом, с одной стороны, отображая характер реакции взаимодействия k-компонента системы с электромагнитным (солнечным) излучением $r_k(\lambda)$, а с другой - пространственные особенности регистрируемого компонента.

Такое объяснение природы анизотропии вариаций может позволить расширить возможности использования спектрального подхода при решении задач дифференциации компонентного состава (ДКС) САП. Например, по сравнению с методом, в котором используются фрактальные характеристики поля вариаций [3].

Постановка задачи

К числу задач ДКС САП относится проблема разделение вкладов атмосферы (атмосферной дымки) и поверхности при дистанционном зондировании (ДЗ) в оптическом диапазоне спектра слабо-отражающих поверхностных образований. Трансформация восходящего излучения САП в этом диапазоне за счет рассеивающих свойств ее компонентов, сопровождаемая эффектами многократного рассеяния, может приводить к значительным искажениям, которые проявляются в размытости и уменьшении контраста регистрируемых изображений. Без применения специальных мер, ошибка восстановления дешифровочных признаков наблюдаемых компонентов САП, может достигать нескольких сотен процентов [4].

Примером задачи, при решении которой приходится сталкиваться с этой проблемой, является дистанционное определение концентрации хлорофилла в морской воде [5].

Достоверность конечного результата – определение концентрации хлорофилла в морской воде, определяется совершенством и надежностью метода, который выбран для решения задачи “атмосферной коррекции”. Так для этих целей можно использовать алгоритм Г.Гордона [6], но

проведенный в работе [5] анализ совокупного воздействия всех источников погрешностей, показывает, что ошибка этого метода оказывается большой.

Математически более строгим и физически обоснованным является подход, в котором используется МКС-методика [5]. Пожалуй, ее уязвимым местом можно считать необходимость использования для решения задачи “атмосферной коррекции” априорной информации, неадекватность которой реальным условиям измерений может приводить к известным ошибкам.

Как представляется, альтернативным вариантом решения этой задачи может быть использование спектрального подхода, который может позволить снизить долю априорной информации, которая необходима для ее решения, тем самым, уменьшая суммарные ошибки восстановления отыскиваемых величин.

Более обоснованная и исчерпывающая оценка положительных и отрицательных сторон предлагаемого подхода возможна лишь только после его соответствующих исследований и проверки на практике. Первым шагом в этом направлении можно считать приводимые ниже предварительные результаты попытки восстановления спектральной яркости атмосферной дымки и выходящего из водной толщи излучения с использованием спектрального подхода по материалам международного многоуровневого эксперимента «Карибэ-88».

О спектральном подходе при дифференциации компонентного состава САП

В основе метода ДКС с применением спектрального анализа, лежит линейно-системный подход и состоит в использовании особенностей реакций $r_k(\lambda)$ восстанавливаемых компонентов САП при взаимодействии с электромагнитным (солнечным) излучением. Эти особенности проявляются через регистрируемые в пространстве λ, Ω вариации спектральной яркости восходящего излучения, а их индикатором являются взаимные спектральные образы $VS_x(\Omega, \lambda)$.

В целом, метод состоит в применении к ансамблю, образованному измерениями спектральной яркости $I_\lambda(x)$, комплекса фильтрующих (в широком понимании этого слова) процедур [7], параметры которых определяются из результатов спектрального анализа вариаций $\Delta I_\lambda(x)$ [2, 8]. Тем самым выделяются данные, принадлежащие определенным областям спектрального λ, Ω и евклидова пространств. Затем, путем применения соответствующего решаемой задаче алгоритма обработки, входными параметрами которой являются характеристики выделенных данных, определяются искомые величины.

Характеристика измерений

Для исследований возможностей, оценки работоспособности и выявления недостатков использованного алгоритма восстановления спектральной яркости атмосферной дымки и выходящего из водной толщи излучения с применением рассмотренного подхода, были обработаны, нормированные на солнечную постоянную выраженные в абсолютных единицах, надирные спектральные измерения восходящего излучения САП $I_{n\lambda, H=3.5}(x)$, выполненные во время международного многоуровневого эксперимента “Карибэ-88”. Наблюдения проводились 15.04.1988 г. с борта самолета-лаборатории на высоте 3,5км при помощи аппаратуры МКС-М [9]. Измерения содержат свыше $N = 4200$ распределений I_λ , в двенадцати каналах блока БС. Одновременно с регистрацией $I_{\lambda, H=3.5}(x)$ с борта самолета-лаборатории, аналогичной аппаратурой проводились квази-синхронные измерения $I_{\lambda, H=350}(x)$ на долговременной орбитальной станции (ДОС) Мир.

Распределения средних значений спектральной яркости $\bar{I}_{n\lambda, H=3.5}(x)$ для 2-го - 6-го участков

трассы, на которые она была условно разделена на стадии детального анализа эксперимента [3] приведены на рис 1. Представленные распределения демонстрируют имевшую место пространственную неоднородность поля спектральной яркости вдоль трассы наблюдений.

В программу эксперимента входили измерения некоторых оптических свойств морской воды [3] с борта кубинских научно-исследовательских судов. Проводимый во время эксперимент контроль оптической погоды путем измерений спектральной оптической толщины атмосферы $\tau_{\lambda}^{\bullet} = \tau_{\lambda r} + \tau_{\lambda a}$, где $\tau_{\lambda r}$ и $\tau_{\lambda a}$ - соответственно, релейевская и аэрозольная составляющие оптической толщины, показал, что оптические условия характеризовались изменчивостью спектральной оптической толщины атмосферы, которая составляла 20-25%.

Обсуждение результатов

Предварительные результаты восстановления яркости атмосферной дымки $I_{a\lambda}$ и выходящего из водной толщи излучения $I_{p\lambda}$, с использованием спектрального подхода иллюстрируются рис. 1 и 2.

- При восстановлении был использован упрощенный алгоритм обработки, который предполагал:
- постоянство спектральной яркости атмосферной дымки $I_{a\lambda}$ вдоль всей трассы наблюдений;
 - вклад яркостей водной поверхности и за счет отражения от дна в $I_{p\lambda}$ принимался равным 0.

Восстановленные на участке $\lambda = 416-570$ нм спектральные значения яркости атмосферной дымки, которые находятся в интервале 0.33-0.4, представлены на рис. 1 утолщенной линией. «Коридор» среднеквадратических отклонений восстановления изображен штрих-пунктиром. Максимум откло-

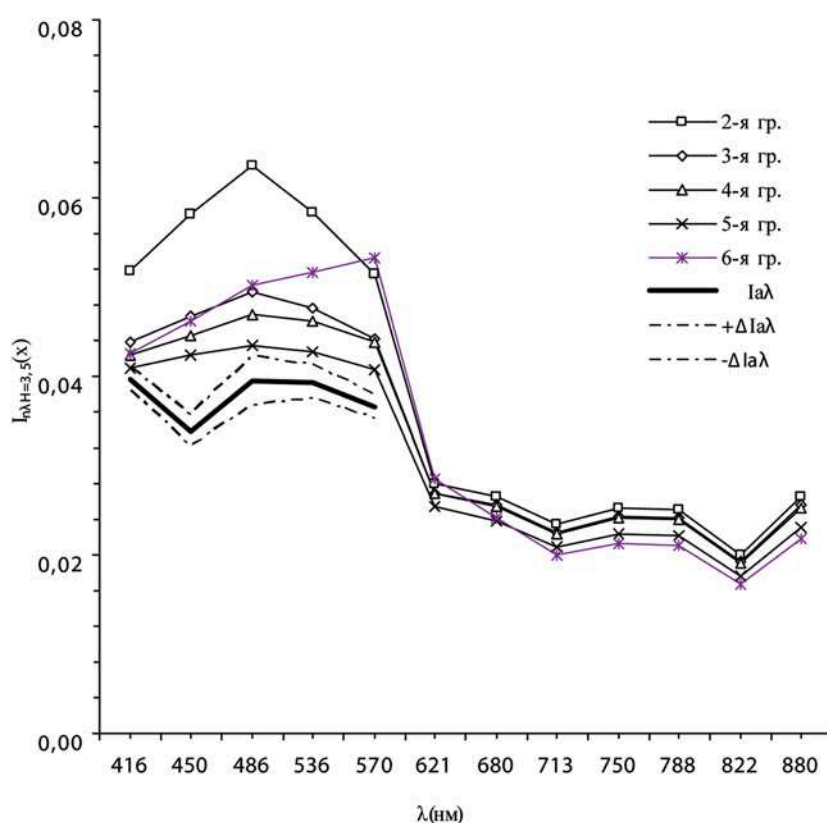


Рис. 1. Распределения средних значений нормированных на солнечную постоянную спектральной яркости $\bar{I}_{n\lambda, H=3.5}(x)$ для 2-го – 6-го участков трассы, измеренные с высоты 3,5 км. $I_{a\lambda}$ - восстановленные спектральные значения яркости атмосферной дымки. $\Delta I_{a\lambda}$ - среднеквадратические отклонения восстановления $I_{a\lambda}$

нений, приходится на $\lambda = 495$ нм и не превышает 5%. Значения $I_{a\lambda}$ сопоставимы со средними измеренными значениями восходящего излучения $\bar{I}_{n\lambda, H=3.5}(\bar{x})$, которые принадлежат 5-ой группе.

Результаты восстановления выходящего из водной толщи излучения, характеризуемого спектральной яркостью $I_{p\lambda} = I_{hp\lambda} / p(\lambda)$, где $I_{hp\lambda}$ - восстановленное значение яркости на высоте наблюдений $h = 3,5$ км; $p(\lambda)$ - коэффициент пропускания атмосферы, представлены на рис. 2 распределениями 1.1 и 1.2. Коэффициент пропускания оценивался для средних значений оптической толщины τ_{λ}^{\bullet} , полученных из наземных измерений. Выражение для $p(\lambda)$ определялось схемой наблюдений.

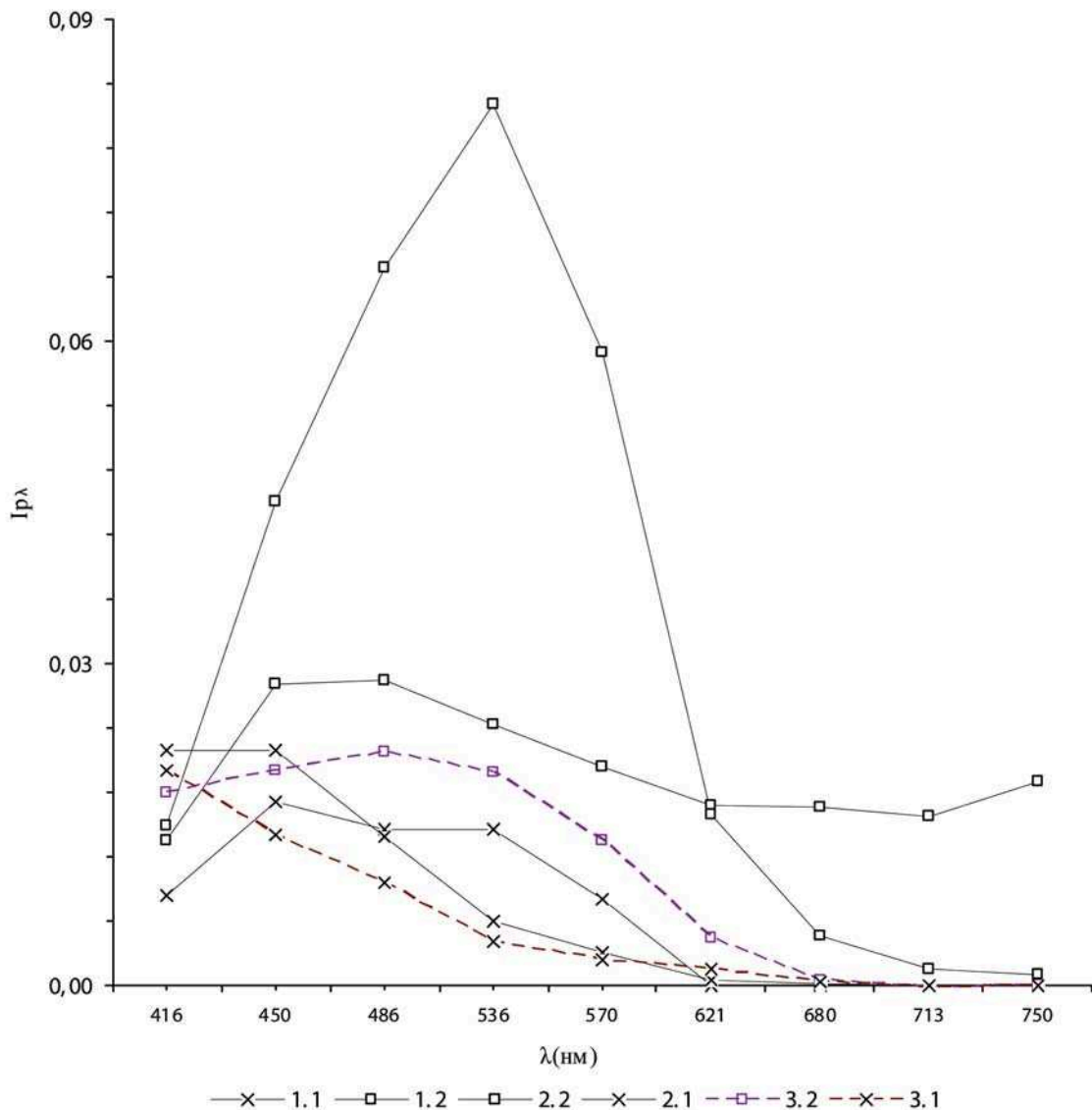


Рис. 2. Распределения граничных значений выходящего из водной толщи излучения, характеризуемого спектральной яркостью $I_{p\lambda}$, 1.1; 1.2 – восстановленные с использованием спектрального подхода; 2.1; 2.2 – корабельные измерения; 3.1; 3.2 – результаты восстановления по МКС-методике

Проблема, с которой пришлось столкнуться при сопоставлении корабельных измерений и полученных различными методами результатов восстановления, состоит в том, что используемые

для этих целей данные имеют различное пространственное разрешение. Из-за отсутствия возможностей, которые позволили бы преодолеть это препятствие, был избран подход, который использовался в [5], и состоял в сравнении распределений граничных значений. Эта информация о корабельных данных и результатах восстановления по измерениям с ДОС Мир с использованием МКС-методики [10] представлена на рис. 2 соответственно распределениями 2.1; 2.2 и 3.1; 3.2.

Сопоставление минимальных значений спектральной яркости, восстановленных с использованием спектрального подхода (распределение 1.1), с корабельными измерениями (распределение 2.1) и восстановленными по МКС-методике (распределение 3.1), обнаруживает их качественное совпадение.

Распределения максимальных значений (1.2, 2.2 и 3.2), имеют существенные взаимные отклонения, прежде всего, вызванные различием в пространственном разрешении, с которым они были получены. Обращает на себя внимание, что их относительный ход восстановленных с использованием спектрального подхода значений $I_{p\lambda}$, имеет заметные отклонения, например, по отношению к результатам восстановления по МКС-методике. Анализ возможных причин с привлечением данных [1, 11], позволяет сделать предположения об их природе и провести их оценку.

Прежде всего, возможной причиной отклонений, могут быть ошибки, вызванные точностью восстановления спектральной яркости атмосферной дымки $I_{a\lambda}$. Ее максимум приходится на $\lambda = 435 - 496$ нм, и составляет для распределения 1.1 порядка 20%. Это, значительно меньше вклада атмосферы, регистрируемого по измерениям спектральной яркости $\bar{I}_{n\lambda, H=3.5}(\bar{x})$ (рис.1). Как было отмечено выше, восстановленные значения яркости атмосферной дымки, сопоставимы с измерениями 5-й группы, и превышает восстановленные для нее значения $I_{p\lambda}$ в 8,5 раз.

Отклонения, которые имеют место для распределений максимальных значений (1.2), начиная с $\lambda = 570$ нм, возрастают по мере смещения в длинноволновую область спектра, в то время, как для распределений минимальных значений (1.1) они практически совпадают с аналогичными распределениями (3.1), восстановленными по методике МКС. Вероятно, эти отклонения вызваны отражением от водной поверхности и дна, которые в использованном алгоритме восстановления не рассматривались.

Проведенный разбор возможных причин и источников ошибок позволяет надеяться на их уменьшение (кроме отклонений, вызванных различиями в пространственном осреднении), после внесения соответствующих изменений в алгоритм обработки.

Заключение

Таким образом, рассмотренные предварительные результаты дифференциации компонентов САП, позволяют предполагать о принципиальной возможности применимости рассмотренного метода ДКС при решении задач дистанционного зондирования. Имеющиеся резервы в части учета мешающих факторов, дают надежды на получение более качественных результатов после соответствующей доработки алгоритма ДКС САП.

Литература

1. Козлов Е.М. Разработка методов спутникового зондирования системы «атмосфера-поверхность». Отчет ИКИ РАН по НИР, раздел 4.4.10 темы «Атмосфера»; 2005. 32 с.
2. Козлов Е.М. О передаточной характеристике системы «водная толща – поверхность – атмосфера» в оптическом диапазоне длин волн в эксперименте Карибэ-88 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мо-

мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. Сборник научных статей. М.: ООО «Азбука-2000», 2007. Выпуск 4. Т. 1. С. 69-71.

3. Бадаев В.В., Васильев Л.Н., Козлов Е.М., Т.З. Мулдашев. О масштабной дифференциации компонентов системы “водная толща – поверхность – атмосфера” при дистанционном зондировании в видимой области спектра // Исследование Земли из космоса, 2003. № 4. С.1-6.

4. Зеге Э.П., Иванов А.П., Кацев И.Л. Перенос изображения в рассеивающей среде. Минск: Наука и техника, 1985. 327 с.

5. Бадаев В.В., Васильев Л.Н., Пелевин В.Н., Соломаха В.Л., Циммерманн Г. Определение концентрации хлорофилла фитопланктона в океане по измерениям с орбитальной станции МИР в эксперименте “Карибэ-88” // Исследование Земли из космоса, 1991. № 5. С. 47-55.

6. Gordon H.R. Removal of atmospheric effects from satellite imagery of the oceans // Appl. Opt. 1978. V. 17. №10. p. 1631-1636.

7. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. М.: Мир, 1983. Т. 1. 311 с.

8. Козлов Е.М. Некоторые результаты исследований взаимных спектров вариаций яркости восходящего излучения системы “водная толща - поверхность - атмосфера” в оптическом диапазоне длин волн по материалам многоуровневого эксперимента Карибэ-88 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. Сборник научных статей. М.: ООО «Азбука-2000», 2006. Т. 1. С.102-105.

9. Zimmermann G., Badaev 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.

10. Малкевич М.С., Бадаев В.В., Истомина Л.Г. и др. Итоговый отчет по исследованию параметров системы атмосфера – поверхность дистанционными методами. Эксперимент МКС-М – МКФ-6М на станции «Салют-7», 1983-1985 гг. М.: ВИНТИ, 1988. С. 13-59.

11. Оптика океана. Т. 1. Физическая оптика океана / Под ред. А.С. Мониной. М.: Наука, 1983. 372 с.