

**Е.В. Шалина**

## **СПОСОБ ВОССТАНОВЛЕНИЯ АЛЬБЕДО ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ УХОДЯЩЕЙ РАДИАЦИИ СО СПУТНИКА**

Предложен способ восстановления альbedo подстилающей поверхности совместно с оптической толщиной атмосферы и альbedo однократного рассеяния аэрозоля пограничного слоя по данным измерений уходящей КВ радиации, полученным с борта спутника в условиях безоблачного неба. В основе изложенной схемы лежит найденная с помощью численных экспериментов четырехпараметрическая зависимость между потоком уходящего КВ излучения и перечисленными выше параметрами системы «подстилающая поверхность — атмосфера», а также зенитным углом Солнца. Исследована чувствительность потока уходящего КВ излучения к вариациям параметров атмосферы и подстилающей поверхности. Приведены данные о благоприятных и неблагоприятных для решения рассматриваемой задачи дистанционного зондирования состояниях атмосферы и подстилающей поверхности, высказаны соображения относительно организации спутниковых измерений.

Ограниченность массива данных сети наземных актинометрических станций определяет актуальность решения задачи восстановления радиационного баланса подстилающей поверхности и его составляющих по данным спутниковых измерений уходящего излучения. Можно выделить два подхода к решению указанной задачи — эмпирический и теоретический. Первый состоит в сопоставлении данных спутниковых и наземных (подспутниковых) наблюдений и выявлении корреляционных связей между уходящим излучением и составляющими радиационного баланса подстилающей поверхности и атмосферы [1, 2]. Полученные таким способом соотношения отражают специфику переноса излучения и строения атмосферы в соответствующих регионах и применимы лишь в тех областях, где производились измерения. Второй подход включает в себя численное моделирование переноса излучения в атмосфере и на его основе параметризацию ряда зависимостей. Этот способ позволяет получить соотношения, применение которых оправдано в той мере, в какой оптическая модель атмосферы и способ расчета переноса излучения соответствуют реальной подспутниковой ситуации [3, 4, 5].

Изучение работ, посвященных восстановлению составляющих радиационного баланса подстилающей поверхности по данным спутниковых радиационных измерений показывает, что одной из наиболее трудных проблем оказалась задача восстановления альbedo подстилающей поверхности [6]. Содержание настоящей работы составляют результаты, полученные при решении указанной задачи с помощью численного моделирования.

Представляемая схема рассчитана на случай безоблачной атмосферы. Альbedo подстилающей поверхности предлагается оценивать по спутниковым измерениям потока уходящего излучения с длиной волны 0,55 мкм (схема должна быть уточнена в случае, когда спутник измеряет излучение другого волнового диапазона). Выявлена возможность одновременно с определением альbedo поверхности оценивать оптическую толщину атмосферы и альbedo однократного рассеяния аэрозоля пограничного слоя атмосферы — параметры, обладающие значительной пространственно-временной изменчивостью. То, что методика не требует априорного задания указанных параметров или подспутниковых измерений, составляет ее главное отличие от существующих схем восстановления альbedo поверхности по спутниковым измерениям.

Расчеты переноса излучения проведены с помощью метода, использующего дельта—приближение Эддингтона. Для тех реализаций оптических свойств атмосферы, которые рассмотрены в работе, названный метод, согласно [7], позволяет вычислять поток уходящего КВ излучения с ошибкой от 1,5 до 10%. Причем наибольшей ошибке соответствует случай наиболее сильно поглощающего аэрозоля. Учтено поглощение излучения основными газовыми составляющими атмосферы, релеевское рассеяние.

Пространственное распределение аэрозоля промоделировано по [8] в соответствии с региональным принципом деления атмосферы. Учтены специфические условия различных районов земного шара: морской поверхности, континентальных областей, промышленных зон. При описании вертикальной структуры атмосферы предполагалось, что региональная изменчивость оптических свойств аэрозоля проявляется лишь в планетарном пограничном слое атмосферы толщиной 2 км. Следует отметить, что последнее предположение оправдывается далеко не всегда. В реальной атмосфере толщина этого слоя может быть как большей, так и меньшей: возможны, например, выносы пыли пустынь на высоту до 6 км. Подобные случаи в данной работе не рассматривались. Выше уровня двух километров в вертикальном строении атмосферы выделено еще три области: тропосфера, стратосфера и мезосфера — каждая из которых имеет свой аэрозольный состав [8]. Как показали расчеты, возможные вариации аэрозоля, находящегося выше пограничного слоя атмосферы, за исключением мощных вулканических выбросов, не оказывают существенного влияния на уходящую радиацию. Поэтому для тропосферы, стратосферы и мезосферы был использован фоновый профиль аэрозольного коэффициента ослабления.

Среди параметров, определяющих величину уходящего излучения КВ диапазона, были выявлены наиболее значимые. По результатам расчетов ими оказались альbedo подстилающей поверхности  $A$ , оптическая толщина атмосферы  $\tau$  и альbedo однократного рассеяния аэрозоля пограничного слоя атмосферы  $\omega$ , причем зависимость потока уходящего излучения от перечисленных параметров близка к линейной. Подобные результаты уже встречались в [7, 9–12] для однослойной атмосферы. Расчеты, проведенные для широкого спектра возможных реализаций оптических свойств атмосферы, показали, что ошибка линейного представления составляет не более 3% в следующих диапазонах изменения параметров:  $A$  от 0,1 до 0,7,  $\omega$  от 0,5 до 1,0 и  $\tau$  от 0,15 до 0,45. Два первых из приведенных интервалов представляют области естественных изменений соответствующих параметров в атмосфере, последний же (для  $\tau$ ) охватывает лишь случаи несильной замутненности атмосферы. С увеличением  $\tau$  зависимость уходящего излучения от этого параметра следует описывать, видимо, квадратичной зависимостью. Таким образом, одно из ограничений представляемой методики состоит в требовании несильной (в указанном выше смысле) замутненности атмосферы. Существенное влияние на уходящее излучение кроме перечисленных параметров имеет положение Солнца, причем зависимость потока уходящего КВ излучения от косинуса зенитного угла Солнца  $\mu$ , тоже может быть описана линейной функцией.

Изложенные результаты определили вид зависимости потока уходящего в космос излучения от перечисленных параметров:

$$\frac{F\uparrow}{F_0} = b_0 + b_1\mu + b_2\tau + b_3\omega + b_4A + b_5\mu\tau + \dots + b_{11}\mu\tau\omega + \dots + b_{15}\mu\tau\omega A. \quad (1)$$

где  $F\uparrow/F_0$  — величина уходящего потока в единицах падающего на верхнюю границу потока солнечного излучения,  $b_0, b_1, \dots, b_{15}$  — неизвестные коэффициенты. Приведенное выражение линейно по каждому из четырех параметров. В нем учтен также тот факт, что ход зависимости уходящего потока от любого из параметров может меняться (оставаясь линейным) вследствие изменения значений других параметров. Это взаимовлияние отражено в (1) включением двучленных, трехчленных и одного четырехчленного произведения.

Поиск неизвестных коэффициентов зависимости (1) проводился с использованием рекомендаций, разработанной теорией факторного планирования эксперимента [13]. Для начала задача была масштабирована, т.е. соответствующей заменой переменных все четыре параметра зависимости (1) были приведены к изменению в интервалах от  $-1$  до  $+1$  и рассматривались в качестве контролируемых факторов. Такой формулировки задачи требовала теория факторного планирования эксперимента. Кроме того, масштабирование обеспечило возможность количественно сравнить роль разных параметров в формировании поля уходящего излучения.

В масштабированном виде искомая зависимость выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{F\uparrow}{F_0} = & 0,172 + 0,046 - 0,003x_1 + 0,014x_2 + 0,062x_3 - 0,002x_0x_1 + 0,004x_0x_2 + \\ & + 0,029x_0x_3 + 0,007x_1x_2 - 0,007x_1x_3 + 0,007x_2x_3 + 0,002x_0x_1x_2 - 0,002x_0x_1x_3 + \\ & + 0,002x_0x_2x_3 + 0,003x_1x_2x_3 + 0,001x_0x_1x_2x_3, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $x_0, x_1, x_2$  и  $x_3$  — параметры  $\mu, \tau, \omega$  и  $A$ , приведенные к изменению в одинаковых интервалах: от  $-1$  до  $+1$ .

С одной стороны, величины коэффициентов при линейных членах выражения (2) говорят о мере влияния соответствующих факторов на поток уходящего КВ излучения. В частности, видно, что определяющее влияние на уходящее излучение имеет альbedo подстилающей поверхности: значение коэффициента при линейном члене с масштабированным параметром  $A(x_3)$  наибольшее и равно 0,062. С другой стороны, величины коэффициентов при произведениях факторов указывают на степень взаимовлияния параметров. Так, отрицательный коэффициент при произведении  $x_1x_3$  отражает тот факт, что с увеличением оптической толщины атмосферы влияние  $A$  ослабевает, а коэффициент 0,029 при произведении  $x_0x_3$  — что с уменьшением зенитного угла Солнца определяющая роль альbedo поверхности в формировании поля уходящей радиации усиливается.

Зависимость (2), пересчитанная для параметров в реальном масштабе

$$\begin{aligned} \frac{F \uparrow}{F_0} = & 0,053 + 0,017\mu + 0,015\tau - 0,06\omega - 0,032A - 0,021\mu\tau + 0,054\tau\omega - \\ & - 0,159\tau A - 0,024\mu\omega + 1,204\mu A - 0,019\omega A + 0,086\tau\mu\omega - 1,601\tau\mu A + \\ & + 0,090\tau\omega A - 0,222\mu\omega A + 1,344\mu\tau\omega A, \end{aligned} \quad (3)$$

позволяет по спутниковым измерениям  $F \uparrow$  и  $F_0$ , произведенным для разных условий освещения (разных  $\mu$ ) при неизменной подспутниковой обстановке, восстанавливать искомые параметры. Предложенная процедура может быть легко реализована при наличии данных измерений с борта геостационарного спутника. Подобрать данные с полярных спутников, удовлетворяющие поставленным условиям, значительно сложнее.

Эффективность предложенной схемы может быть оценена после разрешения вопроса о чувствительности уходящего в космос потока КВ радиации к изменениям параметров атмосферы  $\tau$  и  $\omega$  альbedo подстилающей поверхности  $A$ . Были получены соотношения для производных функций (1) по перечисленным параметрам. В масштабированном виде они выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} P_1 &= 0,038 - 0,024x_0 + 0,077x_2 - 0,075x_3 + 0,021x_0x_2 - 0,021x_0x_3 + 0,036x_2x_3 + 0,012x_0x_2x_3; \\ P_2 &= 0,055 + 0,014x_0 + 0,031x_1 + 0,026x_3 + 0,009x_0x_1 + 0,015x_1x_3 + 0,009x_2x_3 + 0,05x_0x_1x_3; \\ P_3 &= 0,316 + 0,145x_0 - 0,038x_1 + 0,032x_2 - 0,011x_0x_1 + 0,018x_1x_2 + 0,011x_0x_3 + 0,006x_0x_1x_3; \end{aligned} \quad (4)$$

где  $P_1$  — производная  $F \uparrow (\tau, \omega, A, \mu) / F_0$  по  $\tau$ ,  $P_2$  — производная по  $\omega$  и  $P_3$  — по  $A$ .

Как видно из приведенных выражений, производная  $P_3$  достигает наибольших значений. Это еще одно подтверждение факта, что измеряемая на спутнике величина уходящего излучения наиболее чувствительна к изменениям альbedo подстилающей поверхности. Кроме того, коэффициент при параметре  $x_0$  (масштабированном косинусе зенитного угла Солнца  $\mu$ ) в выражении для  $P_3$  значительно больше аналогичных коэффициентов в двух других выражениях, поэтому эффективность определения величины  $A$  наиболее сильно зависит от организации спутниковых измерений. Этот вывод иллюстрируется рис. 1, где показана зависимость всех трех производных от  $\mu$  в реальном масштабе изменения параметров. Чем больше величина  $\mu$  во время измерений, тем большая чувствительность измеряемой величины к вариациям  $A$  может быть достигнута. Однако в ряде случаев следствием увеличения  $\mu$  будет потеря чувствительности к вариациям  $\tau$  (см. рис. 1).

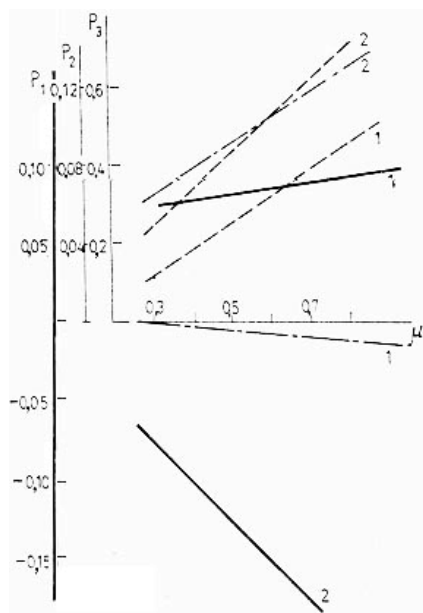


Рис. 1. Зависимость производной  $P_1$  (сплошная линия),  $P_2$  (штрихпунктирная линия) и  $P_3$  (пунктир) от зенитного угла Солнца: 1 —  $\tau = 0,15$ ,  $\omega = 0,99$ ,  $A = 0,1$ ; 2 —  $\tau = 0,45$ ,  $\omega = 0,5$ ,  $A = 0,5$

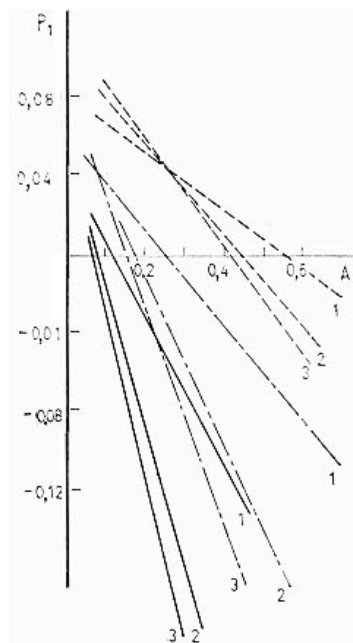


Рис. 2. Зависимость производной  $P_1$  от альbedo подстилающей поверхности: сплошная линия для  $\omega = 0,5$ , штрихпунктир для  $\omega = 0,99$ ; для различных  $\mu$ : 1 —  $0,3$ ; 2 —  $0,65$ ; 3 —  $0,8$

Показанные на рис. 2 и 3 зависимости производных  $P_1$  и  $P_2$  от  $A$  в реальном масштабе демонстрируют влияние состояния подспутниковой обстановки на чувствительность спутниковых измерений. Из рис. 2 и первого соотношения (4) видно, что производная  $P_1$  определяющая чувствительность спутниковых измерений к вариациям оптической толщины атмосферы, испытывает противоположное влияние при изменениях  $\omega$  и  $A$ . Существуют «неблагоприятные» сочетания указанных параметров, при которых  $P_1$  обращается в нуль. Это, например, диапазон  $0,07 \div 0,12$  изменения  $A$  при  $\omega = 0,5$ ,  $0,15 \div 0,25$  при  $\omega = 0,75$ ,  $0,38 \div 0,44$  при  $\omega = 0,99$ . В этом случае решающую роль в увеличении чувствительности эксперимента должен сыграть правильный выбор параметра измерений  $\mu$ . Так, если при  $\mu = 0,3$  для случая  $\omega = 0,5$  и  $A = 0,12$  производная обращается в нуль, то при  $\mu = 0,8$  она приближается к  $0,05$  по абсолютному значению. Можно заметить, что при приближении значения  $\omega$  к 1 чувствительность к вариациям  $\tau$  все меньше зависит от величины  $\mu$  (см. рис. 1).

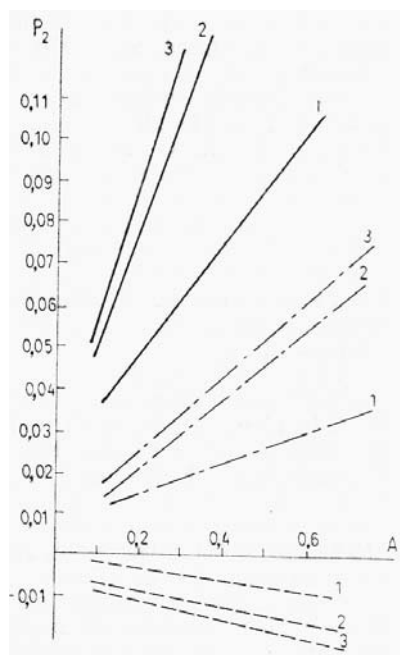


Рис. 3. Зависимость производной  $P_2$  от альбедо подстилающей поверхности: сплошная линия для  $\tau = 0,45$ , штрихпунктир для  $\tau = 0,25$ , пунктир для  $\tau = 0,15$ ; для различных: 1—0,3; 2—0,65; 3—0,8

Величина производной  $P_2$  чаще всего меньше  $P_1$  и почти везде меньше  $P_3$  (см. рис. 1), что указывает на наименьшую чувствительность спутниковых измерений к вариациям  $\omega$  и на относительно низкую надежность восстановления этого параметра. Как видно из рис. 3, при высокой прозрачности атмосферы ( $\tau$  около 0,15) производная  $P_2$  близка к нулю. Она быстро растет с ростом  $\tau$  и  $A$ . При увеличении  $\tau$  на 0,1  $P_2$  может вырасти в 2 раза, а при увеличении  $\tau$  на 0,2 — в 4 раза. Только при больших значениях  $\tau$  и  $A$  начинает проявляться существенная зависимость  $P_2$  от  $\mu$  (см. рис. 1 и 3). Таким образом, чувствительность спутниковых измерений к вариациям  $\omega$  в основном определяется подспутниковой обстановкой и лишь в небольшой степени зависит от параметра измерений  $\mu$ .

Итак, предложенная схема дистанционного зондирования с наибольшей чувствительностью работает при определении по спутниковым радиационным измерениям альбедо подстилающей поверхности. Предлагается считать это ее основным назначением. Работать она должна тем точнее, чем больше  $\mu$  и чем меньше оптическая толщина атмосферы. Применять ли этот метод для восстановления оптической толщины атмосферы и альбедо однократного рассеяния аэрозоля пограничного слоя, должен подсказать анализ подспутниковой обстановки, которая в достаточном приближении всегда известна, поскольку известны координаты области, над которой спутник проводит измерения. Например, неблагоприятная для восстановления  $\tau$  ситуация — это слабо отражающая поверхность и слой сильно поглощающего аэрозоля над ней. Если есть основания считать подспутниковую обстановку для определения  $\tau$  и  $\omega$  «неблагоприятной», в выражение (3) следует подставить оценочные значения названных величин и пользоваться двухпараметрической зависимостью, в которой один из параметров ( $\mu$ ) будет параметром измерений, а  $A$  — искомым.

1. Ellis J. S., Vonder Haar T. H. Solar radiation reaching the ground determining from meteorological satellite data. — Third Conf. Atmos. Radiat. of the Amer. Meteorol. Soc. Preprints, June 28–30, 1978, Davis, Calif., p. 187–189.
2. Rockwood A. A., Cox S. K. Satellite inferred surface albedo over North-western Africa. — J. Atmos. Sci., 1978, v. 35, № 3, p. 513–522.
3. Raschke E., Preuss H. J. The determination of the solar radiation budget of the Earth's surface from satellite measurements. — Meteorol. Rdsch., 1979, v. 32, № 1, p. 21–28.
4. Preuss H. J., Geleyn J. F. Surface albedos derived from satellite data and their impact on forecast models. — Archiv für Meteorol., Geophys. und Bioklimat., 1980, Ser. A, v. 29, № 4, p. 345–356.
5. Chen T. S., Ohring G. On the relationship between clear-sky planetary and surface albedos: a parameterization for simple energy balance climate models. — Adv. Space Res., 1985, v. 5, № 6, p. 141–144.
6. Кондратьев К. Я. Радиационный баланс Земли, аэрозоль и облачность. — Итоги науки и техники. Метеорология и климатология. Т. 10. — М.: ВИНТИ, 1983. — 315 с.
7. Тарасова Т. А., Фейгельсон Е. М. Об учете эффекта аэрозоля в лучистом теплообмене. — Изв. АН СССР, ФАО, 1981, т. 17, № 1, с. 18–26.
8. McClathrey R. A., Bolle H.-J., Kondratyev K. Ya. Report of the I AM AP RC WG on a Standard Radiation Atmosphere. WMO/IAMAP. — Fort Collins, Colorado, USA. 10 August 1980. Preprint.
9. Тарасова Т. А., Фейгельсон Е. М. Влияние тропосферного аэрозоля на интегральное альbedo системы атмосфера — подстилающая поверхность. — Изв. АН СССР, ФАО, 1982, т. 18, № 11, с. 1199–1206.
10. Сушкевич Т. А., Иолтуховский А. А., Стрелков С. А. О влиянии атмосферы при дистанционном зондировании подстилающей поверхности. — В сб.: Исследование природных ресурсов Земли из космоса. Труды VII объединенных научных чтений по космонавтике, посвященных памяти выдающихся советских ученых — пионеров освоения космического пространства. Москва, 24–28 января 1983 г. — М., 1983, с. 10–44.
11. Hergman B. M., Browning S. R. The effect of aerosols on the earth-atmosphere albedo. — J. Atmos. Sci., 1975, v. 32, № 7, p. 1430–1445.
12. Reck R. A. Influence of airborne particles on the earth's radiation balance. — General Motors Research Laboratories, Warren, MI, GMR-2791, 20 July 1978. — 29 p.
13. Монтгомери Д. К. Планирование эксперимента и анализ данных. — Л.: Судостроение, 1980. — 383 с.

Главная геофизическая  
 обсерватория им. А. П. Воейкова,  
 Ленинград

Поступила в редакцию  
 8 октября 1987 г.

**E. V. Shalina. A Retrieval Procedure for the Reconstruction of the Surface Albedo from Satellite Measurements of the Outgoing Radiation.**

A retrieval procedure for the reconstruction of the surface albedo and single-scattering albedo of the boundary layer aerosol as well as the optical thickness of the atmosphere from the satellite measurements of the outgoing short-wave radiation for clear sky has been developed. The proposed approach is based on the numerical simulation data on the outgoing flux as a function of the above parameters characterizing the atmosphere underlying surface system and of the zenith angle.