
СПЕКТРАЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

SPECTRAL DEVICES

УДК 528.8

ИССЛЕДОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ СКАНИРУЮЩЕГО СОЛНЕЧНОГО СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРА

А. О. МАТИНОВ¹⁾, Л. В. КАТКОВСКИЙ¹⁾, В. В. СТАНЧИК¹⁾, Б. И. БЕЛЯЕВ¹⁾

¹⁾Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ,
ул. Курчатова, 7, 220108, г. Минск, Беларусь

Представлен разработанный и созданный в НИИПФП имени А. Н. Севченко БГУ сканирующий солнечный спектрополяриметр. Описываются программно-технические решения, используемые в аппаратно-программной разработке. Приводится методика измерения рассеянного в атмосфере солнечного излучения и методика восстановления из данных измерений атмосферных параметров. По результатам проведенных измерений рассчитаны поляризационные характеристики рассеянного солнечного излучения и параметры атмосферы.

Ключевые слова: спектр; атмосферные параметры; спектрополяриметр; поляризация; решение обратной задачи.

Образец цитирования:

Мартинов АО, Катковский ЛВ, Станчик ВВ, Беляев БИ. Исследование атмосферы с помощью сканирующего солнечного спектрополяриметра. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2018;3:20–30.

For citation:

Martinov AO, Katkouski LV, Stanchick VV, Beliaev BI. Investigation of the atmosphere with a scanning solar spectropolarimeter. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2018;3:20–30. Russian.

Авторы:

Антон Олегович Мартинов – научный сотрудник.
Леонид Владимирович Катковский – доктор физико-математических наук, доцент; заведующий лабораторией дистанционной фотометрии.
Валерий Валерьевич Станчик – инженер-программист.
Борис Илларионович Беляев – доктор физико-математических наук, профессор; заведующий отделом аэрокосмических исследований.

Authors:

Anton O. Martinov, researcher.
antonmartinov@gmail.com
Leand V. Katkouski, doctor of science (physics and mathematics), docent; head of the laboratory of remote photometry.
remsens@mail.ru
Valery V. Stanchick, software engineer.
remsens@mail.ru
Boris I. Beliaev, doctor of science (physics and mathematics), full professor; head of the department of aerospace research.
remsens@mail.ru

INVESTIGATION OF THE ATMOSPHERE WITH A SCANNING SOLAR SPECTROPOLARIMETER

A. O. MARTINOV^a, L. V. KATKOUSKI^a, V. V. STANCHICK^a, B. I. BELIAEV^a

*^aA. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems, Belarusian State University,
7 Kurčatava Street, Minsk 220108, Belarus*

Corresponding author: A. O. Martinov (antonmartenov@gmail.com)

The article presents the scanning solar spectropolarimeter developed and created in the Institute of Applied Physical Problems of BSU. Software and hardware solutions used in hardware and software development are described. A technique for measuring solar radiation scattered in the atmosphere and a method for reconstructing atmospheric parameters from measurements are presented. Based on the results of the measurements, the polarization characteristics of the scattered solar radiation and the parameters of the atmosphere are calculated.

Key words: spectrum; atmospheric parameters; spectropolarimeter; polarization; solution of the inverse problem.

Введение

Измерение спектров отражения излучения природными и искусственными объектами – важная задача, поскольку их спектральные отражательные характеристики являются ключевыми при полетных калибровках многоспектральных бортовых сенсоров, интерпретации космических изображений, разработке и валидации новых методов решения тематических задач. В отделе аэрокосмических исследований НИИПФП имени А. Н. Севченко БГУ по программе Союзного государства «Мониторинг-СГ» разработан и создан аппаратно-программный комплекс (АПК) «Калибровка». Спектральная аппаратура АПК предназначена для использования на подспутниковых полигонах при проведении полетных калибровок спутниковых съемочных систем, а также при испытаниях и поверке новой техники дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), математическом планировании экспериментов ДЗЗ, при верификации и повышении надежности дешифрирования данных ДЗЗ путем интеграции данных космического, авиационного и наземного сегментов. АПК «Калибровка» объединяет в своем составе пять спектральных приборов и использует новые способы спектрометрии, касающиеся, в частности, комплексования спектрорадиометров различных спектральных диапазонов, видеопривязки и регистрации изображений спектрометрируемого объекта с пространственной привязкой поля зрения спектрорадиометра к изображению, географическую привязку объектов, одновременную съемку спектров отражения подстилающей поверхности и освещающего излучения, регистрацию спектрально-угловых зависимостей рассеянного в атмосфере излучения Солнца [1].

В ДЗЗ и при полетных калибровках важную роль играет атмосферная коррекция космических изображений и спектральных данных, требующая определения оптических параметров атмосферы на момент съемки. Для нахождения атмосферных параметров в состав АПК «Калибровка» входит сканирующий солнечный спектрополяриметр ССП-600. В работе представлена методика измерения рассеянного в атмосфере излучения и методика восстановления атмосферных параметров. На основе проведенных экспериментальных измерений рассчитаны атмосферные параметры и поляризационные характеристики рассеянного солнечного излучения.

Сканирующий солнечный спектрополяриметр ССП-600

ССП-600 предназначен для определения характеристик атмосферного аэрозоля на основании регистрации данных прямого и рассеянного под различными углами (в альмукантарате и в плоскости солнечного вертикала) солнечного излучения в диапазоне 350–950 нм [2]. На рис. 1 представлен внешний вид ССП-600.

В составе ССП-600 можно выделить два основных модуля: спектрополяриметр и автоматическую поворотную платформу на основе универсальной монтажки Synta Sky-Watcher AllView Highlight SynScan GOTO (Китай).

Спектрополяриметр ССП-600 включает в себя полихроматор с приемником излучения на ПЗС-линейке с 3648 элементами. Перед проекционным объективом размещена бленда, уменьшающая уровень паразитной засветки. Прибор снабжен визиром для ручного наведения поля зрения на соответствующие участки неба и поляриоидом.

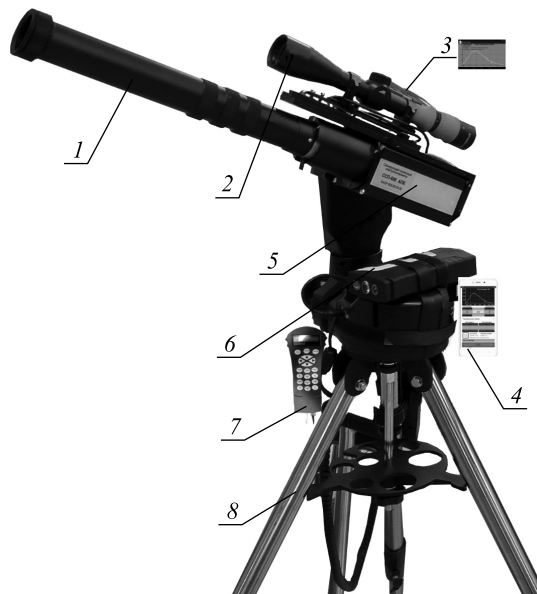


Рис. 1. ССП-600 на поворотной платформе:

1 – бленда с поляроидом; 2 – визир оптический; 3 – смартфон для управления ССП-600;
4 – смартфон для управления монтировкой; 5 – спектрополяриметр ССП-600;
6 – аккумулятор; 7 – пульт управления монтировкой; 8 – монтировка

Fig. 1. SSP-600 on the turntable:

1 – lens hood with a polaroid; 2 – optical viewfinder; 3 – smartphone for controlling SSP-600;
4 – smartphone for controlling the mount; 5 – SSP-600; 6 – battery;
7 – control panel of the mount; 8 – mount

Автоматическая поворотная платформа позволяет с точностью до 5 угловых минут направить ССП-600 на любую точку неба. С помощью разработанного программного обеспечения (ПО) можно заранее подготовить маршрут обхода небесной полусферы и выполнять в автоматическом режиме съемку спектров в заданных точках. Платформа управляется с помощью смартфона, который связан по беспроводному интерфейсу со смартфоном для управления спектрополяриметром. Питание платформы обеспечивается внешним аккумулятором.

Технические характеристики ССП-600:

Спектральный диапазон	350–950 нм
Спектральное разрешение	1,2–2,0 нм
Приемник излучения	ПЗС-линейка фирмы <i>Toshiba TCD1304DG</i>
Число элементов приемника излучения	3648
Диспергирующий элемент	Вогнутая голографическая дифракционная решетка
Число штрихов	315 штр./мм
Проекционный объектив	МС Гелиос-44-3М
Фокусное расстояние	58 мм
Угол поля зрения	4°
Точность позиционирования	До 5 угловых секунд
Тип привода	Сервоприводы постоянного тока по обеим осям
Встроенные датчики	Датчики положения по обеим осям
Источник питания	8–15 В постоянного тока или 10 батареек типа АА

Спектрополяриметр и поворотная платформа ССП-600 могут принимать управляющие команды по интерфейсу USB. Для организации управления этими устройствами и их совместного использования применяются смартфоны с операционной системой Android. Каждое из устройств подключено к смартфону по USB-интерфейсу, а смартфоны, в свою очередь, соединены друг с другом по беспроводному интерфейсу Bluetooth (рис. 2).

Управление платформой и ССП-600 осуществляется с помощью ПО, которое сводит к минимуму работу оператора. В ПО реализованы методики проведения основных атмосферных измерений, ускоряющие процесс спектрометрирования. Интерфейс программы, установленной на смартфон, позволяет задавать экспозицию (автоматически или вручную), количество спектров в серии, положение поляроида и выбирать режим съемки (рис. 3, а).

В режиме произвольной съемки задаются азимутальный и вертикальный углы для установки оптической оси ССП-600 с помощью поворотной платформы при измерении спектра (рис. 3, б).

Два других режима позволяют сканировать горизонтальную и вертикальную плоскости (альмукантат и солнечный вертикал) и получать набор спектров во всех точках небесной полусферы, определяемых заданным шагом по углу. Так как в большинстве методик измерений рассеянного в атмосфере излучения необходимо знать высоту Солнца над горизонтом, то в ПО имеется возможность сохранить это значение.

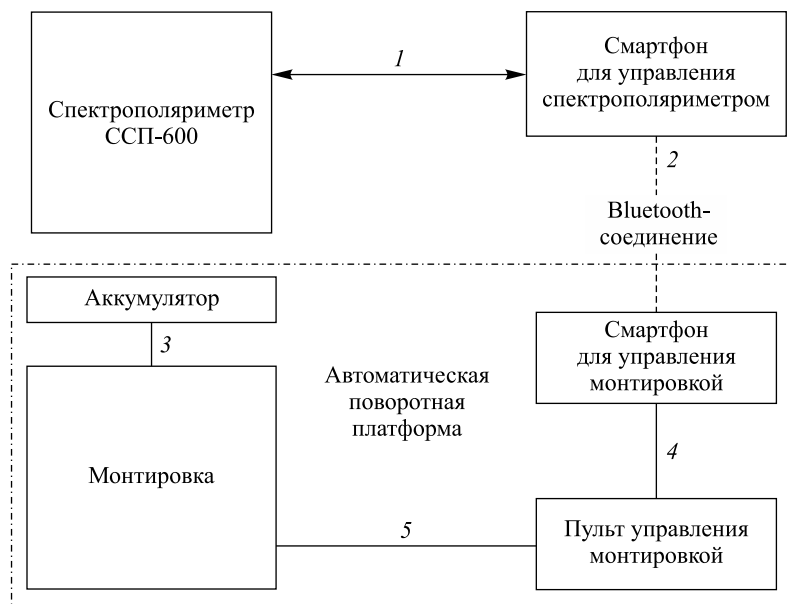


Рис. 2. Электрическая блок-схема соединения ССП-600 с монтировкой и управляющими смартфонами: 1 – OTG-кабель для подключения смартфона к спектрополяриметру ССП-600; 2 – Bluetooth-соединение между смартфоном ССП-600 и смартфоном для управления монтировкой; 3 – кабель питания монтировки со штырьковыми разъемами (DJK 10A); 4 – набор кабелей, соединенных между собой последовательно, включающий в себя: штатный кабель монтировки с разъемом DB-9 (розетка), кабель-адаптер (USB-RS 232) с разъемами USB типа A (вилка), DB-9 (вилка); 5 – кабель для соединения монтировки и пульта управления

Fig. 2. Electrical block diagram of the connection SSP-600 with the mount and control smartphones: 1 – OTG cable for connecting the smartphone to the SSP-600; 2 – Bluetooth connection between the smartphone SSP-600 and a smartphone for controlling the mount; 3 – power cable mounts with pin connectors (DJK 10A); 4 – a line representing a set of cables connected in series, which includes: a standard cable for mounting with a DB-9 connector (socket), an adapter cable (USB-RS 232) with USB connectors type A plug, DB-9 (fork); 5 – a cable for connecting the mount and the control panel

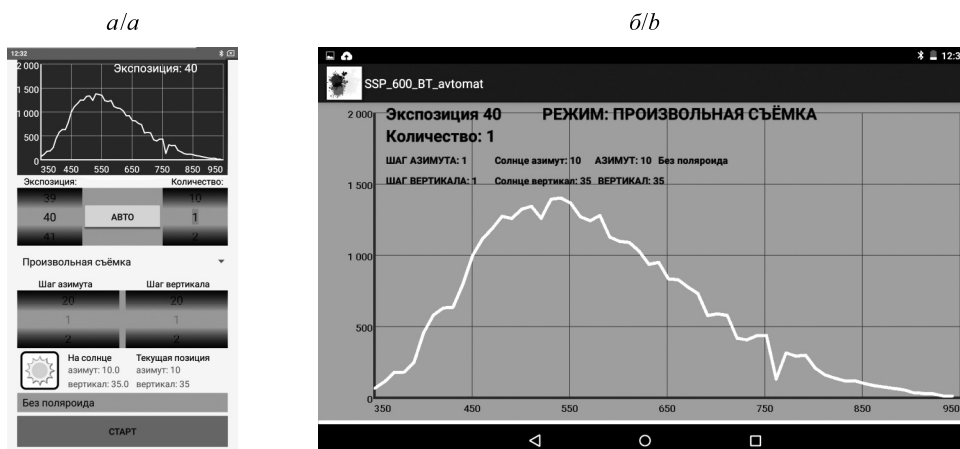


Рис. 3. Главные окна ПО, установленного на смартфон, соединенный с поворотной платформой (а) или со спектрополяриметром ССП-600 (б)

Fig. 3. The main windows of the software installed on: a smartphone connected to a turntable (a), a smartphone connected to the SSP-600 (b)

Во время съемки серии спектров по Bluetooth-каналу отправляется команда на смартфон, соединенный со спектрополяриметром ССП-600. Производится съемка в соответствии с переданными параметрами. Снятые спектры сохраняются в текстовом виде вместе с xml-файлом, содержащим все параметры и условия съемки, относящиеся к спектру. На экран двух смартфонов постоянно в режиме реального времени выводятся спектры, регистрируемые солнечным спектрополяриметром.

Методика получения атмосферных параметров

Построение той или иной оптической модели атмосферы является необходимым этапом при решении обратной задачи. Анализ проведенных многочисленных расчетов спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) излучения для различных углов Солнца и наблюдения показал, что спектры как уходящего, так и нисходящего излучения слабо зависят от вертикальных профилей оптических параметров атмосферы и могут быть достаточно точно описаны с использованием интегральных (в некотором смысле эффективных) по толщине атмосферы значений параметров, существенных с точки зрения теории переноса излучения. Таковыми параметрами являются (в дополнение к угловым переменным, описывающим геометрию задачи): спектральные оптические толщины атмосферы (по молекулярному рассеянию и аэрозольному ослаблению); параметр индикатрисы рассеяния (средний косинус); альbedo однократного рассеяния; спектральное альbedo поверхности; интегральное (в столбе атмосферы) содержание водяного пара, кислорода и озона. Причем наиболее чувствителен спектр нисходящего излучения к изменениям среднего косинуса индикатрисы, оптической толщины аэрозоля и альbedo однократного рассеяния.

Предлагаемая ниже аналитическая аппроксимация СПЭЯ нисходящего излучения в атмосфере обеспечивает расчет значений СПЭЯ на основе простой модели безоблачной атмосферы по аналитическим формулам, которые используются затем для решения обратной задачи. Указанная аппроксимация построена аналогично предложенной ранее аппроксимации СПЭЯ для восходящего излучения [3], которая успешно используется для атмосферной коррекции гиперспектральных данных.

Для СПЭЯ на нижней границе атмосферы $B^\downarrow(\mu, \mu_0, \varphi)$ (с учетом взаимодействия излучения с поверхностью) можно записать следующее выражение (вводим зависимость СПЭЯ от длины волны) [4; 5]:

$$B^\downarrow(\lambda, \mu, \mu_0, \varphi) = T_g(\lambda) \left[B_{\text{атм}}^\downarrow(\lambda, \mu, \mu_0, \varphi) + \frac{S_\lambda \mu_0 \rho_\lambda T_{1\lambda} (1 - T_{2\lambda})}{(1 - r_\lambda \rho_\lambda)} \right], \quad (1)$$

где μ – косинус зенитного угла наблюдения; μ_0 – косинус зенитного угла Солнца; φ – азимутальный угол направления распространения излучения относительно плоскости солнечного вертикала; $B_{\text{атм}}^\downarrow(\lambda, \mu, \mu_0, \varphi)$ – яркость атмосферной дымки (часть излучения, не взаимодействующая с поверхностью); $S_\lambda = \frac{E_{0\lambda}}{\pi}$ – яркость солнечного излучения на верхней границе атмосферы, $E_{0\lambda}$ – спектральная солнечная постоянная (освещенность на верхней границе атмосферы площадки, перпендикулярной солнечным лучам); ρ_λ – спектральное альbedo подстилающей поверхности, отражение считается лагранжевским; $T_{1\lambda}$ – суммарное (прямое плюс диффузное, без учета полос поглощения газовых составляющих атмосферы) пропускание атмосферы от Солнца к поверхности Земли; $T_{2\lambda}$ – суммарное (прямое плюс диффузное, без учета полос поглощения газовых составляющих атмосферы) пропускание атмосферы от поверхности Земли до верхней границы атмосферы; r_λ – сферическое альbedo аэрозольной атмосферы.

В формуле (1) учет поглощения излучения в полосах основных газовых составляющих атмосферы (водяного пара, озона и кислорода) осуществляется фильтровым способом, т. е. общее выражение для СПЭЯ $B^\downarrow(\lambda, \mu, \mu_0, \varphi)$, записанное без учета поглощения газовыми компонентами атмосферы, умножается на произведение пропусканий трех газовых компонент:

$$T_g(\lambda) = T_\lambda(\text{H}_2\text{O}) T_\lambda(\text{O}_2) T_\lambda(\text{O}_3).$$

Для учета пропускания в полосах поглощения указанных газов были рассчитаны пропускания атмосферы для стандартных значений поглощающих масс каждой газовой компоненты со спектральным разрешением 2 нм при расположении Солнца в зените, при наблюдении также в зенит и при среднем альbedo поверхности 0,2 (рис. 4).

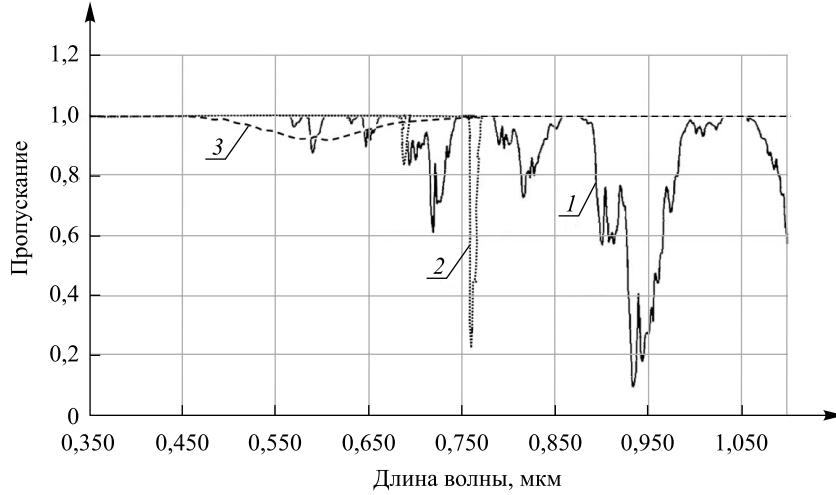


Рис. 4. Спектральные пропускания водяного пара (кривая 1), молекулярного кислорода (кривая 2) и озона (кривая 3)

Fig. 4. Spectral transmissions of water vapor (curve 1), molecular oxygen (curve 2) and ozone (curve 3)

При определении пропускания с поглощающей массой, отличающейся в m раз от стандартной, и других углов Солнца и наблюдения необходимо воспользоваться следующим выражением для каждого из газов:

$$T_g(\lambda) = [T_g^0(\lambda)]^{m\left(\frac{1}{\mu_0} + \frac{1}{\mu}\right)},$$

где $T_g^0(\lambda)$ – стандартное пропускание газа при указанных выше условиях.

Для функций полного пропускания (без учета поглощений в полосах газов) $T_{1\lambda}$ и $T_{2\lambda}$ вниз и вверх соответственно, а также сферического альбеда аэрозольной атмосферы предлагается использовать достаточно точные аналитические аппроксимации из работы [4], которые получены для следующих значений параметров (здесь и далее g – средний косинус индикатрисы рассеяния; τ_λ – полная спектральная оптическая толщина атмосферы): $0 < g < 0,9$; $0,2 < \mu < 1,0$; $0 < \tau_\lambda < 2$ с максимальной погрешностью около 8 % для $g \in [0; 0,9]$, $\tau_\lambda \in [0; 2]$, $\mu \in [0,2; 1,0]$ и погрешностью менее 4 % для $\tau_\lambda \leq 1,6$, $g \leq 0,8$ и $\mu \in [0,2; 1,0]$.

Спектральную яркость атмосферной дымки $B_{\text{атм}}^\downarrow(\lambda, \mu, \mu_0, \varphi)$ в (1) предлагается рассчитывать по следующей аппроксимационной формуле:

$$B_{\text{атм}}^\downarrow(\lambda, \mu, \mu_0, \varphi) = B_{1\text{атм}}^\downarrow(\lambda, \mu, \mu_0, \varphi) \left[1 + q(\omega_\lambda \tau_\lambda(\lambda))^p \right], \quad (2)$$

где учет многократного рассеяния в нисходящее излучение атмосферной дымки осуществляется в виде поправки к однократному; q, p – неизвестные константы (подгоночные параметры модели); $B_{1\text{атм}}^\downarrow(\lambda, \mu, \mu_0, \varphi)$ – СПЭЯ дымки в приближении однократного рассеяния (в следующих формулах сами μ и μ_0 везде положительны, знак учтен явно):

$$B_{1\text{атм}}^\downarrow(\lambda, \mu, \mu_0, \varphi) = \frac{S_\lambda \mu_0 \omega_\lambda}{4} x(\gamma_0) \frac{\exp(-\tau_\lambda/\mu) - \exp(-\tau_\lambda/\mu_0)}{\mu - \mu_0}, \quad \mu \neq \mu_0,$$

$$B_{1\text{атм}}^\downarrow(\lambda, \mu_0, \mu_0, \varphi) = \frac{S_\lambda \omega_\lambda \tau_\lambda}{4\mu_0} x(\gamma_0) \exp(-\tau_\lambda/\mu_0), \quad \mu = \mu_0,$$

$$x(\gamma_0) = \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g\gamma_0)^{3/2}},$$

$$\gamma_0 = \mu\mu_0 + \sqrt{(1 - \mu^2)(1 - \mu_0^2)} \cos \varphi.$$

Полная вертикальная оптическая толщина на длине волны λ без учета оптической толщины по газовому поглощению:

$$\tau_{\lambda} = \tau_m + \tau_a + \tau_e,$$

где τ_m – оптическая толщина по молекулярному (рэлеевскому) рассеянию; τ_a – оптическая толщина по аэрозольному рассеянию; τ_e – оптическая толщина по аэрозольному поглощению. Альбе́до однократного рассеяния (вероятность выживания кванта) вычисляется через введенные оптические толщины:

$$\omega_{\lambda} = \frac{\tau_m + \tau_a}{\tau_m + \tau_a + \tau_e}.$$

Спектральные оптические толщины атмосферы аппроксимируются в рамках используемой модели степенными функциями:

$$\begin{cases} \tau_m = \tau_{m0} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^4, \\ \tau_a = \tau_{a0} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^{\beta}, \quad 0 < \beta \leq 4, \quad \tau_e = \text{const}, \end{cases}$$

где τ_{m0} , τ_{a0} – значения соответствующих оптических толщин на опорной длине волны λ_0 .

Приближение (2) предложено и исследовано в работе [5] для суммарного излучения атмосферы, мы же используем это приближение только для вклада атмосферной дымки (случай $\rho_{\lambda} = 0$). Константы q и p в (2) являются неизвестными (подгоночными параметрами модели). Учет вклада атмосферной дымки в однократном приближении, как показывают расчеты, совершенно неудовлетворителен даже для очень чистой атмосферы, тогда как представление (2) обеспечивает высокую точность.

При моделировании спектра СПЭЯ нисходящего излучения используются *известные измеренные величины*:

- 1) зенитный угол Солнца;
- 2) зенитный угол съемки;
- 3) азимутальный угол съемки относительно плоскости солнечного вертикала;
- 4) измеренная спектрополяриметром СПЭЯ;
- 5) размерная функция яркости Солнца на верхней границе атмосферы;
- 6) функция пропускания кислорода;
- 7) функция пропускания озона;
- 8) функция пропускания водяного пара,

а также *неизвестные параметры атмосферы*:

- 1) альбе́до ρ подстилающей поверхности (среднее по спектру);
- 2) показатель β степенной зависимости аэрозольной оптической толщины по рассеянию от длины волны (параметр Ангстрема);
- 3) оптическая толщина τ_e по поглощению аэрозоля (константа);
- 4) оптическая толщина τ_{a0} по рассеянию аэрозоля на опорной длине волны 0,55 мкм;
- 5) средний косинус g индикатрисы рассеяния;
- 6) отличие поглощающей массы от стандартной (m раз);
- 7) первый подгоночный параметр p ;
- 8) второй подгоночный параметр q .

Для определения неизвестных параметров применяется алгоритм Левенберга – Марквардта решения обратной задачи методом наименьших квадратов. С его помощью находится такой набор атмосферных параметров, который минимизирует отклонение смоделированного спектра от измеренного. Алгоритм позволяет задавать ограничения вида $l_i \leq x_i \leq u_i$, где x_i – значение i -го параметра; l_i и u_i – минимальное и максимальное возможные значения, которые задаются исходя из физического смысла параметра.

Результаты восстановления атмосферных параметров

Для получения атмосферных данных проводились измерения спектров атмосферы по следующей схеме. В безоблачный день ССП-600, установленный на крыше здания на высоте 30 м над уровнем земли, регистрировал спектры с шагом 5° по углу в альмукантарате Солнца и 2° в плоскости солнечного вертикала по описанной выше методике (рис. 5). В итоге были получены спектральные данные в 162 точках.

Разработано ПО, которое позволяет подготовить набор данных для анализа и выполнить алгоритм нахождения атмосферных параметров. При этом для формирования анализируемой далее выборки данные считываются в формате, в котором сохраняются спектры и сопутствующая информация. Снятые спектры загружаются в программу вместе с характеризующими направления съемки углами. Можно отобразить в виде графиков каждый из загруженных спектров и при необходимости (например, зашкаливающие значения в части спектра) исключить из выборки недостоверные.

Процедура определения атмосферных параметров предполагает нахождение таковых для каждого измерения с помощью подгонки аналитической аппроксимации спектра к измеренному (рис. 6) методом Левенберга – Марквардта. Незначительные расхождения экспериментального и теоретического спектров на рис. 6 объясняются разными спектральными разрешениями. Небольшие максимумы по обе стороны полосы поглощения кислорода (762 нм) обусловлены погрешностями прибора.

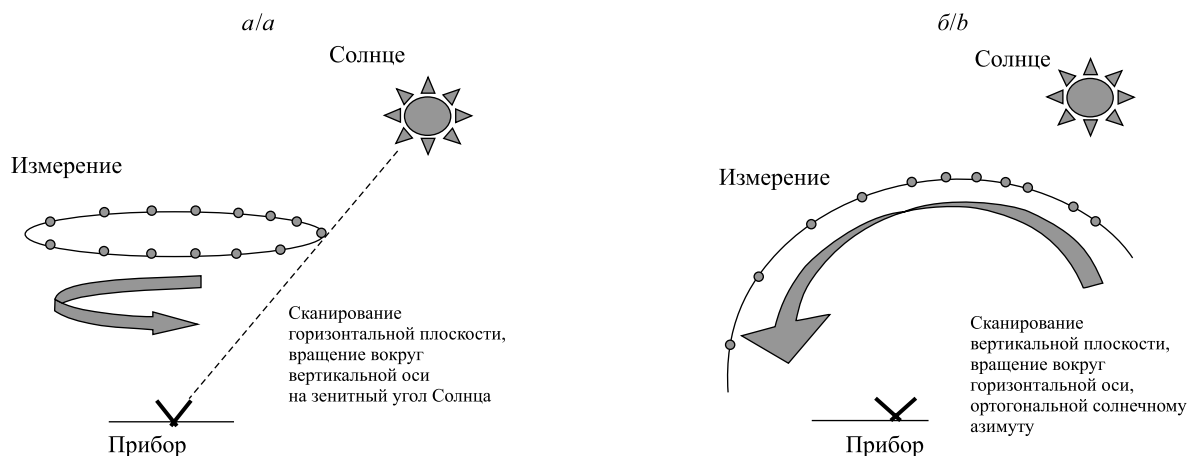


Рис. 5. Схема измерений ССП-600:
в альмукантате Солнца (а); в плоскости солнечного вертикала (б)

Fig. 5. Measurement Scheme of SSP-600:
in the Sun's almucantarate (a); in the plane of the solar vertical (b)

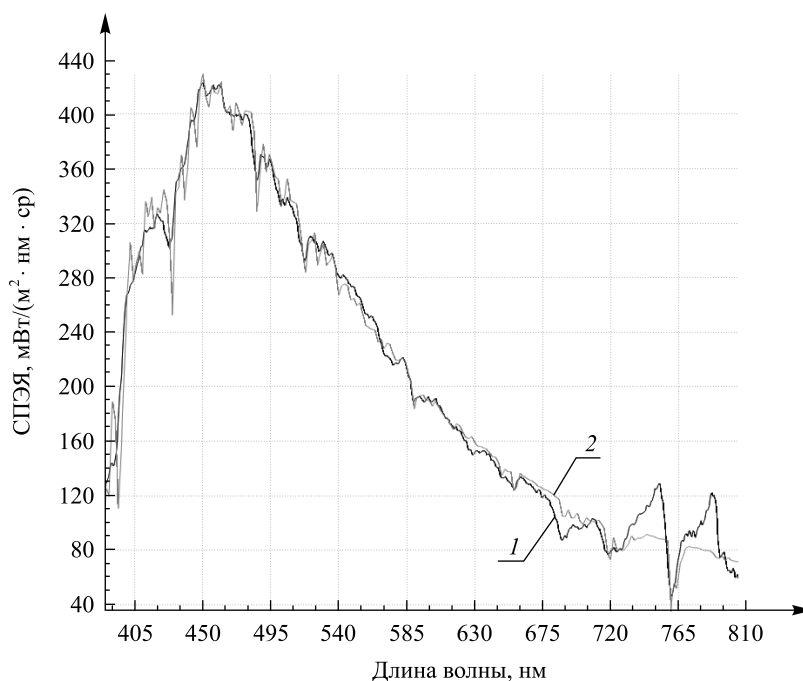


Рис. 6. Измеренная СПЭЯ рассеянного в атмосфере солнечного излучения (кривая 1)
и аналитическая аппроксимация спектра (кривая 2)

Fig. 6. The measured spectral density of energy brightness of the solar radiation scattered
in the atmosphere (curve 1) and the analytic approximation of the spectrum (curve 2)

В результате анализа набора найденных параметров (устранение выбросов и усреднение оставшихся значений атмосферных параметров) были определены следующие значения параметров атмосферы: $\beta = 3,608\,67$; $\rho = 0,866\,991$; $\tau_{a0} = 0,424\,449$; $\tau_e = 0,005$; $g = 0,428\,715$; $m = 0,189\,117$; $q = 6,020\,09$; $p = 0,740\,876$. Полученные величины соответствуют типичным параметрам городской (замутненной) атмосферы. Несколько завышенное значение среднего по подстилающей поверхности и спектру альбедо ($\rho = 0,866\,991$) может объясняться наличием большого количества относительно ярких поверхностей городской среды (крыши, дороги и пр.).

По рассчитанной оптической толщине можно сделать оценку концентрации частиц аэрозоля различных радиусов. Согласно [6] данная концентрация для частиц радиусом $0,1\text{ мкм}$ в 2 раза выше, а радиусом $0,2\text{ мкм}$ – в 4,5 раза выше, чем в чистой атмосфере.

Результаты угловых измерений спектров излучения с поляризационным фильтром

ССП-600 позволяет измерять СПЭЯ рассеянного в атмосфере излучения с учетом его поляризации. Был проведен эксперимент, заключающийся в одновременных измерениях СПЭЯ в одних и тех же точках небесной полусферы при разных положениях плоскости пропускания поляризационного фильтра.

При обработке поляризационных измерений использовались формулы (см. ниже) для выражения первых трех параметров Стокса, а также интенсивности, степени и азимута линейной поляризации через интенсивности излучения I_α , соответствующие трем положениям плоскости пропускания поляроида (эллиптической поляризацией в атмосфере можно пренебречь). Значения I_α были получены на длине волны 440 нм .

Параметры Стокса (первые три):

$$L = I_0 + I_{90}, \quad U = 2I_{45} - I_0 - I_{90}, \quad Q = I_0 - I_{90};$$

степень линейной поляризации:

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{L};$$

азимут поляризации:

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctg \frac{U}{Q}.$$

Результаты вычислений интенсивности и параметров поляризации излучения представлены на рис. 7–9.

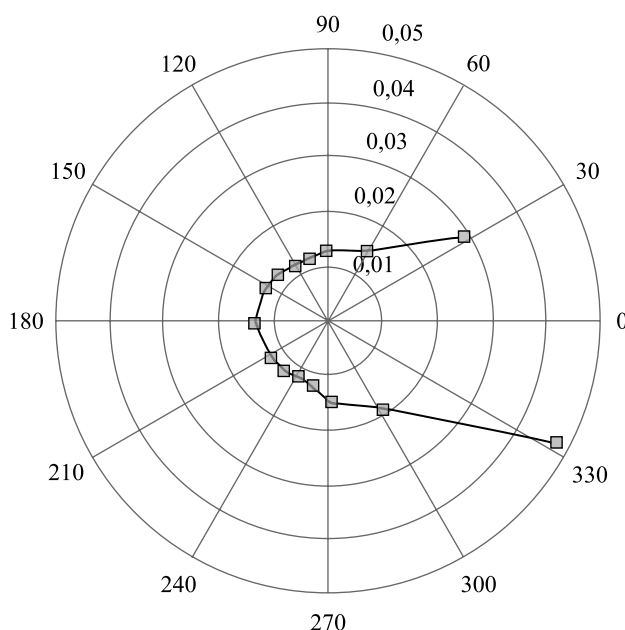


Рис. 7. Интенсивность излучения в альмукантарате Солнца (угол 0 соответствует направлению на Солнце)

Fig. 7. Intensity of the radiation in the Sun's almucantarate (angle 0 corresponds to the direction of the Sun)

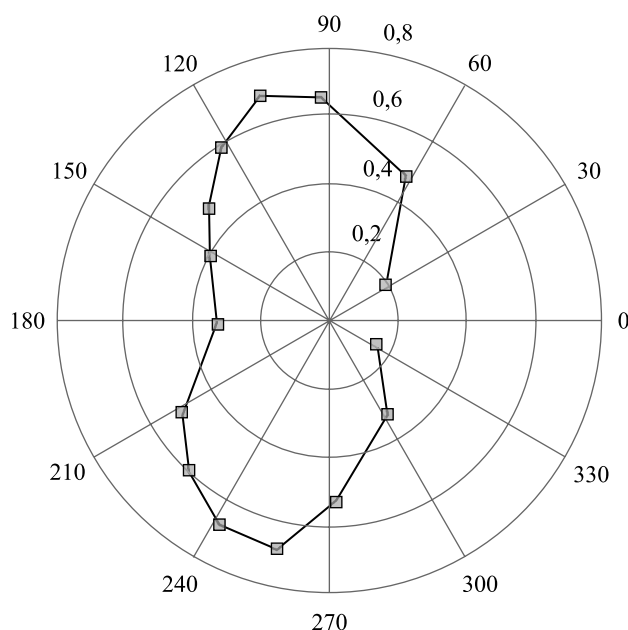


Рис. 8. Угловая зависимость степени линейной поляризации в альмукантарате Солнца (угол 0 соответствует направлению на Солнце)
Fig. 8. Angular dependence of the degree of linear polarization in the Sun's almukantarate (angle 0 corresponds to the direction of the Sun)

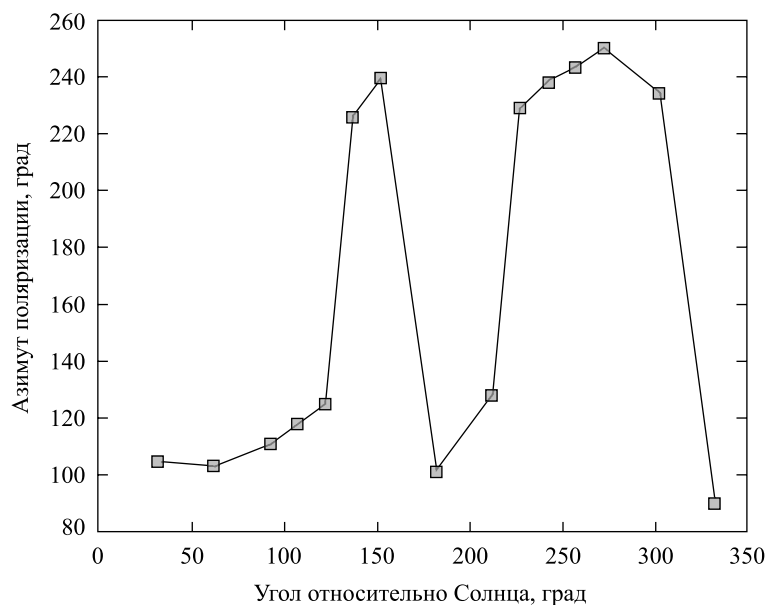


Рис. 9. Угол азимута поляризации в альмукантарате Солнца относительно направления на Солнце
Fig. 9. The angle of polarization azimuth in the Sun's almukantarate relative to the direction to the Sun

Анализируя угловую зависимость степени линейной поляризации (см. рис. 8), можно сделать вывод о наличии частиц аэрозоля над местом измерения, так как заметно смещение максимумов «лепестков» от положений 90° и 270° , что соответствовало бы «чистой» рэлеевской атмосфере.

Заклучение

Разработаны сканирующий солнечный спектрополяриметр ССП-600 и ПО системы управления. Проведены спектральные измерения по предложенной методике в Минске, получен набор данных для дальнейшего анализа. Решая обратную задачу алгоритмом Левенберга – Марквардта для каждого спектра с помощью ПО, были определены оптические атмосферные параметры. Также рассчитаны поляризационные характеристики рассеянного солнечного излучения. По результатам проведенных измерений можно судить о наличии существенного количества аэрозольных частиц над Минском. Полученные оптические атмосферные параметры и поляризационные характеристики представляют интерес для решения задачи определения состава и концентрации аэрозоля и будут использованы в дальнейших исследованиях.

Библиографические ссылки

1. Беляев БИ, Катковский ЛВ, Сосенко ВА, Беляев ЮВ. Наземные и полетные калибровки авиакосмической аппаратуры дистанционного зондирования Земли. *Наука и инновации*. 2016;4:21–26.
2. Martenov A, Katkouski L, Stanchick V. High resolution solar spectropolarimeter SSP-600 for determination of radiation parameters. In: *Open Readings 2017. Proceedings of International conference. 2017 March 14–17; Vilnius, Lithuania*. Vilnius: Vilnius University; 2017. p. 221.
3. Катковский ЛВ. Параметризация уходящего излучения для быстрой атмосферной коррекции гиперспектральных изображений. *Оптика атмосферы и океана*. 2016;29(9):778–784. DOI: 10.15372/AOO20160909.
4. Kokhanovsky AA, Mayer B, Rozanov VV. A parametrization of the diffuse transmittance and reflectance for aerosol remote sensing problems. *Atmospheric Research*. 2005;73:37–43. DOI: 10.1016/j.atmosres.2004.07.004.
5. Васильев АВ, Кузнецов АД, Мельникова ИН. Аппроксимация многократно рассеянного солнечного излучения в рамках приближения однократного рассеяния. В: *Международный симпозиум «Атмосферная радиация и динамика». Тезисы; 23–26 июня 2015 г.; Санкт-Петербург, Россия*. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет; 2015. с. 131.
6. Queface AJ, Stuart JP, Annegarn HJ, Holben BN, Uthui RJ. Retrieval of aerosol optical thickness and size distribution from the CIMEL Sun photometer over Inhaca Island, Mozambique. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2003;108(D13):45. DOI: 10.1029/2002JD002374.

References

1. Belyaev BI, Katkovskii LV, Sosenko VA, Belyaev YuV. Nazemnye i poletnye kalibrovki aviakosmicheskoi apparatury distantionnogo zondirovaniya Zemli [Land and flight calibrations of aerospace equipment for Earth remote sensing]. *Nauka i innovatsii*. 2016;4:21–26. Russian.
2. Martenov A, Katkouski L, Stanchick V. High resolution solar spectropolarimeter SSP-600 for determination of radiation parameters. In: *Open Readings 2017. Proceedings of International conference. 2017 March 14–17; Vilnius, Lithuania*. Vilnius: Vilnius University; 2017. p. 221.
3. Katkovskii LV. Parametrizatsiya ukhodyashchego izlucheniya dlya bystroj atmosfernoi korrektsii giperspektral'nykh izobrazhenii [Parametrization of outgoing radiation for fast atmospheric correction of hyperspectral images]. *Optika atmosfery i okeana*. 2016;29(9):778–784. Russian. DOI: 10.15372/AOO20160909.
4. Kokhanovsky AA, Mayer B, Rozanov VV. A parametrization of the diffuse transmittance and reflectance for aerosol remote sensing problems. *Atmospheric Research*. 2005;73:37–43. DOI: 10.1016/j.atmosres.2004.07.004.
5. Vasil'ev AV, Kuznetsov AD, Melnikova IN. Approximation of multiply scattered solar radiation in the framework of a single scattering. In: *International Symposium «Atmospheric Radiation and Dynamics». Theses; 2015 June 23–26; Saint Petersburg, Russia*. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University; 2015. p. 131. Russian.
6. Queface AJ, Stuart JP, Annegarn HJ, Holben BN, Uthui RJ. Retrieval of aerosol optical thickness and size distribution from the CIMEL Sun photometer over Inhaca Island, Mozambique. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2003;108(D13):45. DOI: 10.1029/2002JD002374.

Статья поступила в редколлегию 23.04.2018.
Received by editorial board 23.04.2018.