ПРОГРАММА РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТОВ АСИММЕТРИИ АЭРОЗОЛЬНОГО РАССЕЯНИЯ В КРАСНОЙ И БЛИЖНЕЙ ИК ОБЛАСТЯХ СПЕКТРА

В.В. Пашнев, Ю.Я. Матющенко, В.В. Белозерских, А.В. Калачев

Алтайский государственный университет, г. Барнаул

В настоящей работе представлено программное обеспечение, реализующее методику определения аэрозольного коэффициента асимметрии из результатов наблюдений интегрального коэффициента рассеянных световых потоков, оптической толщи и альбедо местности интерполяционным путем без применения аппарата решения обратных задач. В качестве исходных используются данные измерений углового хода яркости дневного безоблачного неба в солнечном альмукантарате при разной спектральной прозрачности атмосферы и альбедо подстилающей поверхности. Наблюдения выполняются в длинах волн 675, 870 и 1020 нм при зенитных углах Солнца $65 \div 75^\circ$, при этом яркость может измеряться в любых единицах, включая непосредственно отсчеты фотометра. При обработке результатов мониторинговых наблюдений даже на одной длине волны требуется производить значительное количество однотипных вычислений, что делает задачу автоматизации расчетов атмосферных параметров, в частности, коэффициентов асимметрии, безусловно актуальной. Изложены требования к входным данным, представлена блок-схема алгоритма и описание интерфейса пользователя программы. Результаты расчетов выводятся в табличной форме. Программа обеспечивает приемлемую погрешность определения коэффициентов асимметрии и может быть использована в геофизике и климатологии при проведении расчетов поступления рассеянной солнечной радиации на земную поверхность с целью последующей оценки размеров частиц.

Ключевые слова: коэффициент асимметрии рассеянных световых потоков, абсолютная индикатриса яркости, альбедо подстилающей поверхности, аэрозольная оптическая толщина, линейная интерполяция.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в современной климатологии неуклонно возрастает потребность в исследованиях радиационных свойств атмосферы и подстилающей поверхности, ответственных за формирование регионального климата. Одной из характеристик, в значительной степени определяющей поступление солнечной радиации на поверхность Земли, является коэффициент асимметрии рассеянных световых потоков.

Ранее авторами было подробно исследовано поведение этой величины в зависимости от различных атмосферных параметров [1-2]. На основе аэрозольной модели Института физики атмосферы РАН [3-4] был разработан метод определения аэрозольного коэффициента асимметрии из результатов наблюдений яркости неба в солнечном альмукантарате, оптической толщи и альбедо подстилающей поверхности без применения аппарата решения обратных задач. Результаты расчетов коэффициентов асимметрии представлены в виде подробных таблиц [5], допускающих использование интерполяционных методов для поиска атмосферных параметров.

Однако практическое применение табличных данных показало низкую эффективность «ручного» определения коэффициентов асимметрии. При использовании метода линейной интерполяции многократное выполнение однотипных операций (к

примеру, вычисление коэффициентов уравнения прямой по стандартным формулам) влечет за собой непроизводительные временные затраты, возрастает вероятность ошибок. Кроме того, вычисления производятся, как правило, для больших объемов исходных данных (в случае мониторинговых наблюдений – тысячи и десятки тысяч измерений). Все это делает актуальной задачу автоматизации поиска коэффициентов, которая и решается в настоящей работе.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В оптике атмосферы и климатологии рассеивающие свойства аэрозольных частиц характеризуют величиной коэффициента асимметрии рассеянных световых потоков

$$\Gamma_a = \frac{\int_0^{\pi/2} f_a(\varphi) \cdot \sin(\varphi) d\varphi}{\int_{\pi/2}^{\pi} f_a(\varphi) \cdot \sin(\varphi) d\varphi},$$

где φ – угол рассеяния; $f_a(\varphi)$ – направленный коэффициент однократного аэрозольного рассеяния. Если к $f_a(\varphi)$ добавить коэффициент молекулярного рассеяния $f_m(\varphi)$, получим абсолютную индикатрису однократно рассеянного света

$$f_1(\varphi) = f_a(\varphi) + f_m(\varphi).$$

Измерения яркости безоблачного неба в солнечном альмукантарате позволяют найти абсолютную индикатрису яркости [3, 6]

$$f_n(\varphi) = f_1(\varphi) + f_2(\varphi) + f_q(\varphi).$$

Величина $f_n(\varphi)$ включает в себя компоненты однократно $f_1(\varphi)$, многократно рассеянного $f_2(\varphi)$, и отраженного от подстилающей поверхности света $f_q(\varphi)$. Здесь q - альbedo подстилающей поверхности. Тогда получаемый из наблюдений интегральный коэффициент асимметрии рассеянных световых потоков будет иметь вид

$$\Gamma = \frac{\int_0^{\pi/2} f_n(\varphi) \cdot \sin(\varphi) d\varphi}{\int_{\pi/2}^{\pi} f_n(\varphi) \cdot \sin(\varphi) d\varphi}, \quad (1)$$

где в числителе и знаменателе - суммарные световые потоки в переднюю и заднюю полусферы соответственно.

В [1-2] изложены подробности расчетов коэффициентов асимметрии путем решения уравнения переноса излучения на основе аэрозольной модели ИФА РАН [7-8]. В итоговых таблицах [5] приведены значения рассчитанных по формуле (1) величин Γ при вариациях параметров Z_0 , τ_a , q и Γ_a .

Методика определения Γ_a по данным наблюдений при помощи таблиц [5] состоит в следующем [1-2]: при зенитных углах Солнца $65-75^\circ$ в трех узкополосных спектральных участках с максимумами 675, 870 и 1020 нм проводятся измерения углового хода яркости дневного безоблачного неба в альмукантарате Солнца и вычисляется величина Γ , при этом не обязательны измерения интенсивности рассеянного света в абсолютных единицах. Это обстоятельство обусловлено тем, что величина Γ – безразмерная, благодаря чему исключаются погрешности, связанные с калибровкой аппаратуры.

Рассматриваются только те угловые распределения яркости, которые соответствуют условию $m > 2$ (m – воздушная масса). Это позволяет в дальнейшем осуществить надежное интегрирование в задней полусфере при $\pi/2 \leq \varphi \leq \pi$. Затем осуществляется отбор данных, для которых имеет место однородное распределение мутности в горизонтальном направлении. Значения яркости неба по обе стороны от плоскости солнечного вертикала в направлениях ψ и $360^\circ - \psi$ в случае однородного распределения мутности должны быть одинаковы, т.е. должно, например, выполняться условие $B(70^\circ) \approx B(290^\circ)$. Естественно, что азимут ψ отсчитывается в одном направлении.

Если в атмосфере имеет место явно выраженная разрывная структура аэрозольных образований, то наиболее контрастно такие облака будут обнаруживаться в длинноволновой области спектра, где минимальна роль молекулярного и многократного рассеяния света. Поэтому выбор подлежащих последующему анализу распределений $B(\psi)$ осуществляется путем анализа данных, в первую очередь, в области спектра 1.02 мкм. Выбираются такие атмосферные ситуации, когда величины $B(\psi)$ и $B(360^\circ - \psi)$ при $\psi \geq 10^\circ$ отличаются не более, чем на

10%, причем эти различия не имеют систематического характера для широкого интервала азимутов ($\Delta\psi \leq 30^\circ$). В последующих расчетах индикатрис яркости использовались средние значения $[B(\psi) + B(360^\circ - \psi)]/2$ [9].

В области околосолнечного ореола при $2^\circ \leq \psi \leq 6^\circ$ расхождения между $B(\psi)$ и $B(360^\circ - \psi)$ обычно более существенны, чем при больших значениях азимутов; они растут с приближением к Солнцу и мало зависят от длины волны. По-видимому, это вызвано погрешностями установки прибора в заданном направлении в световом поле ореола с сильным градиентом яркости. Однако неточности в задании $f_n(\varphi)$ при малых углах рассеяния, и, соответственно, азимутах, приводят к незначительным ошибкам в расчетах.

Далее вычисляется абсолютная индикатриса яркости в солнечном альмукантарате $f_n(\varphi)$, которая связана с яркостью неба $B(\varphi)$ следующим соотношением

$$B(\varphi) = E_0 \exp(-\tau m) m f_n(\varphi),$$

где E_0 – внеатмосферная солнечная постоянная, τ – оптическая толща атмосферы, m – атмосферная масса в направлении на Солнце.

Параллельно в тех же спектральных участках определяются альbedo подстилающей поверхности и спектральная прозрачность атмосферы. По этим данным фиксируются значения q и τ . Из τ , с учетом оптической толщи озонового поглощения, вычитается молекулярная составляющая τ_m и определяется аэрозольная оптическая толща $\tau_a = \tau - \tau_m$.

Далее, для всех перечисленных параметров с помощью таблицы с требуемой длиной волны устанавливаются границы областей, где возможно путем интерполяции определить Γ . При условии, что расчетные и наблюдаемые значения Γ имеют небольшие отклонения, значение коэффициента Γ_a может быть найдено путем линейной интерполяции [1].

Входными данными программы являются результаты измерений оптических параметров атмосферы для определенной географической точки, с конкретными датой и временем измерения:

- длина волны λ ,
- зенитный угол Солнца Z_0 ,
- альbedo подстилающей поверхности q ,
- аэрозольная оптическая толща τ_a ,
- угловые распределения яркостей $B(\varphi)$.

Для получения Γ из наблюдений яркости используется программное обеспечение, ранее написанное авторами при разработке метода оценки коэффициентов асимметрии на основе результатов решения уравнения переноса излучения [2, 10]. Выполняется линейная экстраполяция углов рассеяния и индикатрис яркости до значения угла рассеяния $\varphi \geq 150^\circ$ (используется метод наименьших

квадратов). Полученные данные загружаются в программу-интегратор, в которой интерполируются произведения $f_n(\varphi) \cdot \sin(\varphi)$ от φ_{max} до π и области солнечного ореола до $\varphi = 0$. Вычисляются промежуточные значения индикатрисы яркости до 1800 значений. Из полученных величин абсолютной индикатрисы яркости методом трапеций определяются значения интегралов рассеяния в переднюю и заднюю полусферы, т.е. числитель и знаменатель в выражении (1) для определения Γ .

Блок-схема алгоритма программы вычисления Γ_a представлена на рис. 1. Работа программы начинается с загрузки таблиц [5] в предварительно созданные в памяти массивы с аналогичной структурой. Затем считываются данные измерений, т.е. строки с параметрами λ , Z_0 , τ_a , q и Γ . В массиве с актуальной длиной волны для областей таблицы, соответствующих определенному значению Γ_a , путем линейной интерполяции последовательно производятся вычисления Γ для q , τ_a и Z_0 , меньших или равных и больших $\Gamma_{изм}$. Далее, в ряду всех полученных Γ выполняется поиск двух наиболее близких к измеренному.

Если обе величины Γ отличаются от измеренной не более, чем на 10% [1], так же линейной интерполяцией определяется искомое значение Γ_a , иначе осуществляется переход к следующей строке исходных данных без вычисления Γ_a .

Рабочий вариант программы реализован в среде Microsoft Excel на встроенном языке Visual Basic for Application (VBA) [11]. Такой выбор связан с тем, что электронная таблица при помощи встроенных средств позволяет эффективно проводить анализ больших объемов числовых данных (используя в том числе их графическое представление), что обычно требуется при обработке мониторинговых наблюдений.

Пользователь загружает файл MS Excel, который содержит лист с шаблоном таблицы входных данных и панель инструментов с кнопками запуска программ экстраполяции, управления интегратором и непосредственно расчета коэффициентов асимметрии. Кроме результатов обработки в табличном виде, осуществляется вывод статистической информации: параметры географической точки наблюдений, дата и время начала и окончания измерений, число исходных и выходных данных и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования климатических изменений в настоящее время приобретают все большую актуальность, при этом важное место отводится изучению влияния атмосферного аэрозоля на формирование радиационного баланса тропосферы и подстилающей поверхности. Коэффициент асимметрии рассеянных световых потоков, наряду с аэрозольной оптической толщиной и альбедо

подстилающей поверхности, является характеристикой, подлежащей тщательному изучению и анализу.

Одним из наиболее распространенных методов определения вышеуказанных характеристик является метод решения обратных задач [12]. Способ достаточно сложный и трудоемкий и далеко не все специалисты в области оптики атмосферы владеют техникой решения задач подобного рода.

Рис. 1. Блок-схема алгоритма программы

Программное обеспечение, представленное в данной работе, дает возможность определения коэффициентов асимметрии интерполяционным путем без применения громоздкого аппарата решения обратных задач. Это позволяет выполнять обработку больших объемов данных и оперативно получать информацию, характеризующую рассеивающие свойства аэрозольных частиц, что необходимо для построения региональных моделей атмосферы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пашнев В.В., Павлов В.Е., Орлов С.С., Матюшенко Ю.Я. Факторы, определяющие наблюдаемые значения коэффициентов асимметрии световых потоков в ближней ИК области спектра // Оптика атмосферы и океана. – 2018. – Т. 31, № 5. – С. 385-390.
2. V.V. Pashnev, V.E. Pavlov, Yu.Ya. Matyuschenko. Numerical methodology for the assessment of asym-metry coefficient of aerosol scattering in near IR region of spectrum // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1615, article: 012017.
3. Лившиц Г.Ш. Рассеяние света в атмосфере. – Алма-Ата: Наука, 1968. – 177 с.
4. Розенберг Г.В., Горчаков Г.И., Георгиевский Ю.С., Любовцева Ю.С. Оптические параметры атмосферного аэрозоля. В книге «Физика атмосферы и проблемы климата». – М.: Наука, 1980. – С. 216-257.
5. Пашнев В.В., Павлов В.Е., Матюшенко Ю.Я., Белозерских В.В. Таблицы для разработки методик определения коэффициентов асимметрии световых потоков, рассеянных на аэрозолях в красной и ближней ИК областях спектра // Южно-Сибирский научный вестник. – 2019. – №2 (26). – С. 204-212.
6. Пясковская-Фесенкова Е.В. Исследование рассеяния света в земной атмосфере. – М.: Наука, 1957. – 218 с.
7. Журавлева Т.Б. Моделирование переноса солнечного излучения в различных атмосферных условиях. Часть 1.

Детерминированная атмосфера // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т.28, №2. С. 99-114.

8. Андреев С.Ю., Бедарева Т.В. Информационно-вычислительная система для исследования спектрально-угловых характеристик солнечной радиации // Оптика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 26, № 05. – С. 408-413.

9. Матюшенко Ю.Я., Пашнев В.В. Информационная система получения и обработки параметров атмосферы по данным мониторинговых наблюдений // Ползуновский вестник. – 2017. – №3. – С. 76-80.

10. Пашнев В.В., Павлов В.Е., Матюшенко Ю.Я. Программный комплекс оценки коэффициента асимметрии аэрозольного рассеяния в ближней ИК области спектра // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. – 2020. – том 4, №1 (10). – С. 150-154.

11. Биллиг В. А. Основы офисного программирования и язык VBA [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – Режим доступа: <https://www.twirpx.org/file/2109954/>.

12. Антифеев В.С., Назаралиев М.А. Обратные задачи атмосферной оптики. – Новосибирск: Вычислительный центр СО АН СССР, 1988. – 156 с.

Пашнев Владимир Валентинович, к.ф.-м.н., доцент, зав. кафедрой Вычислительной техники и электроники Алтайского госуниверситета, тел. 8-905-926-5417, e-mail: pashnev@phys.asu.ru;

Матюшенко Юрий Яковлевич, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры Вычислительной техники и электроники Алтайского госуниверситета, тел. 8-960-959-4750, e-mail: matyuschenko@phys.asu.ru;

Белозерских Василий Вениаминович, старший преподаватель кафедры Вычислительной техники и электроники Алтайского госуниверситета, тел. 8-903-947-7115, e-mail: bww@phys.asu.ru;

Калачев Александр Викторович, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры Вычислительной техники и электроники Алтайского госуниверситета, тел. 8-913-027-8406, e-mail: kalachev@phys.asu.ru.

THE PROGRAM FOR CALCULATING THE ASYMMETRY COEFFICIENTS OF AEROSOL SCATTERING IN THE RED AND NEAR IR REGIONS OF THE SPECTRUM

V.V. Pashnev, Yu.Ya. Matyuschenko, V.V. Belozerskikh, A.V. Kalachev

Altai State University, Barnaul

Abstract – In this paper, software is presented that implements the method for determining the aerosol asymmetry coefficient from the results of observations of the integral coefficient of scattered light fluxes, optical depth and albedo of the terrain by interpolation without using an apparatus for solving inverse problems. The data of measurements of the angular variation of the brightness of the daytime cloudless sky in the solar almucantar with different spectral transparency of the atmosphere and the albedo of the underlying surface are used as the initial data. Observations are carried out at wavelengths of 675, 870 and 1020 nm at zenith angles of the Sun $65 \div 75^\circ$, while the brightness can be measured in any unit, including directly the readings of the photometer. When processing the results of monitoring observations, even at one wavelength, it is required to perform a significant number of calculations of the same type, which makes the task of automating the calculations of atmospheric parameters, in particular, the asymmetry coefficients, undoubtedly relevant. Requirements for the input data are stated, a block diagram of the algorithm and a description of the user interface of the program are presented. The calculation results are displayed in tabular form. The program provides an acceptable error in determining the asymmetry coefficients and can be used in geophysics and climatology when calculating the arrival of scattered solar radiation on the earth's surface in order to further estimate the particle size.

Key words: *coefficient of asymmetry of scattered light fluxes, absolute indicatrix of brightness, albedo of the underlying surface, aerosol optical depth, linear interpolation.*

REFERENCES

1. Pashnev V.V., Pavlov V.E., Orlov S.S., Matyuschenko Yu.Ya. Factors determining the observed values of the asymmetry coefficients of light fluxes in the atmosphere in the IR region of the spectrum // *Optics of the Atmosphere and Ocean*. – 2018. – Vol. 31, No. 5. – P. 385-390.
2. V.V. Pashnev, V.E. Pavlov, Yu.Ya. Matyuschenko. Numerical methodology for the assessment of asymmetry coefficient of aerosol scattering in near IR region of spectrum // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – Vol. 1615, article: 012017.
3. Livshits G.Sh. Light scattering in the atmosphere. – Alma-Ata: Nauka, 1968. – 177 p.
4. Rosenberg G.V., Gorchakov G.I., Georgievsky Yu.S., Lyubovtseva Yu.S. Optical parameters of atmospheric aerosol. In the book «Atmospheric Physics and Climate Problems». – M.: Science, 1980. – P. 216-257.
5. Pashnev V.V., Pavlov V.E., Matyuschenko Yu.Ya., Belozerskikh V.V. Tables for the development of methods for determining the asymmetry coefficients of light fluxes, scattered by aerosols in the red and near IR spectral regions // *South Siberian Scientific Bulletin*. – 2019. – No. 2 (26). – P. 204-211.
6. Pyaskovskaya-Fesenkova E.V. The study of light scattering in the earth's atmosphere. – M.: Science, 1957. – 218 p.
7. Zhuravleva T.B. Modeling the transfer of solar radiation in different atmospheric conditions. Part 1. Deterministic Atmosphere // *Atmospheric and Ocean Optics*. – 2008. – Vol. 28, No. 2. – P. 99-114.
8. Andreev S.Yu., Bedareva T.V. Information-computational system for the study of spectral-angular characteristics of solar radiation // *Optics of the Atmosphere and Ocean*. – 2013. – Vol. 26, No. 05. – P. 408-413.
9. Matyushchenko Yu.Ya., Pashnev V.V. Information system for obtaining and processing atmospheric parameters from data of monitoring observations // *Polzunov's messenger*. – 2017. – No. 3. – P. 76-80.
10. Pashnev V.V., Pavlov V.E., Matyuschenko Yu.Ya. Software complex for assessing the aerosol scattering asymmetry coefficient in the near ir spectrum area // *High-performance computing systems and technologies*. – 2020. – Vol. 4, No. 1 (10). – P. 150-154.
11. Billig V.A. Basics of office programming and VBA language [Electronic resource] .– Electron. Dan. - Access mode: <https://www.twirpx.org/file/2109954/>.
12. Antyufeev V.S., Nazaraliev M.A. Inverse problems of atmospheric optics. – Novosibirsk: Computing Center of the Siberian Branch of the Academy of Sciences of the USSR, 1988. – 156 p.

Pashnev Vladimir Valentinovich, Ph.D., head of the department of Computing engineering and electronics of the Altai State University, tel. 8-905-926-5417, e-mail: pashnev@phys.asu.ru;

Matyuschenko Yuri Yakovlevich, Ph.D., associate professor of the department of Computing engineering and electronics of the Altai State University, tel. 8-960-959-4750, e-mail: matyuschenko@phys.asu.ru;

Belozerskikh Vasily Veniaminovich, senior lecturer, department of Computing engineering and electronics of the Altai State University, tel. 8-903-947-7115, e-mail: bww@phys.asu.ru;

Kalachev Alexander Viktorovich, Ph.D., associate professor of the department of Computing engineering and electronics of the Altai State University, tel. 8-913-027-8406, e-mail: kalachev@phys.asu.ru.