

К.А. Матвеев¹, В.В. Пашнев¹, В.Е. Павлов²

О возможности применения нейросетевых технологий для определения альbedo однократного рассеяния аэрозольных частиц по данным диффузной яркости безоблачного неба

¹Алтайский государственный университет,

²Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул

Поступила в редакцию 30.01.2008 г.

На основе модельных расчетов яркости безоблачного неба в области спектра 0,675 мкм анализируется возможность применения нейронных технологий в решении задачи по восстановлению альbedo однократного рассеяния аэрозольных частиц. Рассмотрена однородная нейронная сеть с тремя скрытыми слоями по 10 нейронов в каждом слое. В обучении сети использован комплекс оптических параметров, охватывающий их реальные вариации при разных атмосферных условиях. Тестирование сети осуществлено на многочисленных примерах в соответствии с обучаемой выборкой. Приводится гистограмма отклонений найденных значений альbedo от задаваемых в модели: в пределах 3% находится 96,8% случаев.

Развитие вычислительных технологий стимулирует поиск новых подходов к решению задач оптики атмосферы. В настоящей статье рассматривается принципиальная возможность применения искусственных нейронных сетей для определения альbedo однократного рассеяния аэрозольных частиц ω_a из данных измерений яркости безоблачного неба в солнечном альмукантарате.

Классический путь решения подобной задачи, базирующийся на использовании результатов численного решения уравнения переноса излучения, включает два направления. Первое, весьма громоздкое, основано на применении итерационных алгоритмов и состоит в приближенной оценке микроструктуры аэрозоля из наблюдений спектральной оптической толщи, альbedo подстилающей поверхности и яркости безоблачного неба. Каждое из последовательных приближений формируется на основе результатов решения уравнения переноса излучения, в котором в качестве входных параметров используются данные предыдущей итерации. На основании сравнения полученных расчетных величин с экспериментальными принимается решение о продолжении или окончании итерационного процесса [1–3].

Основу второго, упрощенного, подхода составляют аппроксимационные формулы, выведенные из результатов решения уравнения переноса излучения [4–6]. С их помощью определяется аэрозольная оптическая толщина рассеяния, величина которой вкуче с суммарной оптической толщиной атмосферы, определенной методом Бугера и включающей в себя компоненты поглощения и рассеяния, позволяет вычислить величину ω_a . В последнем случае исследователь сталкивается с необходимостью учета асим-

метрии аэрозольной индикатрисы [7], что может быть осуществлено итерационным методом. При подобном подходе приходится оперировать достаточно громоздкими выражениями, особенно на уровне второго и последующего приближений.

В настоящей статье анализируется принципиальная возможность развития еще одного подхода к определению ω_a в рамках специально предназначенного для решения подобных задач математического аппарата: нейронных сетей. Нейросетевой метод в решении физических задач использует различные математические подходы: метод обращения нейронной сети, метод гибридной нечеткой системы и метод слоистой сети с алгоритмом обратного распространения [8, 9]. Отметим, что в литературе уже есть сведения об использовании нейронных сетей для определения оптических параметров рассеивающих сред [10–12].

Вычисление альbedo однократного рассеяния для аэрозольных частиц нейросетевым методом может быть осуществлено следующим образом:

1) определяется вводимое в нейронную сеть множество геометрических и оптических параметров атмосферы и соответствующих им данных по интенсивности рассеянного излучения. Последние вычисляются путем решения уравнения переноса лучистой энергии в атмосфере;

2) из первоначальных данных выделяется обучающая выборка, на основе которой происходит последующее обучение нейронных сетей, а также определяется тестовая выборка, с помощью которой осуществляется тестирование обученных нейронных сетей;

3) определяются тип и структура нейронной сети, вычисляется приблизительное число используемых нейронов;

4) производятся обучение и последующее тестирование нейронной сети с возможной модификацией ее структуры, если результаты обучения или тестирования не удовлетворяют заданным критериям.

Для решения уравнения переноса излучения в скалярной форме применялся метод Монте-Карло [13, 14]. В рассматриваемом конкретном случае в качестве исходного множества использовались значения яркости неба в альмукантарате Солнца в безоблачной атмосфере в красной области спектра ($\lambda = 0,675$ мкм), вычисленные для аэрозольной модели атмосферы. Она включала в себя три группы частиц с нормальными логарифмическими распределениями по размерам: ядра Айткена, грубодисперсную и субмикронную фракции.

Вытянутость аэрозольной индикатрисы рассеяния $f_a(\varphi)$ менялась путем вариаций числа частиц в модах [15], и соответствующие коэффициенты асимметрии световых потоков для аэрозольных частиц

$$\Gamma_a = \frac{\int_0^{\pi/2} f_a(\varphi) \sin \varphi d\varphi}{\int_{\pi/2}^{\pi} f_a(\varphi) \sin \varphi d\varphi} \quad (1)$$

задавались равными 6,00; 7,03; 9,66; 11,55. Оптическая толщина молекулярного рассеяния τ_{ms} равна 0,0427. Аэрозольная оптическая толщина варьировалась в интервале $0,1 \leq \tau_a \leq 0,7$ с шагом $\Delta\tau_a = 0,05$, что охватывает абсолютное большинство оптических ситуаций в безоблачной атмосфере. Значения альbedo однократного рассеяния частиц ω_a менялись в пределах $0,7 \leq \omega_a \leq 1,0$ с шагом $\Delta\omega_a = 0,1$. Зенитный угол Солнца принимал значения 60; 70,5; 75,5 и 78,5°; при этом угол рассеяния φ изменялся в пределах от 0 до 157°. Альbedo подстилающей поверхности принималось равным 0,15, что эквивалентно летним условиям для большинства типов земных покровов. Поглощение света молекулами воздуха считалось пренебрежимо малым.

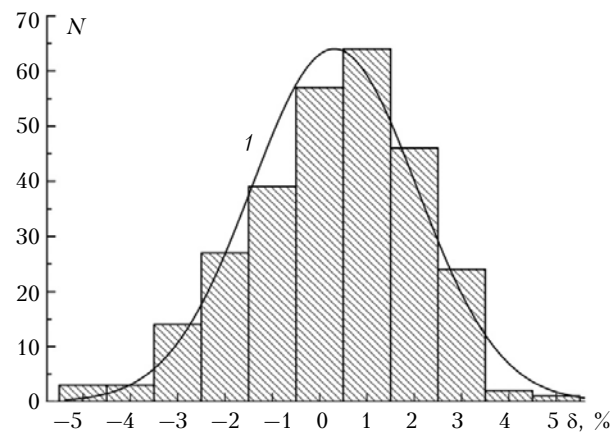
В качестве тестовой выборки использовались значения яркости неба и альbedo однократного рассеяния, вычисленные для следующих оптических параметров атмосферы. Аэрозольные оптические толщи рассеяния τ_a равны: 0,15; 0,23; 0,37; 0,41; 0,54; 0,66 и 0,69; секансы зенитных углов Солнца Z : 2; 2,2; 2,9; 3,2; 3,3; 3,5; 4,1; 4,2; 4,5 и 4,9; альbedo однократного рассеяния аэрозольных частиц ω_a : 0,73; 0,84 и 0,96.

Для решения задачи по определению ω_a применялись слоистые нейронные сети. В их обучении был использован широко известный алгоритм обратного распространения (Back propagation). Это итеративный градиентный алгоритм обучения, который используется с целью минимизации среднеквадратичного отклонения текущего выхода и желаемого выхода многослойных нейронных сетей [8, 9].

Было исследовано несколько структур нейронных сетей: от одно- до десятислойной, с различным количеством нейронов в слое. Наиболее приемлемые результаты показала однородная нейронная сеть с тремя скрытыми слоями по 10 нейронов в каждом слое. В выбранной сети при тестировании на обучающем

множестве максимальная и средняя абсолютные ошибки определения ω_a составили 0,013 и 0,043, а при тестировании на примерах, не входящих в обучающее множество, соответственно 0,012 и 0,043, что существенно лучше, чем в других исследованных сетях. В построении нейронных сетей использовался программный продукт NeuroPro версия 0.25. Их обучение осуществлялось на 1008 обучающих примерах. Тестирование сети проводилось на 280 примерах с вариациями основных оптических характеристик в пределах значений, заданных в обучающей выборке.

Результаты тестирования нейронной сети можно представить в виде гистограммы, изображенной на рисунке.



Гистограмма результатов тестирования нейронной сети: N — число примеров; δ — относительное отклонение; 1 — кривая случайного распределения отклонений

На ней представлены отклонения δ альbedo однократного рассеяния частиц $\omega_{a,test}$ от $\omega_{a,0}$:

$$\delta = \frac{\omega_{a,test} - \omega_{a,0}}{\omega_{a,0}} \cdot 100\% \quad (2)$$

Здесь $\omega_{a,test}$ — значения альbedo однократного рассеяния частиц, полученные на выходе нейронной сети, а $\omega_{a,0}$ — значения альbedo, которые использовались при решении уравнения переноса излучения.

В рассмотренных 280 примерах определения ω_a в 160 случаях (57%) относительные отклонения составляют $\pm 1\%$, а в 257 случаях (91,8%) — не превышают $\pm 3\%$. В целом же погрешность определения всех 280 величин ω_a не превышает $\pm 5,5\%$. Отклонения не носят систематического характера для различных входных параметров тестирующей выборки. Хотя следует заметить, что отрицательные отклонения в основном наблюдаются для малых значений аэрозольной оптической толщи, а положительные — для толщ, превышающих значения 0,5. Наименьшее количество отклонений, превышающих 3%, возникает при коэффициенте асимметрии световых потоков, равном 9,66. Эти детали, видимо, требуют последующего более подробного анализа.

Таким образом, первый опыт использования нейросетевых технологий для определения альbedo однократного рассеяния для аэрозольных частиц по

модельным данным яркости неба дал положительный результат: он показал принципиальную возможность их применения на практике для решения весьма сложных многопараметрических обратных задач атмосферной оптики.

Авторы благодарны Т.Б. Журавлевой и В.Г. Царегородцеву за возможность использования их программ для решения уравнения переноса излучения и вычислений альbedo однократного рассеяния частиц с помощью нейротехнологий.

1. *Dubovik O.T., King M.* A flexible inversion algorithm for retrieval aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements // *J. Geophys. Res. D.* 2000. V. 105. N 16. P. 20673–20696.
2. *Tonna G., Nakajima T., Rao R.* Aerosol features retrieved from solar aureole data: a simulation study concerning a turbid atmosphere // *Appl. Opt.* 1995. V. 34. N 21. P. 4486–4499.
3. *Devaux C., Vermeulen A., Deuze J.L., Dubuisson P., Herman M., Senter R.* Retrieval of aerosol single-scattering albedo from ground-based measurements: Application to observational data // *J. Geophys. Res. D.* 1998. V. 103. N 8. P. 8753–8761.
4. *Журавлева Т.Б., Павлов В.Е., Пашиев В.В.* Разностный метод определения аэрозольных оптических толщ рассеяния по данным о яркости неба в видимой области спектра: Часть 1 // *Оптика атмосфер. и океана.* 2003. Т. 16. № 4. С. 377–382.
5. *Журавлева Т.Б., Павлов В.Е., Шестухин А.С., Пашиев В.В.* Интегральный метод определения оптической толщи рассеяния по данным о яркости неба // *Оптика атмосфер. и океана.* 2003. Т. 16. № 5–6. С. 454–460.
6. *Zhuravleva T.B., Pavlov V.E., Pashnev V.V., Shestukhin A.S.* Integral and difference methods for the determination of the aerosol scattering optical depth from sky brightness data // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.* 2004. V. 88. P. 191–209.
7. *Журавлева Т.Б.* Статистическое моделирование распространения солнечной радиации: детерминированная атмосфера и стохастическая облачность: Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. Томск, 2007. 39 с.
8. *Уоссермен Ф.* Нейрокомпьютерная техника. М.: Мир, 1992. 184 с.
9. *Горбань А.Н., Россиев Д.А.* Нейронные сети на персональном компьютере. Новосибирск: Наука, 1996. 276 с.
10. *Okada Y., Mukai S., Sano I.* Neural network for aerosol retrieval // *Geosci. and Remote Sens. Symp.* 2001. IGARRS'01. V. 4. P. 1716–1718.
11. *Котова С.П., Майоров И.В., Майорова А.М.* Применение нейронных сетей для определения оптических параметров сильно рассеивающих сред по профилю интенсивности рассеянного назад излучения // *Квант. электрон.* 2007. Т. 37. № 1. С. 22–26.
12. *Гилев К.В., Некрасов В.М., Семьянов К.А.* Решение обратной задачи рассеяния для одиночной сферической частицы с помощью нейронных сетей // *Нейроинформатика и ее приложения: Матер. 12 Всерос. семинара.* 2004. С. 49–50.
13. *Метод Монте-Карло в атмосферной оптике* / Под ред. Г.И. Марчука. Новосибирск: Наука, 1976. 283 с.
14. *Журавлева Т.Б., Насртдинов И.М., Сакерин С.М.* Численное моделирование угловой структуры яркости неба вблизи горизонта при наблюдении с Земли. Часть 1. Аэрозольная атмосфера // *Оптика атмосфер. и океана.* 2003. Т. 16. № 5–6. С. 537–545.
15. *Мулдашев Т.З., Павлов В.Е., Тейфель Я.А.* Об определении аэрозольной оптической толщи по яркости неба в видимой области спектра // *Оптика атмосфер.* 1989. Т. 2. № 11. С. 1130–1134.

K.A. Matveev, V.V. Pashnev, V.E. Pavlov. On applicability of neural network technique to determination of single-scattering particle albedo from clear sky diffusion brightness.

An applicability of neural network techniques to the problem of retrieval of the aerosol particle single-scattering albedo from calculations of the clear sky brightness in a spectral range 0.675 μm is under analysis. A homogeneous neural network consisting of three latent layers, each by 10 neurons, has been considered. A complex of optical parameters covering their actual variations under different atmospheric conditions was used in learning the network. The network was tested in accordance with many samples under learning. A histogram of deviations of the found albedo values from model ones is presented. It follows from the histogram that deviations in 3% are observed in 96.8% of cases.