

Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - «Муром 2021»

Определение методом нейронных сетей оптических характеристик аэрозолей при лидарном зондировании

А.Я. Суханов^{1,2}

¹ *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, Россия, г. Томск, площадь Академика Зуева, 1
E-mail: say@iao.ru*

² *Томский университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40*

Представлены результаты исследований возможностей восстановления отношения рассеяния, аэрозольного обратного рассеяния по данным двухчастотного наземного лидарного зондирования на длинах волн 355 и 532 нм.

Ключевые слова: лидар, отношение рассеяния, аэрозоль, нейронные сети

Aerosols optical characteristics determination by neural networks method during lidar sensing

A.Ya. Sukhanov^{1,2}

¹ *V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS.*

² *Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.*

The studies results of reconstructing possibilities the scattering ratio, aerosol backscattering from the data of two-frequency ground-based lidar sounding at 355 and 532 nm are presented.

Keywords: lidar, scattering ratio, aerosol, neural networks

Введение

Аэрозоль представляет собой мелкие частицы (от 0.01 до 20 мкм), взвешенные в воздухе и различающиеся по форме и химическому составу. Исследование и изучение аэрозолей имеет долгую историю. Огромный вклад в получение сведений об аэрозолях сделан благодаря использованию методов лазерного зондирования и лидарных станций. Важность изучения аэрозоля связана как с необходимостью оценки влияния на климат, экологию, качество жизни людей, так и в связи с влиянием аэрозоля на точность восстановления других параметров атмосферы.

С точки зрения взаимодействия оптических волн с аэрозольными частицами, наиболее важными параметрами являются комплексный показатель преломления, форма и размеры. Комплексный показатель преломления вещества частицы является сложной функцией длины волны падающего излучения и обычно записывается $m(\lambda) = n(\lambda) - i\chi(\lambda)$, где действительная часть определяет фазовый сдвиг электромагнитной волны и называется показателем преломления, а мнимая определяет уменьшение амплитуды и называется показателем поглощения. Так как природа аэрозольных частиц бывает различной, то комплексный показатель преломления может изменяться в широких пределах и для каждого вещества он свой. Форма аэрозольных частиц изменяется от шаровой и нитевидной до кристаллической. Но довольно часто при интерпретации экспериментальных данных, используют то или иное приближение формы частицы к сферической. Для расчета оптических характеристик частиц данной формы разработана теория Ми, и даже для таких частиц существующая зависимость характеристик от размера и показателя преломления частицы, приводит к тому, что зондирование аэрозолей представляет собой достаточно сложную задачу. В данной

работе для восстановления оптических аэрозольных характеристик по лидарным сигналам предлагается использовать нейронные сети.

Уравнение лидарного зондирования и отношение рассеяния

По уравнению лазерного зондирования

$$P_{\lambda}(R) = \frac{E_{\lambda} \eta_{\lambda} G(R) A \cdot \Delta z}{\Delta t_L R^2} \beta_{\lambda}^{\pi}(R) \exp \left(-2 \int_0^R \sum_{i=1}^n c_i(r) \alpha_{\lambda,i}(r) + \alpha_{\lambda}^{sci}(r) + \beta_{\lambda}^{ext}(r) dr \right) \quad (1)$$

информацию об аэрозоле можно извлечь из коэффициента обратного рассеяния $\beta_{\pi}(\lambda, z) = \beta_{\pi}^a(\lambda, z) + \beta_{\pi}^m(\lambda, z)$ и пропускания $\Theta^2(\lambda, z)$.

Разделить различные составляющие уравнения лазерного зондирования достаточно сложно. При восстановлении аэрозоля это особенно актуально для стратосферных высот, где вклад аэрозольной составляющей в поглощение и рассеяние мал по сравнению с молекулярной. Для разделения прибегают к многочастотному зондированию и другим методам, но даже в этом случае необходимо иметь информацию об индикатрисе рассеяния аэрозолей по всем высотам.

При одночастотном зондировании обычно переходят к рассмотрению отношения рассеяния:

$$R(H) = \frac{\beta(H)}{\beta_m(H)} = \frac{\beta_m(H) + \beta_a(H)}{\beta_m(H)} = 1 + \frac{\beta_a(H)}{\beta_m(H)}, \quad (2)$$

где H - высота;

β, β_m, β_a - полный, аэрозольный и молекулярный коэффициенты обратного рассеяния.

Отношение рассеяния через уравнение лазерного зондирования связано с лидарными эхо-сигналами $N_c(H)$ следующим образом:

$$R(H) = \frac{N_c(H) H^2}{C \Theta^2(H) \beta_m(H)}, \quad (3)$$

где $\Theta(H)$ - прозрачность слоя атмосферы от лидара до высоты H ;

C - аппаратная константа, включающая площадь приемного телескопа, пропускание прямо-передающего тракта и т.д.

Эхо-сигналы $N_c(H)$ находятся из разности полного сигнала фотодетектора $N(H)$ и фоновых шумов N_{ϕ} . $\Theta(H)$ и $\beta_m(H)$ находятся из модельных представлений. Неизвестная константа C определяется с помощью нормировки $R(H)$. Для этого находят точку калибровки, точку, где функция $R(H)$ принимает минимальное значение и величины $N_c(H)$, $R(H)$ и $\beta_m(H)$ могут быть достаточно точно определены. Затем значение функции $R(H)$ делится на значение функции $R(H_m)$ в точке калибровки.

Анализ аэрозольной составляющей включает поиск аэрозольных слоев, сравнительно постоянных образований в атмосфере, оценка их параметров, изучение взаимодействия аэрозоля с другими составляющими атмосферы.

Само по себе аэрозольное отношение не позволяет судить о микрофизических характеристиках аэрозолей, кроме того, необходимо знание отношения рассеяния в точке калибровки. Классический подход в расчете отношения рассеяния применяется на Малой Станции Высотного Зондирования Атмосферы (МСВЗА) в институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН. Лидарным комплексом МСВЗА измеряются вертикальные профили стратификации аэрозоля, температуры и плотности воздуха в

стратосфере и мезосфере. В измерениях используются лидарные методы упругого аэрозольного и молекулярного рассеяния света (рассеяние Ми и Рэлея) и спонтанного комбинационного рассеяния света. Особый акцент направлен на исследования аномальных отклонений, связанных с возмущениями аэрозольной компоненты (появление и перенос вулканических облаков и слоев, полярных стратосферных облаков, серебристых облаков), проявлением внезапных стратосферных потеплений, а также с региональной особенностью наполнения стратосферы фоновым аэрозоле.

Расчет отношения рассеяния более точен, если известны давление и температура, но чаще всего как уже было сказано прибегают к использованию модельных значений, хотя это дает порой значительное расхождение в профиле отношения рассеяния.

Обработка данных лидарного зондирования МСВЗА с целью восстановления отношения рассеяния

В данной части работы делается попытка использования нейронной сети в восстановлении отношения рассеяния по полученным сигналам на длинах волн 355 и 532 нм. Исследование проводится с целью дальнейшего анализа использования нейронной сети для восстановления профиля обратного аэрозольного рассеяния и ослабления, в настоящее время пока данные характеристики на МСВЗА не восстанавливаются, кроме того, можно будет сравнить стандартные алгоритмы восстановления и нейронные сети на экспериментально полученных сигналах.

В настоящее время выработано уже множество рекомендаций по использованию НС (нейронных сетей), а также готовых библиотек по глубокому обучению, а также для работы с НС (deeplearning4j, keras, pylearn2 и многие другие), многие из методов реализованы в стандартных наборах библиотек математических пакетов, используемых для научных вычислений. Таким образом, существенных проблем с использованием и привлечением данной технологии для широкого класса задач уже нет. Тем не менее, анализ возможностей сетей для конкретной предметной области является важной задачей, в том числе и при привлечении данной технологии к решению обратных задач лидарного зондирования. Нейронная сеть обычно представляет собой полносвязный набор нейронов, реализует типичную задачу машинного обучения, поиска аппроксимирующей функции для имеющихся обучающих данных. В данной работе используется библиотека keras, использующая в качестве вычислительного бэкенда библиотеку tensorflow и графическую карту.

Для использования нейронных сетей важным этапом является создание обучающих выборок. Здесь на вход нейронной сети будет подаваться нормированный лидарный сигнал по части сигнала приходящей со средних высот, а на выходе восстанавливаться отношения рассеяния. Обучение при этом проводится на моделированных лидарных сигналах.

Данные по техническим характеристикам лидарной станции можно посмотреть в работах [1-2]:

Диаметр приемного зеркала лидара 1 м, фокус 2 м, энергия излучения на 532 нм 400 мДж, и на 355 нм 210 мДж, ширина приемного фильтра 1 и 10 нм соответственно. Частота излучения 10 Гц, поле зрения 1 мрад.

Кроме указанных характеристик при моделировании рассматривается приближение однократного рассеяния, а так же атмосферные модели по давлению и температуре (2012–2016 гг.) [3]. В качестве аэрозольной атмосферной модели привлекается модель Крекова-Рахимова, а также расчет оптических аэрозольных характеристик с учетом теории Ми и различных распределений и типов аэрозолей по высоте и составу (тропосфера, стратосфера). Также моделируются водяные облака, но здесь не учитываются ледяные кристаллы.

Обучающая выборка имеет значительный размер до 500000 примеров. Представлены результаты восстановления отношения рассеяния по трем датам для двух длин волн.

Примеры восстановления НС и стандартными методами отношения рассеяния на длинах волн 355 нм приведены на рисунке 1.

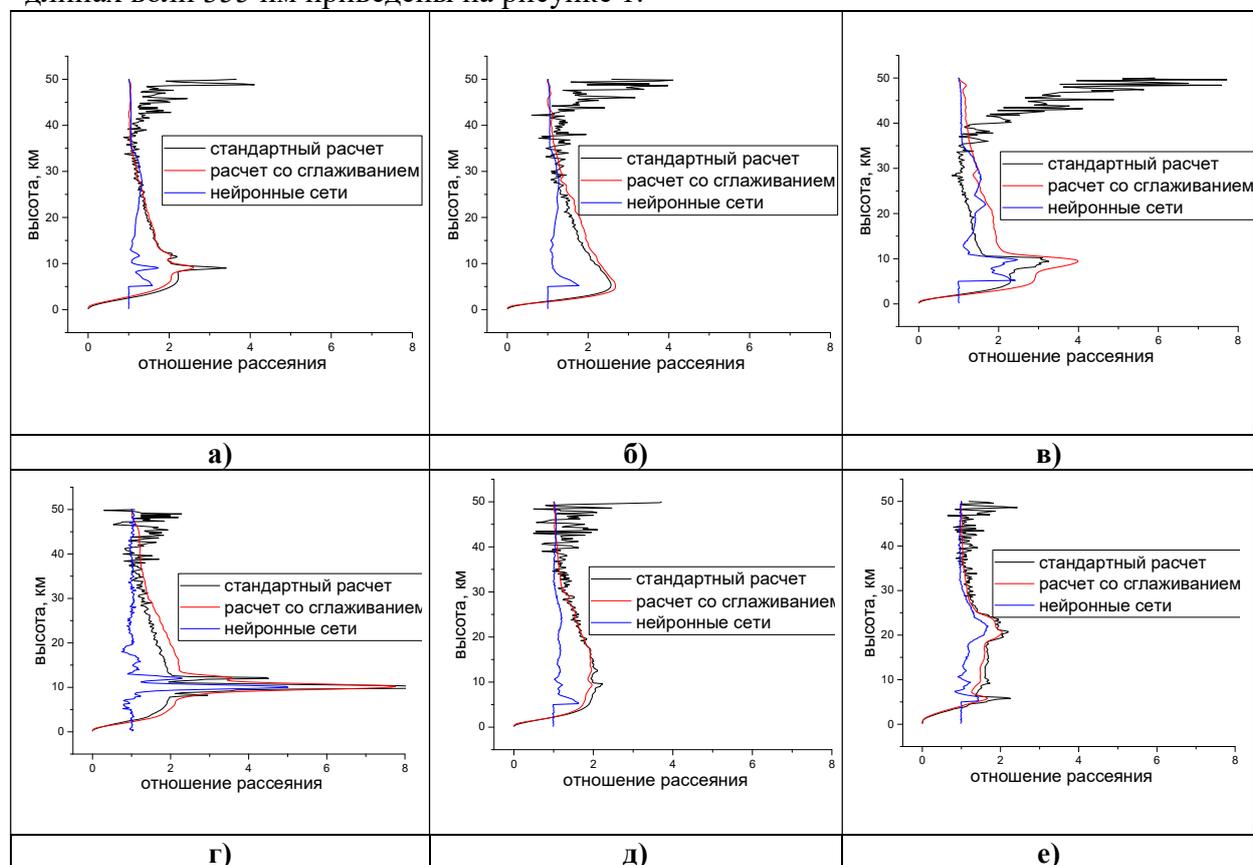


Рис. 1. Восстановление отношения рассеяния на длине волны 355 нм за а) - 18.12.2017 б) - 19.12.2017 в) - 21.12.2017 и на длине волны 532 нм за г) 18.12.2017 д) 19.12.2017 е) 21.12.2017

Таким образом, нейронная сеть получает отношение рассеяния без завышения значений в передних областях сигнала на тропосферных и стратосферных высотах, при этом повторяя ход присутствия аэрозоля, это обнадеживающие результаты, но требуется уточнение аэрозольных моделей закладываемых в имитационную модель сигнала, так как в части решений сеть дает несовпадающий ход профиля. Следует уделить внимание решению прямой задачи. Также при анализе работы нейронных сетей было выявлено, что важное значение имеет применяемый способ нормировки данных.

Обработка данных лидарного зондирования МСВЗА с целью восстановления аэрозольного рассеяния назад

Данная часть работы посвящена оценке возможностей нейронных сетей для одновременного восстановления отношения рассеяния и аэрозольного рассеяния назад. В данном случае используется нейронная сеть со сверточными нейронными слоями, слоями нормализация и пулинга. Сеть будет иметь два выхода размерностью 250 (количество данных по высотам для отношения рассеяния и для аэрозольного рассеяния назад). Сеть восстанавливает аэрозольное рассеяние отдельно по каждой из длин волн. Результаты представлены на рисунке 2. Не приводим восстановленные

данные по отношению рассеяния, во многом они повторяют представленные выше результаты (рисунок 1), хотя и несколько отличаются, что также дает повод к продолжению исследований в данном направлении и совершенствовании прямой модели и изучению конфигурации сетей.

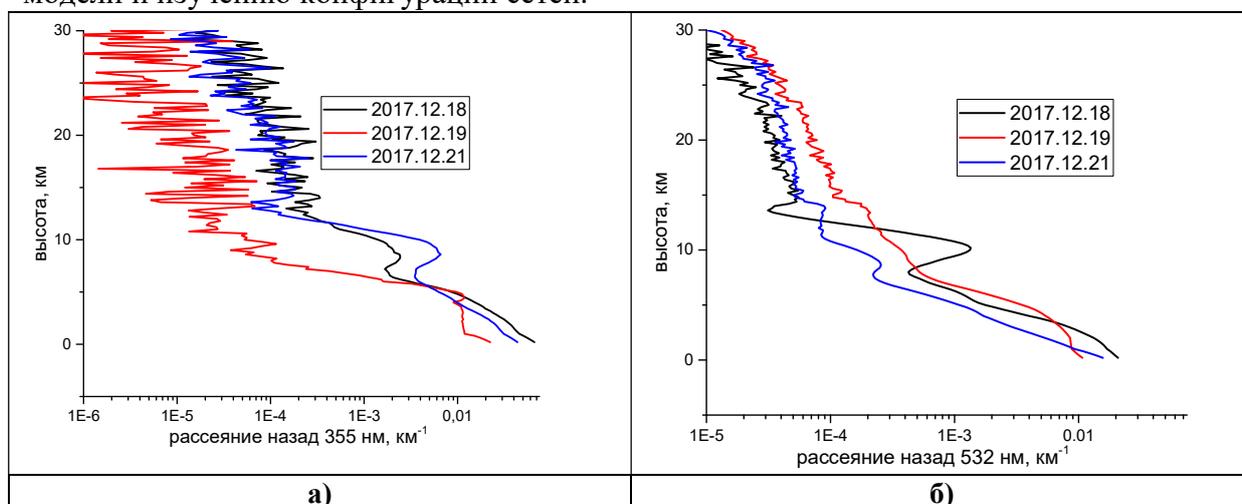


Рис. 2. Восстановление аэрозольного рассеяния назад на длине волны а) – 355 нм и б) 532 нм за три сеанса зондирования

Можно сделать вывод, что нейронные сети позволяют решать задачу восстановления аэрозольного рассеяния назад, но, очевидно, нужен достаточно строгий подход к моделированию сигналов и атмосферных ситуаций. Хотя даже на данном этапе результаты обнадеживают.

Далее приведены графики аэрозольного рассеяния назад для длин волн 355 и 532 нм для нейронной сети восстанавливающей одновременно по сигналам на двух длинах волн (рисунок 3).

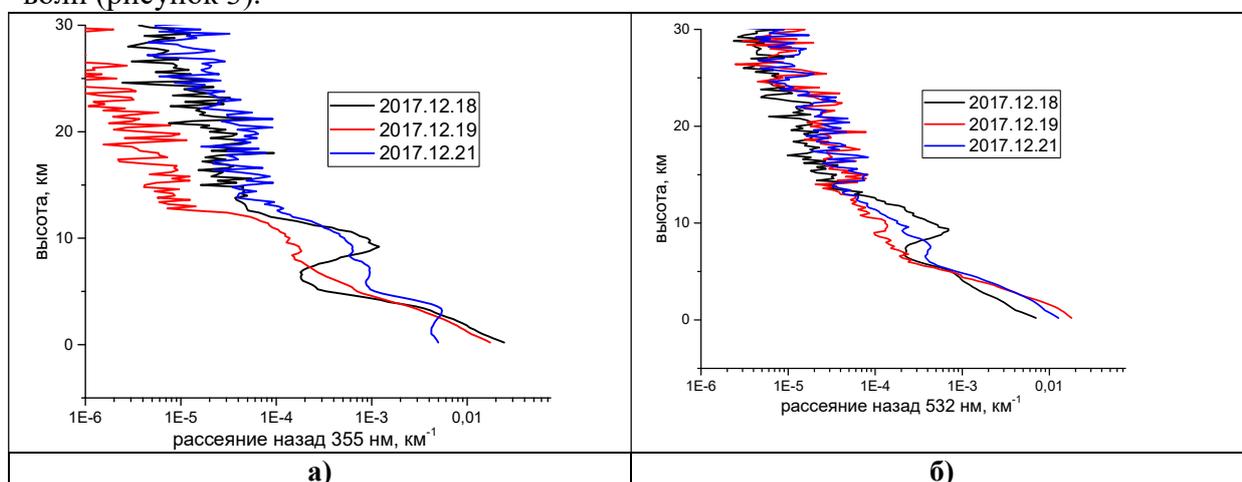


Рис. 3. Восстановление аэрозольного рассеяния назад на длине волны а) – 355 нм и б) 532 нм за три сеанса зондирования одновременно по двум сигналам

Как видно по графикам на рисунке 3, профили аэрозольного рассеяния назад для 355 и 532 нм во многом схожи, что отличает данную ситуацию от ситуации с использованием отдельных сигналов. Следует отметить, что при обучении нейронной сети, возникали различные решения при низких значениях ошибки на обучающей выборке, при этом обучающая выборка была довольно объемной (что показывает, что задача численно некорректная).

Выводы

Следует очень тщательно подойти к вопросу моделирования самих лидарных сигналов при создании обучающей выборки, а также к созданию аэрозольной модели атмосферы и способу нормирования сигналов. В данной работе нормировка осуществлялась на сумму части сигнала наименее подверженной шумам, но следует учесть, как искажается начальная часть сигнала, при моделировании также не учитывалось многократное рассеяние, на вход сети также не подавалось значение давления, температуры, и это должно стать предметом дальнейших исследований.

Работа выполнена в рамках выполнения государственного задания ИОА СО РАН.

Литература

1. Маричев В. Н., Бочковский Д. А. Лидарные измерения плотности воздуха в средней атмосфере. Часть 1. Моделирование потенциальных возможностей в видимой области спектра. // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 07. С. 553-563.
2. Маричев В. Н., Бочковский Д. А. Лидарный комплекс малой станции высотного зондирования атмосферы ИОА СО РАН. // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 05. С. 399–406. DOI: 10.15372/AOO20200510.
3. NRLMSISE-00 Model 2001 (Hedin A.E. Extension of the MSIS Thermospheric Model into the Middle and Lower Atmosphere // J. Geophys. Res. 1991. V. 96, iss. A2. P. 1159–1172.