

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА В СТОЛБЕ АТМОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ КА ЭЛЕКТРО-Л № 3 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

© 2022 г. В. Д. Блощинский^а *, М. О. Кучма^а, А. В. Кухарский^б

^аДальневосточный центр Федерального государственного бюджетного учреждения

“Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии “Планета”, Хабаровск, Россия

^бФедеральное государственное бюджетное учреждение “Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии “Планета”, Москва, Россия

*E-mail: v.bloshchinsky@dvrpod.ru

Поступила в редакцию 22.11.2021 г.

В работе рассматривается метод оценки общего содержания озона в столбе атмосферы на основе искусственных нейронных сетей по данным прибора МСУ-ГС геостационарного космического аппарата Электро-Л № 3. Проведенные тесты и сравнения восстановленных значений общего содержания озона по данным МСУ-ГС с данными наземных измерений из архивов AERONET и WOUDC, а также со спутниковыми оценками по данным прибора OMPS показали высокую корреляцию и точность. Средняя абсолютная ошибка при сравнении с OMPS составила 1.9 DU, с AERONET – 13.4, с WOUDC – 15.7, а корреляция – 99.8, 89.6 и 86.9% соответственно. Полученные результаты говорят о хорошей точности и эффективности предложенного метода оценки общего содержания озона.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, МСУ-ГС, Электро-Л, газ, озон, искусственная нейронная сеть

DOI: 10.31857/S0205961422040029

ВВЕДЕНИЕ

Озон – один из важнейших газовых компонентов атмосферы. Он способствует парниковому эффекту в тропосфере, участвует в нагреве стратосферы, а его высокая концентрация у поверхности Земли может быть токсична. Изучение пространственно-временных изменений содержания озона в атмосфере – важная проблема, связанная с его значительным влиянием на климат и уровень ультрафиолетового (УФ) излучения у поверхности Земли.

В настоящее время региональный и глобальный мониторинг состояния озонового слоя проводится как по данным *in situ*, так и по данным измерений космических аппаратов (КА). Наземные озонметрические станции дают наиболее точные данные о содержании озона в столбе атмосферы, но получить с них полную информацию о пространственном распределении озона не предоставляется возможным, так как они расположены неравномерно: большая часть станций находится в Западной и Центральной Европе, заметно меньше станций в Северной Америке, по несколько станций в Индии, Китае и Японии, и совсем мало в Южном полушарии. Этого недостатка лишены спутниковые оценки общего содержания озона (ОСО) или количества озона в вертикальном столбе от поверхности Земли до верхней границы атмосферы.

Значительный объем информации о содержании озона получают на основе данных дистанционного зондирования Земли с помощью трех методов пассивного зондирования: метода солнечного просвечивания, также называемого затменным методом, и методов с использованием собственного излучения атмосферы или рассеянного солнечного излучения (Hassler et al., 2014).

Традиционно общее содержание озона определяется с использованием обратного рассеянного УФ излучения Солнца. Это связано с тем, что ОСО изменяется обратно пропорционально УФ-излучению, большая часть которого поглощается в стратосфере, где находится около 90% озона. Примерами инструментов для мониторинга озона, которые измеряют уходящее УФ-излучение, являются: TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) (McPeters et al., 1998), OMI (Ozone Monitoring Instrument) (Veefkind et al., 2006), OMPS (Ozone Mapping and Profiler Suite) (McPeters et al., 2019).

Помимо такого подхода были разработаны технологии определения ОСО в спектрах инфракрасного излучения. Например, с применением искусственных нейронных сетей (ИНС) были получены оценки общего содержания озона по данным приборов ИКФС-2 (Инфракрасный Фурье-Спектрометр) со средним смещением 3–5% (Timofeyev et al., 2019) и IASI (Infrared Atmospheric

Sounding Interferometer) со средним смещением 3–4% (Turqueti et al., 2004).

Описанные выше подходы применяются в основном для полярно-орбитальных КА, которые имеют некоторые ограничения для определения ОСО. Так УФ-датчики способны обеспечить информацию об общем содержании озона только в дневное время суток с малой временной дискретностью, как правило, один раз в сутки над определенной территорией. ИК-гиперспектрометры обладают схожей с УФ-датчиками временной дискретностью, однако могут проводить измерения, как днем так и ночью. В то же время приборы, установленные на геостационарных КА лишены указанных недостатков. Преимущество спутников такого типа – большое пространственное покрытие исследуемой территории с высокой временной дискретностью поступающей информации. Имеются исследовательские работы по определению ОСО по данным геостационарных космических аппаратов. Например, по данным прибора ABI (Advanced Baseline Imager) КА GOES на основе метода статистической регрессии проведена оценка общего содержания озона с отклонением около 4.6% по сравнению с данными TOMS (Li et al., 2007). Также осуществлено определение ОСО в столбе атмосферы с помощью регрессии с моделированием спектральной яркости ABI и использованием данных SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager) КА Meteosat 8 (Jin et al., 2008; Schmidt, Hoffman, 2010). Дополнительное использование в этих работах вертикального профиля температуры в качестве одного из признаков для оценки ОСО позволило улучшить точность получаемых оценок за счет корреляции между стратосферной температурой и озоном. Также с помощью ИНС была осуществлена попытка определения общего содержания озона по инфракрасным измерениям SEVIRI (Polyakov, Timofeev, 2008). Данный подход показал отклонение в 6.5% по сравнению с озонометрическими станциями. Для прибора АНИ КА Himawari был предложен физический подход к решению вопроса по определению ОСО, использующий модель переноса излучения RTTOV (Radiative Transfer for TOVs) (Lee et al., 2019). Данный метод позволяет восстановить общее содержание озона для безоблачных областей с отклонением около 2.3% по сравнению с данными ОМІ и примерно 3% по сравнению с измерениями озонозондов. Минусом такого подхода является использование первого приближения наблюдений, которые состояются по климатическим данным и дневным измерениям ОМІ. Ранее был рассмотрен подход к определению ОСО для прибора МСУ-ГС (Многозональное сканирующее устройство гидрометеорологического обеспечения), установленном на КА Электро-Л № 1, основывающийся на статистической регрессии (Крамчанинова, Успенский, 2013). Также разработана технология восстановления значений общего содержания озона по данным прибора МСУ-ГС КА Электро-Л № 2 с применением ИНС (Roshydromet,

2019) с среднеквадратическим отклонением в 21 DU по сравнению с ОМІ.

Авторами настоящей работы был рассмотрен метод определения ОСО для безоблачной атмосферы, основывающийся на применении искусственной нейронной сети, которая в качестве входных данных использует значения яркостной температуры, регистрируемой в инфракрасных каналах прибора МСУ-ГС с геостационарного КА Электро-Л № 3, и данные о параметрах атмосферы (вертикальный профиль температуры и приземное давление) из численной модели прогноза GFS NCEP (Global Forecast System National Centers for Environmental Prediction).

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ АППАРАТУРЫ МСУ-ГС

Прибор МСУ-ГС позволяет измерять уходящее излучение всего диска Земли в видимом (3 канала с разрешением 1 км) и инфракрасном (7 каналов с разрешением 4 км) диапазонах спектра. Характеристика каналов представлена в табл. 1. Бортовая калибровка регистрируемых сигналов в каналах обеспечивается референсными источниками (лампы, имитаторы абсолютно черного тела). Периодичность съемки составляет 30 мин, что особенно важно для изучения пространственно-временных изменений общего содержания озона и получения его региональных оценок с возможностью построения многолетних трендов ОСО. Инфракрасные каналы обеспечивают получение количественной информации о параметрах атмосферы, облачности и подстилающей поверхности. В канале 8 (9.2–10.2 мкм) регистрируется уходящее излучение в спектральном диапазоне полосы поглощения озона около 9.6 мкм, что позволяет определять общее содержание озона в атмосфере. Измеряемые в “озоновом” канале радиационные температуры чувствительны к вариациям концентрации озона, вертикального распределения температуры, а также к вариациям температуры и излучательной способности подстилающей поверхности (Schmidt, Hoffman, 2010). Поэтому для получения достоверных оценок ОСО по спутниковым измерениям требуется привлечение дополнительных источников информации о вышеуказанных параметрах, которые были получены из модели GFS NCEP.

НАБОР ДАННЫХ ДЛЯ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Для обучения искусственной нейронной сети и проверки качества ее работы была сформирована выборка данных, которая разделялась на 3 части: выборка непосредственно для обучения, выборка для валидации при обучении и выборка для проведения тестов. Для наиболее точной оценки работы сети в тестовую выборку не включаются данные, которые участвовали в обучении.

В данной работе рассматривается МСУ-ГС КА Электро-Л № 3, имеющего точку стояния 76.6° долготы, а область интереса находится в пределах от –70° до 70° по широте и от 10° до 140° по долготе. В качестве входных данных для нейронной сети в выборку были включены данные измерений 7-и инфракрасных каналов данного прибора, так как основные полосы поглощения озона лежат в инфракрасном диапазоне. Дополнительно включались: профиль температуры (31 уровень от 1000 гПа до 1 гПа) и приземное давление, полученные из модели GFS NCEP. Это обуславливается тем, что тепловой режим атмосферы определяет ее потенциальную завихренность, которая в стратосфере сильно коррелирует со озоном. Аналогичный подход к выбору исследуемых параметров был рассмотрен в (Schmidt, Hoffman, 2010). Для учета пространственно-временного изменения полей ОСО в выборку включалась информация о зенитном угле спутника и Солнца. Зенитный угол спутника позволит нейронной сети учесть различия значений в каналах прибора по удаленности от надира, а зенитный угол Солнца – зависимость показателей яркостной температуры в каналах прибора от освещенности подстилающей поверхности.

Разрабатываемая ИНС должна решать задачу вычисления значений ОСО по определенным признакам. Для этого в выборке должна присутствовать априорная информация о количестве озона в столбе атмосферы. Такие данные могут быть получены по наземным или спутниковым измерениям. Наземные станции наблюдения дают наиболее точные измерения общего содержания озона в столбе атмосферы. Минусом таких данных является их неравномерная пространственная распределенность, так как наземные станции производят замеры в конкретных географических точках. Ввиду широтной зависимости пространственного распределения полей ОСО, этот минус не позволяет собрать достаточную по объему и разнообразию выборку для обучения ИНС. Поэтому в качестве эталонных значений ОСО выбирались его спутниковые оценки по данным прибора OMPS KA Suomi NPP. Были использованы данные уровня 2 (OMPS-NPP L2 NM Ozone (O3) Total Column swath orbital), в которых содержание озона вычисляется из значений нормализованной яркости с использованием двух пар длин волн: 317.5 и 331.2 нм для большинства условий и 331.2 и 360 нм для условий с высоким содержанием озона и большим зенитным углом Солнца. Данные были получены из NASA Goddard Earth Sciences (GES) Data and Information Services Center (DISC) (Jaross, 2017). Таким образом, общее количество записей в наборе данных для ИНС составило 225 000 за период с января по апрель 2021 г. Распределение набранных значений ОСО лежит в пределах от 195 до 460 DU. Обучающая выборка составила 70% от общего количества записей, валидационная и тестовая – по 15%.

Таблица 1. Характеристика каналов прибора МСУ-ГС космического аппарата Электро-Л № 3

Канал	Спектральный интервал, мкм	Канал	Спектральный интервал, мкм
1	0.5–0.65	6	7.5–8.5
2	0.65–0.8	7	8.2–9.2
3	0.8–0.9	8	9.2–10.2
4	3.5–4.01	9	10.2–11.2
5	5.7–7.0	10	11.2–12.5

Итоговый набор содержит в себе разные по физическому смыслу данные, которые сильно различаются по своим абсолютным величинам. Такой дисбаланс в значениях признаков может вызвать неустойчивость работы модели ИНС, замедлить процесс ее обучения и ухудшить итоговый результат. Поэтому выборка была нормализована отдельно по каждому признаку классическим способом согласно выражению:

$$X_n = \frac{X - \mu}{\sigma},$$

где X – вектор всех значений признака из выборки, μ – среднее значение для вектора X , σ – стандартное отклонение значений для вектора X . Таким образом удастся добиться получения среднего значения каждого признака по всем данным равным нулю, а дисперсии – единице.

АРХИТЕКТУРА ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ И ПРОЦЕСС ОБУЧЕНИЯ

В данной работе для решения регрессионной задачи определения ОСО были рассмотрены варианты архитектур искусственной нейронной сети, построенных по типу полносвязных нейронных сетей (многослойных перцептронов). Такой подход является одним из наиболее распространенных в различных направлениях применения ИНС и демонстрирует одни из лучших показателей точности в решении задач регрессионного анализа. Полносвязные ИНС состоят из входного, выходного, а также одного или нескольких скрытых слоев. Размерность входного слоя для поставленной задачи определяется количеством подаваемых на вход параметров (признаков), определенных ранее, а размерность выходного слоя равна 1, так как определяется только одно значение – ОСО в столбе атмосферы. В данной работе в архитектуры рассматриваемых ИНС также были добавлены слои активации и слои нормализации активации, которые делают обучение нейронной сети более устойчивым (Ioffe, Szegedy, 2015). Для каждой архитектуры эмпирически выбирались число используемых скрытых слоев и их размерность. В качестве функций активации рассматривались ReLU (Rectified Linear Unit), которая реализуется выражением $f(x) = \max(0, x)$, и tanh (гиперболический тангенс).

Процесс обучения ИНС – это итерационный пересчет весовых коэффициентов нейронов в слоях по заданному алгоритму оптимизации. Обучение выполнялось с помощью алгоритма обратного распространения ошибки, по которому определяется реакция сети на подаваемые данные от входного слоя к выходному на каждом шаге с фиксированными весами нейронов. На основе полученной реакции, определяется ошибка выходного слоя, которая определяется функцией потерь, далее проводится пересчет весовых коэффициентов каждого нейрона по методу градиентного спуска во время обратного прохода нейронной сети. В качестве функции потерь в данной работе использовалось среднеквадратическое отклонение.

В качестве алгоритма оптимизации был выбран алгоритм Adam (Kingma, Ba, 2015), который объединяет в себе идеи сохранения инерции и масштабирования градиента. Главная идея инерции – использование значений градиента, полученных на предыдущих итерациях обучения, чтобы “смягчить” его быстрое изменение в каждой итерации. Идея масштабирования заключается в том, чтобы шаг обучения выбирался отдельно для каждого параметра на основе данных о градиенте на предыдущих итерациях. Это достигается тем, что каждый элемент градиента делится на квадратный корень суммы квадратов предыдущих значений элемента. Такой подход позволяет достичь более высокой производительности в поиске оптимальных значений параметров по сравнению с другими методами оптимизации.

Обучение ИНС останавливается при достижении минимальных изменений в показателях метрик машинного обучения для валидационной выборки на протяжении нескольких итераций. В качестве метрик были выбраны среднеквадратическое отклонение и средняя абсолютная ошибка.

Точность обученной ИНС оценивалась по данным тестовой выборки. В качестве метрик точности были выбраны: средняя абсолютная ошибка (MAE), среднеквадратическое отклонение (RMSE), среднее смещение (BIAS), коэффициент корреляции Пирсона (ρ), коэффициент детерминации (R^2).

Во время проведения экспериментов по обучению различных архитектур ИНС и определению наиболее оптимальных размеров скрытых слоев и их количества, проводились эксперименты по определению наиболее весомых признаков для оценки ОСО. Для этого нейронная сеть поочередно обучалась, исключая какой-либо из признаков. Если это исключение не приводило к сильным ухудшениям показателей используемых метрик, считалось, что данный входной параметр имеет малое влияние на результат определения общего содержания озона и его можно не использовать при обучении. Таким образом было определено, что можно исключить измерения 4, 5, 6 и 10 каналов прибора МСУ-ГС. В результате прове-

денных экспериментов была выявлена наилучшая, согласно указанным метрикам, конфигурация архитектуры, которая состоит из пяти полносвязных слоев: входного слоя с размерностью, равной 37; трех скрытых полносвязных слоев с размерностями 64, 128 и 256 нейронов, дополнительно к которым включались слои с активацией ReLU и слои нормализации; и выходного слоя с размерностью, равной 1. Метрики для обученной ИНС по данным тестовой выборки имеют следующие показатели: MAE – 1.9 DU, RMSE – 0.9 DU, BIAS – –0.01 DU, ρ – 99.8%, R^2 – 99.6%. На рис. 1 представлены примеры карт ОСО для безоблачных пикселей, построенных с помощью разработанного алгоритма и по данным прибора OMPS.

Рассчитанные метрики для тестовой выборки говорят о хорошей корреляции и точности определения ОСО по отношению к спутниковым оценкам, полученным по данным прибора OMPS. Это также подтверждается визуальной корреляцией значений общего содержания озона по рис. 1.

ВАЛИДАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенное тестирование на выборке показывает качество обучения ИНС по собранным данным с OMPS. Для оценки точности работы предлагаемого алгоритма были проведены дополнительные сравнения. Первое – с данными наземных озонметрических станций, которые дают наиболее точные данные о содержании озона в столбе атмосферы. База данных с наземными измерениями была взята у WOUDC (World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre) – один из шести мировых центров являющийся частью программы глобального наблюдения за атмосферой Всемирной Метеорологической Организации (ВМО). Второе – с данными из архивов AERONET (AErosol RObotic NETwork) – программы по объединению наземных сетей зондирования аэрозолей, созданной NASA и LOA-PHOTONS (CNRS), которая значительно дополняется данными национальных агентств, институтов и университетов, отдельными учеными и партнерами. Программа обеспечивает долгосрочную и легкодоступную базу данных об оптических, микрофизических и радиационных свойствах аэрозолей для исследования и определения характеристик аэрозолей и подтверждения их спутниковых оценок. AERONET обеспечивает 3 уровня качества данных, последний из которых (2.0) гарантирует качественные данные по измерениям с фильтрацией облачности. Информация об общем содержании озона в архивах AERONET собирается по данным прибора TOMS, установленном на спутниках Earth Probe и Nimbus.

Для сравнения был выбран период с января по апрель 2021 г. Для рассматриваемых точек разница во времени между измерениями из баз данных и спутниковой съемки не превышала 30 мин, а расстояние не превышало 4 км. Точность рассчи-

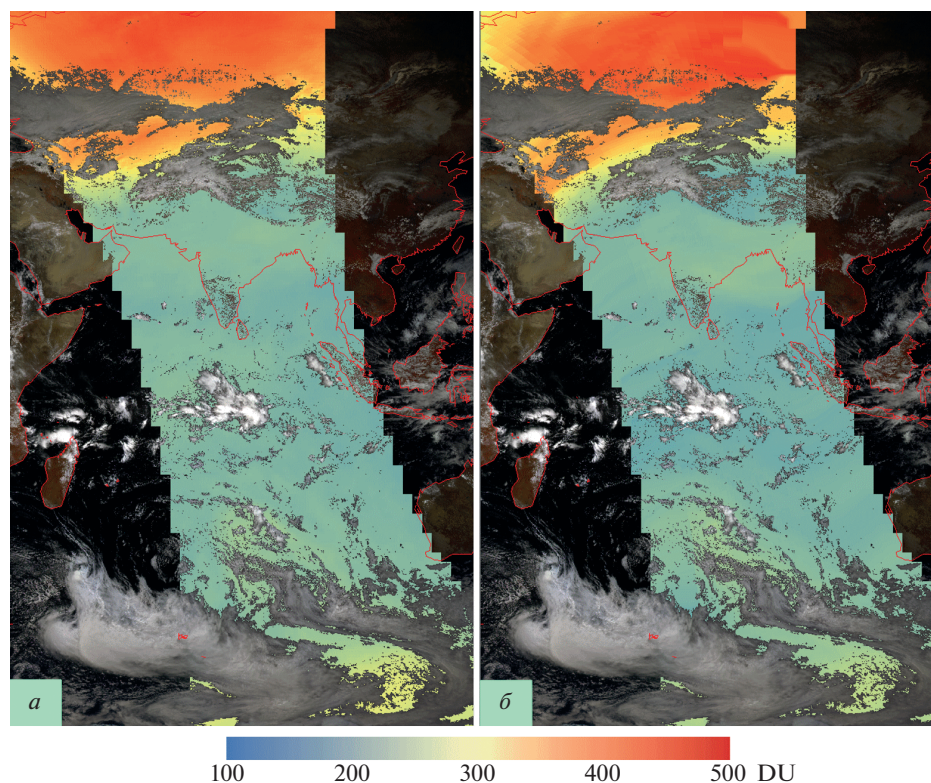


Рис. 1. Примеры карт ОСО по данным МСУ-ГС (а) за 2021.02.22 08:00 и ОМПС (б) за 2021.02.22 07:51.

тивалась по тем же метрикам, которые использовались для тестовой выборки. Для того же временного периода было проведено сравнение значений ОСО, полученных по данным ОМПС, с данными архивов WOUDC и AERONET. Для валидации значений ОСО по данным МСУ-ГС было набрано 8000 точек из архива AERONET и 3500 точек из архивов WOUDC, а для данных ОМПС – 700 и 500 точек соответственно. В таблице 2 представлены показатели метрик для всех рассматриваемых сроков.

По результатам валидации видна хорошая корреляция восстанавливаемых по данным МСУ-ГС значений ОСО с данными архивов WOUDC и AERONET. Схожесть значений метрик по данным МСУ-ГС и ОМПС подтверждает хорошие показатели обучения ИНС. Важно отметить, что показатели точности для архивов AERONET немного лучше, чем для WOUDC для двух спутниковых приборов. Это может объясняться наличием в архивах WOUDC измерений, сделанных в облачности, тогда как AERONET проводит фильтрацию по данному признаку. По требованиям ВМО, ошибка восстановления ОСО не должна превышать 15 DU (World Meteorological Organization (WMO), 2018). Разработанный алгоритм не в полной мере достигает заданных показателей точности, но результаты сопоставимы с аналогичными продуктами, получаемым по данным других геостационарных спутниковых приборов

(Schmidt, Hoffman, 2010; Lee et al., 2019) или лучше (Polyakov, Timofeev, 2008; Крамчанинова, Успенский, 2013; Roshydromet, 2019). Наличие только одного канала для полосы поглощения в районе 9.6 мкм, несовершенство маски облачности не позволяют в полной мере использовать полученные оценки ОСО по данным МСУ-ГС, например, в таких задачах, как изменение климата или анализ УФ радиации. Для этих целей используются специализированные спутниковые приборы, данные наземных измерений или радиозондирования. Разработанная методика восстановления ОСО по данным МСУ-ГС хорошо подойдет для проведения процедур атмосферной коррекции, калибровки и восстановления параметров атмосферы по данным КА Электро-Л № 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрен алгоритм восстановления общего содержания озона в столбе атмосферы с помощью полносвязной искусственной нейронной сети по данным прибора МСУ-ГС геостационарного КА Электро-Л № 3. В данном алгоритме нет необходимости дополнительной настройки каких-либо параметров, то есть возможен расчет глобальных карт распределения ОСО в автоматическом режиме в регионе от -70° до 70° по широте и от 10° до 140° по долготе. Входными данными для используемой ИНС являются 7, 8 и 9 каналы прибора МСУ-ГС, профиль температу-

Таблица 2. Результаты валидации

Прибор/архив	RMSE (DU)	MAE (DU)	BIAS (DU)	ρ , %	R^2 , %
МСУ-ГС/AERONET	18.5	13.4	-9.5	89.6	74.6
OMPS/AERONET	17.6	12.4	-7.1	92.8	75.4
МСУ-ГС/WOUDC	19.2	15.7	-7.8	86.9	72.8
OMPS/WOUDC	18.7	12.9	-7.8	91.9	83.2

ры и приземное давление, полученные из модели GFS NCEP, информация о зенитном угле спутника и Солнца. Преимущество предлагаемого метода перед физическим подходом, использующим модели переноса излучения, состоит в меньшей трудоемкости самого алгоритма, что уменьшает время обработки спутниковой информации. При этом точность оценки параметров не сильно уступает физическому подходу. Подход с использованием статистических методов уступает нейросетевым в том, что приходится определять значительное количество предикторов и пороговых значений, что не всегда является возможным для достижения необходимой точности из-за сложности анализируемых процессов.

Результаты проведенной валидации по данным из архивов AERONET и WOUDC показали, что среднеквадратическая ошибка восстановления ОЗО составляет 18.5 DU по отношению к AERONET и 19.2 DU по отношению к WOUDC, а средняя абсолютная ошибка – 13.4 DU и 15.7 DU соответственно. Такие результаты говорят о хорошей точности работы предлагаемого алгоритма, сопоставимой с аналогичными продуктами, получаемым по данным других спутниковых приборов (Schmidt, Hoffman, 2010; Lee et al., 2019) или лучше (Polyakov, Timofeev, 2008; Крамчанинова, Успенский, 2013; Roshydromet, 2019).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Крамчанинова Е.К., Успенский А.Б. Мониторинг общего содержания озона в атмосфере по данным российского геостационарного метеоспутника “Электро-Л”. // Исследование Земли из космоса. 2013. № 2. С. 12–18.
- Hassler B., Petropavlovskikh I., Staehelin J., August T., Bhar-tia P.K., Clerbaux C., Degenstein D., Mazière M.D., Dinelli B.M., Dudhia A., Dufour G., Frith S.M., Froidevaux L., Godin-Beekmann S., Granville J., Harris N.R.P., Hoppel K., Hubert D., Kasai Y., Kurylo M.J., Kyrölä E., Lambert J.-C., Levelt P.F., McElroy C.T., McPeters R.D., Munro R., Nakajima H., Parrish A., Raspollini P., Remsberg E.E., Rosenlof K.H., Rozanov A., Sano T., Sasano Y., Shiotani M., Smit H.G.J., Stiller G., Tamminen J., Tarasick D.W., Urban J., van der A R.J., Veefkind J.P., Vigou-roux C., von Clarmann T., von Savigny C., Walker K.A., Weber M., Wild J., Zawodny J.M. Past changes in the vertical distribution of ozone – Part 1: Measurement techniques, uncertainties and availability // Atmos. Meas. Tech. 2014. V. 7. P. 1395–1427. <https://doi.org/10.5194/amt-7-1395-2014>
- Ioffe S., Szegedy C. Batch Normalization: Accelerating Deep Network Training by Reducing Internal Covariate Shift. // Proceedings of the 32nd International Conference on International Conference on Machine Learning – Volume 37 (ICML'15). Lille, France, 2015. P. 448–456.
- Jaross G. OMPS-NPP L2 NM Ozone (O3) Total Column swath orbital V2. Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), 2017. <https://doi.org/10.5067/0WV4HAAZ0VHK>
- Jin X., Li J., Schmidt C.C., Schmit T.J., Li J. Retrieval of total column ozone from imagers onboard geostationary satellites. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2008. V. 46. № 2. P. 479–488. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.910222>
- Kingma D.P., Ba J.L. Adam: a method for stochastic optimization. // CoRR. 2015. № abs/1412.6980.
- Lee S.J., Ahn M., Ha S. Total Column Ozone Retrieval From the Infrared Measurements of a Geostationary Imager. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2019. V. 57. № 8. P. 5642–5650. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2901173>
- Li J., Li J., Schmidt C.C., Nelson III J.P., Schmit T.J. High temporal resolution GOES sounder single field of view ozone improvements. // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. № L01804. <https://doi.org/10.1029/2006GL028172>
- McPeters R.D., Bhartia P.K., Krueger A.J., Herman J.R. Earth Probe Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Products User's Guide. NASA Goddard Space Flight Center, 1998. 70 p.
- McPeters R., Frith S., Kramarova N., Ziemke J., Labow G. Trend quality ozone from NPP OMPS: the version 2 processing. // Atmos. Meas. Tech. 2019. V. 12. P. 977–985. <https://doi.org/10.5194/amt-12-977-2019>
- Polyakov A.V., Timofeev Y.M. Determining the total ozone from geostationary earth satellites. // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2008. V. 44. P. 745–752. <https://doi.org/10.1134/S000143380806008X>
- Roshydromet. Meteorological satellite data and products applications in Roshydromet. CGMS-47 ROSHYDROMET-WP-03, 2019. 11 p [URL: <https://www.cgms-info.org/Agendas/GetWp-File.ashx?wid=9d79a9f5-17aa-4dc9-9789-58b38a4-ba804&aid=a63dcf2e-bcc9-469f-a07b-8824959b599b>].
- Schmidt C.C., Hoffman J.P. ABI Ozone Detection. Algorithm Theoretical Basis Document. NOAA/NESDIS/STAR. Ver. 2.0. 2010. 43 p.
- Timofeyev Y.M., Uspensky A.B., Zavelevich F.S., Polyakov A.V., Viro-lainen Y.A., Rublev A.N., Kukharsky A.V., Kiseleva J.V., Kozlov D.A., Kozlov I.A., Nikulin A.G., Pyatkin V.P., Rusin E.V. Hyperspectral infrared atmospheric sounder IKFS-2 on “Meteor-M” No. 2 – Four years in orbit. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2019. V. 238. № 106579. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2019.106579>
- Turquety S., Hadji-Lazarou J., Clerbaux C., Hauglustaine D.A., Clough S.A., Cassé V., Schlüssel P., Mégie G. Operational trace gas retrieval algorithm for the Infrared Atmospheric Sounding Interferometer // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. № D21301. <https://doi.org/10.1029/2004JD004821>
- Veefkind J.P., de Haan J.F., Brinksma E.J., Kroon M., Levelt P.F. Total ozone from the ozone monitoring instrument (OMI) using the DOAS technique // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2006. V. 44. № 5. P. 1239–1244. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.871204>
- World Meteorological Organization (WMO). Guide to Instruments and Methods of Observation. Volume IV: Space-based Observations. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2018. 265 p.

Determination of the Total Ozone Content in Atmospheric Column according to the Data of Electro-L No. 3 Spacecraft Using Neural Networks Satellite

V. D. Bloshchinskiy¹, M. O. Kuchma¹, and A. V. Kukharsky²

¹Far-Eastern Center of State Research Center for Space Hydrometeorology “Planeta”, Khabarovsk, Russia

²State Research Center for Space Hydrometeorology “Planeta”, Moscow, Russia

The paper considers a method for retrieval of the total ozone content in atmospheric column on basis of artificial neural networks according to the MSU-GS instrument of the Electro-L No. 3 geostationary spacecraft. The tests and comparisons of the retrieved values of total ozone content according to the MSU-GS data with the ground-based measurements from the AERONET and WOUDC archives, as well as with satellite estimates based on the OMPS instrument data, showed a high correlation and accuracy. The mean absolute error when compared with OMPS was 1.9 DU, with AERONET – 13.4, with WOUDC – 15.7, and the correlation was 99.8, 89.6 and 86.9%, respectively. The obtained results indicate good accuracy and efficiency of the proposed method for retrieval of total ozone content.

Keywords: remote sensing, MSU-GS, Electro-L, gas, ozone, artificial neural network

REFERENCES

- Kramchaninova E.K., Uspensky A.B. Monitoring obshchego soderzhaniya ozona v atmosfere po dannym rossijskogo geostacionarnogo meteosputnika “Elektro-L”. [Monitoring of the total ozone content in the atmosphere according to the Russian geostationary meteorological satellite “Elektro-L.”] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2013. № 2. P. 12–18.
- Hassler B., Petropavlovskikh I., Staehelin J., August T., Bhartia P.K., Clerbaux C., Degenstein D., Mazjère M.D., Dinelli B.M., Dudhia A., Dufour G., Frith S.M., Froidevaux L., Godin-Beekmann S., Granville J., Harris N.R.P., Hoppel K., Hubert D., Kasai Y., Kurylo M.J., Kyrölä E., Lambert J.-C., Levelt P.F., McElroy C.T., McPeters R.D., Munro R., Nakajima H., Parrish A., Raspollini P., Remsberg E.E., Rosenlof K.H., Rozanov A., Sano T., Sasano Y., Shiotani M., Smit H.G.J., Stiller G., Tamminen J., Tarasick D.W., Urban J., van der A R.J., Veefkind, J. P., Vigouroux C., von Clarmann T., von Savigny C., Walker K.A., Weber M., Wild J., Zawodny J.M. Past changes in the vertical distribution of ozone – Part 1: Measurement techniques, uncertainties and availability // *Atmos. Meas. Tech.* 2014. V. 7. P. 1395–1427. <https://doi.org/10.5194/amt-7-1395-2014>
- Ioffe S., Szegedy C. Batch Normalization: Accelerating Deep Network Training by Reducing Internal Covariate Shift. // *Proceedings of the 32nd International Conference on International Conference on Machine Learning – Volume 37 (ICML'15)*. Lille, France, 2015. P. 448–456.
- Jaross G. OMPS-NPP L2 NM Ozone (O3) Total Column swath orbital V2. Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), 2017. <https://doi.org/10.5067/0WF4HAAZ0VHK>
- Jin X., Li J., Schmidt C.C., Schmit T.J., Li J. Retrieval of total column ozone from imagers onboard geostationary satellites. // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2008. V. 46. № 2. P. 479–488. doi 10.1109/TGRS.2007.910222
- Kingma D.P., Ba J.L. Adam: a method for stochastic optimization // *CoRR*. 2015. No. abs/1412.6980.
- Lee S.J., Ahn M., Ha S. Total Column Ozone Retrieval From the Infrared Measurements of a Geostationary Imager. // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2019. V. 57. № 8. P. 5642–5650. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2901173>
- Li J., Li J., Schmidt C.C., Nelson III J.P., Schmit T.J. High temporal resolution GOES sounder single field of view ozone improvements // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. № L01804. <https://doi.org/10.1029/2006GL028172>
- McPeters R.D., Bhartia P.K., Krueger A.J., Herman J.R. Earth Probe Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Products User’s Guide. NASA Goddard Space Flight Center, 1998. 70 p.
- McPeters R., Frith S., Kramarova N., Ziemke J., Labow G. Trend quality ozone from NPP OMPS: the version 2 processing // *Atmos. Meas. Tech.* 2019. V. 12. P. 977–985. <https://doi.org/10.5194/amt-12-977-2019>
- Polyakov A.V., Timofeev Y.M. Determining the total ozone from geostationary earth satellites. // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2008. V. 44. P. 745–752. <https://doi.org/10.1134/S000143380806008X>
- Roshydromet. Meteorological satellite data and products applications in Roshydromet. CGMS-47 ROSHYDROMET-WP-03, 2019. 11 p [URL: <https://www.cgms-info.org/Agendas/GetWp-File.ashx?wid=9d79a9f5-17aa-4dc9-9789-58b38a4-ba804&aid=a63dcf2e-bcc9-469f-a07b-8824959b599b>].
- Schmidt C.C., Hoffman J.P. ABI Ozone Detection. Algorithm Theoretical Basis Document. NOAA/NESDIS/STAR. Ver. 2.0. 2010. 43 p.
- Timofeyev Y.M., Uspensky A.B., Zavelevich F.S., Polyakov A.V., Viro-lainen Y.A., Rublev A.N., Kukharsky A.V., Kiseleva J.V., Kozlov D.A., Kozlov I.A., Nikulin A.G., Pyatkin V.P., Rusin E.V. Hyperspectral infrared atmospheric sounder IKFS-2 on “Meteor-M” No. 2 – Four years in orbit. // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 2019. V. 238. № 106579. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2019.106579>
- Turquety S., Hadji-Lazaro J., Clerbaux C., Hauglustaine D.A., Clough S.A., Cassé V., Schlüssel P., Mégie G. Operational trace gas retrieval algorithm for the Infrared Atmospheric Sounding Interferometer // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. № D21301. <https://doi.org/10.1029/2004JD004821>
- Veefkind J.P., de Haan J.F., Brinksma E.J., Kroon M., Levelt P.F. Total ozone from the ozone monitoring instrument (OMI) using the DOAS technique // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2006. V. 44. № 5. P. 1239–1244. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.871204>
- World Meteorological Organization (WMO). Guide to Instruments and Methods of Observation. Volume IV: Space-based Observations. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2018. 265 p.