

ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОЗОНОВОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ В БЕЛАРУСИ

*С.К. Бородко¹, И.И. Бручковский¹, М.А. Горбацевич¹, Н.В. Дорожко^{1,2},
В.В. Жучкевич¹, А.Н. Красовский², А.М. Людчик¹, А.Г. Светашев¹,
Е.И. Сидоркина¹, Т.Г. Табальчук¹, Л.Н. Турышев¹, Т.В. Шлендер^{1,2}*

¹*Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы Белорусского государственного университета, ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь*

²*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь, natashka_d10.05@mail.ru*

Рассматривается история изучения озонового слоя, а также вопросы организации мониторинга ультрафиолетового излучения в Беларуси. Показаны перспективы развития видов мониторинга и возможности усовершенствования анализа полученных данных. Отображена приборная база для мониторинга. Отдельно отмечена роль мониторинга озонового слоя и УФ излучения в национальной системе мониторинга окружающей среды.

Ключевые слова: озоновый слой; атмосфера; общее содержание озона; ультрафиолетовое излучение; мониторинг.

HISTORY OF THE STUDY OF THE OZONE LAYER OF THE ATMOSPHERE IN BELARUS

*S.K. Borodko¹, I.I. Bruchkovsky¹, M.A. Gorbatshevich¹, N.V. Dorozhko^{1,2},
V.V. Zhuchkevich¹, A.N. Krasovsky², A.M. Ludchik¹, A.G. Svetashev¹,
E.I. Sidorkina¹, T.G. Tabalchuk¹, L.N. Turyshev¹, T.V. Shlender^{1,2}*

¹*National Ozone Monitoring Research and Education Center, Belarusian State University, 7 Kurčatava Street, Minsk 220045, Belarus*

²*Belarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus, natashka_d10.05@mail.ru*

The article considers the history of studying the ozone layer, as well as the organization of monitoring of ultraviolet radiation in Belarus. The prospects for the development of types of monitoring and the possibility of improving the analysis of the data obtained are shown. The instrument base for monitoring is displayed. The role of monitoring of the ozone layer and UV radiation in the national environmental monitoring system is separately noted.

Keywords: ozone layer, atmosphere, total ozone content, ultraviolet radiation, monitoring.

Атмосферный озон в силу своих физических и химических свойств является одним из важнейших атмосферных газов. Поглощение озоном коротковолновой солнечной радиации и излучение в инфракрасной области спектра являются важнейшими составляющими радиационного и термического баланса всей атмосферы и стратосферы. Именно общее содержание озона в вертикальном столбе атмосферы (ОСО) определяет уровень и спектральный состав приземного биологически активного солнечного ультрафиолетового излучения на поверхности Земли, что является жизненно важным для существования человека и разнообразных форм жизни. Вследствие этого, развитие и совершенствование комплексных методов анализа состояния озоносферы по данным всех видов мониторинга определяется ВМО как первостепенная задача [1-3]. Один из возможных механизмов передачи изменений, происходящих в верхней атмосфере (стратосфере, мезосфере), на приземный слой атмосферы – озоновый механизм [4, с 18].

Верхняя атмосфера является существенным звеном общей циркуляции атмосферы, изменения термодинамических параметров стратосферы в конечном итоге оказывает воздействие на характер циркуляции тропосферы (погодные условия), непосредственно влияющей на жизнедеятельность человека.

Рост концентрации озоноразрушающих веществ (ОРВ) вызвал наблюдаемое с 1980 по середину 1990-х большое повсеместное снижение содержания озона в атмосфере. С конца 1990-х, концентрации озоноразрушающих веществ снижаются из-за успешного действия Монреальского протокола.

Наблюдения последних лет показывают, что общее содержание озона остается в рамках прежних значений, ниже уровня 80-х годов, однако резкий отрицательный тренд отсутствует. Восстановление содержания озона в глобальных масштабах, предсказанное результатами численного моделирования идет гораздо медленнее, что отчасти связано с изменениями глобальных атмосферных параметров – изменением концентрации парниковых газов и остыванием стратосферы, особенно в полярных районах обоих полушарий, где низкие температуры создают условия для разрушения молекул озона.

На сегодняшний день общее содержание озона в атмосфере (ОСО) на 2 % ниже, чем в 80-х гг. для широтного пояса ($60^{\circ}\text{S} - 60^{\circ}\text{N}$). Для широт ($35^{\circ}\text{N}-60^{\circ}\text{N}$) Северного полушария ОСО ниже примерно на 3,5 %, а для Южного полушария ($35^{\circ}\text{S}-60^{\circ}\text{S}$) ниже на 6 %. Такое межполушарное различие связывают с потерями озона весной в Антарктиде, обусловленными антарктической озоновой дырой. Изменений ОСО в тропиках ($20^{\circ}\text{S}-20^{\circ}\text{N}$)

не наблюдается. Уровень общего содержания озона (большую часть которого обеспечивает стратосферный озон) в глобальных масштабах остается стабильным с 2000 года.

В Северном полушарии в среднем наблюдается некоторое увеличение содержания озона на высотах 35-40 км и в нижней стратосфере (12-15 км). Однако рост концентрации озона в стратосфере найден далеко не во всех регионах; на некоторых станциях отмечается наличие небольшого отрицательного тренда стратосферного озона и общего содержания озона.

Мониторинг озонового слоя в отличие от других видов мониторинга, проводимых в рамках НСМОС, относится к глобальному типу, который целенаправленно проводится отдельными государствами в интересах всего мирового сообщества. Он направлен на выполнение международных обязательств Республики Беларусь в области охраны озонового слоя и защиты жизни и здоровья человека, окружающей среды от неблагоприятных последствий, вызываемых разрушением озонового слоя, и в настоящее время регламентируется Законом Республики Беларусь: «Об охране озонового слоя» от 16 июня 2014 года, а также рядом Постановлений Совета Министров Республики Беларусь, направленных на выполнение Венской Конвенции 1985 г. о защите озонового слоя.

В соответствии с указанными документами в 1997 г. в Минске создан Национальный научно-исследовательский центр мониторинга атмосферы (ННИЦ МО БГУ), где в настоящее время проводятся регулярные измерения: общего содержания озона в столбе атмосферы (ОСО), концентраций приземного (тропосферного) озона, общего содержания двуокиси азота (ОСДА), а также уровней приземного ультрафиолетового солнечного излучения.

Для обеспечения данных видов мониторинга в ННИЦ МО БГУ разработан ряд оригинальных автоматизированных приборов и соответствующее программное обеспечение для получения, обработки и анализа результатов измерений (рис. 1).

Разработаны инструментальные (линейка озонометров и фотометров «ПИОН») и программные средства для измерения ОСО и исследования уровней и доз основных биологических эффектов солнечного УФ излучения. Постоянно совершенствуется система их калибровки.

Непрерывный мониторинг ОСО на Минской озонометрической станции (№354) ННИЦ МО БГУ (53.83°N, 27.47°E) проводится с 1997 г. с помощью озонометра «ПИОН», работающего по прямому солнцу. Начиная с 2002 года, измерения ОСО осуществляются спектрометрическим «ПИОН-УФ», в рамках специально разработанной процедуры с использованием спектров плотности энергетической освещенности приземным солнечным

излучением (СПЭО). Измерения концентрации приземного озона сертифицированными приборами проводятся на Минской озонметрической станции с 2004 г. с помощью анализатора озона TEI-49C фирмы Thermo Environment Instruments (USA) и разработанного в НИИЦ МО БГУ трассового измерителя озона ТрИО-1. С использованием данных наблюдений на Минской озонметрической станции, на минских пунктах Гидромета и дополнительных, близких по величине, данных литовской станции Прейла за 2000 – 2010 гг. в НИИЦ МО БГУ была рассчитана динамическая климатическая норма приземного озона для минского региона.



Рис. 1. Приборы для измерения общего содержания O_3 , интенсивности солнечного УФ излучения, приземной концентрации озона, ОС NO_2 : а) спектро радиометр ПИОН-УФ-П; б) фильтровый радиометр ПИОН-Ф в) фильтровый радиометр ПИОН-ФН с солнечной батареей; г) спектрограф изображения MARS-B; д) измеритель концентрации приземного озона на основе ПГС (NiO); е) измеритель концентрации приземного озона на основе ПГС (SnO_2).

Измерения ОСО проходят также в Учебно-научном центре «Нарочанская биологическая станция» имени Г.Г. Винберга ($53.89^\circ N$, $27.55^\circ E$) и в Гомельском государственном университете имени Франциска Скорины ($52.44^\circ N$, $31.00^\circ E$).

В результате выполнения работ по программе мониторинга в рамках НСМОС накоплена уникальная база данных, включающая значения ОСО за период 1997–2022 гг., а также спектры приземного солнечного излучения за период 2002–2022 гг. и значения концентраций приземного озона за период 2004–2022 гг. Результаты наземных измерений дополнены доступными данными спутниковых наблюдений. С использованием этой базы специалистами НИИЦ МО БГУ проводятся систематические исследования сезонной и многолетней изменчивости состояния озоносферы над территорией Республики Беларусь и Восточно-Европейским регионом Северного

Полушария. По данным мониторинга параметров и составляющих атмосферы в НИИЦ МО БГУ выполнен ряд научных исследований. В частности, проведены исследования сезонной и многолетней изменчивости состояния озоносферы над территорией Республики Беларусь и Восточно-Европейским регионом Северного Полушария. С привлечением данных спутниковых наблюдений за период 1978–2017 гг. определены динамические климатические нормы и многолетние тренды общего содержания озона в средних широтах Северного полушария (30 – 60°N). С привлечением глобальных спутниковых измерений ОСО, временные ряды которых, существенно длиннее временных рядов наземных измерений и позволяют получить значения ОСО в тех местах, где нет озонометрических станций, проведен анализ динамики озоносферы над территорией Республики Беларусь для периодов 1979 – 1992 и 1997 – 2022 годов (в период 1992-1997 спутниковые измерения отсутствовали). Проведена оценка климатических норм для ряда городов РБ. Климатические нормы рассмотренных городов очень близки (рис. 2), отличие в среднемесячных многолетних значениях ОСО над территорией Беларуси невелико – от 2 до 5 ед.Д, наибольшие значения ОСО характерны для северо-востока страны в марте, наименьшие значения ОСО – для запада страны в октябре.

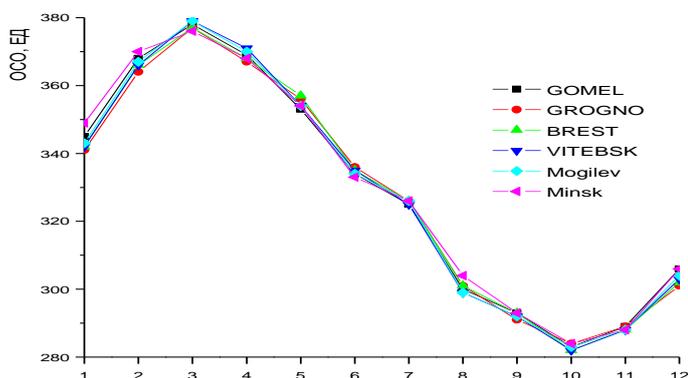


Рис. 2. Климатическая норма для областных городов Республики Беларусь (с использованием данных за период 2005-2009 гг., спутниковые данные)

Анализ повторяемости типов циркуляции для января и февраля, для временных периодов 1979-1992 гг. и 2000-2022 гг. показал, наличие связи процессов, протекающих в озоносфере и тропосфере. Эта связь сохраняется и в случае смены знака тренда ОСО.

Одной из характерных черт динамики озоносферы над нашим регионом в период значительного отрицательного тренда ОСО является более частое, чем в последнее десятилетие, появления отрицательных озоновых аномалий («озоновых мини-дыр») — явлений кратковременного значительного (до 30 % - 35 %) снижения ОСО в локальной области атмосферы. В последние годы в НИИЦ МО БГУ было проведено исследование роли

положительных аномалий стратосферного озона в Северном полушарии, сезонность, пространственное распределение и их связь с динамикой стратосферно-тропосферных процессов. На основании данных спутниковых наблюдений за период 1987 – 2017 гг. был определен многолетний тренд общего содержания озона над различными регионами Северного полушария и был сделан прогноз поведения озонового слоя на период 2018 – 2022 гг. Исследованы особенности в поведении приземного озона на территории Беларуси в январе 2021 и 2022 гг. В 2022 г. зарегистрированы заметно более высокие концентрации озона на всех пунктах наблюдений по сравнению с 2021 г. Показано, что обсуждаемые различия не связаны с изменениями в уровне антропогенного загрязнения воздуха, а обусловлены различием в метеорологических условиях в названные периоды. Определение причин таких различий важно для понимания особенностей климатологии приземного озона в Беларуси и выработки достоверного прогноза его поведения в будущем.

В настоящее время мониторинг уровней и доз биологически активного солнечного УФ излучения является важной частью глобального экологического мониторинга состояния озонового слоя, который проводится с помощью приборов наземного и орбитального базирования. В НИИЦ МО БГУ регулярно ведется мониторинг этих показателей. Данные наблюдения за уровнем приземного солнечного биологически активного ультрафиолетового излучения, полученные за более чем 20-летний период исследований (2000-2022 гг.) были использованы для сравнительного анализа региональной и сезонной изменчивости УФ климата на территории Беларуси. Результаты мониторинга применялись также для валидации и совершенствования модели расчета значений доз биологически активного солнечного излучения, позволяющей осуществлять их ретроспективную и прогнозную оценку для климатически значимых временных периодов, а также охватывать значительные пространственные области. На основании полученных закономерностей в БГУ разработана методика краткосрочного (до 3 дней) прогноза уровней и доз облученности биологически активным УФ-излучением (УФ-индекс), базирующаяся на прогнозе ОСО и облачности в вегетационный период (конец марта – середина сентября) [5, с 20]. В результате мониторинга за период 2016 – 2022 г. накоплены временные ряды общего содержания и приземной концентрации двуокиси азота для г. Минска и характерные профили распределения концентрации двуокиси азота с временным разрешением 1.5 минуты за периоды светового дня. На основании измерения вертикальных профилей двуокиси азота над Минском (53.837317 N, 27.475145 E), полученных при помощи многоосевого регистратора спектров MARS-B, проведен анализ пространственно-

временных рядов за период наблюдений. Для мониторинга аэрозольной оптической толщи на постоянной основе применяется международная сеть AERONET, в составе которой работают солнечные радиометры. Эти приборы способны проводить измерения, при помощи которых восстанавливаются параметры аэрозолей. Применяемый в НИИЦ МО БГУ метод МАХ-DOAS позволяет восстанавливать, в том числе вертикальные профили аэрозольного оптического поглощения.

Перспективными направлениями развития мониторинга является: совершенствование приборной базы и разработка нового программного обеспечения; развитие (расширение) сети мониторинга для оценки пространственной неоднородности распределения озона в стратосфере; разработка автоматизированных систем использования данных орбитальных наблюдений за состоянием озонового слоя и совершенствование системы оперативного распознавания и траекторного анализа озоновых аномалий, прогноз их появления в атмосфере над территорией Республики Беларусь; комплексное использование данных орбитальных и наземных наблюдений для совершенствования процедуры восстановления вертикальных профилей распределения озона в атмосфере; исследование процессов формирования полей концентрации приземного озона и оценка вклада отдельных факторов; развитие моделей и методов численного моделирования атмосферных процессов с учетом фотохимии озона в верхней атмосфере с целью изучения стратосферно-тропосферных связей и оценки влияния верхней атмосферы на формирование циркуляционных и конвективных процессов в тропосфере, непосредственно воздействующих на погоду и региональный климат; развитие международного сотрудничества.

Библиографические ссылки

1. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014. Report No. 55. World Meteorological Organization, Global Ozone Research and Monitoring Project. Geneva: WMO; 2015.
2. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010. WMO Report No. 52. World Meteorological Organization, Global Ozone Research and Monitoring Project. Geneva: WMO, 2011.
3. Сайт Всемирной метеорологической организации – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://public.wmo.int/en>– Дата доступа: 01.09.2023 г.
4. Красовский А.Н., Турышев Л.Н., Светашев А.Г., Бородко С.К., Жучкевич В.В. Озоновый механизм управления региональным климатом и погодой. Наука и инновации –2016 – С17–20
5. Турышев Л.Н., Красовский А.Н., Жучкевич В.В., Борковский Н.Б., Атрашевский Ю.И., Цвирко М.П., Сикорский В.В. Методика краткосрочного прогноза ультрафиолетового индекса в районе г. Минска. Природные ресурсы. 2005; 1С.15–25.