

DOI: 10.7868/S0869587313040269

## ЧТО ПРОИСХОДИТ С ОЗОНЫМ СЛОЕМ В НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ?

Исследования атмосферного озона, начатые в 30-х годах XX в. и продолжающиеся поныне, необходимы вследствие его чрезвычайно важного значения для земной биосферы и климатической системы.

Озон относится к малым газовым примесям атмосферы. Толщина озонового слоя, приведённого к нормальному давлению, составила бы всего около 3 мм (или около 300 единиц Добсона), в то время как высота однородной атмосферы — порядка 8 км, а общая масса озона — лишь около  $0.64 \times 10^{-6}$  от массы всей атмосферы. Поглощая коротковолновое солнечное излучение, озон защищает земную биосферу от опасной ультрафиолетовой солнечной радиации и участвует в нагревании стратосферы. Поглощая уходящую от Земли длинноволновую радиацию, озон участвует в парниковом эффекте в тропосфере. Основная масса озона находится в стратосфере. Максимум его концентрации обычно сосредоточен на высотах 15–25 км, в зависимости от широты и сезона, а пространственное распределение и изменение во времени определяются фотохимическими и динамическими процессами в атмосфере.

Большое внимание учёных и общественности к проблемам озонового слоя в течение двух последних десятилетий вызвано разрушением озона в весенние сезоны в нижней стратосфере над Антарктикой, образованием так называемой “озоновой дыры”. В отдельные годы последнего десятилетия отмечены случаи значительного уменьшения содержания озона и в стратосфере Арктики. Рекордное сокращение содержания стратосферного озона над Арктикой, сопоставимое с разрушением озона в области антарктической озоновой дыры, произошло весной 2011 г. Очевидно, что необходимо продолжать изучение динамических и химических процессов, влияющих на озоновый слой, и совершенствовать его мониторинг.

В 1948 г. Международным союзом геодезии и геофизики учреждена Международная озонная комиссия (МОК), призванная оказывать помощь в организации и координации озонных исследований в мире, включая развитие наземных и спутниковых методов наблюдения, изучение химических и динамических процессов, влияющих на озоновый слой. Члены МОК (их число ограниче-

но 30, выборный срок составляет 4 года с возможностью его однократного продления) — это ведущие учёные в области исследования атмосферного озона из разных стран. Первым президентом комиссии был Гордон Добсон — выдающийся британский учёный, именем которого назван один из основных приборов для измерения общего содержания озона в атмосфере — спектрофотометр Добсона. Членами МОК были выдающиеся учёные в области атмосферной динамики и химии, в том числе лауреаты Нобелевской премии по химии мексиканский учёный Марио Молина и голландский учёный Пауль Крутцен (совместно с профессором из США Шервудом Роуландом). Их исследования механизмов разрушения озона в полярной стратосфере сыграли важную роль в подготовке Монреальского протокола, который, совместно с принятыми позже дополнениями к нему, привёл к ограничению выбросов в атмосферу озоноразрушающих веществ — хлорфторуглеродов. Монреальский протокол был принят в 1995 г. и к настоящему времени подписан 190 странами мира, в том числе и Российской Федерацией. В состав МОК в разные годы, начиная с 1980 г., входили ведущие российские учёные в названной области: А.Х. Хргиан (Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова), С.П. Перов, В.У. Хаттатов, В.М. Дорохов (Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета), Н.Ф. Еланский (Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН). В 2012 г. членом МОК от нашей страны избран А.Н. Груздев (Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН).

В августе 2012 г. в канадском городе Торонто завершился проходящий раз в четыре года Озонный симпозиум. В нём участвовали более 300 учёных из 30 стран, в том числе 6 из России. Наибольшее внимание участников привлекли следующие вопросы:

- подтверждают ли результаты мониторинга в последние годы начало восстановления озонового слоя вследствие сокращения содержания озоноразрушающих веществ в атмосфере?
- каковы причины рекордного по своей интенсивности истощения озонового слоя в стратосфере Арктики весной 2011 г.?

• каково взаимное влияние предполагаемого в ближайшие десятилетия восстановления озонового слоя и изменения климата?

Действующий президент Международной озоновой комиссии профессор Афинского университета (Греция) **Х. Зерифос** подчеркнул, что Монреальский протокол не решил полностью проблему озонового слоя. Факт его разрушения над Сибирью (в Арктике) весной 2011 г. показал, что оставаться спокойными нельзя, так как проблема ещё не решена. Учёные должны тщательно следить за состоянием озонового слоя и уровнем опасной для человека и биосферы ультрафиолетовой радиации.

В настоящее время очевидно, что влияющие на озон химические процессы сложнее, чем считалось ранее. Долговременные изменения озонового слоя не только в полярных регионах, но и над тропиками становятся всё более актуальной проблемой исследований. Важно продолжать следить за общим содержанием и вертикальным распределением озонового слоя, его состоянием в тропосфере и стратосфере, за влияющими на озон химическими процессами. Важна роль современных моделей, учитывающих эти процессы, а также взаимосвязь изменения климата и озонового слоя. Специалисты нуждаются в данных о динамике уровня опасной части ультрафиолетовой радиации (УФ-В) на поверхности Земли. Последние модельные исследования показывают, что возвращение уровня УФ-В радиации к нормальным значениям предполагается к середине текущего столетия.

В целом, считает президент МОК, в стратосфере наблюдаются признаки восстановления озонового слоя, хотя озон по-прежнему разрушается в весенний период над Антарктикой и в Арктике, где этот процесс даже усиливается вследствие глобального потепления в нижней атмосфере, сопровождаемого понижением температуры стратосферы. Из-за этого восстановление озона замедляется. Химические заменители озоноразрушающих соединений также являются парниковыми газами, они вносят дополнительный вклад в изменение климата. В тропосфере ситуация немного улучшилась, за исключением регионов Юго-Восточной Азии, где наблюдается сильное загрязнение атмосферного воздуха над мегаполисами.

Президент МОК отметил также, что изменение климата приводит к потеплению в тропосфере, но в то же время к понижению температуры в стратосфере, что, в свою очередь, делает состояние озонового слоя в полярных регионах более уязвимым вследствие сохранения в атмосфере озоноразрушающих веществ. Таким образом, не только изменение климата влияет на озоновый слой, но и озон влияет на климат. Последние исследования показывают, что значительные изме-

нения озонового слоя могут воздействовать на климат в нижних слоях атмосферы Земли.

В заключение **Х. Зерифос** сказал, что работы российских исследователей в последние десятилетия входили в число передовых. Деятельность российской сети мониторинга озонового слоя имеет чрезвычайно важное значение, так как значительная часть полярного региона является российской территорией.

Большое внимание в выступлениях участников Озонного симпозиума уделялось исследованию озонового слоя в полярных областях; на четырёх специальных сессиях этому вопросу было посвящено 57 докладов, при этом наибольший интерес вызвали исследования озоновой дыры в Арктике, которая, как показал зимний сезон 2010/11 г., по ряду своих параметров стала сравнимой с озоновой дырой в Антарктике. Так, немецкий исследователь **М. Рекс** сообщил, что зимой 2010/11 г. в нижней стратосфере Арктики наблюдался чрезвычайно стабильный и холодный полярный вихрь, в результате чего в начале апреля 2011 г. потери озона на высотах 18–20 км превысили 80%. При этом минимальная концентрация озона составила 0.5 миллионных долей, что ниже соответствующих значений в Антарктиде в 1985 г., когда разрушение озонового слоя было одним из самых значительных за последние более чем 20 лет.

В ряде сообщений, в частности, в докладе французского учёного **Ж. Поммеро**, были представлены результаты анализа химического состава нижней стратосферы Арктики, объясняющие образование озоновой дыры весной 2011 г. В докладе **М. Вебера** (Германия) возникновение рекордной арктической озоновой дыры весной 2011 г. связывается с эволюцией волновой активности до и во время полярного вихря, которая привела к ослаблению циркуляции Брюера–Добсона, что уменьшило перенос озона и температуру нижней полярной стратосферы.

Рассматривались различные пути влияния изменения климата на арктическую озоновую дыру. Обсуждались также вопросы влияния на неё парниковых газов, оценка скорости разрушения озона на основе баллонных измерений, температура образования полярных стратосферных облаков в Арктике и Антарктике, распределение озона на границе полярного вихря, наименьшие концентрации озона в антарктической озоновой дыре и его восстановление.

Интересными были и сообщения по общим вопросам атмосферной химии, в частности, следует отметить ещё один доклад **М. Рекса**, в котором обсуждались последствия существенно пониженной концентрации радикалов ОН в тропической тропосфере западной части Тихого океана, увеличивающей возможность проникно-

вения короткоживущих биогенных веществ и  $\text{SO}_2$  в стратосферу.

В ряде сообщений подчёркивалась важность изучения динамических процессов в стратосфере, в частности, зимних внезапных стратосферных потеплений (ВСП), которые в значительной степени определяют интенсивность разрушения озона в полярных регионах. ВСП, возникающие в результате взаимодействия распространяющихся из тропосферы в стратосферу планетарных волн с зональной циркуляцией, могут приводить к замедлению, а в некоторых случаях к изменению направления зонального ветра и увеличению температуры полярной стратосферы на десятки градусов в течение нескольких дней. В результате наиболее сильных (мажорных, или главных) ВСП стратосферный полярный вихрь может значительно ослабнуть или даже разделиться на две части. Значительный рост температуры в ходе ВСП приводит к уменьшению объёма полярных стратосферных облаков, соответственно, снижается разрушение озонового слоя в стратосфере. Например, в результате главного ВСП в январе 2010 г. деструкция озонового слоя в целом за весь зимний сезон была одной из самых минимальных за последние годы.

Как показывают результаты наблюдений, в Арктике главные ВСП происходят примерно 6–7 раз за 10 лет, хотя, например, с 1992 по 1998 г. в силу неизвестных причин главных ВСП не наблюдалось, поэтому разрушение озона в стратосфере Арктики в этот период было сильным. В отличие от Арктики в Антарктике главное ВСП было зафиксировано только один раз за все годы наблюдений – в сентябре 2002 г. Причины межгодовой изменчивости состояния полярной стратосферы, оказывающей сильное влияние на озоновый слой, по-прежнему остаются неизвестными. Также неизвестно, как на ней скажется изменение климата.

Член-корреспондент РАН **Н.Ф. Еланский**, входивший в состав МОК в 1996–2004 гг., участник ряда предыдущих Озонных симпозиумов, считает, что арктическая озоновая дыра весной 2011 г. значительно обострила интерес к исследованиям атмосферного озона в России. Кроме того, по мере своей эволюции озоновая аномалия несколько раз смешалась на территорию Евразийского континента, захватывая огромные пространства России. Даже Москва 4 апреля 2011 г. оказалась в области озоновой депрессии и испытала на себе значительное усиление коротковолнового ультрафиолетового облучения, которое должно было оказать некоторое воздействие на состояние живой природы. Другим важным событием стало обнаружение эффекта ослабления захвата растениями основного парникового газа  $\text{CO}_2$  при повышении концентрации озона в приземном воздухе. Особое значение

это имеет для России, подчеркнул **Н.Ф. Еланский**, где рост концентрации озона по мере активизации промышленного производства, электроэнергетики и транспорта приводит к повышению темпами, а болотные и лесные экосистемы играют роль стока  $\text{CO}_2$  в глобальном балансе углерода. Поэтому предельно важны регулярные наблюдения содержания озона и озonoактивных примесей на территории страны. В последние годы несколько выросло число станций, на которых проводятся измерения концентрации озона в приземном слое атмосферы. Шесть из них работают в условиях, близких к фоновым. Две станции расположены в высокогорье на Кавказе и на юге Сибири и дают информацию о состоянии свободной тропосферы. В Москве, Томске и нескольких других городах действуют станции, контролирующие концентрацию озона в городском воздухе.

Решена проблема калибровки озонных газоанализаторов. Во ВНИИ метрологии им. Д.И. Менделеева создан первичный эталон, а в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН – передвижной стандарт. Состояние стратосферного озонового слоя отслеживается на 28 станциях, оборудованных фильтровыми фотометрами, и на 4 станциях, оснащённых современными спектрофотометрами Брюера, которые, кроме того, ведут измерения спектрального состава коротковолновой УФ-радиации. В сентябре 2012 г. все российские спектрофотометры прошли международную калибровку. Фильтровые фотометры также регулярно калибруются, и, таким образом, показания всех российских станций “привязаны” к мировой озонометрической сети. Тем не менее существующая национальная система мониторинга озона и озonoактивных веществ, определяющих его генерацию в загрязнённом воздухе, сильно отстаёт от аналогичных систем, действующих в странах ЕС, США, Канаде, Японии и Китае, как по плотности сети станций, так и по числу измеряемых параметров. Дефицит информации о составе атмосферы над Россией частично восполняли трансконтинентальные наблюдения, проводившиеся Институтом физики атмосферы РАН с 1995 по 2010 г. с помощью единственной в мире железнодорожной обсерватории (эксперименты TROICA). К сожалению, из-за отсутствия финансирования эти наблюдения приостановлены. Проблемы с финансированием стали причиной нерегулярности наблюдений за состоянием озона с самолёта лаборатории Ан-30, проводимых Институтом оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН в течение многих лет.

Несмотря на недостатки системы мониторинга озона, анализ полученной информации позволил выявить основные характерные особенности поведения озона над территорией России. Оказалось, что концентрация озона в свободной тропо-

сфере (наблюдения на Высокогорной научной станции на Северном Кавказе) не только не росла в последние 20 лет, как это было в Центральной и Западной Европе, но, наоборот, снижалась. Этот факт продемонстрировал региональный характер воздействия загрязнений на генерацию озона в приземном воздухе. Фотохимические процессы в атмосфере над территорией нашей страны менее активны, чем над Северной Америкой и Европой, что говорит о её относительно слабом загрязнении. Более того, выяснилось, что на территории Сибири с её бореальными лесами и болотами преобладает сток озона, который компенсирует в значительной части глобальный рост концентрации этого газа в приземном слое и в тропосфере. В то же время в последние годы наметилась тенденция увеличения концентрации озона в воздухе городов. Рост числа автомобилей, переход на новые вещества, материалы, используемые в быту, строительстве, на транспорте, привели к увеличению окислительных свойств городской атмосферы и усилению генерации озона в летний период. Вследствие тех же причин участились случаи резкого превышения предельно допустимых концентраций озона в летних антициклонических условиях в Москве, как это было в 2010 г.

Продолжая комментировать отечественные исследования озонового слоя, Н.Ф. Еланский отметил, что значимые результаты были получены при изучении влияния атмосферной циркуляции на пространственную и временную изменчивость озона. Это направление исследований является традиционным для российских учёных. В Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова и НПО «Тайфун» Росгидромета детально исследованы механизмы воздействия квазидвухлетних колебаний, Северо-Атлантического колебания и Эль-Ниньо на состояние стратосферного озонового слоя. Новые закономерности выявлены в реакции стратосферного озона на изменение солнечной активности. В частности, показана связь между такими колебаниями и изменением содержания озона в высоких широтах (их величина достигает 10–20%), причём в разных регионах это влияние проявляется по-разному и в разное время года.

Многие сведения об особенностях изменения озонового слоя получены с помощью численного моделирования. Так, химические потери озона на полярных стратосферных облаках в Арктике, по оценке Центральной аэрологической обсерватории, составляют 20–30%, что объясняет наличие прямой связи между температурой стратосферы, полярными стратосферными облаками и образованием озоновой дыры.

Различные сценарии воздействия динамических и фотохимических процессов на озоновый слой начали просчитываться с помощью трёхмер-

ной химико-климатической модели Института вычислительной математики РАН. Исследовалось влияние солнечной активности, грозовой деятельности, различных антропогенных факторов. Значительный прогресс заметен в изучении состава мезосферы и процессов, определяющих состояние мезосферного озона. Большую роль в этом сыграли разработанные в Институте прикладной физики РАН и Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН микроволновые методы и аппаратные средства зондирования верхней атмосферы. Благодаря их применению стало возможным исследовать воздействие крупномасштабной атмосферной циркуляции, солнечной активности, заряженных космических частиц и человеческой деятельности на состояние верхней атмосферы.

В целом исследования атмосферного озона и химического состава атмосферы в России в настоящее время имеют тенденцию к развитию, подытожил Н.Ф. Еланский. В исследованиях занято много молодых специалистов. Ежегодно с 1995 г. для них проводятся школы-конференции, в которых участвуют ведущие учёные из России и европейских стран. Если бы была решена проблема модернизации действующих станций мониторинга газового и аэрозольного состава атмосферы и создания нескольких новых современных станций на территории России, то отечественные учёные могли бы вернуться на передовые позиции в этой очень важной для решения острых экологических проблем области науки.

Доктор географических наук **Н.Е. Чубарова** (географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова), участвовавшая в подготовке разделов об УФ-радиации в Оценочных докладах о состоянии озонового слоя, подготовленных ведущими учёными в рамках Программы по исследованию окружающей среды ООН в 2006 и 2010 гг., в одном из своих последних исследований отметила значительное повышение уровня УФ-радиации весной 2011 г. над Москвой. В Метеорологической обсерватории МГУ с 1999 г. ведётся мониторинг биологически активной УФ-радиации с помощью широкополосных УФ-В-пиранометров. Весна 2011 г. в Москве характеризовалась аномалиями, которые привели к экстремально высоким значениям биологически активной УФ-радиации. Известно, что в январе–марте 2011 г. в Арктике была зафиксирована озоновая дыра – значительное сокращение общего содержания озона внутри циркумполярного вихря, где при относительно низкой температуре стратосферы происходили активные химические реакции, ведущие к сокращению содержания озона на 40%. На высотах 18–20 км сокращение озона доходило до 80%. В конце марта – начале апреля эта область частично “накрыла” и Москву, что вызвало заметное сокращение концентрации озона в воз-

духе. С 28 марта в течение нескольких дней до 5 апреля 2011 г. наблюдался заметный рост УФ-индексов на фоне 25–30%-ного сокращения общего содержания озона. В апреле был отмечен абсолютный максимум поступления биологически активной УФ-радиации (+18%) за весь период наблюдений с 1999 г., что в большой степени связано с пониженным содержанием озона. 31 марта и 29 апреля 2011 г. при 20%-ном уменьшении содержания озона были зарегистрированы и абсолютные месячные максимумы УФ-индексов. В результате в 2011 г. защита от биологически активной УФ-радиации требовалась уже с конца марта. Заметный рост биологически активной УФ-радиации в Москве (+16%) регистрировался и в апреле 2000 г., когда также отмечалось заметное сокращение общего содержания озона в Арктике за счёт аномально низких стратосферных температур. В целом же данные и модельных реконструкций, и измерений биологически активной УФ-радиации свидетельствуют о её заметном росте.

На протяжении последних 15 лет химическое разрушение озонового слоя в течение зимне-весенних сезонов в стратосфере Арктики анализируется в Центральной аэрологической обсерватории Росгидромета под руководством кандидата физико-математических наук **В.А. Юшкова**. Результаты этой работы включаются в ежегодный доклад Росгидромета об особенностях климата на территории России. По словам В.А. Юшкова, для оценок химических потерь используются спутниковые данные и результаты баллонного озонного зондирования на станциях международной Сети для обнаружения изменений состава атмосферы. Впервые за время наблюдений в Арктике зимой 2010/11 г. условия для химического разрушения озона в стратосферном полярном вихре были сопоставимы с антарктическими. Необычайно сильный и стабильный полярный вихрь, более длительный, чем обычно, период низких температур, а также рекордные пространственные размеры области формирования полярных стратосферных облаков создали в стратосфере Арктики условия для значительного увеличения содержания монооксида хлора (ClO) и денитрификации (уменьшение суммарного содержания азотсодержащих примесей), которые влияют на концентрацию ClO. Отметим, что такие условия обычно характерны для стратосферы Антарктики.

Химические потери озона в газофазных и гетерофазных реакциях внутри полярного вихря зимой 2010/11 г. составили, по разным оценкам, 130–150 единиц Добсона (е.Д.), что является рекордной величиной потерь за весь период наблюдений в Арктике (предыдущий рекорд наблюдался зимой 2004/05 г. – 116 е.Д.). Это позволяет говорить об обострении озонной проблемы в регионе. Монреальский протокол сыграл важную роль в ограничении выбросов озоноразрушающих компонентов, но их концентрация в стратосфере пока снижается очень медленно. Поэтому химическое разрушение озона в этих условиях определяется в значительной степени наличием полярных стратосферных облаков, которые формируются при низкой температуре. Это объясняет наличие прямой связи между температурой стратосферы, полярными стратосферными облаками и интенсивностью разрушения озонового слоя.

Необходимо отметить, что внимание к изучению озона в мире связано не только с его восстановлением в стратосфере, где он выполняет важнейшую роль по защите от опасных уровней УФ-радиации, но ещё и с увеличением содержания озона в приземном слое атмосферы, которое может происходить в результате химических реакций с участием, например, углеводородов, окислов азота, попадающих в атмосферу с выбросами промышленности и автотранспорта. Высокая загрязнённость атмосферного воздуха и определённые метеорологические условия, как, например, аномальная жара летом 2010 г. на европейской территории России, могут приводить к существенному повышению уровня тропосферного озона. Интересно, что даже при дефиците общего содержания озона в том или ином регионе в приземном воздухе его концентрация может достигать опасного уровня, способного нанести вред здоровью человека и урожайности некоторых сельскохозяйственных культур. Традиционно на Озонных симпозиумах в рамках отдельной секции обсуждаются проблемы тропосферного озона, не стал исключением и симпозиум, состоявшийся в Торонто.

*П.Н. ВАРГИН,  
кандидат физико-математических наук,  
А.Н. ГРУЗДЕВ,  
доктор физико-математических наук*