

УДК 504.3.054.541.124,541.124.7

## О ВЛИЯНИИ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ НА ОЗОНОВЫЙ СЛОЙ И УФ-В ИЗЛУЧЕНИЕ

© 2021 г. И. К. Ларин\*

*Институт энергетических проблем химической физики им. В.Л. Тальрозе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук, Ленинский просп., 38, корп. 2, Москва, 119334 Россия*

\*E-mail: [iklarin@narod.ru](mailto:iklarin@narod.ru)

Поступила в редакцию 04.05.2020 г.

После доработки 26.05.2020 г.

Принята к публикации 14.10.2020 г.

Представлены данные о влиянии глобального потепления на озоновый слой и интенсивность приземного околополуденного УФ-В излучения в 2100 г. по сравнению с 2000 г. Изменения в озоновом слое рассчитывались на широте  $50^\circ$  с.ш. для января и июня 2100 г. по сравнению с 2000 г. с помощью одномерной фотохимической модели, а также интерактивной двумерной фотохимической модели SOCRATES с использованием данных о концентрациях парниковых газов, приведенных в сценариях Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC) RCP 4.5 и RCP 6.0. Расчеты потоков приземного УФ-В излучения для указанных выше условий проводились с помощью программы, разработанной в Норвежском институте атмосферных исследований в 2005 г. (автор Ola Engelsen).

**Ключевые слова:** глобальное потепление, озоновый слой, температура стратосферы, общее содержание озона, УФ-В излучение

DOI: 10.31857/S0002351521010090

### ВВЕДЕНИЕ

Изменение климата, которое в настоящее время проявляется в том числе в виде глобального потепления, может повлиять на интенсивность приземного биологически активного УФ-В излучения (280–318 нм) через изменение толщины озонового слоя, который эффективно поглощает излучение в указанном диапазоне длин волн. Сам же озоновый слой при изменении климата может изменяться различными путями, из которых в качестве наиболее существенных следует выделить изменение химического состава стратосферы, а также изменение ее температуры и динамики. Происходящие в озоновом слое изменения в свою очередь оказывают влияние на климат – через изменение радиационных потоков, следствием чего является изменение градиентов температуры и, соответственно, динамики стратосферы. Таким образом, изменения климата и озонового слоя оказываются взаимосвязанными, причем часто – нелинейным образом, что осложняет анализ ситуации [1].

Из общей сложной картины взаимодействия климата и озонового слоя можно выделить достаточно узкую проблему воздействия на озоновый слой (а через него – и на уровень приземного УФ-

В излучения) глобального потепления, под которым мы далее будем понимать ожидаемое в конце XXI в. изменение температуры стратосферы на высотах 15–50 км. Таким образом, задачей настоящей работы является оценка изменения уровня приземного УФ-В излучения в январе и июне 2100 г. по сравнению с 2000 г. на широте  $50^\circ$  с.ш. под действием глобального потепления в указанном выше смысле.

Оценка изменения уровня приземного УФ-В излучения под действием глобального потепления в 2100 г. по сравнению с 2000 г.

Поставленная задача решалась в два этапа: сначала было рассчитано изменение толщины озонового слоя в единицах Добсона в 2100 г. по сравнению с 2000 г. для указанных выше условий, а затем с помощью специальной программы – изменение уровня приземного полуденного УФ-В излучения для тех же условий.

### 1. РАСЧЕТ ВЛИЯНИЯ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ НА ОЗОНОВЫЙ СЛОЙ

Расчет влияния глобального потепления на озоновый слой проводился с помощью одномерной фотохимической модели, разработанной в

Институте энергетических проблем химической физики им. В.Л. Гальперина РАН [2], и сценариев эмиссии парниковых газов Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC) RCP 4.5 и RCP 6.0 [3] для условий января и июня 2000 и 2100 гг. Целью расчетов было установление толщины озонового слоя в единицах Добсона (высоты 15–50 км) для указанных выше условий.

В этих расчетах использовались данные о температуре и коэффициенте турбулентной диффузии, полученные с помощью двумерной интерактивной фотохимической модели SOCRATES [4].

Использовавшаяся одномерная фотохимическая модель позволяла находить решения системы одномерных дифференциальных уравнений диффузии с нелинейной правой частью, а также рассчитывать поля солнечной радиации и вычислять коэффициенты фотодиссоциации газовых составляющих атмосферы по их сечениям поглощения УФ-В излучения и величинам квантовых выходов продуктов. Общее число рассчитываемых в модели компонент атмосферы может достигать нескольких десятков. Для части этих компонент задавались постоянные профили концентрации, остальные профили рассчитывались. Поскольку рассчитываемые компоненты имели широкий разброс времен жизни, то для сокращения времени счета использовался метод семейств, описанный в [5]. В связи с тем, что правые части уравнений системы существенно нелинейные, решение находили методом итераций. Поля солнечной радиации вычислялись в приближении прямого поглощения. Учитывалось поглощение  $O_2$ ,  $O_3$  и рэлеевское рассеяние. Поглощение и диссоциация  $O_2$  в полосах Шумана–Рунге рассчитывалось с помощью параметризации, представленной в [6]. Привязка к сезонным условиям счета проводилась с помощью параметризации [7], учитывающей зависимость среднедневного зенитного угла от широты места и сезона. Модель позволяла рассчитывать временные и высотные профили 39 атмосферных компонент, включая  $O_3$ ,  $O(^3P)$ ,  $O(^1D)$ ,  $H$ ,  $OH$ ,  $HO_2$ ,  $H_2O_2$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $NO_3$ ,  $N_2O_5$ ,  $HNO_2$ ,  $HNO_3$ ,  $HNO_4$ ,  $CH_4$ ,  $CH_3$ ,  $CH_3O_2$ ,  $CH_2O$ ,  $CO$ . Химический блок модели включал более ста химических реакций, а фотохимический (сечения поглощения света и квантовые выходы) — более шестидесяти реакций. Модель допускает практически любое расширение обоих блоков при выполнении конкретных задач. Химические и фотохимические данные заимствованы из [8].

Задача изменения толщины озонового слоя под действием глобального потепления в диапазоне высот 15–50 км на широте  $50^\circ$  с.ш. в июне и январе 2100 г. по сравнению с 2000 г. решалась следующим образом. Сначала с помощью одно-

мерной модели были рассчитаны толщины озонового слоя в единицах Добсона по сценариям IPCC RCP 4.5 и RCP 6.0 для условий 2000 г. Различие сценариев RCP 4.5 и RCP 6.0 заключается в том, что в сценарии RCP 6.0 концентрации парниковых газов в 2100 г. принимаются более высокими, чем в сценарии RCP 4.5, который считается более умеренным. Для 2000 г. сценарии RCP 4.5 и RCP 6.0 совпадают, поэтому совпадали и результаты. Затем для тех же условий и сценариев с помощью модели SOCRATES были получены данные о высотном профиле температуры в 2100 г. Далее эти данные были использованы для аналогичных расчетов, что и ранее, в которых использовались данные о концентрациях активных частиц для 2000 г., а данные о температуре — для 2100 г. Это позволило исключить влияние на озон изменений в концентрациях компонент, происходящих в течение XXI в., и учесть только влияние изменений в температуре, т.е. влияние глобального потепления в чистом виде.

Расчеты толщины озонового слоя на высотах 15–50 км для условий 2100 г. проводились с учетом нового (по сравнению с 2000 г.) высотного распределения температуры, которое возникло благодаря изменению атмосферного содержания парниковых газов в 2100 г. в соответствии со сценариями IPCC RCP 4.5 и RCP 6.0. Высотные профили температуры для условий июня и января 2000 и 2100 гг. по сценариям RCP 4.5 и RCP 6.0, которые учитывались в расчетах, показаны на рис. 1. Можно видеть, что помимо естественных сезонных изменений, происходят изменения, связанные со сценариями: при переходе от сценария RCP 4.5 к сценарию RCP 6.0 похолодание стратосферы увеличивается, что объясняется разницей в прогнозах атмосферного содержания парниковых газов в этих сценариях. Подчеркнем еще раз, что в расчетах для 2100 г. изменялась только температура стратосферы (высоты 15–50 км), а концентрации активных компонент, участвующих в каталитических циклах разрушения озона, оставались теми же, что и в 2000 г.

Следует также сказать, что в расчетах для 2100 г. на высотах тропосферы (0–15 км) профиль температуры оставался неизменным (т.е. таким же, как в 2000 г.), что должно было оставить неизменным и содержание озона в тропосфере. Таким образом, в расчетах учитывалось только изменение температуры стратосферы, происходящее под действием глобального потепления. Результаты расчета общего содержания озона в единицах Добсона в диапазоне высот от 0 до 50 км для указанных выше условий показаны на рис. 2.

Можно видеть, что переход от условий 2000 г. к условиям 2100 г. приводит к росту общего содержания озона как в январе, так и в июне, что

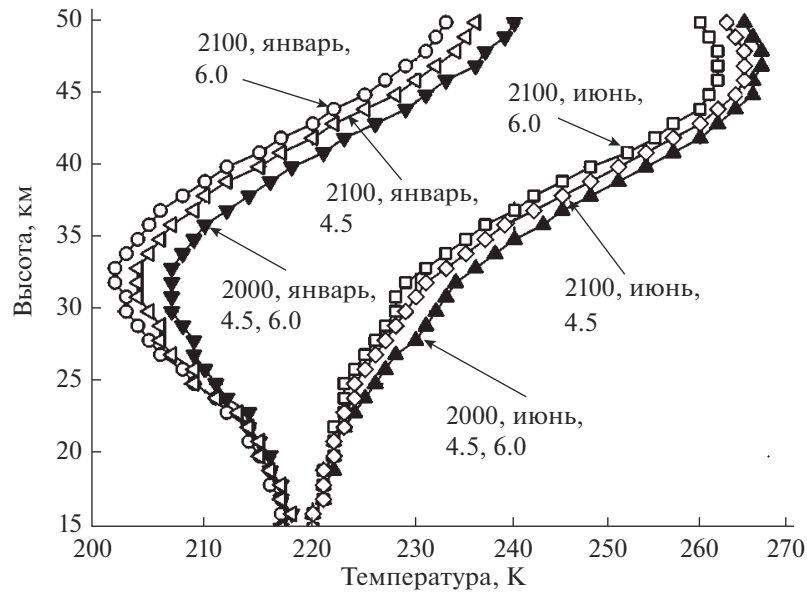


Рис. 1. Высотные профили температуры в стратосфере для июня и января 2000 и 2100 гг. по сценариям IPCC RCP 4.5 и RCP 6.0 на широте  $50^\circ$  с.ш.

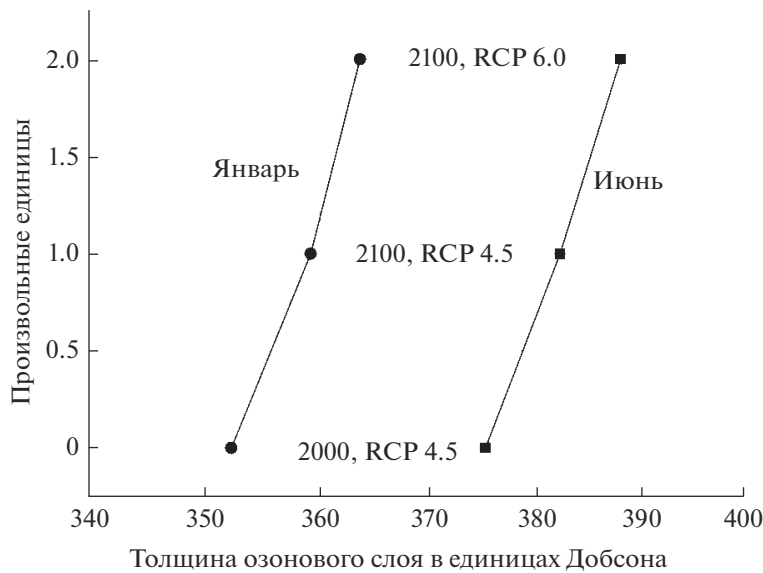


Рис. 2. Изменение общего содержания озона в диапазоне высот 0–50 км в единицах Добсона с учетом изменений стратосферного озона (высоты 15–50 км) для разных сценариев и сезонов.

объясняется похолоданием стратосферы и соответствующим уменьшением скорости разрушения озона в каталитических циклах, что автоматически ведет к росту озона. Рост общего содержания озона по сценарию RCP 6.0 по сравнению со сценарием RCP 4.5 объясняется различием температурных профилей для этих сценариев (см. рис. 1).

В заключение этой части заметим, что помимо температуры и химически активных компонент, содержание озона в тропосфере может изменять-

ся в результате стратосферно-тропосферного обмена. Однако, как показывают оценки, для крайних случаев различия в общем содержании озона в тропосфере, связанные с этим фактором, не превышают 3%, поэтому в дальнейших расчетах они не принимались во внимание, т.е. считалось, что во всех случаях общее содержание озона в тропосфере остается таким же, как в 2000 г. по сценарию RCP 4.5 и RCP 6.0.

Переходим теперь к решению основной задачи работы.

## 2. РАСЧЕТ ВЛИЯНИЯ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ НА УФ-В ИЗЛУЧЕНИЕ

УФ-В излучение (280–318 нм) играет важную роль в жизни окружающей среды и человека. Границы области определяются зависимостью сечения поглощения света озоном от длины волны: при  $\lambda < 280$  нм сечение становится столь большим, что озон практически перестает пропускать солнечное излучение, а при  $\lambda > 318$  нм озон практически перестает влиять на него. Т.о., УФ-В излучение занимает такой интервал длин волн, в котором озон оказывает максимальное воздействие на уровень приземного ультрафиолетового солнечного излучения. Роль УФ-В излучения в жизни человека и окружающей среды объясняется тем, что сечение поглощения света озоном в диапазоне длин волн 240–320 нм (включающего диапазон УФ-В излучения) практически полностью совпадает с сечением поглощения света молекулами ДНК живых систем. В результате при любом изменении общего содержания озона (т.е. его отклонении от некоторого среднего значения, при котором на протяжении последних четырехсот миллионов лет озон обеспечивал защиту ДНК от ультрафиолетового излучения солнца [9]) происходит изменение интенсивности УФ-В излучения, которое воздействует непосредственно на ДНК живых систем, вызывая соответствующие негативные эффекты. При истощении озонового слоя и росте УФ-В излучения – эритему и рак кожи, а при росте озона и уменьшении УФ-В излучения – недостаток витамина D и ослабление иммунитета.

Расчеты влияния глобального потепления на УФ-В излучение проводились с помощью программы [10], предназначенной для моделирования нисходящего УФ-доз, УФ-индексов и потоков коротковолнового излучения вблизи поверхности Земли. Программа позволяет анализировать 21 вид биологически активной ультрафиолетовой радиации, включая эритему, образование витамина D, рак кожи и другие факторы. В программе используются следующие входные параметры: месяц, день, мировое время (или зенитный угол Солнца), широта и долгота места, различные показатели облачности (включая безоблачное небо, параметр Ангстрема, количество воды в столбе в единицах  $\text{г м}^{-2}$  и др.), общее содержание озона в единицах Добсона, альbedo поверхности (в виде числа в диапазоне 0–1), либо тип поверхности (трава, песок и т.д.), высота места (в диапазоне 0–6 км). При задании этих параметров программа позволяет вычислять интенсивность УФ излучения на любой длине волны в диапазоне 290–400 нм в единицах  $\text{мВатт м}^{-2} \text{нм}^{-1}$ , а также УФ индекс. УФ индекс является показателем опасности солнечного УФ излучения для здоровья человека. При его значении равном 1.2 защита от солнца не тре-

**Таблица 1.** Относительное изменение интенсивности околополуденного приземного УФ-В излучения в январе и июне 2100 г. по сравнению с 2000 г. для сценариев RCP 4.5 и RCP 6.0.

	Январь	Июнь
2100, RCP 4.5	–3.49%	–1.88%
2100, RCP 6.0	–5.66%	–3.40%

буется, при 3–7 защита требуется (тень, одежда, защитные кремы, пребывание на солнце не более 20–40 мин, в зависимости от индекса), при 8–10 требуется повышенная защита (тень, одежда, более сильные защитные кремы, пребывание на солнце не более 10 мин). Помимо этого программа позволяет вычислять так называемые спектры действия для различных типов биологически активно ультрафиолетового излучения, включая эритему (загар), рак кожи, повреждение ДНК, образование витамина D и др. Специальный вариант программы позволяет рассчитывать время пребывания на солнце, необходимое для образования в коже человека достаточного количества витамина D. В этом случае, наряду с указанными выше параметрами, учитывается тип кожи и степень открытости тела человека солнечным лучам.

Наши расчеты проводились с помощью основной программы [10] для условий околополуденных часов 20 июня и 21 января, безоблачного неба, на широте  $50^\circ$  с.ш., при альbedo, соответствующего альbedo травы летом и снега зимой, на высоте 0 км. В качестве толщины озонового слоя использовались соответствующие данные, приведенные на рис. 2. Результаты расчетов показаны в табл. 1

Можно видеть, что во всех случаях интенсивность УФ-В излучения в 2100 г. будет меньше, чем в 2000 г., что объясняется ростом общего содержания озона в стратосфере под действием глобального потепления. Еще раз подчеркнем, что рассчитанный эффект глобального потепления связан только с изменением температуры стратосферы. И хотя в расчетах изменения УФ-В излучения использовалась толщина озона в диапазоне высот 0–50, однако содержание озона в тропосфере при этом не изменялось (с учетом оговорки, сделанной выше).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты удовлетворительно согласуются с литературными данными.

В работе [11] говорится, что благодаря успешному выполнению требований Монреальского протокола, увеличение УФ-В излучения в конце XX в. вне Антарктической озоновой дыры было незначительным, что объясняется высокой вариативностью других (помимо озона) факторов,

воздействующих на это излучение, таких, как облачность и аэрозоли. Без Монреальского протокола пиковые значения солнечной ультрафиолетовой радиации могли бы быть утроены к 2065 г. в средних северных широтах, что имело бы серьезные последствия для окружающей среды и здоровья человека. Помимо Монреальского протокола на озон оказывают существенное влияние выброс парниковых газов, приводящий к снижению температуры стратосферы и ускорению процессов циркуляции. Эти изменения, как правило, приводят к уменьшению общего содержания озона в тропиках и его увеличению в средних и высоких широтах. Прогнозируемые изменения озона и облачности могут привести к значительному уменьшению УФ-В радиации в высоких широтах (где его и так мало) и к незначительному увеличению в низких широтах (где он и так высок), что будет иметь негативные последствия для здоровья человека и окружающей среды. По сравнению с 1980 г., уровень УФ-В излучения к концу XXI в., по прогнозам, будет ниже в средних и высоких широтах на 5 и 20% соответственно и выше на 2–3% в низких широтах. Однако к этим прогнозам следует относиться с осторожностью, поскольку они также сильно зависят от изменений в облачном покрове, от степени загрязнения воздуха и уровня аэрозолей, контролирующего изменение климата.

Хотя полученные нами данные относительно изменений уровня УФ-В излучения в конце XXI в. попадают в диапазон прогнозов, сделанных в [11], однако такое сравнение затрудняется из-за отсутствия в [11] сведений о входных параметрах (сценарий, по которому рассчитывался озон, месяц года). Следует также иметь в виду, что наши данные учитывали только изменения озона в стратосфере, а данные [11] включали изменения озона и в тропосфере, где его содержание, как показывают собственные оценки, выполненные с помощью модели SOCRATES, росло в течение XXI в.

В другой работе [12] анализируется вопрос об изменении эритемного излучения в период с 1960 по 2100 гг. Анализ проводился с использованием 14 транспортно-химических климатических моделей, с помощью которых анализировались вопросы переноса излучения, изменения озона, температуры и облачности. Укажем здесь, что воздействие эритемного излучения на здоровье человека проявляется в покраснении кожи незагорелого человека, которое затем может приводить к возникновению загара, а в тяжелых случаях сопровождается образованием волдырей, солнечных ожогов и впоследствии может привести к различным кожным заболеваниям, в том числе к раку кожи.

Полученные в [12] оценки дают общую картину возможного изменения интенсивности эритемы излучения ( $УФ_{эр}$ ) в XXI в. Из этих оценок сле-

дует, что по сравнению с 1980 г., средние значения  $УФ_{эр}$  в 2090-х гг. будут в среднем на 12% ниже в высоких широтах в обоих полушариях, на 3% ниже в средних широтах и незначительно выше (~1%) в тропиках. Наибольшее изменение (16%) в  $УФ_{эр}$  прогнозируется для Антарктиды в октябре. Облака ответственны за 2–3% уменьшения  $УФ_{эр}$  излучения в высоких широтах и примерно за 1% в средних широтах.

В связи с приведенными данными укажем, что если УФ-В излучение занимает диапазон 280–318 нм, то  $УФ_{эр}$  излучение лежит в диапазоне 290–400 нм, т.е. включает значительный участок спектра (318–400 нм), в котором озон не должен оказывать никакого действия на любое приземное УФ излучение, в том числе и на  $УФ_{эр}$  излучение. Это подтверждается собственными оценками, из которых следует, что изменение  $УФ_{эр}$  при переходе от 2000 к 2100 г. в диапазоне 318–400 нм изменяется на ~0.1%, а в диапазоне 290–318 нм — на ~3%. Тем не менее можно утверждать, что приведенные в [12] оценки не противоречат нашим данным.

Хотя в большинстве случаев прогнозируется уменьшение поверхностной УФ радиации и ее производных в 2100 г. по сравнению с современным уровнем, однако в некоторых работах высказывается иная точка зрения. Так, в [13] сообщается о результатах комплексного моделирования поверхностной УФ радиации с помощью новой модели MIROC-ESM-CHEM, которая учитывает ключевые процессы, воздействующие на поверхностное УФ излучение, включая динамику и химию атмосферы, определяющих содержание озона в стратосфере и тропосфере, аэрозоли и облака в тропосфере, а также изменения альbedo поверхности с морским льдом и снежным покровом. В отличие от предшествующих оценок, рассматривающих только эффект долгосрочного изменения стратосферного озона, моделирующие долгосрочное поведение УФ излучения, в [13] учитывается вклад других факторов, воздействующих на УФ излучение. Согласно одному из двух прогнозов, в XXI в., несмотря на ожидаемое восстановление озонового слоя, уровень ультрафиолетового излучения в северных средних широтах должен возрасти, что можно объяснить сокращением уровня аэрозолей и облачности, в результате чего будет скомпенсирован эффект восстановления озонового слоя.

Приведенный пример показывает, насколько сложной является проблема прогнозирования процессов, течение которых зависит от многих факторов, зачастую имеющих разнонаправленный характер. Напомним в связи с этим, что в настоящей работе действует один единственный фактор — температура стратосферы, которая известным образом изменяет содержание озона в стратосфере,

что, в свою очередь, известным образом изменяет уровень приземного УФ-В излучения.

### ВЫВОДЫ

1. Рассчитано влияние глобального потепления на озоновый слой для условий января и июня 2000 и 2100 гг. на широте 50° с.ш. по сценариям IPCC RCP 4.5 и RCP 6.0.

2. Полученные данные об озоне в стратосфере использованы для расчетов уровня приземного околополуденного УФ-В излучения для указанных выше условий при ясном небе.

3. Показано, что при переходе от 2000 к 2100 г. поверхностный уровень УФ-В излучения изменяется следующим образом: в январе падает на 3.49% (RCP 4.5) и на 5.66% (RCP 6.0); в июне падает на 1.88% (RCP 4.5) и на 3.40% (RCP 6.0).

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ 19-05-00080, а также Госзаданий ИНЭП ХФ РАН им. В.Л.Тальрозе АААА-0047-2018-0012.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006. World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project-Report № 50.

2. Угаров А.А. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: Институт энергетических проблем химической физики РАН, 2003.
3. <http://tntcat.iiasa.ac.at:8787/RcpDb/dsd?Action=html-page&page=welcme>
4. <http://acd.ucar.edu/models/SOCRATES/>
5. Brasseur G., Solomon S. Aeronomy of the Middle Atmosphere: Chemistry and Physics of the Stratosphere and Mesosphere. Third revised and enlarged edition. Montreal, Canada: Springer, 2005. P. 644.
6. Nicolet M. Etude des reactions chimiques de l'ozone dans la stratosphere. Institut Royal Meteorologique de Belgique, 1978. P. 536.
7. Gerstl S.A.W., Zardecki A., Wiser H.L. Biologically damaging radiation amplified by ozone depletions // Nature. 1981. V. 294. № 5839. P. 352–354.
8. <https://jpldataeval.jpl.nasa.gov/index.html>
9. Wayne R.P. Chemistry of Atmospheres. 2nd ed. UK, Oxford: Clarendon Press, 1991. P. 806.
10. <http://zardozi.nilu.no/~olaeng/fastrt/fastrt.html>
11. McKenzie R.L., Aucamp P.J., Bais A.F., Björn L.O., Ilyas M., Madronich S., Ozone depletion and climate change: effects on UV radiatio // Photochem Photobiol Sci. 2011 V.10. № 2. P. 182–198.
12. Bais A.F., Tourpali K., Kazantzidis A. et al. Projections of UV radiation changes in the 21st century: impact of ozone recovery and cloud effects // Atmos. Chem. Phys. 2011. V. 11. P. 7533–7545.
13. Watanabe S., Sudo K., Nagashima T., Takemura T., Kawase H., Nozawa T., Future projections of surface UV-B in a changing climate // JGR. 2011. V. 116. Iss. D16118. P. 1–11.

## On the Influence of Global Warming on the Ozone Layer and UV-B Radiation

I. K. Larin\*

*Talrose Institute of Energy Problems of Chemical Physics of the Semenov Federal State Budgetary Institution of Science of Chemical Physics Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

\*e-mail: [iklarin@narod.ru](mailto:iklarin@narod.ru)

The data on the effect of global warming on the ozone layer and the intensity of near-surface near noon UV-B radiation in 2100 compared to the year 2000 are presented. Changes in the ozone layer were calculated at a latitude of 50° N for January and June of 2100 compared to 2000 using the one-dimensional photochemical model, as well as the SOCRATES interactive two-dimensional photochemical model using greenhouse gas concentrations given in the scenarios of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) RCP 4.5 and PCP 6.0. The calculation of surface UV-B radiation fluxes for the above conditions was carried out using a program developed at the Norwegian Institute for Atmospheric Research in 2005 (author Ola Engelsen).

**Keywords:** global warming, stratosphere temperature, total ozone content, UV-B radiation