

18. Маклочлан К. А. Магнитный резонанс. М., 1976.
19. Нагаев Э. Л. Магнитные автолокализованные состояния носителей тока в аморфных кремнии и германии // ФТТ. 1991. Т. 33. № 10. С. 3097–3099.
20. Давыдов С. Ю., Тихонов С. К. О магнитной восприимчивости широкозонных полупроводников // ФТП. 1996. Т. 30. № 4. С. 695–698.
21. Поклонский Н. А., Лапчук Т. М., Горбачук Н. И. Измерение методом ЭСР размагничивающего поля на поверхности металлических образцов // ЖПС. 2001. Т. 68. № 4. С. 419–422.
22. Поклонская О. Н. Электронный спиновый резонанс поликристаллической алмазной пленки, облученной нейтронами // Актуальные проблемы физики твердого тела (ФТТ-2011): сб. докл. Междунар. науч. конф. (Минск, 18–21 окт. 2011 г.). Минск, 2011. Т. 2. С. 306–308.
23. Поклонская О. Н., Лапчук Н. М. Парамагнитные дефекты в имплантированных ионами ксенона и пассивированных в плазме водорода кристаллах природного алмаза // Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 7-й Междунар. конф. (Минск, 26–28 сент. 2007 г.). Минск, 2007. С. 216–218.
24. Андриевский Р. А. Водород в наноструктурах // УФН. 2007. Т. 177. № 7. С. 721–735.
25. Кинцель В. Спиновые стекла как модельные системы для нейронных сетей // УФН. 1987. Т. 152. № 1. С. 123–131.
26. Семенцов Д. И., Шутьей А. М. Нелинейная регулярная и стохастическая динамика намагниченности в тонкопленочных структурах // УФН. 2007. Т. 177. № 8. С. 831–857.
27. Андриевский Р. А. Металлические нано- и микростекла: новые подходы в наноструктурном материаловедении // УФН. 2013. Т. 183. № 3. С. 277–285.
28. Бучаченко А. Л. Магнитопластичность диамагнитных кристаллов в микроволновых полях // ЖЭТФ. 2007. Т. 132. № 3(9). С. 673–679.
29. Поклонский Н. А., Потоцкий И. В., Горбачук Н. И. Увеличение парамагнетизма композитов $(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7/\text{SiO}_2$ во время регистрации спектров ЭПР // Аморфные и микрокристаллические полупроводники: сб. тр. IV Междунар. конф. (Санкт-Петербург, 5–7 июля 2004 г.). СПб., 2004. С. 151–152.
30. Тихомирова Н. Н., Воеводский В. В. Метод анализа формы линий электронного парамагнитного резонанса // Оптика и спектроскопия. 1959. Т. 7. № 6. С. 829–832.
31. Поклонская О. Н., Лапчук Н. М., Поклонский Н. А., Вырко С. А. Имплантированный ионами ксенона кристалл природного алмаза: состояние спинового стекла // Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 8-й Междунар. конф. (Минск, 23–25 сент. 2009 г.). Минск, 2009. С. 117–119.
32. Поклонский Н. А., Горбачук Н. И., Ксеневиц В. К., Поклонская О. Н., Карькин А. Е., Ральченко В. Г., Власов И. И., Хомич А. А. Импеданс поликристаллических CVD-алмазных пленок, облученных нейтронами // Аморфные и микрокристаллические полупроводники: сб. тр. VII Междунар. конф. (Санкт-Петербург, 28 июня – 1 июля 2010 г.). СПб., 2010. С. 157–158.
33. Shimakawa K., Miyake K. Hopping transport of localized π -electrons in amorphous carbon films // Phys. Rev. B. 1989. Vol. 39. № 11. P. 7578–7584.
34. Пейк Дж. Парамагнитный резонанс. М., 1965. Гл. 2, § 5.
35. Лебедев Я. С., Муромцев В. И. ЭПР и релаксация стабилизированных радикалов. М., 1972. Гл. 4, §§ 4.1–4.3.
36. Giordano M., Martinelli M., Pardi L., Santucci S. Observations of bistability effects in electron paramagnetic resonance experiments // Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 59. № 3. P. 327–330.
37. Адашкевич С. В., Акунец В. В., Киранов В. С., Стельмах В. Ф. Особенности формы линии электронного парамагнитного резонанса фуллереноподобных систем // Фуллерены и фуллереноподобные структуры: сб. науч. тр. Минск, 2005. С. 292–299.

Поступила в редакцию 06.05.13.

Ольга Николаевна Поклонская – аспирант кафедры физики полупроводников и наноэлектроники. Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Н. М. Лапчук.

УДК 53.083

В. Ю. СТАНКЕВИЧ, А. Г. СВЕТАШЕВ

ВЛИЯНИЕ ОСЛАБЛЯЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА В АТМОСФЕРЕ

Для увеличения точности непрерывных измерений общего содержания озона (ОСО) предложен оптимизационный метод восстановления значений этого показателя по спектрам энергетической освещенности земной поверхности, позволяющий, в отличие от традиционных таблиц Стамнеса, учитывать мгновенные значения различных параметров атмосферы, характеризующие ослабление солнечного излучения, проходящего через атмосферу Земли. Было показано, что полученные с помощью данного метода результаты обладают устойчивостью в течение дня и хорошо согласуются со спутниковыми данными. Новые исследования связаны с учетом влияния на восстановленные значения ОСО ослабления солнечного излучения облачностью. Для повышения точности результатов предлагается коррекция входных данных в соответствии с опорным каналом спектро-радиометра, находящимся в отличном от полосы активного поглощения озона спектральном диапазоне. Показано, что такая коррективка позволяет увеличить точность получаемых значений ОСО на 0,5–3,0 % для каждого измерения, проведенного в выбранные дни.

Ключевые слова: атмосфера; озон; метод Стамнеса; УФ-излучение; измерения общего содержания озона; ослабление излучения.

To increase the accuracy of continuous measurements of the total ozone column (TOC), an optimization method has been proposed. The method employs the spectral irradiance data collected at the Earth's surface. This enables to account for actual values of different

parameters of the atmosphere characterizing attenuation of the solar radiation, what is impossible in the case of Stamnes tables. The data retrieved with the procedure have proved to be time-stable during the day and are in a good agreement with the satellite data. In the study, the resulting TOC values have been obtained assuming the effect of the solar radiation attenuation due to the clouds. To improve the accuracy of TOC values, one should define the initial spectra utilizing the reference channel of a spectral radiometer being assigned to the range different from the range of active ozone absorption. It is shown that such a correction may increase the accuracy of the resulting TOC values up to 0,5–3,0 % for each measurement session in the selected days.

Key words: atmosphere; ozone; Stamnes method; UV-radiation; total ozone column retrieval; radiation attenuation.

Озон является исключительно важным для земной атмосферы газом, что обусловлено его физическими свойствами [1]. Измерение общего содержания озона (ОСО) позволяет определить ультрафиолетовый индекс, характеризующий уровень солнечной радиации у поверхности Земли, и по его значениям вероятность повреждения кожи при нахождении людей на открытом солнце. Помимо этого, определение значений ОСО необходимо для создания моделей атмосферы, позволяющих строить долговременные климатические прогнозы [2].

Среди методов измерения ОСО наиболее дешевы и удобны наземные оптические методы, однако применение широко разработанных и наиболее точных из них – методов измерения по прямому Солнцу – в условиях Беларуси затруднительно из-за малого числа безоблачных дней в году. Поэтому перспективными являются разработка и внедрение методов, позволяющих проводить измерения ОСО в облачные дни [3].

Один из подобных методов – метод Стамнеса – позволяет восстанавливать значения ОСО из измерений спектральной плотности энергетической освещенности (СПЭО) земной поверхности солнечным ультрафиолетовым излучением. «Классический» метод Стамнеса предполагает расчет номограмм, моделирующих зависимость отношений освещенности на рабочих парах длин волн от значений ОСО и солнечного зенитного угла SZA , обычно объединенных в специальные таблицы (таблицы Стамнеса). Затем из предварительно рассчитанной таблицы Стамнеса по измеренным отношению освещенностей и солнечному зенитному углу SZA определяется значение ОСО [4]. Для расчета переноса солнечного излучения в атмосфере используется пакет прикладных программ, объединенных в библиотеку LibRadTran [5].

Как показывают предварительные оценки, в «классическом» варианте метод Стамнеса позволяет получить значения ОСО с точностью порядка 5 % при благоприятных метеорологических условиях [6]. Данную точность можно считать вполне удовлетворительной для целого ряда прикладных и научных задач. Однако при ухудшении условий наблюдения точность метода может значительно снижаться [7].

Исследования показали, что из различных атмосферных параметров только действительная часть аэрозольного показателя преломления в достаточно широком интервале значений (0–10 с шагом 0,1) не влияет на результирующие значения ОСО, что связано, по всей видимости, с особенностями аэрозольной модели LibRadTran. При изменении оптической толщины атмосферного аэрозоля от 0 до 10 единиц получается разбежка результатов в пределах 15–90 ЕД (единиц Добсона) в зависимости от выбранной пары длин волн. Это примерно соответствует 5–30 %. Для типичных оптических толщин аэрозоля (для Минска составляющих величину порядка 0,3–0,4) погрешность определения ОСО составляет 2–10 ЕД [7].

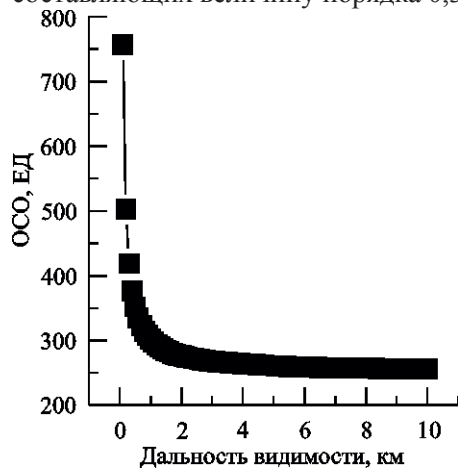


Рис. 1. Зависимость восстановленных значений ОСО от дальности видимости (первоначальное модельное значение ОСО – 250 ЕД)

Влияние дальности видимости на получаемые значения ОСО при плохих погодных условиях может быть очень значительным. Так, при низкой дальности видимости такие значения могут быть ниже действительных в несколько раз (рис. 1). При дальности видимости от 1 до 2 км погрешность, связанная с данным параметром, составляет 40–50 ЕД, от 2 до 5 км – 20–30 ЕД, более 5 км – 2–10 ЕД. Таким образом, при дальности видимости менее 5 км проводить измерения ОСО по СПЭО земной поверхности солнечным УФ-излучением бессмысленно [7].

Альbedo однократного аэрозольного рассеяния может варьироваться от 0 до 1, при этом восстановленные значения ОСО различались на 0,5–1,0 ЕД. При варьировании аэрозольного фактора асимметрии от –1 до 1 получаемая разбежка в значениях ОСО находится в пределах 2–4 ЕД. При варьировании альbedo подстилающей поверхности от 0 до 1 различие в восстановленных значениях ОСО для разных пар длин волн составило 6–12 ЕД. Изменение оптической толщины облачности в диапазоне 0–10 приводит к разбежке в полученных значениях ОСО в 4–10 ЕД [7].

Таким образом, суммарная погрешность без учета погодных и метеорологических параметров, характеризующих ослабление солнечного УФ-излучения в земной атмосфере, при дальности видимости более 5 км и характерных для Минска атмосферных аэрозолях может составлять до 40–47 ЕД. При типичных для Беларуси значениях ОСО 300–400 ЕД относительная погрешность метода, таким образом, составляет 11–13 %, что слишком много для прецизионных измерений.

Следует признать, что «классический» метод Станнеса мало приспособлен для учета значений атмосферных параметров, поскольку таблицы рассчитываются априорно и строятся на основании усредненных значений, а это – источник погрешности [3]. Таким образом, целесообразным является разработка метода, который позволит восстанавливать значения ОСО по СПЭО земной поверхности солнечным УФ-излучением. Это возможно, если вместо таблиц применить оптимизационные методы расчета.

Как показано выше, наибольший вклад в погрешность получаемых значений ОСО при дальности видимости более 5 км вносят аэрозольные составляющие земной атмосферы. Их удобно параметризовать с помощью формулы Ангстрема. Значения ангстремовских параметров предлагается брать из данных роботизированной сети контроля аэрозолей (AeroNET). В августе 2002 года в Минске на базе Института физики НАН Беларуси введена в действие станция AeroNET, которая в автоматическом режиме проводит измерения аэрозольной оптической толщины атмосферы (АОТ) на нескольких длинах волн в диапазоне 380–1020 нм. К сожалению, станция AeroNET не оснащена коротковолновым датчиком для определения АОТ в диапазоне 300–320 нм, который представляет наибольший интерес при расчете значений ОСО. Данную проблему можно решить с помощью построения регрессионной спектральной зависимости аэрозольной толщины над Минском, измеренной станцией AeroNET.

Оптимизационный метод нахождения значений ОСО по СПЭО земной поверхности солнечным УФ-излучением основан на нахождении минимума функции следующего вида:

$$F(X, \alpha, \beta) = \sum_{X, \alpha, \beta} (R_{\text{расч}}(\lambda_1, \lambda_2, X, \alpha, \beta) - R_{\text{набл}}(\lambda_1, \lambda_2, X, \alpha, \beta))^2,$$

где X – искомое ОСО; α и β – коэффициенты в формуле Ангстрема, характеризующие атмосферные аэрозоли; $R_{\text{расч}}$ – рассчитанное с помощью модели атмосферы отношение СПЭО для длин волн λ_1 и λ_2 ; $R_{\text{набл}}$ – полученное в результате наблюдений отношение СПЭО для тех же длин волн.

Минимум функции находится в точке, соответствующей реальным значениям ОСО и ангстремовских параметров атмосферного аэрозоля, для его нахождения используется оптимизационный алгоритм Хука – Дживса [8]. Расчетные значения СПЭО получаются с помощью моделей атмосферы, реализованных в библиотеке LibRadTran.

Оптимизационный метод наиболее точен при применении для двух пар длин волн (рис. 2 и 3), в целом же средние значения ОСО, получаемые с помощью этого метода, в ясные дни отклоняются от спутниковых данных не более чем на 14 % для одной и 8 % для двух пар длин волн.

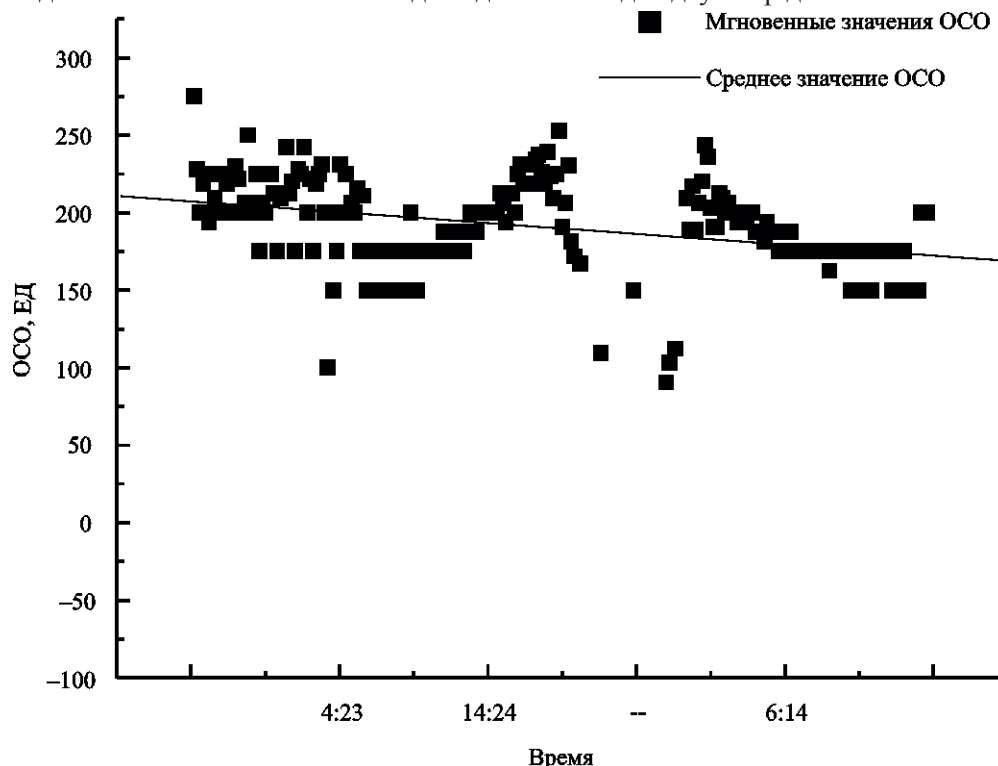


Рис. 2. Значения ОСО, рассчитанные оптимизационным методом, по данным измерений 04.06.2010 для пары длин волн 305,5 нм и 323,5 нм

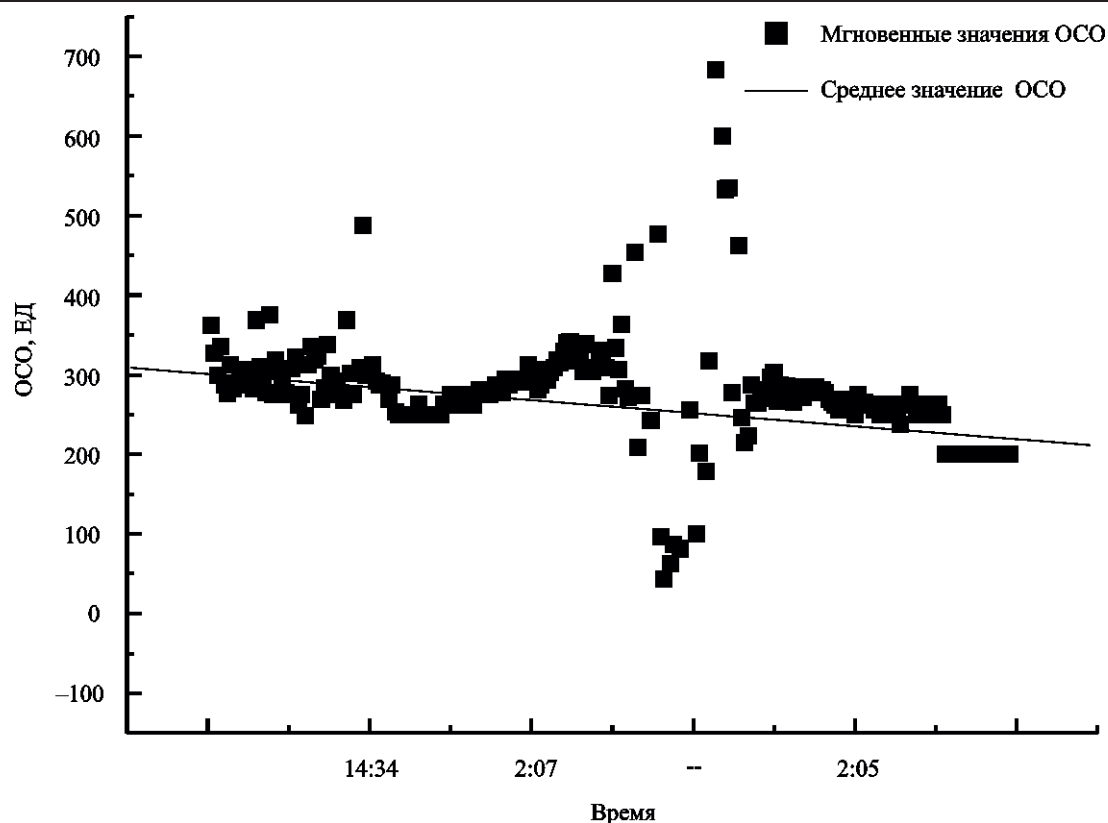


Рис. 3. Значения ОСО, рассчитанные оптимизационным методом, по данным измерений 04.06.2010 для пар длин волн 305,5 и 323,5 нм, 308,9 и 329,1 нм

Чтобы увеличить точность значений ОСО при применении оптимизационного метода, целесообразно ввести учет неселективного ослабления солнечного излучения атмосферной облачностью, корректируя входные данные в соответствии с опорным каналом спектро радиометра, находящимся в отличном от полосы активного поглощения озона спектральном диапазоне [9]. Основной канал включает в себя измерения в УФ-диапазоне, опорный – в видимом, где нет полос поглощения озона. Это позволяет оценить неселективное влияние атмосферы на солнечное излучение, проходящее через нее.

Коррекция заключается в учете изменений сигнала опорного канала с помощью коэффициента, равного относительному изменению сигнала в опорном канале за время проведения одного измерения (для спектро радиометра ПИОН-УФ, работающего в ННИЦ мониторинга озоносферы БГУ, время измерения УФ-части спектра составляет около 4 мин). Данный коэффициент используется для вычисления изменения сигнала основного канала измерений, затем вычисляется его усредненное значение, используемое потом в расчетных формулах. Данную коррекцию можно записать в виде следующей формулы:

$$S = S_0(1/2 + (B_2/B_1)/2),$$

где S – итоговое значение сигнала основного канала, S_0 – измеренное значение сигнала основного канала, B_2 – значение сигнала опорного канала на момент окончания измерения, B_1 – значение сигнала опорного канала на момент начала измерения.

Применение данной корректировки в облачные дни позволяет повысить точность получаемых значений ОСО. При значительной облачности увеличение точности может достигать 3 %, в то время как для облачности, характеризуемой как умеренная, изменение результатов после коррекции сигнала составляет величину порядка 0,5 %. Для безоблачных дней данная коррекция не оказывает сколь-нибудь заметного влияния на результирующее значение ОСО.

Таким образом, в облачные дни можно добиться, чтобы погрешность получаемых значений ОСО была не более 5 %, что уже ближе к прецизионным методам.

В настоящее время ведется работа по усовершенствованию оптимизационного метода восстановления ОСО по СПЭО земной поверхности солнечным УФ-излучением для учета большего числа различных параметров, а также по разработке метода, работающего с более чем двумя парами длин волн.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Petzoldt K., Naujokat B., Neugeboren K. Correlation between stratospheric temperature, total ozone, and tropospheric weather systems // Geophysics Research Lett. 1994. Vol. 21. P. 1203–1206.

2. Vaniches K. UV Index for public An Output from the COST-713 Project // Proceeding of the Quadrennial ozone symposium. Sapporo, 2000. P. 695–696.
3. Светашев А. Г., Атрашевский Ю. И., Красовский А. Н., Станкевич В. Ю. Предварительные результаты восстановления ОСО по результатам наземных измерений спектрального распределения освещенности УФ-составляющей солнечной радиации // Сахаровские чтения 2009: Экологические проблемы XXI века: материалы 9-й Междунар. науч. конф., Минск, 21–22 мая 2009 г. Минск, 2009. С. 305.
4. Stamnes K. Derivation of total ozone abundance and cloud effects from spectral irradiance measurements // Applied Optics. 1991. Vol. 30. № 30. P. 1–15.
5. Mayer B., Kylling A. Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations – description and examples of use // Atmos. Chem. Phys. Vol. 5. 1855–1877, doi:10.5194/acp-5-1855-2005, 2005.
6. Станкевич В. Ю. Влияние параметров модели на результаты восстановления ОСО по спектральному распределению освещенности // Сахаровские чтения 2010: Экологические проблемы XXI века: материалы 10-й Междунар. науч. конф. Минск, 2010. С. 260.
7. Станкевич В. Ю. Оценка влияния атмосферных и приборных параметров на значения общего содержания озона, полученные по методу Стамнеса // Молодой ученый. 2011. № 3. Т. 1. С. 22–24.
8. Банди Б. Методы оптимизации. М., 1988. С. 40–45.
9. Станкевич В. Ю. Оптимизационный метод восстановления значений общего содержания озона по спектральной плотности энергетической освещенности поверхности Земли солнечным ультрафиолетовым излучением // Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы: тез. докл. XV Всерос. школы-конф. молодых ученых, Борок, 30 мая – 4 июня 2011 г. Борок, 2011. С. 53–54.

Поступила в редакцию 20.03.13.

Вадим Юрьевич Станкевич – аспирант кафедры физической информатики и атомно-молекулярной физики. Научный руководитель – А. Г. Светашев.

Александр Георгиевич Светашев – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Национального научно-исследовательского центра мониторинга озоносферы БГУ.