

ПРОХОЖДЕНИЕ УФ-С, ВИДИМОГО И БЛИЖНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЙ ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРУ

© 2019 г. И. Д. Родионов^{1*}, А. И. Родионов¹, И. П. Родионова¹, Д. В. Шестаков¹,
В. Д. Песков¹, В. В. Егоров², А. П. Калинин³, Н. А. Матвеева⁴

¹Институт химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук, Москва, Россия

²Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

³Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва, Россия

⁴ЗАО “Научно-технический центр “Реагент”, Москва, Россия

*E-mail: irodionov@reagent-rdc.ru

Поступила в редакцию 15.02.2019;

после доработки 13.03.2019;

принята в печать 20.03.2019

Представлены результаты экспериментального исследования прохождения УФ-С излучения (со спектральным диапазоном от 100 до 280 нм) через атмосферу и проведено сравнение прохождения солнечного излучения через атмосферу с данными программы MODTRAN.

Ключевые слова: атмосфера, УФ-С-сенсор, гиперспектрометр, прохождение, спектр излучения, поглощение, экстинкция, загрязнение воздуха.

DOI: 10.1134/S0207401X19070136

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных задач в исследовании атмосферы является изучение процессов прохождения УФ-С и видимого излучения через атмосферу. Результаты такого исследования представляют интерес как для обработки данных по дистанционному зондированию [1–5], исследования озонового слоя, так и для изучения процессов ослабления УФ-С излучения. Данная работа состоит из двух разделов: первый посвящен прохождению УФ-С излучения на горизонтальных трассах для различных условий съемки, во втором рассмотрены особенности прохождения солнечного излучения сквозь атмосферу. В обоих случаях для решения этих задач проведены эксперименты с применением новейших оптоэлектронных приборов [6, 7].

Для обработки данных прохождения излучения через атмосферу наряду с законом Бугера применяются различного рода модели, входящие в состав коммерческих программных средств атмосферной коррекции, такие как MODTRAN и LOWTRAN [8, 9]. В них используются алгоритмы решения задач переноса излучения, которые позволяют учитывать большинство параметров состояния атмосферы.

Как известно, любая модель обладает рядом ограничений, связанных с неполнотой описания объекта или процесса моделирования, что приво-

дит к различной степени неопределенности решения задач. Поэтому одним из перспективных направлений исследования является валидация моделей прохождения оптического излучения через атмосферу. Цель настоящей статьи – описание методов и результатов экспериментального исследования прохождения через атмосферу волн УФ-С, видимого и ближнего инфракрасного излучения с помощью гиперспектральной и монофотонной УФ-С-аппаратуры, разработанной в ЗАО “НТЦ “Реагент”.

МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Методика измерений в УФ-С-диапазоне

В качестве измерительной аппаратуры был использован монофотонный сенсор УФ-С-диапазона [6]. Источником эталонного излучения служила эксимерная лампа (ЭЛ). Измерения проводились в горах Северного Кавказа на различных высотах и расстояниях от источника излучения до приемника, вдоль подмосковной автотрассы, а также в Москве.

А. В горах Северного Кавказа, где воздушный бассейн практически свободен от антропогенных загрязнений как молекулярных, так и аэрозольных, измерения проводили на горизонтальных трассах различных высотных уровней и, соответ-

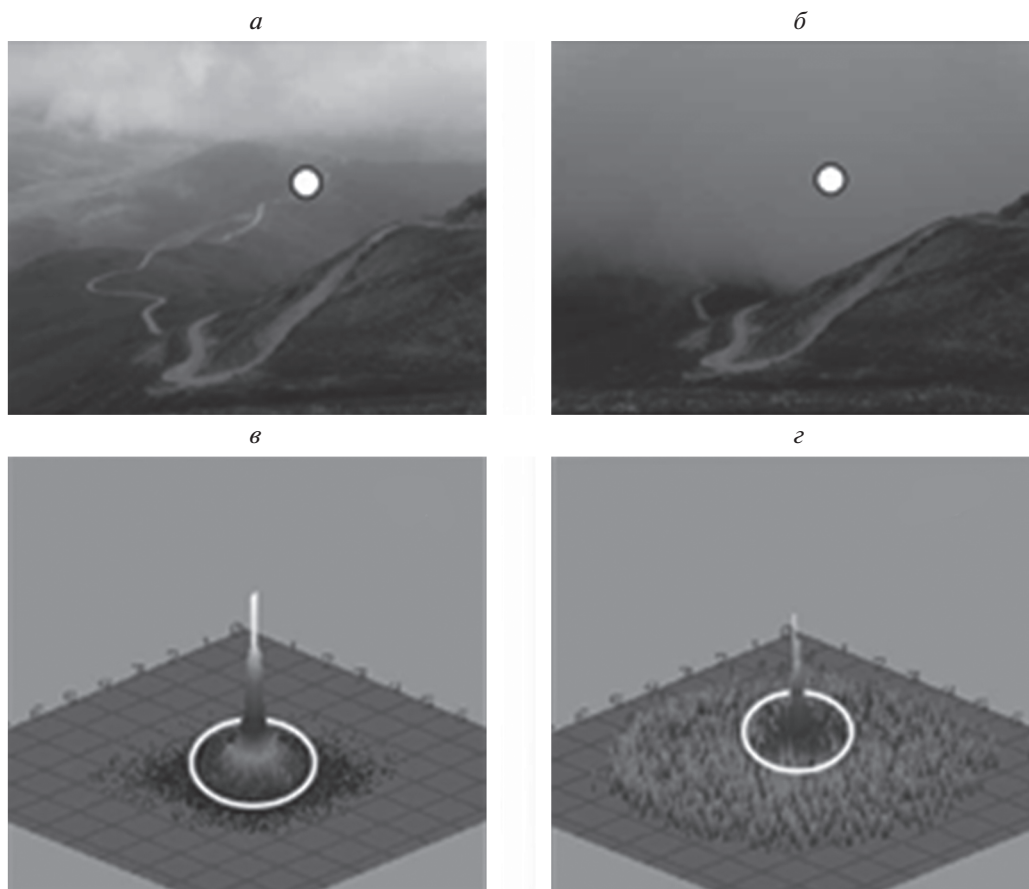


Рис. 1. Изображения, полученные видеокамерой: белым кружком отмечено место расположения источника УФ-С излучения (*a* и *б*), а также пространственное (угловое) распределение интенсивности принимаемого излучения (*в* и *г*): *a* и *в* – при слабом тумане; *б* и *г* – в условиях плотного тумана. На рис. 1*в* и 1*г* белыми кольцами выделены области пиков распределений.

ственно, различных дальностях. Условия съемки: ясная погода, наличие тумана, дождь и дождь со снегом. Просвечивание трассы осуществили источником УФ-С-излучения (эксимерная лампа ХеВг, модель ВD_Р с длиной волны 283 нм). Источник излучения устанавливали на одном из склонов горы (рис. 1). На противоположной горе находился приемник излучения – монофотонный сенсор “Скорпион”.

На рисунках 1*a* и 1*б* приведены изображения склона горы, на которых белыми кружками помечены места расположения источника излучения для двух моментов съемки, характеризующихся туманами различной плотности. На рисунках 1*в* и 1*г* даны пространственные (угловые) распределения принимаемого излучения в пределах углового поля зрения сенсора “Скорпион”. Интенсивность излучения (число отсчетов в секунду) в пределах пиков распределений, очерченных белыми кольцами, регистрировал сенсором в качестве полезного принимаемого сигнала.

По завершении очередного этапа измерений источник излучения и приемник перемещали в другие точки по высоте и дальности, располагая их на противоположных склонах гор. При этом снова измеряли интенсивность принимаемого сигнала. Полученные значения интенсивностей для постоянной высоты для разной горизонтальной дальности сравнивали между собой следующим образом: учитывая ослабление интенсивности сигнала по квадратичному закону и известной дальности между источником и приемником и используя закон Бугера: $[\exp(-kR)]$, где k – коэффициент затухания (экстинкции), а R – дальность от источника излучения до приемника, можно вычислить искомое значение коэффициента затухания, связанного с поглощением и рассеянием УФ-С-излучения в атмосфере.

Б. Автотрасса в Подмоскowie. В отличие от измерений в горах, на трассе вдоль автомобильной магистрали имеют место значительные концентрации выбросов выхлопных газов. Выбросы содержат такие газы, как CO, NO₂, CO₂ и др., а так-

же аэрозольные частицы в виде сажи. Измерения проводили в ясную погоду. Расстояние от источника УФ-С-излучения (эксимерная лампа) до приемника (монофотонный сенсор “Скорпион”) вдоль трассы составляло от 1800 до 5000 м.

В. Наклонные трассы в Москве. В Москве измерения коэффициента ослабления волн УФ-С-диапазона при прохождении излучения эксимерной лампы через атмосферу проводили также с использованием монофотонного сенсора “Скорпион”. Эксперимент выполняли следующим образом. Монофотонный сенсор (приемник УФ-С-излучения “Скорпион”) был размещен на крыше жилого комплекса. Источник (эксимерная лампа) располагали на автомобиле, который перемещался по прилегающим дорогам.

Методика измерений в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах солнечного излучения

В качестве измерительной аппаратуры использовали гиперспектрометр видимого и ближнего инфракрасного диапазона ВИД-ИКЗ [7]. Регистрировали излучение, рассеянное баритовым эталонным экраном. Измерения проводили в полуденные часы при ясной погоде.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МОНОФОТОННАЯ УФ-С-АППАРАТУРА И ГИПЕРСПЕКТРОМЕТР ВИДИМОГО И БЛИЖНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА

Описание монофотонного сенсора “Скорпион”

Особенностями разработанного в ЗАО “НТЦ “Реагент” сенсора по сравнению с имеющимися зарубежными аналогами являются как возможность определения угловых координат регистрируемого УФ-С-излучения, так и определение времени его прихода с наносекундной точностью, что существенно отличает его от имеющихся аналогов. Это обеспечивает сенсору уникальную возможность определения амплитудно-временной характеристики регистрируемого УФ-С-излучения и установления на основе ее типа регистрируемого источника и высокочастотных особенностей излучения. Возможность одновременной регистрации угловых координат регистрируемого фотона и времени его прихода достигается использованием в качестве регистрирующего устройства время-координатно-чувствительного детектора (ВКЧД) [6].

Монофотонный сенсор работает следующим образом. Фотон от источника УФ-С-излучения попадает в оптическую систему, которая служит для формирования изображения на поверхности фотокатода ВКЧД. Оптическая система пропускает фотоны УФ-С-излучения и подавляет все

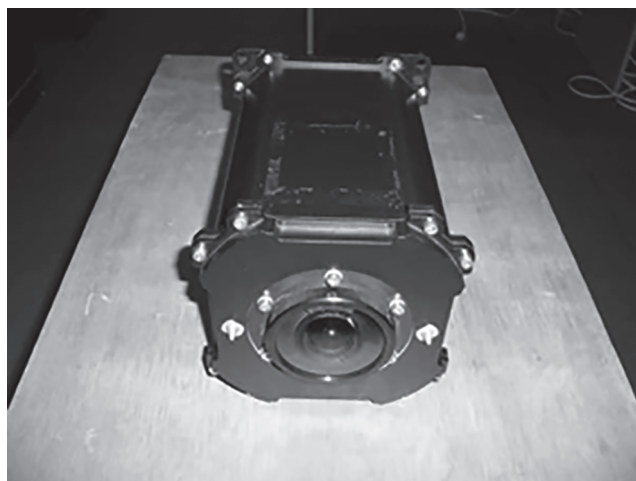


Рис. 2. Внешний вид монофотонного сенсора “Скорпион”.

остальные. Коэффициент подавления фотонов с длинами волн отличными от УФ-С-излучения благодаря оптической системе и ВКЧД может достигать 10^{-14} . Это и обеспечивает “солнечно-слепой” режим регистрации УФ-С-излучения, когда прибор может работать в условиях интенсивного солнечного излучения, попадающего в объектив. Прошедший оптический тракт фотон УФ-С-излучения попадает на фотокатод ВКЧД и регистрируется. Более подробное описание работы УФ-С-сенсора можно найти в работе [6]. Внешний вид УФ-С-сенсора “Скорпион” показан на рис. 2, основные технические характеристики его приведены в табл. 1.

Описание используемого гиперспектрального сенсора

Гиперспектрометр — прибор, одновременно осуществляющий измерения как в спектральных, так и пространственных координатах. Идентификация объектов и материалов при гиперспектральных измерениях базируется на способностях этих объектов и материалов поглощать и рассеивать свет, дифференцируя по длинам волн, что специфично для каждого материала. Объектив сенсора служит для формирования изображения в фокальной плоскости диафрагменного узла, щель которого вырезает узкую полосу зондируемой поверхности. Далее это изображение проходит через коллиматор в диспергирующий блок, в качестве которого использована призма. После диспергирующего блока разложенное по спектру изображение через выходной объектив попадает на матрицу фотоприемного устройства, на которой формируется гиперспектральное изображение узкой полоски, вырезаемой щелью. По одной оси матрицы откладывается пространствен-

Таблица 1. Основные технические характеристики сенсора “Скорпион”

Характеристика	Значение
Угловое поле зрения, град	120
Спектральный диапазон, нм	250–280
Временное разрешение, нс	менее 1
Энергопотребление, Вт	20
Масса, кг	5
Точность оценки координат точки, град	менее 0.2
Рабочая температура, °С	от –55 до +60
Габариты, мм	250 × 170 × 178

ная координата вдоль щели, а по другой – длина волны. В каждом пикселе матрицы формируется интенсивность излучения для длины волны, соответствующей данным пикселю и координате.

Таким образом, в каждом пикселе изображения вдоль узкой полоски формируется спектральная плотность энергетической яркости (СПЭЯ) регистрируемого излучения. Более подробное описание работы гиперспектрометра можно найти в работе [4]. Внешний вид использованного гиперспектрометра показан на рис. 3, технические характеристики приведены в табл. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эксперименты в УФ-С-диапазоне

Алгоритм обработки экспериментальных данных основан на известных законах, характеризующих ослабление мощности электромагнитной волны обратно пропорционально квадрату расстояния от источника излучения до приемника, а также ее экстинкцию (рассеяние и поглощение) по закону Бугера. В этом случае, при выполнении измерений на различных дальностях R_1 и R_2 , как было указано выше, коэффициент экстинкции α ,

в предположении об отсутствии стратификации состояния атмосферы при измерениях в горах, может быть представлен в виде

$$k = -\frac{1}{R_2 - R_1} \ln \frac{P_2 L_2^2}{P_1 L_1^2}, \quad (1)$$

где P_1 и P_2 – мощности сигнала (число отсчетов в секунду), измеренные в точках с дальностями R_1 и R_2 , соответственно, при $R_2 > R_1$. Условия измерений, полученные данные и результаты их обработки с использованием формулы (1) приведены в табл. 3.

Проведенные исследования по выявлению общих закономерностей и особенностей распространения УФ-С-излучения в горах и через облака позволили сделать ряд интересных выводов. Так, при изучении прохождения УФ-С-волн через облака на высоте 2 км в условиях дождя и снега, принимаемый сигнал уверенно регистрировался на дальности 1.2 км. Несмотря на то, что изображение источника излучения на экране сенсора “Скорпион” сильно размыто (см. рис. 1з), имеется возможность не только обеспечивать прием энергетических сигналов, но и с точностью до 1 град находить положение источника. Это подтверждает факт отсутствия существенного поглощения волн УФ-С на водяных парах и дает возможность работы сенсора в данном спектральном диапазоне в условиях тумана и облачности (на дальностях до нескольких км). Данный вывод существенно противоречит стандартным выводам для модели, используемой в программе “LOWTRAN”.

В работе [8] приведена формула для расчета коэффициента экстинкции волн в дожде, справедливая (по мнению авторов) для УФ-С-диапазона, т.е.

$$k = 0.365I^{0.63}, \quad (2)$$

где I – интенсивность дождевых осадков в мм/ч. Величина k меняется в пределах от 1 мм/ч для слабого дождя и до 100 мм/ч в случае сильного ливня. Согласно формуле (2) даже для слабого до-



Рис. 3. Внешний вид гиперспектрометра ВИД-ИКЗ.

Таблица 2. Характеристики гиперспектрометра ВИД-ИКЗ

Характеристика	Значение
Спектральный диапазон, мкм	0.4–1.0
Угловое поле зрения, град	35
Число спектральных каналов	до 500
Частота кадров, 1/с	до 100
Масса, кг	3.2
Габариты, мм	425 × 230 × 84

для коэффициент экстинкции будет равен 0.365, что оказывается существенно больше, чем величины (0.28 и 0.25), полученные по измерениям в горах (см. табл. 4). Это ставит под сомнение корректность модели, принятой в работе [8].

Отличие полученных экспериментальных результатов от модели объясняется результатом многократного рассеяния излучения на туманных и дождевых трассах, которым пренебрегают в типовых моделях. Это необходимо учитывать в практических результатах. Кроме того, можно утверждать, что, в условиях 100%-ной влажности и осадков в виде дождя и снега, значения коэф-

фициента экстинкции незначительно отличаются от значений, соответствующих случаю рэлеевского (молекулярного) рассеяния.

Найдено повышенное поглощение в приземном слое для промышленных трасс (типа оживленной автомагистрали), где оценка коэффициента экстинкции приводит к значению 0.5 км^{-1} , что объясняется наличием аэрозолей и выхлопных газов автомашин в приземном слое воздуха. При измерениях прохождения УФ-С-излучения через атмосферу на наклонных трассах в пределах городской среды (Москва) коэффициент экстинкции составлял $(0.3–0.4) \text{ км}^{-1}$, что обусловлено, как и в случае автомагистрали, задымленностью атмосферного воздуха.

Эксперименты, проведенные в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне

Прохождение солнечного излучения через атмосферу в видимой и ближней инфракрасной области длин волн, как было сказано выше, изучали с помощью регистрации гиперспектрометром ВИД-ИКЗ световых волн солнечного излучения, рассеиваемых баритовым экраном. Результаты измерений представлены на рис. 4. Для сравне-

Таблица 3. Условия и результаты УФ-С-измерений на различных трассах, а также результаты расчетов коэффициента экстинкции

Протяженность трассы R , м	Высота трассы, м	Принимаемый сигнал, отсчет/с	Погодные условия	Местное время	Коэффициент экстинкции $k_{\text{экс}}$
1200	1980	4080	Дождь со снегом	9.20	0.28
2000		1220		9.30	
2300	1650	1910	Дождь	11.10	0.25
3050		710		11.20	
4250		530		11.30	
1510	740	7090	Ясно	13.20	0.2
2020		3280		—	
2510		1670		—	
2630		1610		—	
1230	0	9320	Ясно (задымленная трасса)	14.45	0.5
1830		3790		14.48	
2110		2410		14.50	
2510		1720		14.55	
4000		630		15.20	
5000		490		15.30	
1500	0–30	780	Ясно	—	0.3–0.4
3500	0–30	127	Ясно	—	

Таблица 4. Параметры, заложенные в программу MODTRAN

Модель атмосферы	Лето в средних широтах
Температура поверхности Земли, К	294.2
Альbedo Земли	0.05
Аэрозольная модель	городская среда
Видимость	12 км
Высота расположения сенсора	1 км
Направление зондирования сенсора	180 град

ния экспериментальных данных с модельными данными был рассчитан график СПЭЯ по программе MODTRAN [9] для условий, близких к условиям эксперимента.

Программа MODTRAN – это программа расчета переноса солнечного излучения в атмосфере. Программа дает возможность рассчитывать СПЭЯ для различных состояний атмосферы. Она предлагает шесть климатических моделей для различных географических широт и сезонов. Модель включает также шесть различных аэрозолей, которые могут присутствовать в климатической зоне.

Результаты расчетов СПЭЯ по программе MODTRAN показаны на рис. 5 в виде кривой 2; 1 – результаты измерения СПЭЯ солнечного излучения гиперспектрометром ВИД-ИКЗ; 3 – от-

ношение величин СПЭЯ кривых измерения 1 и расчета 2, 4 – сглаженная кривая 3.

Из приведенных кривых видно, что расчет по программе MODTRAN достаточно хорошо воспроизводит экспериментальные данные. Это позволяет утверждать, что модель, заложенная в программе MODTRAN, является достаточно корректной и может использоваться для калибровки спектральных сенсоров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований позволили в ряде случаев уточнить значения коэффициента экстинкции в УФ-С-диапазоне, вычисленные по модели, используемой в работе [5], а также определить величину этого коэффициента для конкретных условий измерений, например, при наличии

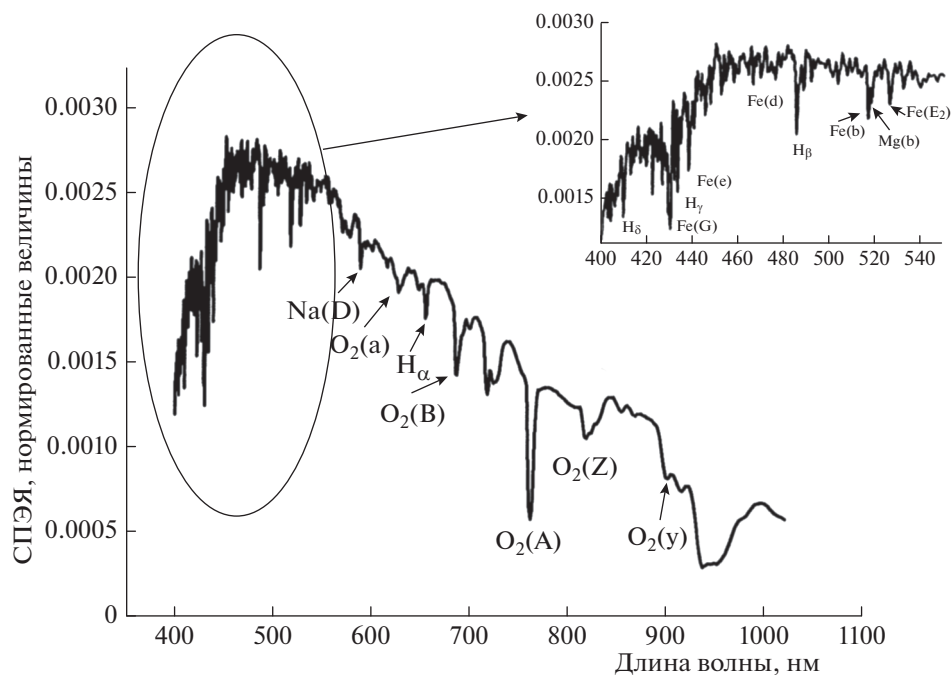


Рис. 4. Спектр солнечного излучения, рассеянного баритовым экраном.

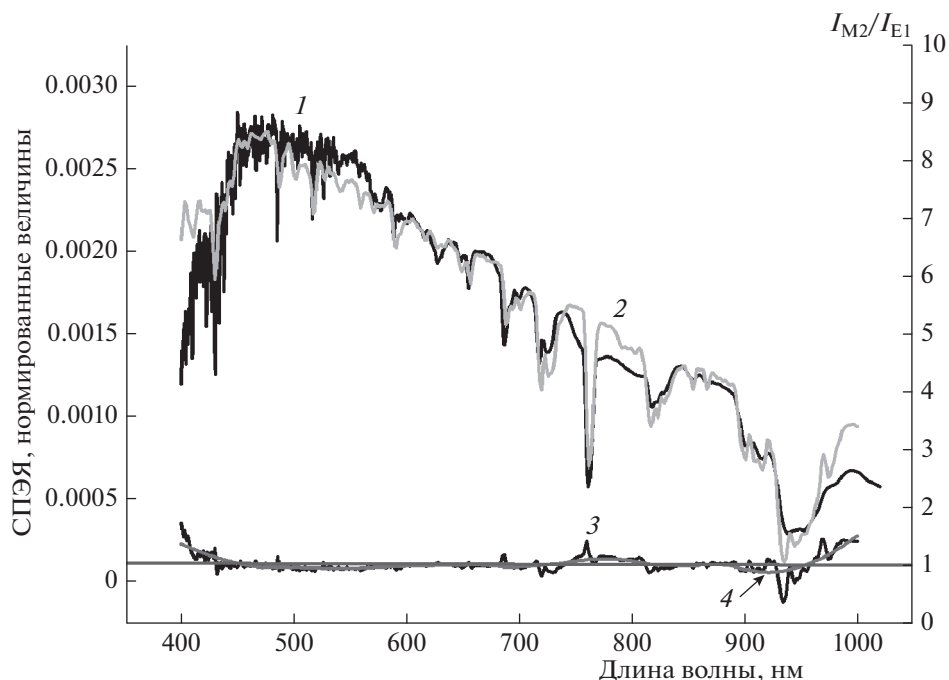


Рис. 5. Сравнение графика СПЭЯ солнечного излучения, измеренного экспериментально (1), с графиком, рассчитанным при помощи программы MODTRAN (2); 3 – отношение значений спектров 1 и 2.

дождевых осадков в горах. Это особенно актуально для исследователей и практиков, поскольку сама программа MODTRAN не предназначена для расчета параметров атмосферы в УФ-С-диапазоне и поэтому требует коррекции данных, полученных по используемой в ней модели.

Сравнение измеренных в ходе экспериментов графиков СПЭЯ для видимого и ближнего инфракрасного диапазонов с рассчитанными по программе MODTRAN, показало их хорошее совпадение. Поэтому можно утверждать, что эти два способа определения состояния атмосферы могут взаимно дополнять друг друга. Результаты натуральных экспериментов, наряду с теоретическими и имитационными моделями, целесообразно использовать для формирования базы данных характеристик поглощения и рассеяния волн УФ, видимого и ИК-диапазонов, поскольку известные модели являются неполными и ограниченными в своих возможностях [8], что частично подтвердили и наши исследования.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема 0082-2019-

0017, регистрационный номер № АААА-А19-119010990034-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Родионов И.Д., Родионов А.И., Ведешин Л.А. и др. // Исследование Земли из космоса. 2013. № 6. С. 81.
2. Виноградов А.Н., Егоров В.В., Калинин А.П. и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 2. С. 125.
3. Голубков Г.В., Манжелей М.И., Лушников А.А. // Хим. физика. 2014. Т. 33. № 7. С. 101.
4. Голубков Г.В., Манжелей М.И., Берлин А.А. и др. // Хим. физика. 2016. Т. 35. № 1. С. 5.
5. Голубков Г.В., Манжелей М.И., Берлин А.А. и др. // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 7. С. 33.
6. Белов А.А., Егоров В.В., Калинин А.П. и др. // Датчики и системы. 2012. № 12. С. 58
7. Виноградов А.Н., Егоров В.В., Калинин А.П. и др. // Оптический журн. 2019. Т. 86. № 2. С. 62; <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2019-86-02-62-67>
8. Kneizys F.X., Robertson D.C., Abreu L.W. et al. The MODTRAN 2/3 Report and LOWTRAN 7 MODEL. Phillips Laboratory, Geophysics Directorate, 1996.
9. http://modtran.spectral.com/modtran_home