

УДК 551.510.534

А.Б. Белецкий, А.В. Михалев, М.А. Черниговская

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПРИЗЕМНОГО СОЛНЕЧНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 9 марта 1997 г.

Представлены результаты спектральных измерений приземного солнечного ультрафиолетового излучения в диапазоне длин волн 296–326 нм в период солнечного затмения, наблюдавшегося над Иркутском 9 марта 1997 г. Обсуждаются выявленные во время затмения изменения в спектральном распределении регистрируемого излучения. Высказывается предположение, что изменения в спектрах, наблюдаемые в моменты времени, близкие к максимальной фазе затмения, могут быть обусловлены эффектом многократного рассеяния ультрафиолетового излучения.

Введение

Для решения ряда фундаментальных и прикладных задач в области исследования взаимодействия солнечного излучения с земной атмосферой информация о распределении энергии в спектре излучения Солнца является определяющей, например, для построения моделей фотохимических процессов атмосферы и ионосферы Земли или для измерения содержания атмосферного озона оптическим методом [1]. Особую важность представляют вариации интенсивности солнечного электромагнитного излучения в коротковолновой области спектра. Это объясняется тем, что всплески интенсивности излучения Солнца в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах являются индикатором проявления процессов солнечной активности, ультрафиолетовое излучение в диапазоне длин волн 220÷310 нм связано с процессами образования озона, а излучение более коротких длин волн (крайний ультрафиолет и рентгеновские лучи) ответственно за процессы ионизации в слоях *D* и *E* ионосферы. Обнаружены вариации интенсивности коротковолнового излучения Солнца в связи с такими кратковременными событиями, как солнечные вспышки, с прохождением секторных границ межпланетного магнитного поля, с 27-суточным периодом обращения Солнца, а также глобальные вариации в цикле солнечной активности [2, 3]. Уникальную возможность для изучения реакции атмосферы и ионосферы на кратковременное отклонение притока солнечной электромагнитной радиации представляет такое природное явление, как полное солнечное затмение. Во время солнечных затмений (СЗ) изменяются величина и спектральный состав солнечного излучения, при этом изменение спектрального состава обычно связывают или с гелиофизическими факторами (например, потемнением к краю солнечного диска [4], наличием активных образований на Солнце) или геофизическими, такими как изменения общего содержания озона (ОСО) и нефотохимическими изменениями оптических характеристик атмо-

сферы вследствие изменения давления, температуры, состава воздуха и т.д.

Противоречивая ситуация сложилась с измерением ОСО во время солнечных затмений. Фотохимическое моделирование эффектов воздействия СЗ на состав стратосферы и мезосферы приводит в целом к количественно согласующимся результатам, согласно которым изменения ОСО во время солнечного затмения не должны превышать доли процента. В эксперименте же наблюдают широкий спектр вариаций ОСО во время солнечных затмений – его возрастание, периодические колебания или уменьшение в периоды солнечных затмений с амплитудой, достигающей единиц и десятков процентов (см. [4–9] и цитируемую там литературу).

Учет потемнения к краю солнечного диска не всегда позволяет количественно согласовать наблюдаемые изменения спектрального состава в период СЗ. Кроме того, используемые до настоящего времени поправки к измеряемым величинам общего содержания озона [5, 6], обусловленные потемнением солнечного диска к краю в период СЗ, основываются на неизменности и симметрии функций распределений солнечного диска. Между тем результаты [10] выявили неожиданные эффекты: в эпоху минимума солнечной активности наблюдалась меняющаяся со временем западно-восточная асимметрия кривых потемнений.

Распределение интенсивности по диску менялось во всей исследуемой области спектра (330–660 нм) с амплитудой 1–2% за время от минут до часов. Диапазон изменений возрастал с уменьшением длины волны. Для сравнения следует указать, что согласно [1] точность измерения общего содержания озона по прямому Солнцу составляет 1%. Это вносит некоторую неопределенность в измерения атмосферного озона в периоды СЗ и, возможно, отчасти объясняет существующую противоречивость результатов экспериментальных наблюдений вариаций ОСО, обусловленных влиянием солнечных затмений, и их интерпретации. В силу этого представленные

ниже спектральные измерения приземного солнечного УФ-излучения в период солнечного затмения могут представлять взаимный интерес для исследователей как в области физики Солнца, так и в области физики атмосферы и ионосферы Земли.

Некоторые характеристики солнечного затмения

9 марта 1997 г. в северной части Восточного полушария наблюдалось солнечное затмение, полоса полной тени которого на земной поверхности начиналась в районе с координатами 49° с.ш. и 87° в.д. на границе России и Китайской Народной Республики [11]. Из крупных городов в полосу полной тени, наибольшая ширина которой достигала 370 км, попадал г. Чита, а города Иркутск, Улан-Удэ и Улан-Батор находились в непосредственной близости от нее.

Особенностью солнечного затмения 9 марта 1997 г., наблюдавшегося в г. Иркутске (географические координаты 52° с.ш. и 104° в.д.), являлась низкая высота Солнца в диапазоне $5-20^\circ$, что вызывало существенное изменение оптических масс озона и атмосферы (от 2,5 до 10) в течение СЗ и, соответственно, изменение спектрального состава излучения для длин волн, имеющих различные коэффициенты поглощения и рассеяния. Полная продолжительность

затмения составляла над Иркутском 2 ч 04 мин. Время наступления максимальной фазы в пункте наблюдения $T_{\max} = 8$ ч 54 мин.

Результаты наблюдений

Спектральные измерения проводились автоматическим спектрофотометром, созданным на базе комплекса «КСВУ-12» и ЭВМ типа IBM AT в диапазоне длин волн 296–326 нм с интервалом 5–10 мин и в отдельные моменты времени – в диапазоне 306÷346 нм. Спектральное разрешение прибора составляло 0,25 нм, скорость сканирования – 8 нм/мин. Регистрировалось рассеянное УФ-излучение. Оптическая ось спектрофотометра была ориентирована в плоскости горизонта с фиксированным азимутом и вырезала участок небосвода ниже видимой траектории Солнца. Для контроля общей освещенности с помощью датчика интегрального потока измерялась также суммарная (прямая и рассеянная) интегральная интенсивность в диапазоне длин волн 400÷1100 нм. С помощью телевизионной CCD-камеры WAT-902A велась непрерывная телевизионная регистрация изображения солнечного диска в диапазоне длин волн 350÷390 нм (объектив «Юпитер-37А», 135 мм, светофильтры УФС6, СЗС25, СЗС27, НС9).

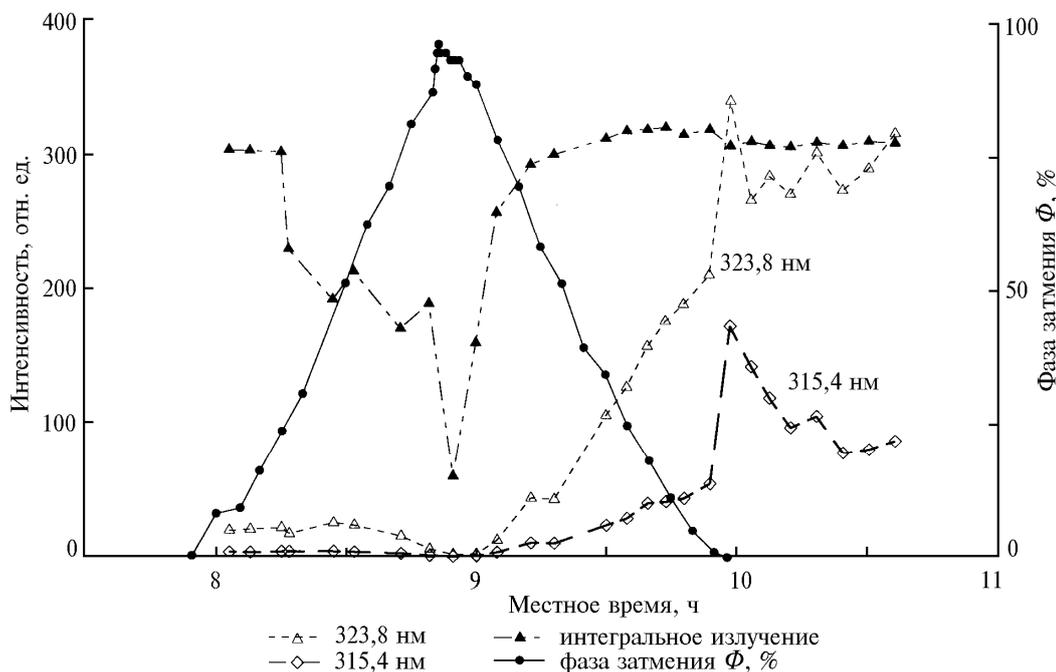


Рис. 1

На рис. 1 показано поведение интенсивностей излучения для двух длин волн 323,8 и 315,4 нм, интенсивность интегрального излучения и кривая фазы затмения Φ , определяемая отношением площадей затененной части солнечного диска ко всей площади диска по данным CCD-камеры. Немонотонный ход кривой интегрального потока в первой половине за-

тмения связан с наличием облачности в восточной части горизонта в этот период. Низкие значения УФ-излучения до начала затмения обусловлены большими значениями оптических масс атмосферы и озонового слоя, характерными для утренних часов.

Для сравнения здесь следует отметить, что уровни интегрального потока до затмения и после

него оказываются сравнимыми. Особенностью поведения регистрируемого УФ-излучения является более сильная модуляция коротковолнового УФ-излучения. Так, для 323,8 нм отношение интенсивностей в начале СЗ к интенсивности во время максимальной фазы порядка 11, отношение интенсивностей в конце фазы затмения к интенсивности во время максимальной фазы порядка 180. Соответствующие величины для длины волны 315,4 нм – 15 и 720. Для интегральной же интенсивности эти величины не превышают значений 8 и 10 соответственно.

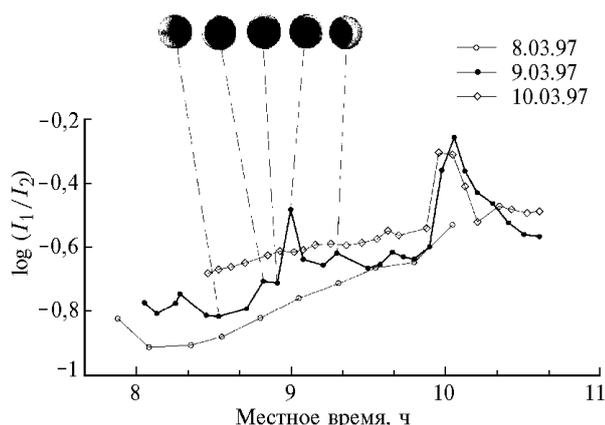


Рис. 2. Логарифм отношения интенсивностей излучения и изображения фаз СЗ

На рис. 2 показано поведение логарифма отношения интенсивностей на длинах волн 315,4 и 323,8 нм для 8, 9 и 10 марта 1997 г. с учетом поправки на неодновременность измерения интенсивностей. Отношение интенсивностей обычно используется в качестве количественной характеристики, отражающей изменение спектра, например, в спектральном факторе прозрачности $\eta = \log(I_k/I_l)$, где $I_{k,l}$ – интенсивности излучения на длинах волн λ_k и λ_l ($\lambda_k < \lambda_l$), или в качестве характеристики среды, в частности, при определении содержания озона оптическими методами. Величину η условно можно считать мерой относительной спектральной прозрачности атмосферы.

На этом же рисунке представлены изображения фаз СЗ, полученные CCD-камерой в диапазоне длин волн 350÷390 нм для соответствующих моментов снятия спектров. Из рисунка видно, что поведение фактора η в день затмения отличается от временного хода η в дни до и после СЗ, что свидетельствует об отклонении в распределении спектрального состава УФ-излучения от обычного суточного хода, обусловленного изменением оптической массы атмосферы. Это прежде всего касается момента времени, близкого к максимальной фазе СЗ ($T_{\max} = 8$ ч 54 мин), когда отмечается рост величины η . Наблюдаемое увеличение η в конце СЗ (ЛТ ~10 ч 00 мин ÷ 10 ч 20 мин) отмечалось и в последующие два дня, поэтому на предварительной стадии анализа результа-

тов считалось неотносящимся непосредственно к событию солнечного затмения. Но, по мнению авторов, такое поведение фактора η требует специального рассмотрения по двум причинам. Во-первых, возможно, эти увеличения η имеют один и тот же (или подобный) механизм, а во-вторых, аналогичное увеличение η в конце СЗ отмечалось и в работе [5].

Обсуждение

Наблюдаемые нами изменения фактора η в период СЗ отмечались и ранее, например в [5, 7], где эти изменения интерпретировались как озонно-затменный эффект. Этот эффект заключался в резком изменении относительной прозрачности атмосферы в озонной области (310÷330 нм), которое соответствовало росту общего содержания озона в моменты времени, близкие к полной фазе затмения. На момент выхода этих работ природа озонно-затменного эффекта была неясна, и предлагалось несколько возможных объяснений этому явлению, среди которых можно отметить изменение в соотношении озонобразующей и озоноразрушающей радиации в спектре внеатмосферного источника, образование селективно ослабляющих радиацию аэрозолей, температурные изменения коэффициентов поглощения озона и др.

К сожалению, нам не удалось обнаружить более поздних публикаций непосредственно по озонно-затменному эффекту. Ситуация же с работами по измерениям ОСО в период СЗ, которые, по существу, являются «измерениями» озонно-затменного эффекта, отмечалась выше. В связи с этим была предпринята попытка выявить дополнительные, помимо обсуждаемых в литературе, возможные причины и механизмы вариации η в период СЗ.

Известно, что на форму спектра приземного ультрафиолетового излучения (и, соответственно, величину η) кроме величины ОСО оказывают влияние многие факторы: угловая высота и состояние диска Солнца, облачность, соотношение прямой и рассеянной освещенности, аэрозоль и др. Из перечисленных факторов наиболее динамичным, если не учитывать возможные изменения общего содержания озона в атмосфере, является освещенность, особенно в моменты времени, близкие к максимальной фазе затмения.

Изменяющаяся во времени и пространстве топология освещенности атмосферы Земли при СЗ, представляющая собой сходящийся конус области полной тени и расходящийся конус полутени, может резко изменять естественное соотношение прямой и рассеянной радиации. На рис. 3 схематично показаны возможные ситуации освещенности атмосферы при СЗ с низкими высотами Солнца при различных положениях наблюдателей относительно области тени. Цифрами I и II соответственно обозначены области тени и полутени (фиксированной фазы затмения). Цифрами 1, 2, 3 – положения трех наблюдателей (или трех моментов времени для

фиксированного наблюдателя $t_1 < t_2 < t_3$). Видно, что существует положение наблюдателя 2 (область тени или близкая к ней) или момент времени (близкий к максимальной фазе затмения) для фиксированного наблюдателя, когда освещенность атмосферы обеспечивается за счет многократного (двух и более) рассеяния из области полутени.

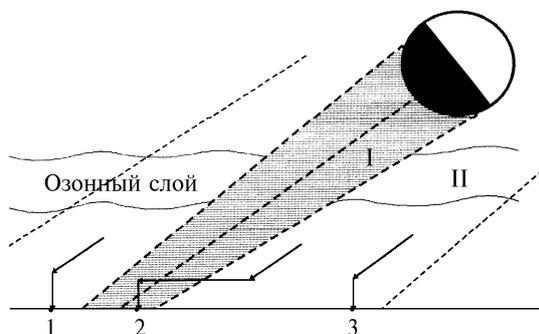


Рис. 3

Субъективно существенное увеличение доли многократно рассеянного света проявляется в отсутствие теней у предметов в моменты времени, близкие к максимальной фазе затмения при ясном безоблачном небе.

Наиболее близким по своему проявлению может быть так называемый эффект «аномальной» прозрачности атмосферы (см., например, [4]). Эффект связан с увеличением (изменением) при некоторых геофизических условиях доли многократно рассеянного регистрируемого УФ-излучения и выражается в изменении спектрального распределения излучения в УФ-части спектра и, в некотором смысле, является аппаратным эффектом. Этот эффект, в частности, наблюдается в сумерках при низких высотах Солнца [12].

Увеличение доли рассеянного излучения сопровождается перераспределением в спектральном составе регистрируемого излучения с обогащением более коротковолновым излучением. На рис. 4 для сравнения представлены результаты расчета спектрального распределения прямого солнечного излучения и двукратно рассеянного излучения в ультрафиолетовом диапазоне спектра (кривые 1 и 2 соответственно), заимствованные из работы [4], и зарегистрированные нами спектры рассеянного УФ-излучения в период СЗ 9 марта 1997 г. для двух моментов времени. Расчетные данные взяты для высоты Солнца 12° , которая соответствует высоте Солнца при максимальной фазе СЗ 9 марта 1997 г. Все спектры нормированы на интенсивность излучения на длине волны 325,4 нм для соответствующих спектральных распределений и приведены в относительных единицах. Первый из зарегистрированных спектров относится к моменту времени $LT = 8 \text{ ч } 32 \text{ мин}$

(кривая 3), соответствующему первой половине фазы затмения ($\Phi \sim 0,5$), второй – моменту времени $LT = 9 \text{ ч } 05 \text{ мин}$ (кривая 4) сразу же после максимальной фазы затмения ($\Phi \sim 0,8$), когда и отмечается изменение в спектральном распределении приземного УФ-излучения. Обращает на себя внимание достаточно хорошее качественное соответствие, по крайней мере для диапазона длин волн 310–325 нм, между расчетными и измеренными спектрами. Первый спектр занимает на графике область, соответствующую прямому и однократно рассеянному излучению, в то время как второй спектр сместился в область двукратно (и более) рассеянного излучения.

Таким образом, по мнению авторов, изменения в спектральном составе УФ-излучения (изменения η), регистрируемые в течение СЗ, кроме изменений, обусловленных потемнением солнечного диска к краю, а также возможным изменением общего содержания озона и других оптико-физических характеристик, могут быть связаны с неравномерным и меняющимся в течение СЗ высотным распределением освещенности атмосферы и увеличением доли рассеянного УФ-излучения.

Подобный эффект наиболее полно, вероятно, проявляется для СЗ, происходящих при небольших высотах Солнца при наклонном освещении атмосферы, и должен отсутствовать при самолетных измерениях [8], когда устранено рассеяние в приземных слоях атмосферы.

Последние обстоятельства, а также то, что обсуждаемый эффект, как и эффект «аномальной» прозрачности атмосферы, является в некотором смысле аппаратным эффектом, зависящим, в частности, от того, прямое или рассеянное излучение регистрируется, а также от величины апертурного угла оптической аппаратуры, может являться причиной противоречивых результатов измерения общего содержания озона. В одних случаях эффект проявляется и может быть интерпретирован как изменения ОСО во время СЗ, в других случаях отсутствовать с соответствующими выводами. Так, если связывать зарегистрированный эффект изменения спектрального распределения приземного УФ-излучения с изменением ОСО во время настоящего СЗ, то по предварительным оценкам в пересчете на возможные изменения ОСО это будет соответствовать уменьшению ОСО до 20% и превышать поправки на потемнение солнечного диска к краю. Согласно [4] поправки на потемнение солнечного диска для спектрофотометров Добсона не превышают для коротковолнового диапазона ультрафиолетового спектра ($\lambda = 305\text{--}332 \text{ нм}$) 11%. Кроме того, учет такой поправки соответствовал бы «кажущемуся» увеличению ОСО в отличие от возможной интерпретации уменьшения ОСО согласно полученным нами экспериментальным данным.

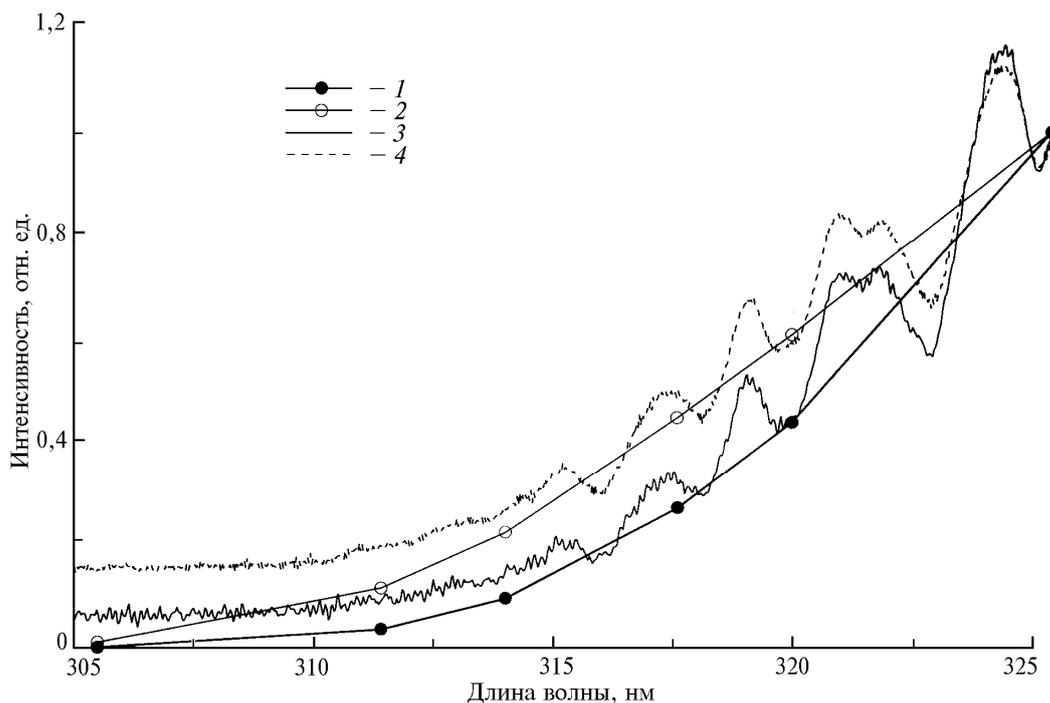


Рис. 4

Относительно особенности поведения η в конце СЗ (LT ~ 10 ч 00 мин \div 10 ч 20 мин) можно отметить, что она наблюдалась при высоте Солнца $\sim 20\text{--}22^\circ$ над горизонтом. Учитывая, что эта особенность отмечалась и в последующие два дня, естественно связать ее с возможными оптико-атмосферными эффектами или явлениями, наблюдаемыми на некоторых расстояниях от Солнца при определенных метеорологических условиях. В этом случае высота 22° совпадает с угловым расстоянием, на котором образуется малое гало в результате преломления и отражения света на частицах некоторых видов облачностей. Следует отметить, что в день затмения (см. рис. 1) и в последующие дни в восточной части горизонта в утренние часы наблюдалась тонкая полоса облачности при ясном небе, в то время как 8 марта, когда этот эффект не наблюдался, отмечалась сплошная облачность всего небосвода. В этом плане представляют интерес результаты работы [5], где аналогичное увеличение η (длины волн 310 и 330 нм) во время наблюдений СЗ отмечалось после IV контакта, когда угловая высота Солнца составляла $\sim 22^\circ$ (оптическая масса $\sim 2,5$). Характер поведения интенсивностей в этом интервале времени (см. рис. 1) говорит о большем относительном увеличении коротковолнового УФ-излучения (для $\lambda = 315,4$ нм увеличение составило около 300%) при полном отсутствии эффекта в суммарном интегральном излучении. Если допустить, что при некоторых высотах Солнца отражение и преломление света осуществляются и в направлениях от земной поверхности, а также учесть, что при

угловых высотах Солнца меньше 20° рассеянная УФ-радиация может превышать прямую радиацию в несколько раз [13], то возможно ожидать существенного локального увеличения облученности земной атмосферы в диапазоне спектра 300–320 нм. Такое увеличение облученности может, в свою очередь, оказывать влияние на фотохимические процессы на высотах нижней атмосферы, которые протекают с поглощением излучения этого спектрального диапазона, например в реакции фотодиссоциации озона.

Выводы

Получены кривые изменения интенсивности рассеянной радиации в диапазоне длин волн 296–326 нм и изображения солнечного диска в диапазоне длин волн 350–390 нм в период солнечного затмения 9 марта 1997 г. над Иркутском.

Зарегистрированы кратковременные изменения в спектральном распределении приземного ультрафиолетового излучения в интервалы времени, близкие к максимальной фазе, и в конце солнечного затмения.

Изменение в спектральном распределении УФ-излучения вблизи момента наступления максимальной фазы затмения интерпретируется как увеличение доли многократно рассеянного излучения в этом временном интервале.

Изменения в спектральном распределении УФ-излучения в конце солнечного затмения, вероятно, обусловлены эффектом солнечного гало и непосредственно с солнечным затмением не связаны.

1. Kerr J.B., Asbridge I.A. and Evans W.F.J. Intercomparison of total ozone measured by Brewer and Dobson spectrophotometers at Toronto // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 93. P. 11129–11135.
2. Макарова Е.А., Харитонов А.В., Казачевская Т.В. Поток солнечного излучения. М.: Наука, 1991. 400 с.
3. Герман Дж.Р., Голдберг Р.А. Солнце, погода и климат. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 320 с.
4. Гуцин Г.П., Виноградова Н.Н. Суммарный озон в атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 238 с.
5. Веролайнен Я.Ф., Ошерович А.Л., Суслов А.К., Шпаков Н.С. Наблюдения содержания озона во время полного солнечного затмения 20 июля 1963 г. // *Геомагнетизм и аэрономия.* 1965. Т. 5. N 1. С. 113–120.
6. Шаламянский А.М., Ионина Н.Д. Измерение общего содержания озона в Нижнеангарске во время полного солнечного затмения 31 июля 1981 г. // *Тр. Гл. геофиз. обсерв.* 1985. N 487. С. 120–122.
7. Родионов С.Ф., Мовчан Б.Н., Ошерович А.Л. и др. О затменном эффекте в озонной области солнечного спектра 20 мая 1966 г. // *Физика атмосферы и океана.* 1967. Т. 3. N 12. С. 1280–1291.
8. Зайцева Н.А., Еланский Н.Ф., Матвеев А.Д., Вартьян Я.А. Метеорологические наблюдения, выполненные в период полного солнечного затмения 31 июля 1981 г. // *Метеорология и гидрология.* 1984. N 6. С. 45–50.
9. Большакова Л.Г., Малкин З.М., Положенцев Д.Д. и др. Результаты измерения озона во время полного солнечного затмения 31 июля 1981 г. // «Атмосферный озон. Тр. 6 Всесоюз. симп. Ленинград, 15–17 мая, 1985». Л., 1987. С. 102–112.
10. Nechet P., Labs B. // *Solar Phys.* 1987. V. 110. P. 139–170.
11. Espenak J. and Anderson J. Total solar eclipse of 1997 March 9. NASA Reference Publication 1369, July 1995. 64 p.
12. Розенберг Г.В. Сумерки. М.: Физматгиз, 1963. 380 с.
13. Зайцева А.Д. Рассеянное излучение в интегральном потоке ультрафиолетовой радиации // *Актинометрия и атмосферная оптика.* М.: Наука, 1964. С. 24–29.

Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск

Поступила в редакцию
7 июля 1997 г.

A.B. Beletsky, A.V. Mikhalev and M.A. Chernigovskaya. **Spectral Measurements of the Solar Ultraviolet Radiation during the Solar Eclipse on March 9, 1997.**

Results of spectral measurements of the solar ultraviolet radiation on the ground in the wavelength range 296–326 nm are presented for the period of the solar eclipse observed over Irkutsk on March 9, 1997. Variations in the spectral distribution of the recorded radiation as revealed during the eclipse are discussed. It is suggested that variations in spectra observed at the moments close to the maximum phase of the eclipse can be caused by the multiple scattering effect of the ultraviolet radiation.