

А.В. Михалев, М.А. Тацилин

Некоторые задачи солнечно-земной физики, связанные с образованием и динамикой атмосферного аэрозоля

Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

Поступила в редакцию 2.02.2007 г.

Рассматриваются некоторые задачи междисциплинарного характера по тематике солнечно-земной физики, связанные с образованием и динамикой атмосферного аэрозоля. В частности, обсуждаются: астроклимат и оптическая погода в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (Тункинская долина), выделение в излучении верхней атмосферы составляющей, обусловленной рассеянием солнечного излучения, влияние атмосферного аэрозоля на вариации ультрафиолетовой радиации, проверка гипотезы изменения внеатмосферного спектрального распределения солнечной радиации, влияние гелио-геофизических возмущений различной природы на оптические характеристики атмосферы.

Проект «Аэронет», организатором которого является американское космическое агентство (NASA), представляет собой автоматизированную сеть аэрозольных наблюдений, насчитывающую более 120 станций, расположенных на всех континентах планеты [1]. Наблюдения осуществляются с помощью солнечно-мультиспектрального фотометра SE-318, работающего в 8 спектральных каналах и измеряющего как прямое, так и рассеянное излучение Солнца.

Основные задачи проекта — это изучение воздействия аэрозоля на климат планеты, выявление особенностей пространственно-временных вариаций аэрозоля, а также подспутниковое обеспечение результатов космического зондирования природных ресурсов Земли. Основными параметрами, которые определяет солнечный фотометр, являются аэрозольная оптическая толщина (АОТ) и влагосодержание атмосферы. Благодаря применению современных методов решения обратных задач, кроме АОТ и влагосодержания атмосферы, восстанавливаются микроструктура аэрозоля, показатель преломления, индикатриса рассеяния, фактор асимметрии и альbedo однократного рассеяния аэрозоля [2].

В настоящей статье рассматриваются некоторые задачи солнечно-земной физики, прямо не относящиеся к проекту «Аэронет», но для решения которых могут привлекаться данные об атмосферном аэрозоле.

Одной из таких задач может стать учет влияния аэрозоля на приземную ультрафиолетовую радиацию (УФР). Наземные методы наблюдения УФР позволяют получить достоверные данные о потоке приземной УФР в локальных точках наблюдения. Фрагментарность получаемых данных вариаций УФР излучения приводит к необходимости использования различных методов их интерполяции, что существенно снижает их достоверность.

В настоящее время широко используется методика восстановления потоков УФР на уровне земной поверхности по данным спутниковых наблюдений при помощи аппаратуры TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer), что позволяет получать данные о пространственных вариациях УФР в различных участках земного шара. Существенным недостатком спутниковых данных TOMS можно считать неучет влияния тропосферного аэрозоля в алгоритме восстановления УФР.

В работе [3] обсуждается алгоритм определения потоков УФР в интервалах 320–400 и 290–320 нм при безоблачных условиях, включая оценки различных источников ошибок, который был применен к спутниковым данным TOMS. Установлено, что над определенными районами аэрозоли могут уменьшать приземные УФ-потоки более чем на 50%.

Валидация спутниковых данных по УФР путем сравнения с результатами наземных наблюдений [4, 5] выявила систематическую завышенность спутниковых данных в средних широтах северного полушария. В работе [6] делается вывод о том, что принятую оценку погрешности восстановления дневных доз УФР по данным TOMS ($\pm 12\%$) следует считать слишком оптимистической.

В [7] отмечается высокая корреляция между результатами наземных и спутниковых (TOMS) измерений УФР на длинных интервалах — месяц, год. Тем не менее существуют временные интервалы, когда в отдельные дни корреляция регистрируемых значений эритемной радиации нарушается. Это может быть связано как с методическими различиями в определении приземных уровней УФР при наземных и спутниковых измерениях, так и с неучетом влияния атмосферного аэрозоля на уровень приземного УФР по спутниковым данным.

В той же работе [7] была выделена асимметрия сезонного хода УФР относительно летнего солнцестояния, которая заключается в превышении значений УФР во втором полугодии по сравнению с первым при одинаковых угловых высотах Солнца. В работе предполагалось, что асимметрия обуславливается наличием выраженного сезонного хода общего содержания озона и метеорологическими особенностями региона. Если учесть тот факт, что наиболее чистой по содержанию аэрозоля является атмосфера в осенне-зимний период, что является типичным для большинства районов умеренных широт [2], можно предположить, что асимметрия, помимо приведенных факторов, обусловлена неучетом аэрозольной компоненты при восстановлении УФР.

Исследования пространственно-временных вариаций УФР в пяти городах (в том числе Иркутске и Томске) [8] выявили «весеннюю особенность» поведения УФР, заключающуюся в отклонении сезонного хода, определяемого угловой высотой Солнца. В работе [9, рисунки], связанной с исследованием УФР в Тибете, также выделена подобная «весенняя особенность».

На рис. 1 для г. Томска за 2003 г. приведены вариации УФР (по данным TOMS), АОТ, влагосодержания (по данным «Аэронет») и общего содержания озона (ОСО). Видно, что в период «весенней особенности» (апрель–май) временные масштабы изменений УФР, АОТ и ОСО совпадают. При этом одни характерные особенности на кривой изменения УФР могут быть сопоставлены с изменением ОСО, другие с изменением АОТ. Не исключено, что «весенняя особенность» сезонного хода УФР формируется под действием нескольких факторов и требует отдельного анализа, что выходит за рамки настоящей статьи.

В Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН один из видов регулярных наблюдений связан с исследованием собственного свечения верхней атмосферы. Для этого необходимо знание спектральной прозрачности атмосферы и других элементов астроклимата и оптической погоды. Учет рассеяния и поглощения собственного излучения верхней атмосферы в тропосфере Земли является достаточно трудной задачей. Так, в работе [10] теоретически решается задача о диффузном пропускании атмосферой излучения от сферического светящегося слоя и делается, в частности, вывод о том, что интенсивности свечения верхних слоев, полученные при различных прозрачностях, сильно отличаются друг от друга и для правильного учета атмосферного ослабления необходимо параллельно измерять интенсивность свечения и прозрачность атмосферы.

Влияние условий прозрачности атмосферы на регистрируемые характеристики собственного свечения атмосферы, как протяженного объекта, отличается от влияния на характеристики точечных астрономических объектов. Для астрономических инструментов основным параметром, ограничивающим возможности наблюдений, является энергетическое ослабление, которое может быть описано законом Бугера. Для протяженных объектов суммарная энергетиче-

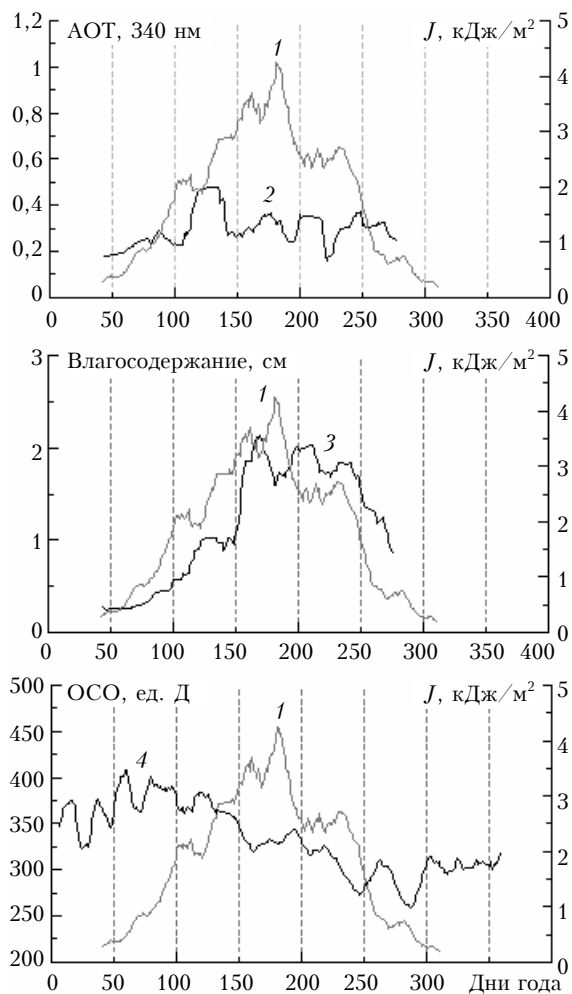


Рис. 1. Вариации УФР (1), АОТ на длине волны 340 нм (2), влагосодержания (3) и ОСО (4) в г. Томске за 2003 г.

ская освещенность от таких объектов на поверхности Земли складывается из прямой и рассеянной освещенности. При этом доля рассеянной освещенности возрастает с уменьшением прозрачности атмосферы и может становиться преобладающей, например в условиях сплошной облачности. Существенно то, что, в отличие от астрономических наблюдений, сигнал от собственного свечения верхней атмосферы может регистрироваться практически при любой оптической погоде.

В случае больших оптических толщ затухание оптического излучения следует определять из уравнения переноса излучения или из эмпирических соотношений. Так, в работе [11] регистрация среднеширотного сияния 30 октября 2003 г. в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН проводилась в условиях сплошной облачности. Это среднеширотное сияние было вызвано одной из самых мощных магнитных бурь за весь период инструментальных наблюдений в Геофизической обсерватории (1988–2006 гг.) и в связи с этим представляло особый интерес.

Реальный учет ослабления атмосферного излучения облачностью от протяженного источника представляет собой довольно сложную задачу, зависящую

от многих факторов. Поэтому на предварительном этапе для оценки величины ослабления облачностью и возможности приведения зарегистрированных интенсивностей свечения атмосферных эмиссий к условиям ясного неба и последующего их сопоставления с другими среднеширотными сияниями была проведена оценка типичного ослабления облачностью из экспериментальных наблюдений с использованием архива данных наблюдений. Были выбраны ночи, соответствующие этому же сезону, с быстрой сменой метеорологической обстановки (ясно—облачно). Для этих ночей были сопоставлены регистрируемые интенсивности в атмосферных эмиссиях для ясных и облачных интервалов наблюдений и соответственно определены коэффициенты ослабления облачностью. Полученные таким образом коэффициенты ослабления использовались далее для приведения зарегистрированных значений интенсивностей в условиях облачности к условиям, соответствующим ясному небу.

В связи с описанным случаем существует задача регистрации собственного излучения верхней атмосферы в условиях любой оптической погоды, для решения которой необходима большая информация о состоянии, составе атмосферы и пропускании атмосферой излучения верхних слоев. Частично эта задача может решаться с привлечением данных солнечного фотометра системы «Аэронет».

Существование аэрозольных образований на разных высотах атмосферы может влиять на спектральное распределение сумеречного и ночного свечения атмосферы за счет составляющей непрерывного фона, зависящего от состояния атмосферы и образующегося в результате многократно рассеянного солнечного света [12]. В случае выделения сплошного спектра собственного излучения верхней атмосферы учет составляющей непрерывного фона целесообразно проводить с учетом динамики аэрозольных образований и оптических характеристик нижней атмосферы. Особенно существенно многократно рассеянное излучение проявляется в синей и УФ-областях спектра.

Кроме того, собственно в возбуждение и вариации некоторых эмиссий верхней атмосферы в сумеречные периоды могут вносить вклад прямое излучение и рассеянное солнечное излучение [флуоресценция Na, фотодиссоциация молекул кислорода $O_2 + h\nu \rightarrow O(^3P) + O(^1D)$], на которые в ряде случаев влияет наличие или отсутствие аэрозольных составляющих в сумеречном секторе атмосферы. В этой связи интерпретация сумеречных вариаций эмиссий верхней атмосферы представляет собой достаточно трудную задачу.

В ряде работ отмечается и дискутируется связь прозрачности атмосферы с солнечной и авроральной активностью (см., например, [13, 14]). Физические механизмы таких связей в настоящее время до конца не ясны, требуют проверки совместно с систематическими данными о прозрачности атмосферы в различных регионах планеты и представляют большой научный интерес в связи с поиском возможных причин изменения погоды и климата. Так, на рис. 2, заим-

ствованном из работы [14], показано уменьшение среднего балла прозрачности атмосферы после возрастания авроральной активности.

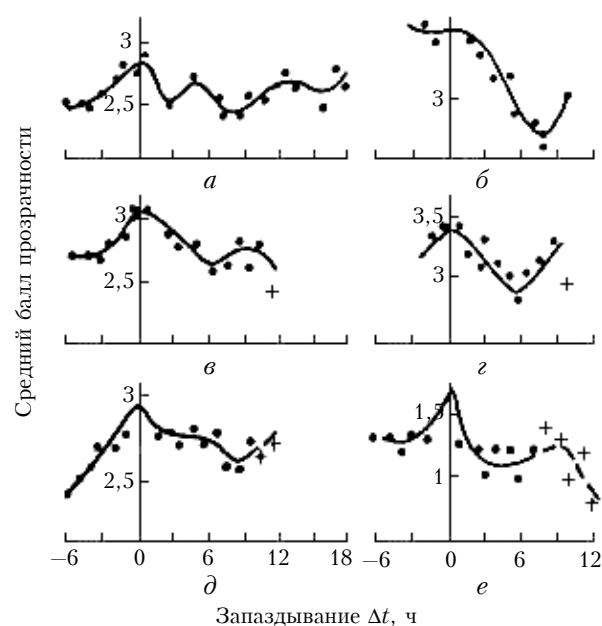


Рис. 2. Средние значения прозрачности атмосферы в различных пунктах наблюдений: *a* — о. Голомянный; *b* — о. Исаченко; *в* — Усть-Тарей; *г* — Кресты; *д* — Норильск; *е* — Игарка. Моменту времени $\Delta t = 0$ соответствует наблюдение, во время которого было отмечено сияние яркостью 3 балла и выше. Крестики соответствуют малой статистике количества измерений прозрачности атмосферы

Прозрачность атмосферы определялась визуально по предельной величине видимых звезд в шестибальной шкале (5 — отличная прозрачность, 0 — звезды не видны). Один из предлагаемых механизмов авторы связывают с изменением температурного режима тропосферы, конденсации паров воды и, как следствие, с уменьшением прозрачности атмосферы. Данные солнечного фотометра системы «Аэронет», осуществляющего одновременно измерение прозрачности и влагосодержания атмосферы, вероятно, могут позволить на большом статистическом материале проверить указанный механизм изменения прозрачности атмосферы в периоды усиления геомагнитной активности.

Также можно отметить задачу проверки гипотезы изменения внеатмосферного спектрального распределения солнечной радиации во время солнечных вспышек, высказанную в работе [15] и основанную на наблюдении «аномальных» значений оптических толщ в некоторых спектральных диапазонах. Иное объяснение нарушения оптических параметров толщи атмосферы во время солнечных событий дается в [16], оно связывается с изменением состава атмосферы. В любом случае задача об «аномальных» значениях оптических толщ (информация о которых периодически появляется в отдельных работах) и спектральной прозрачности атмосферы требует своего решения и, в частности, это возможно с привлечением данных системы «Аэронет».

Таким образом, предварительное рассмотрение отдельных задач показывает возможность использования данных наблюдений системы «Аэронет» для обеспечения некоторых видов наблюдений, проверки механизмов и гипотез наблюдаемых явлений по тематике солнечно-земной физики.

Работа выполнялась при поддержке комплексного интеграционного проекта СО РАН № 3.23.

1. *Интернет-ресурс*: <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>
2. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Панченко М.В., Полькин В.В., Холбен Б.Н., Смирнов А.В., Береснев С.А., Горда С.Ю., Корниенко Г.И., Николашкин С.И., Поддубный В.А., Тащилин М.А. Результаты мониторинга атмосферного аэрозоля в азиатской части России по программе AEROSIBNET в 2004 г. // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18. № 11. С. 968–975.
3. Krotkov N., Bhartia P., Herman J. Satellite estimation of spectral surface UV irradiance in the presence of tropospheric aerosols // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. N 8. P. 8779–8793.
4. DeLuisi J., Theisen D., Augustine J., Disterhoft P., Lantz K., Weatherhead E., Hodges G., Cornwall C., Petropavlovskikh I., Stevermer A., Wellman D., Barnett J. On the correspondence between surface UV observations and TOMS determinations of surface UV: a potential method for quality evaluating world surface UV observations // Ann. of Geophys. 2003. V. 46. N 2. P. 295–308.
5. Fioletov V., Kerr J., Wardle D., Krotkov N., Herman J. Comparison of Brewer UV irradiance measurements with TOMS satellite retrievals // Proc. SPIE. 2001. V. 4482. P. 47–55.
6. McKenzie R., Seckmeyer G., Bais A., Kerr J., Madronich S. Satellite retrievals of erythemal UV dose compared with ground-based measurements at northern and southern midlatitudes // J. Geophys. Res. D. 2001. V. 106. N 20. P. 24051–24062.
7. Михалев А.В., Тащилин М.А., Черниговская М.А., Шалин А.Ю. Эритемная ультрафиолетовая радиация по данным наземных и спутниковых измерений // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16. № 1. С. 63–67.
8. Черниговская М.А., Михалев А.В., Тащилин М.А. Многолетние вариации эритемной ультрафиолетовой радиации в регионах Сибири по данным спутниковых измерений // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18. № 12. С. 1095–1103.
9. Ren P.B.C., Gjessing Y., Sigernes F. Measurements of solar ultraviolet on the Tibetan Plateau and comparisons with discrete ordinate method simulations // J. Atmos. and Terr. Phys. 1999. V. 61. P. 425–446.
10. Гаврилова Л.А. О диффузном пропускании атмосферой ночного излучения верхних слоев // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1987. Т. 23. № 10. С. 1098–1101.
11. Михалев А.В., Белецкий А.Б., Костылева Н.В., Черниговская М.А. Среднеширотные сияния на юге Восточной Сибири во время больших геомагнитных бурь 29–31 октября и 20–21 ноября 2003 г. // Космич. исслед. 2004. Т. 42. № 6. С. 616–621.
12. Фишкова Л.М. Ночное излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли. Тбилиси: Мецниереба, 1983. 272 с.
13. Ролдугин В.К., Старков Г.В. Изменение прозрачности атмосферы в 11-летнем цикле солнечной активности // Докл. РАН. 2000. Т. 370. № 5. С. 676–677.
14. Горелый К.И., Надубович Ю.А. Связь прозрачности атмосферы с авроральной активностью // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. 1984. № 70. С. 61–65.
15. Кондратьев К.Я., Никольский Г.А. Солнечная активность и климат. 2. Прямое воздействие изменений внеатмосферного спектрального распределения солнечной радиации // Исслед. Земли из космоса. 1995. № 6. С. 3–17.
16. Макарова Е.А., Харитонов А.В., Казачевская Т.В. Поток солнечного излучения. М.: Наука, 1991. 400 с.

A.V. Mikhalev, M.A. Tashchilin. Some problems of solar-terrestrial physics connected with formation and dynamics of the atmospheric aerosol.

Some problems of solar-terrestrial physics of interdisciplinary character connected with formation and dynamics of the atmospheric aerosol are treated. In particular, the problems of astroclimate and optical weather being under solving in the geophysical observatory of the ISTP SB RAS (Tunkinskaya valley), distinguishing a component in the upper atmosphere radiation, which is stipulated by the solar radiation scattering; effect of atmospheric aerosol on UV radiation variations; checking the hypothesis on variation of extra-atmospheric spectral distribution of the solar radiation; estimating the influence of the heliogeophysical disturbances of different nature on optical characteristics of the atmosphere.