

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

О.С. Угольников

POLARIZATION INVESTIGATIONS OF THE EARTH'S ATMOSPHERE

O.S. Ugolnikov

В докладе рассказывается о проблемах и методах атмосферной оптики – науки, стоящей на стыке геофизики и астрономии. Приводится общая классификация разделов атмосферной оптики и описание каждого из них. Особый акцент ставится на исследовании состава атмосферы на основе поляризационных измерений рассеяния излучения в ее различных слоях. Дается качественное и количественное объяснение различных атмосферных явлений.

The paper describes the problems and methods of atmospheric optics – the question on the border of geophysics and astronomy. The general classification of atmosphere optics is made, each part is described. The main focus of the paper is the investigation of the atmosphere using polarization measurements of scattered emission in the different layers. The qualitative and quantitative explanation of different atmospheric phenomena is given.

Введение

Атмосферная оптика как самостоятельная область науки возникла достаточно давно. Как и для многих других областей науки, в ее основе стояли два вопроса, которые всякий раз возникают при наблюдении какого-либо эффекта или явления, природа которого неизвестна. Первый вопрос можно по-простому сформулировать как «что мы видим?», т. е., какова природа явления. Второй вопрос, возникающий чуть позже, – «что нового об окружающем нас мире мы можем узнать, наблюдая это явление?», или какие именно наблюдения мы должны проводить для того, чтобы после раскрытия природы явления максимально расширить информацию об его источниках, и до каких пределов это удастся сделать.

Основным наблюдаемым явлением, поставившим эти вопросы перед учеными, был яркий фон дневного и сумеречного неба. С улучшением условий наблюдения и прозрачности атмосферы сюда же входил и фон ночного неба. Вопрос о природе фона неба интересовал арабских ученых еще на рубеже первого и второго тысячелетия, однако он не был разрешен в течение многих веков. Лишь в XIX веке, с открытием явления рассеяния света, удалось ответить на этот вопрос. Многообразие оптических явлений, наблюдаемых на небе, особенно во время сумерек, указывало на сложность строения атмосферы и широкие возможности по ее исследованию на различных высотах. Исследование ночного неба еще более расширило круг затрагиваемых вопросов, теперь уже для верхних слоев атмосферы.

В XX веке круг проблем, в решении которых важная (или даже определяющая) роль была отведена атмосферной оптике, охватывал вопросы атмосферного аэрозоля, малых газовых примесей, в том числе озона, температурного распределения и состава верхней атмосферы, механизмов образования эмиссии ночного неба, слоев натрия и калия, серебристых облаков. Для решения указанных задач необходимо использовать спектральные и поляризационные данные, существенно увеличивающие объем информации. Поляризационные измерения особенно эффективны для исследований рассеяния света в атмосфере и самих рассеивающих компонент, в том числе аэрозоля. Этому вопросу посвящена большая часть настоящей лекции.

Разделы атмосферной оптики

Само понятие «атмосферная оптика» указывает на то, что данная наука предполагает теоретический или экспериментальный анализ излучения, происходящего от атмосферы Земли. В данном обзоре мы ограничимся видимой областью и прилежащим к ней диапазоном электромагнитного спектра. Будучи достаточно холодной, атмосфера практически не излучает в этой области самостоятельно. Исключения составляют лишь эмиссии ночного неба, изучение которых можно выделить в первый раздел атмосферной оптики.

Сильнее всего собственное излучение атмосферы Земли проявляет себя в виде полярных сияний. Спектр полярных сияний состоит из ряда линий, главными из которых являются линия нейтрального атомарного кислорода 557.7 нм и триплет этого же элемента 630.0, 636.3 и 639.2 нм, преобладание которых придает полярному сиянию соответственно зеленый или красный цвет (третья линия в триплете достаточно слабая, и он фактически наблюдается как дублет). Все эти линии запрещенные и могут образовываться только в разреженной среде, что имеет место в верхней атмосфере. Источником возбуждения линий полярного сияния являются энергичные частицы солнечного ветра, влетающие в магнитосферу Земли и достигающие атмосферы вблизи магнитных полюсов нашей планеты. Исследования полярных сияний позволяют изучить физические условия в верхней атмосфере Земли и в ее магнитосфере. В настоящее время проводятся измерения эмиссии ночного неба не только в естественных полярных сияниях, но и создаются «искусственные» сияния путем нагрева электронного газа верхней атмосферы мощным высокочастотным излучением с Земли [1].

Существует и другой механизм возбуждения эмиссионных линий ночного неба. Этот механизм во многом противоположен полярным сияниям: он работает в основном в тропическом поясе Земли (поэтому данное излучение иногда называют «тропическими полярными сияниями»), а энергия поступает от источников в нижних слоях атмосферы – мощных тропических циклонов. Акустико-гравитационные волны распространяются в верхние разреженные слои атмосферы, где их амплитуда существенно

увеличивается. В это время наблюдается повышенная интенсивность эмиссий ночного неба в линии кислорода 557.7 нм, желтом дублете натрия (589.0 и 589.6 нм), а также в полосах гидроксила ОН в ближней инфракрасной области спектра. Фон неба в этих линиях часто имеет четкую волнообразную структуру [2]. Высоты слоев ОН, Na и O оказались равными 85, 90 и 95 км, что близко к высоте последнего температурного минимума в атмосфере. Измерения параметров волн дают возможность локализовать их источник в тропосфере, исследовать механизм их переноса. Более того, акустико-гравитационные волны и наблюдаемая волновая структура эмиссии ночного неба могут служить предвестниками атмосферных тайфунов и, возможно, землетрясений, что существенно увеличивает интерес к данному разделу атмосферной оптики.

Запрещенные линии атомарного кислорода являются наиболее удобными для наблюдений, так как они достаточно ярки и легко выделяются в спектре фона неба как во время полярных сияний или повышенной волновой активности, так и в «спокойном» состоянии фона. Другие составляющие фона ночного неба этих линий не содержат. Проведение наблюдений в линиях натрия может быть затруднено наличием этих же линий в спектре засветки неба от крупных городов, а также (уже как линий поглощения) в спектре Солнца и, следовательно, компонент фона ночного неба, связанных с рассеянием солнечного излучения. Наблюдения в линиях гидроксила обычно проводят в широких спектральных полосах в ближней инфракрасной области, при этом необходимо учитывать излучение фона неба в континууме.

Все остальные темы атмосферной оптики предполагают анализ излучения, рассеянного или поглощенного в атмосфере, для чего необходим внешний источник света. Отнесем ко второму разделу атмосферной оптики вопросы и методы, при которых используется искусственный источник излучения. Здесь особое внимание нужно уделить лидарному зондированию атмосферы (LIDAR – Light Detection And Ranging). В ходе лидарного эксперимента лазерный луч направляется в атмосферу вертикально или под некоторым углом, а приемник регистрирует возвращающееся обратно рассеянное излучение. Так как время прихода рассеянного излучения зависит от его высоты, с помощью лидара можно восстанавливать высотное распределение коэффициента обратного рассеяния и температурное распределение в атмосфере. Выбирая нужным образом длину волны, на которой работает лидар, можно исследовать аэрозольное рассеяние в континууме или резонансное рассеяние отдельных атмосферных компонент (например, атомарного натрия и калия). В настоящее время лидарное зондирование является основным методом исследования мезосферы.

Точность лидарных измерений концентрации аэрозоля можно значительно улучшить, используя так называемый кросс-поляризационный лидар, и это первый, но далеко не единственный пример эффективности поляризационных измерений в атмосферной оптике. Суть кросс-поляризационной методики состоит в том, что молекулярное (рэлеевское)

рассеяние обладает хорошо известными поляризационными свойствами. В частности, фон обратного рассеяния линейно поляризованного излучения будет также линейно поляризован, причем в той же плоскости. Если луч лазера будет линейно поляризованным, а рассеянный сигнал принимается в плоскости поляризации, перпендикулярной плоскости поляризации лазерного излучения, то вклад молекулярного рассеяния в этот сигнал уменьшится практически до нуля, выделяя менее поляризованное аэрозольное рассеяние. Измерения высотного аэрозольного распределения обычно показывают существенное увеличение коэффициента рассеяния (по отношению к молекулярному рассеянию) в тропосфере и мезосфере – области температурного минимума и серебристых облаков.

Одной из главных проблем лидарного метода зондирования атмосферы, как и всех других методов, связанных с измерением рассеянного излучения, является необходимость учета многократного рассеяния света в атмосфере. Эта проблема встает наиболее остро для кросс-поляризационного лидара, так как многократно рассеянное излучение поляризовано слабее, чем однократно рассеянное, и кросс-поляризационный фильтр будет задерживать его в существенно меньшей степени, чем фон однократно молекулярного рассеяния.

Третий раздел атмосферной оптики связан с анализом поглощения и рассеяния в атмосфере излучения внешних естественных источников, прежде всего Солнца (хотя в этой роли могут выступать Луна и даже яркие звезды и планеты). Рассеяние солнечного излучения в атмосфере формирует фон дневного и сумеречного неба, характеристики которого существенно зависят от состояния атмосферы – концентрации, высотного распределения и рассеивающих свойств аэрозоля, содержания малых атмосферных примесей, имеющих полосы поглощения в видимой области спектра (прежде всего, озона и водяного пара). Фон ночного неба также во многом определяется рассеянием солнечного света, только уже не в атмосфере, а в межпланетном пространстве, эта компонента ночного неба известна как зодиакальный свет. Однако рассмотрение этого явления уже выходит за пределы атмосферной оптики, и мы обратим особое внимание на процессы рассеяния солнечного света именно в атмосфере, происходящие днем и во время сумерек.

Анализ дневного и сумеречного неба

Дневное и сумеречное небо, при всей своей визуальной схожести, имеют существенно разную геометрию образования и, вообще говоря, определяются разными атмосферными факторами. Для того чтобы разобраться в этом вопросе, опишем основные рассеивающие компоненты атмосферы и их свойства. Мы уже немного касались их при описании лидарного метода исследования атмосферы.

Первая и главная рассеивающая компонента – газовая составляющая, формирующая молекулярное рассеяние. Свойства этого процесса хорошо известны. Коэффициент молекулярного рассеяния обратно пропорционален четвертой степени длины волны, и

коротковолновое излучение рассеивается в атмосфере значительно сильнее, что и объясняет голубой цвет ясного дневного неба (в сумерки цвет неба ведет себя достаточно сложным образом и определяется сразу несколькими факторами, но об этом чуть позже). Фон молекулярного рассеяния достаточно сильно поляризован, о чем уже говорилось выше. Но, в отличие от источника в кросс-поляризационном лидаре, солнечное излучение неполяризовано. В этом случае излучение, рассеянное вперед и назад, будет также неполяризовано, а вот при рассеянии под прямым углом степень поляризации достигает почти единицы, точнее 94 % для земного воздуха. Плоскость поляризации перпендикулярна плоскости рассеяния, т. е. плоскости, в которой лежат прямой и рассеянный луч. При этом коэффициент рассеяния атмосферы под углом в 90° примерно вдвое меньше, чем коэффициент рассеяния вперед или назад. Таким образом, если рассматривать рассеяние солнечного излучения в двух взаимно перпендикулярных плоскостях поляризации (перпендикулярной и параллельной плоскости рассеяния) как независимые процессы, то первый из них будет изотропным, а второй будет происходить преимущественно вперед и назад.

Однако рассеяние солнечного излучения происходит также на аэрозольных частицах, чей размер сравним или превышает длину волны видимого излучения. Здесь характер рассеяния будет существенно отличаться. Появится анизотропия рассеяния: большая часть излучения будет рассеиваться под малыми углами в направлении, близком к направлению падающего излучения. Аэрозольное рассеяние отличается от молекулярного и своими спектральными характеристиками – коэффициент рассеяния хоть и будет возрастать в коротковолновой области, но значительно медленнее, чем для молекулярного рассеяния. Именно поэтому при сильной запыленности атмосферы вокруг Солнца появляется яркий ореол, а цвет неба вместо голубого становится белесым.

Поляризационные свойства аэрозольного рассеяния отличаются от молекулярного рассеяния значительно меньшей поляризацией при рассеянии под углом 90° . Лабораторные измерения различных образцов вулканической пыли [3] показали, что в видимой области спектра поляризация составляет 15–20 %. Естественно, что в запыленной атмосфере поляризация фона неба будет существенно ослабляться. Поляризационные измерения фона на разных угловых расстояниях от Солнца (то есть для разных углов рассеяния) могут дать информацию о свойствах рассеивающего вещества, содержании и типе атмосферного аэрозоля.

Однако при подобном анализе мы столкнемся с проблемой, о которой уже говорилось при описании лидарного метода. Атмосфера Земли имеет значительную оптическую толщину, и фон неба представлен не только однократным, но и многократным рассеянием света. Особенно серьезной эта проблема будет при анализе неба в период сумерек, когда солнечные лучи проходят большой путь сквозь атмосферу над поверхностью Земли. Поляризация многократно рассеянного излучения будет опреде-

ляться распределением яркости по всему небесному своду и будет также существенно меньше, чем в случае однократного молекулярного рассеяния. Спектральный состав многократного рассеяния заранее неизвестен. С одной стороны, большее количество актов рассеяния должно приводить к избытку в коротковолновой области, но, с другой стороны, там увеличивается и поглощение излучения, проходящего между актами рассеяния длинный путь в атмосфере.

Днем, при большой высоте Солнца над горизонтом, относительный вклад многократного рассеяния не очень велик, но поляризация фона неба даже в 90° от Солнца неполная. Это связано с тем, что фон неба образуется в основном рассеянием солнечных лучей в нижних плотных слоях атмосферы, которые содержат много аэрозоля. Анализ распределения яркости и поляризации фона дневного неба может дать достаточно качественную информацию об оптических свойствах атмосферы, но только лишь в ее приземных слоях [4].

По мере того как Солнце опускается к горизонту, оптическая толщина атмосферы на пути его лучей увеличивается и приземные слои атмосферы освещаются слабее. В некоторый момент времени рассеяние прямого солнечного излучения в приземном слое уже перестает быть определяющим для формирования фона неба. Более высокие слои тропосферы, несмотря на свою меньшую плотность, рассеивают больше солнечного света из-за меньшего поглощения солнечных лучей в этих слоях. В отличие от астрономического понятия сумерек, начинающихся с заходом Солнца, исследователи атмосферы считают окончанием дня и началом сумерек именно момент отрыва слоя эффективного рассеяния света (его еще называют «сумеречным слоем») от поверхности Земли. Этот момент зависит от длины волны и положения точки наблюдения на небе. В зените для желто-зеленой области спектра это происходит при высоте Солнца над горизонтом около $5\text{--}6^\circ$. После этого фон неба эволюционирует по «сумеречным» законам, быстро уменьшая свою яркость. В коротковолновой области спектра, где поглощение света сильнее, сумерки начинаются еще раньше и яркость неба убывает быстрее. Это приводит к изменению цвета неба, которое к заходу Солнца превращается из насыщенно-голубого в бледно-голубое. В отсутствие атмосферного озона, имеющего полосы поглощения в желто-зеленой области спектра, сумеречное небо вообще теряло бы голубой оттенок. Покраснение неба продолжается и после захода Солнца вплоть до его погружения под горизонт на $4\text{--}5^\circ$ (зенитного расстояния $94\text{--}95^\circ$).

С заходом Солнца сумеречный слой поднимается все выше над наблюдателем и, измеряя характеристики фона неба в разные периоды сумерек, мы фактически исследуем разные слои атмосферы. Именно этим сумеречное небо отличается от дневного. Возможность исследовать атмосферу на разных высотах привлекала внимание большого количества ученых к сумеречному методу.

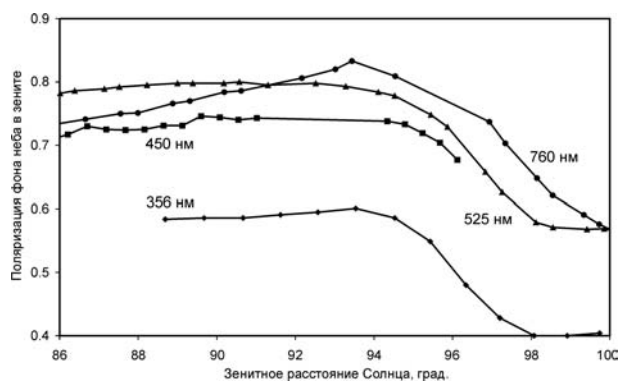
В то же время вклад многократного рассеяния в фон неба во время сумерек, значительно больший,

чем днем, оставался основной проблемой этого метода, существенно ограничивая его точность и высотный диапазон применимости. Самые разнообразные методы оценки вклада многократного рассеяния, делавшиеся в XX веке, вызвали весьма жесткую полемику [5]. Сделать существенный шаг вперед в этом вопросе удалось только в последние десятилетия с появлением мощной вычислительной техники.

Разделить фон сумеречного неба на его отдельные составляющие, выделить многократное рассеяние и рассеяние на аэрозольных частицах помогают данные о поляризации сумеречного неба, так как эта характеристика весьма чувствительна к изменениям вклада различных компонент в фон неба. На рисунке показаны зависимости степени поляризации фона сумеречного неба от зенитного расстояния Солнца для четырех длин волн. Первое, что обращает на себя внимание, – уменьшение поляризации в коротковолновой области спектра. Как было показано, оно связано с увеличением вклада многократного рассеяния, превышающего в фиолетовой области спектра 50 % даже в светлые сумерки [6]. С увеличением вклада многократного рассеяния связано и уменьшение поляризации неба в темные сумерки при зенитных расстояниях Солнца более 95°. Преобладание коротковолнового излучения в многократно рассеянном фоне приводит к тому, что постепенное покраснение сумеречного неба в это время сменяется достаточно быстрым посинением, и в темные сумерки цвет ясного неба оказывается еще более синим, чем днем.

Все описанные эффекты никак не связаны с атмосферным аэрозолем, хотя подобные предположения часто делались многими исследователями атмосферы в XX веке, что иногда приводило их к совершенно необычным свойствам гипотетических аэрозольных частиц. Данная компонента фона атмосферы, самая важная и интересная для исследований, проявляет себя лишь уменьшением поляризации в светлые сумерки, заметным только для длинноволнового излучения (760 нм на рисунке) и изредка, при не очень хорошей прозрачности атмосферы, в желто-зеленой области спектра. В красных лучах поглощение света минимальное и сумеречный слой располагается достаточно низко. Мы регистрируем аэрозольное рассеяние только на небольших высотах в тропосфере. Его следы исчезают при погружении Солнца под горизонт на 3° на длине волны 760 нм, т. е. при эффективной высоте сумеречного слоя около 18 км и высоте его нижней границы примерно 10 км. Этот же результат получается из совершенно иных по своему характеру исследований [7, 8].

Содержание аэрозоля в атмосфере, как и порождаемое им понижение поляризации в красной области спектра в светлые сумерки, в отличие от других эффектов, подвержены сильным вариациям существенно изменяются от сумерек к сумеркам. В отдельные дни с хорошей прозрачностью атмосферы вклад аэрозольного рассеяния в яркость сумеречного неба в зените в момент восхода Солнца не превышал 10 % на длине волны 760 нм, в другие же дни при вроде бы ясном небе он достигал 40–50 %. Наблюдательные данные



Поляризация фона сумеречного неба в зените в зависимости от зенитного расстояния Солнца для разных длин волн.

позволили оценить и поляризацию аэрозольного рассеяния под прямым углом (именно такая ситуация реализуется в зените в светлые сумерки), которая составила примерно 20 %, в согласии с [3].

Таким образом, поляризационные измерения сумеречного неба позволяют определить параметры аэрозольного рассеяния, вклад многократного рассеяния, причем результаты оказываются в хорошем согласии с данными численного моделирования [9]. Полученные соотношения, кроме всего прочего, объясняют цветовые явления, происходящие во время сумерек, в том числе «пояс Венеры» – разноцветные горизонтальные полосы, появляющиеся с противоположной Солнцу стороны неба.

Однако этим возможности сумеречного метода исследования атмосферы (и вообще анализа взаимодействия атмосферы с излучением Солнца) не исчерпываются. В последние десятилетия XX века начались активные спектральные исследования сумеречного неба с целью измерения содержания в атмосфере малых газовых примесей. Слабые спектральные линии поглощения этих газов практически незаметны в спектре прямого солнечного излучения, проходящего через атмосферу в вертикальном направлении. А во время сумерек, когда излучение Солнца проходит длинный путь через плотные слои атмосферы, поглощение в спектральных линиях может стать ощутимым. Широкие полосы поглощения озона в желто-зеленой области спектра (полосы Шапюи), ослабляющие вертикальное излучение всего на 4–5 %, во время сумерек становятся настолько заметными, что существенно изменяют цвет неба, возвращая ему уже было потерянный из-за описанных выше причин голубой оттенок.

В настоящее время разработана методика DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) [10], с помощью которой в спектре фона неба выделяются полосы поглощения озона, окисей азота, хлора, брома и многих других атмосферных примесей. Данные исследования являются важной составляющей экологического контроля атмосферы Земли. К этому необходимо добавить, что высота над земной поверхностью, на которой проходят лучи Солнца, создающие сумеречный фон неба, зависит от длины волны и периода сумерек, поэтому подобные измерения позволяют судить не только о полном содержании той или иной примеси в атмосфере, но и об ее высотном распределении.

Еще более высокой точности и вертикального разрешения можно достичь, наблюдая спектр Солнца или другого источника вблизи края Земли со спутника на околоземной орбите. Кроме этих преимуществ, космический эксперимент позволит охватить большую площадь атмосферы над поверхностью Земли, так как спутник обращается вокруг нашей планеты по орбите, положение которой относительно поверхности Земли изменяется за счет осевого вращения планеты. В настоящее время подобные измерения проводятся в рамках немецко-голландско-бельгийского проекта SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartographY) [11]. Измерить поглощение касательных лучей Солнца на различных высотах в атмосфере можно и другими, в том числе и наземными, способами [8].

Заключение

Атмосфера Земли – очень сложная система, еще во многом не изученная. В настоящее время, с усилением антропогенного воздействия на нашу газовую оболочку и последовавшими за этим климатическими изменениями, исследования всех слоев атмосферы стали особенно важными. И одна из ведущих ролей в этом отведена оптическим исследованиям, так как взаимодействие атмосферы с излучением весьма разнообразно и количество информации, которое могут дать оптические измерения, очень велико. Являясь фактически единственным средством атмосферных исследований (кроме приземного слоя) до появления ракетной техники, атмосферная оптика и сейчас не потеряла свою актуальность, активно используя современные технические достижения.

Работа проведена при поддержке Фонда содействия отечественной науке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Holma H., Kaila K.U., Kosch M.J., Rietveld M.T. Recognizing the blue emission in artificial aurora // *Adv. Space Res.* 2006 (in press).
2. Taylor M.J., Hapgood M.A., Rothwell P. Observations of Gravity Wave Propagation in the OI (557.7 nm), Na (589.2 nm) and the Near Infrared OH Nightglow Emissions // *Planet. Space Sci.* 1987. V. 35. P. 413–427.
3. Volten H., Munoz O., Waters R., et al. Online Database of Scattering Matrices of Irregular Particles // Abstracts of NATO Advanced Study Institute on Photopolarimetry and Remote Sensing and Workshop on Remote Sensing Techniques and Instrumentation: International Cooperation. Army Research Laboratory. 2003. P. 103. <http://www.astro.uva.nl/scatter>.
4. Пясковская-Фесенкова Е.В. Исследование рассеяния света в земной атмосфере. М.: АН СССР, 1957.
5. Розенберг Г.В. Сумерки. М.: Физико-математическая литература, 1963.
6. Угольников О.С., Маслов И.А. Многоцветная поляриметрия сумеречного неба. Роль многократного рассеяния света как функция длины волны // *Космические исследования.* 2002. Т. 40, № 3. С. 242–251.
7. Угольников О.С. Определение параметров рассеяния света в земной атмосфере по фотометрическим наблюдениям сумеречного неба // Там же. 1998. Т. 36, № 4. С. 458–464.
8. Угольников О.С., Маслов И.А. Дистанционное зондирование атмосферы на основе фотометрии лунных затмений // Сборник трудов Байкальской школы по фундаментальной физике. Иркутск, 2006.
9. Ugolnikov O.S., Postlyakov O.V., Maslov I.A. Effects of Multiple Scattering and Atmospheric Aerosol on the Polarization of the Twilight Sky // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer.* 2004. V. 88. P. 233–241.
10. Perner D., Platt U. Detection of Nitrious Acid in the Atmosphere by Differential Optical Absorption // *J. Geophys. Res.* 1979. V. 6. P. 917–920.
11. Noel S., Burrows J.P., Bovensmann H., et al. Atmospheric trace gas sounding with SCIAMACHY // *Adv. Space Res.* 2002. V. 29. P. 1819–1824.

*Институт космических исследований РАН, Москва,
ugol@tanatos.asc.rssi.ru*