

## Поляризационные измерения сумеречного неба: исследования атмосферного аэрозоля от тропосферы до мезосферы

О.С. Угольников, И.А. Маслов\*

*Институт космических исследований РАН  
117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 84/32*

Поступила в редакцию 9.08.2008 г.

Описываются результаты поляризационных измерений фона сумеречного неба, проводимых в Крымской лаборатории Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга МГУ. Указываются основные закономерности поведения величины поляризации фона сумеречного неба в зените в зависимости от погружения Солнца за горизонт на длинах волн 513–525 нм, а также влияние атмосферного аэрозоля на различных высотах на эти зависимости. Подробно рассматриваются эффекты повышенного аэрозольного рассеяния в стратосфере в декабре 2006 и январе 2008 г.

*Ключевые слова:* поляризационные измерения, атмосферный аэрозоль, сумерки, аэрозольное рассеяние, извержение вулканов.

### Введение

Сумеречный метод исследования различных слоев земной атмосферы привлекал внимание ученых начиная с XIX в. Первая детальная теория явления сумерек была опубликована в России в начале XX в. [1]. В то время исследования сумеречного неба, по сути, были единственной возможностью удаленного зондирования отдельных, в том числе высоких, слоев атмосферы. Эта возможность обеспечивалась быстрым увеличением высоты границы земной тени и эффективной высоты однократного рассеяния, связанным с погружением Солнца за горизонт. Высота эффективного рассеяния также зависит от длины волны, увеличиваясь от красных лучей к синим, что расширяет возможности метода. К 60-м гг. XX в. была накоплена значительная база теоретических и экспериментальных исследований, обзор которых содержится в монографии [2].

В этой же монографии указана основная проблема метода сумеречного зондирования, ухудшающая точность результатов и снижающая верхнюю границу диапазона исследуемых высот, — многократное рассеяние солнечного излучения, прежде всего в нижних слоях атмосферы. Построение численной модели многократного рассеяния оставалось неосуществимой задачей вплоть до конца XX в., а приближенные экспериментальные и теоретические методы оценки вклада многократного рассеяния, описанные в [2], приводили к сильно различающимся

результатам и становились поводом оживленной полемики.

Возможности сумеречного зондирования атмосферы существенно расширяются, если проводить поляризационные измерения фона неба. Поляризационный анализ может быть эффективно использован для определения вклада многократного рассеяния [3]. Данный метод был развит в работах [4, 5], результатом которых было построение зависимости вклада многократного рассеяния от погружения Солнца под горизонт и длины волны. В светлые сумерки, при зенитном расстоянии Солнца от 90 до 94°, многократное рассеяние составляет 0,3–0,4 от яркости неба вблизи зенита на длинах волн от 450 до 600 нм, увеличиваясь до 0,6 в фиолетовой области спектра (360 нм). На длинах волн больше 600 нм эта величина сильно зависит от содержания тропосферного аэрозоля. Вклад многократного рассеяния мало меняется в период светлых сумерек, далее он быстро возрастает, практически достигая единицы при зенитном расстоянии Солнца 99°. Результаты оказались в хорошем согласии с данными численного моделирования с учетом стандартных моделей тропосферного аэрозоля [6] и объясняли ряд цветовых и поляризационных явлений, происходящих по мере погружения Солнца под горизонт.

Поляризационные измерения фона сумеречного неба эффективны также для выделения и исследования свойств аэрозольного рассеяния. В зависимости от фазы сумерек объектом исследований может быть тропосферный, стратосферный и мезосферный аэрозоли. В отличие от лидарного зондирования атмосферы сумеречный метод не обладает хорошим высотным разрешением, оно ограничено

\* Олег Станиславович Угольников (ougolnikov@gmail.com); Игорь Алексеевич Маслов (imaslov@iki.rssi.ru).

толщиной слоя, в котором происходит эффективное однократное рассеяние (порядка 10 км). Но при этом сумеречный метод позволяет определить поляризационную функцию рассеяния аэрозольных частиц в диапазоне углов, ограниченном только полем зрения приемной аппаратуры. Эта функция связана с микрофизическими свойствами аэрозольных частиц.

В настоящей статье анализируется влияние аэрозольного рассеяния на различных высотах на поляризационные свойства сумеречного неба. Особое внимание будет уделено вулканическому и полярному стратосферному аэрозолям.

## 1. Наблюдения

Поляризационные измерения сумеречного неба проводятся в Крымской лаборатории Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга МГУ начиная с 2000 г. Основу измерительной аппаратуры составляет ПЗС-матрица SBIG ST-6 с широкоугольным объективом и вращающимся поляризационным фильтром. Наблюдения проводились в разных спектральных полосах с эффективными длинами волн от 360 до 760 нм. Большая часть измерений производилась в полосе с эффективной длиной волны 525 нм. Она близка к длине волны, на которой проводится лидарное зондирование атмосферы в сети CIS-LiNET [7] и для которой построена оптическая модель атмосферного аэрозоля в широком диапазоне высот [8]. Камера направляется в зенит, ее поле зрения составляет примерно  $8 \times 6^\circ$ . Этого поля зрения достаточно, чтобы определять не только интенсивность и поляризацию фона неба в зените, но и их производные величины по солнечному вертикалу. Наблюдения проводятся в течение всего периода сумерек, включая близлежащие дневные и ночные отрезки времени.

На рис. 1 показаны зависимости степени поляризации фона сумеречного неба в зените  $p$  от зенитного расстояния Солнца  $z$  на длине волны 525 нм для ряда безлунных сумерек в различные сезоны,

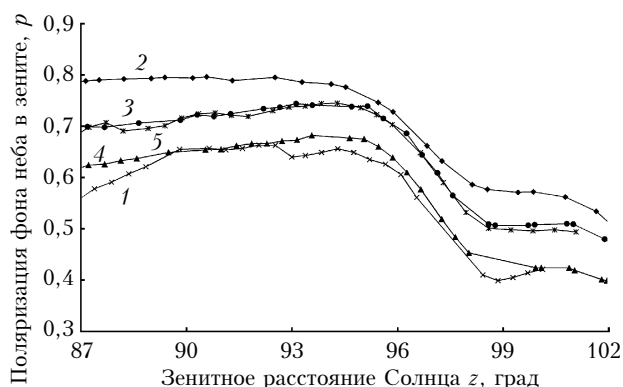


Рис. 1. Зависимость поляризации фона сумеречного неба в зените от зенитного расстояния Солнца для безлунных сумерек в различные сезоны и годы на длине волны 525 нм (1 — вечер 30 июля 2000; 2 — утро 11 декабря 2002; 3 — вечер 13 мая 2007; 4 — вечер 2 июля 2007; 5 — утро 14 мая 2008, 513 нм)

характеризующиеся фоновым уровнем стратосферного аэрозоля.

Видно, что данная зависимость имеет два характерных плато на интервалах зенитных расстояний Солнца  $91-94^\circ$  и  $98-101^\circ$ . Как было указано в [9], первое плато соответствует периоду постоянного отношения вкладов однократного и многократного рассеяния, а второе — периоду полного доминирования многократного рассеяния в фоне сумеречного неба. Вся зависимость  $p(z)$  является отображением изменения вклада многократного рассеяния в фоне сумеречного неба, и лишь в самые светлые сумерки (при  $z < 91^\circ$ ) заметно уменьшение поляризации фона неба, связанное с однократным рассеянием на частицах тропосферного аэрозоля.

Последний эффект значительно лучше заметен на длине волны 760 нм и использовался в работе [10] для выделения и исследования свойств тропосферного аэрозольного рассеяния, в результате чего были получены значение степени поляризации аэрозольного рассеяния под углом  $90^\circ$ , равное 0,2, и характерная высота верхней границы тропосферного аэрозольного слоя (около 15 км).

Хотя кривые на рис. 1 и относятся к разным сезонам, они имеют схожую форму и фактически сдвинуты друг относительно друга как единое целое. Вариации поляризации фона сумеречного неба в целом одинаковы как в светлые, так и в темные сумерки. Очевидно, что однократное рассеяние происходит в эти периоды в совершенно разных слоях атмосферы и не может быть причиной единых вариаций величины поляризации фона неба. Таким образом, эти вариации связаны с изменением поляризационных свойств многократно рассеянной компоненты, достаточно стабильных в течение одних конкретных сумерек при ясной погоде [4, 10].

Единый характер вариаций величины поляризации в разные периоды сумерек виден также на рис. 2, где приведено соотношение максимального значения поляризации в светлые сумерки  $p_L$  (зенитное расстояние Солнца  $91-94^\circ$ ) и ее среднего значения в темные сумерки  $p_D$  (зенитное расстояние Солнца  $98,5-100,5^\circ$ ) для всего имеющегося массива наблюдательных данных для длин волн 513–525 нм в разные сезоны 2000–2008 гг. Величина  $p_D$  получена для

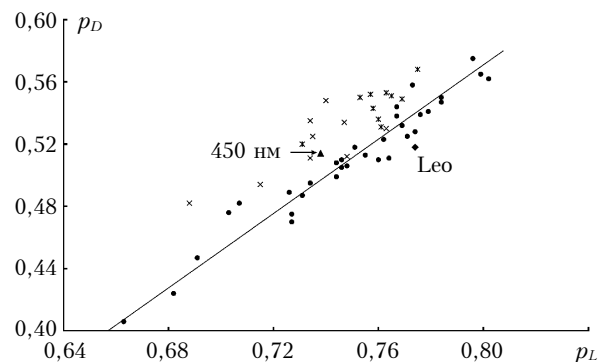


Рис. 2. Соотношение величин поляризации в светлые и темные сумерки ( $p_L$  и  $p_D$ ) для дней с фоновым содержанием стратосферного аэрозоля в 2000–2008 гг. (точки), а также зимой 2006/07 г. (крестики) и в январе 2008 г. (звездочки)

безлунных сумерек или для сумерек с небольшим вкладом рассеяния лунного света, вычитаемого на основе измерений ночного неба.

Видно, что все точки, соответствующие эпохе фонового стратосферного аэрозоля, достаточно близки к прямой линии, что указывает на четкую корреляцию двух значений поляризации. Точка, соответствующая длине волны 450 нм, также располагается близко к этой прямой. Линейная зависимость нарушается при еще меньших значениях длины волны, где заметно увеличивается вклад многократного рассеяния в светлые сумерки, и, напротив, при длинах волн больше 600 нм, где в этот же период еще заметно влияние однократного аэрозольного рассеяния в тропосфере.

Указанная выше закономерность может нарушаться и на длинах волн 500–600 нм, если в стратосфере или мезосфере увеличится концентрация аэрозоля. Мезосферный аэрозоль появляется, как правило, после максимумов мощных метеорных потоков [11]. Слой эффективного однократного рассеяния попадает в мезосферу перед периодом темных сумерек, когда само однократное рассеяние в случае чистой мезосферы уже практически исчезает на фоне многократного рассеяния.

Как видно из рис. 1 и 2, поляризация фона неба в темные сумерки  $p_D$  остается достаточно большой и мезосферное аэрозольное рассеяние может вызвать ее уменьшение. Подобный эффект был замечен в работе [9] для эпохи всплеска активности метеорного потока Леониды в 2002 г. Соответствующая точка обозначена «Leo» на рис. 2. Анализ, проведенный в работе [9], позволил установить наличие метеорной пыли на высоте более 90 км 21 ноября 2002 г., через 2 дня после максимума активности метеорного потока.

Появление стратосферного аэрозоля смещает точки на данной диаграмме в другую сторону, так как при этом уменьшается поляризация в период светлых сумерек  $p_L$ , когда эффективное рассеяние происходит в стратосфере. Данный случай подробно рассматривается в п. 2.

## 2. Эффекты стратосферного аэрозольного рассеяния

В настоящее время известно несколько механизмов появления аэрозольных частиц в стратосфере Земли. Для большей части территории нашей планеты основным источником стратосферного аэрозоля, определяющим его уровень большую часть времени, является вулканическая деятельность [12, 13]. При сильных извержениях вулканов в стратосферу попадает большое количество диоксида серы, который в ходе химических реакций образует серную кислоту и сульфатный аэрозоль. Сильнейшее за последние десятилетия извержение влк. Пинатубо в 1991 г. привело к многократному увеличению как стратосферного, так и интегрального уровня аэрозоля [14, 15]. В течение последующих лет наблюдалось существенное уменьшение поляризации фона неба в период светлых сумерек [16].

В полярной стратосфере возможно также образование перламутровых или полярных стратосферных облаков, играющих активную роль в химических процессах в стратосфере [17]. Появление полярных стратосферных облаков сказывается не только на поляризационных, но и на цветовых характеристиках сумеречного неба [18].

Первые годы XXI в. в пункте наблюдений характеризовались низким фоновым уровнем стратосферного аэрозоля, и поляризация сумеречного неба обладала свойствами, описанными выше. Существенное увеличение концентрации стратосферного аэрозоля впервые в ходе эксперимента было отмечено зимой 2006/07 г. Результаты измерений в данный период нанесены на диаграмму на рис. 2 (крестики), где они смещены влево относительно прямой, соответствующей фоновому уровню аэрозоля. Уменьшение величины поляризации в светлые сумерки  $p_L$  в декабре 2006 г. хорошо видно на рис. 3, где показаны зависимости поляризации фона неба в зените от зенитного расстояния Солнца и эффективной высоты однократного рассеяния для четырех безлунных сумерек декабря 2006 г. в сравнении с сумерками того же периода в 2002 г. При сходных характеристиках неба в темные сумерки наблюдается уменьшение поляризации при зенитном расстоянии Солнца  $92^\circ$ , что соответствует эффективной высоте однократного рассеяния около 20 км.

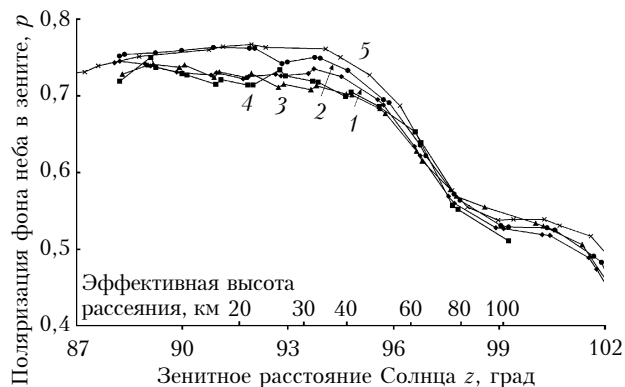


Рис. 3. Зависимость поляризации фона безлунного сумеречного неба в зените от зенитного расстояния Солнца в декабре 2006 г. в сравнении с декабрем 2002 г., длина волны 525 нм (1 — вечер 7 декабря; 2 — вечер 8 декабря; 3 — вечер 9 декабря; 4 — вечер 10 декабря 2006 г.; 5 — утро 9 декабря 2002 г.)

Эффект деполаризации характерен переменностью от сумерек к сумеркам и сопровождается синхронным изменением градиентов яркости и поляризации вдоль солнечного вертикала, что согласуется со свойствами аэрозольного рассеяния света. Анализ вариаций этих величин [19] позволил вычислить значение поляризации аэрозольного рассеяния под углом  $90^\circ$  ( $0,28 \pm 0,03$ ) и его коэффициент по отношению к коэффициенту молекулярного рассеяния (до 0,2). Значение поляризации несколько выше, чем для тропосферного аэрозоля (0,2) [10], что указывает на меньший размер стратосферных аэрозольных частиц.

Увеличение содержания стратосферного аэрозоля зимой 2006/07 г. было также зарегистрировано на Сибирской лидарной станции Института оптики атмосферы СО РАН [20], входящей в сеть CIS-LiNET [7]. Эффект наблюдался со второй половины октября 2006 г. и связан с извержением влк. Рабаул (Новая Гвинея) 7 октября этого же года. По данным обсерватории Рабаула, выбросы диоксида серы достигли стратосферы и разделились на два облака, одно из которых начало двигаться в северном направлении. Повышенный уровень стратосферного аэрозоля регистрировался на Сибирской лидарной станции до конца зимы. Деполяризация фона сумеречного неба наблюдалась в Крыму в конце февраля 2007 г., но уже не наблюдалась в конце апреля этого же года, соответствующие точки вновь оказались рядом с прямой на рис. 2.

Еще один период повышенного содержания стратосферного аэрозоля над Крымом наступил в январе 2008 г. Данные измерений на рис. 2 (звездочки) вновь смещены влево от прямой, соответствующей фоновому содержанию стратосферного аэрозоля. На рис. 4 показаны зависимости степени поляризации фона неба в зените от зенитного расстояния Солнца для ряда безлунных утренних сумерек в декабре 2007 и январе 2008 г. Видна переменная, более слабая, нежели год назад, деполяризация фона неба в светлые сумерки (зенитное расстояние Солнца около 92–93°) на длинах волн 513–525 нм при сходных поляризационных свойствах темного сумеречного неба.



Рис. 4. Зависимость поляризации фона безлунного утреннего сумеречного неба в зените от зенитного расстояния Солнца в декабре 2007 – январе 2008 г. (1 – 9 декабря 2007, 525 нм; 2 – 10 января 2008, 525 нм; 3 – 13 января 2008, 513 нм; 4 – 14 января 2008, 513 нм; 4' – 14 января 2008, 684 нм; 5 – 15 января 2008 г., 513 нм)

На рис. 4 также приведена зависимость  $p(z)$  для одних сумерек того же ансамбля на длине волны 684 нм. Вид этой зависимости несколько отличается от длин волн 513–525 нм, и на ней видно локальное уменьшение поляризации фона неба при зенитном расстоянии Солнца 94°. Однако с учетом спектральной зависимости эффективной высоты однократного рассеяния данный минимум поляризации соответствует той же высоте, что и минимум на 92–93° для длин волн 513–525 нм (около 25 км), и имеет аналогичную природу. Источник появления

стратосферного аэрозоля в январе 2008 г., по-видимому, связан с мощным полярным стратосферным вихрем, достигавшим зимой 2007/08 г. северных умеренных широт.

## Заключение

В настоящей статье рассмотрено явление деполяризации фона сумеречного неба в зените, связанное с увеличением содержания аэрозоля в разных слоях атмосферы. Деполяризационный эффект позволяет не только обнаруживать аэрозоль, но и оценивать вклад аэрозольного рассеяния в яркость фона неба и его поляризацию, делая при этом минимальные априорные предположения о свойствах аэрозольного рассеяния. Подобный анализ был проведен как для тропосферного [10], так и для стратосферного аэрозоля [19].

Для длин волн 513–525 нм, на которых было проведено большинство измерений фона сумеречного неба, в случае фоновое уровня аэрозоля в стратосфере и мезосфере имеет место четкая связь значений поляризации фона неба в зените в периоды медленных изменений этой величины в светлые и темные сумерки. Это соотношение имеет место для сумерек разных лет и сезонов, и его существование значительно облегчает задачу обнаружения повышенного содержания аэрозоля как в стратосфере, так и в мезосфере.

Объем информации об аэрозольном рассеянии, получаемой при помощи сумеречного зондирования, можно существенно расширить. Увеличение поля зрения измерительной аппаратуры (или использование сканирующего поляриметра) может улучшить точность выделения однократного рассеяния и дает возможность определить две компоненты матрицы аэрозольного рассеяния в широком диапазоне углов. Вместе с использованием многоцветных данных это позволяет исследовать микрофизические характеристики аэрозоля в разных слоях атмосферы.

Использование современной чувствительной приемной аппаратуры на основе ПЭС-матриц позволяет с высокой точностью измерять характеристики фона неба в темные сумерки и ночью. Это делает возможным учет изменчивых составляющих фона ночного неба (собственное свечение атмосферы, рассеяние лунного света) при анализе фона в темные сумерки, что может быть важным при исследовании аэрозоля в высоких слоях атмосферы (метеорная пыль, серебристые облака и т.д.). Данные о фоне темного сумеречного неба могут также использоваться для проверки современных численных моделей переноса излучения в атмосфере, учитывающих рассеяние высоких порядков.

В заключение авторы хотели бы поблагодарить В.В. Зуева, В.Д. Бурлакова, А.В. Невзорова и О.В. Харченко (Институт оптики атмосферы СО РАН), О.В. Постылякова (Институт физики атмосферы РАН), А.П. Чайковского (Институт физики НАН Беларуси), Н.Д. Цветкову и А.Н. Лукьянова (Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета) и А.М. Фейгина (Институт прикладной физики РАН) за ряд ценных советов и замечаний.

1. *Фесенков В.Г.* О строении атмосферы (фотометрический анализ сумерек) // Труды Главной российской астрофизической обсерватории. 1923. Т. 2. С. 7.
2. *Розенберг Г.В.* Сумерки. М.: Физматгиз, 1963. 380 с.
3. *Фесенков В.Г.* О поляризационном методе исследования сумеречных явлений // Астрон. ж. 1966. Т. 43. С. 198–205.
4. *Угольников О.С.* Фотометрия и поляриметрия сумеречного неба. Проблема многократного рассеяния света в период сумерек // Косм. исслед. 1999. Т. 37. № 2. С. 168–175.
5. *Угольников О.С., Маслов И.А.* Многоцветная поляриметрия сумеречного неба. Роль многократного рассеяния света как функция длины волны // Косм. исслед. 2002. Т. 40. № 3. С. 242–251.
6. *Ugolnikov O.S., Postulyakov O.V., Maslov I.A.* Effects of multiple scattering and atmospheric aerosol on the polarization of the twilight sky // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 2004. V. 88. N 1–3. P. 233–241.
7. *Чайковский А.П., Иванов А.П., Балин Ю.С., Ельников А.В., Тулинов Г.Ф., Плюснин И.И., Букин О.А., Чен Б.Б.* Лидарная сеть CIS-LINET для мониторинга аэрозоля и озона: методология и аппаратура // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18. № 2. С. 1066–1072.
8. *Креков Г.М., Звенигородский С.Г.* Оптическая модель средней атмосферы. Новосибирск: Наука, 1990. 280 с.
9. *Ugolnikov O.S., Maslov I.A.* Detection of Leonids meteoric dust in the upper atmosphere by polarization measurements of the twilight sky // Planet. and Space Sci. 2007. V. 55. N 10. P. 1456–1463.
10. *Угольников О.С., Маслов И.А.* Поляризационные исследования вклада аэрозольного рассеяния в свечение сумеречного неба // Косм. исслед. 2005. Т. 43. № 6. С. 424–432.
11. *Лебединец В.Н.* Аэрозоль в верхней атмосфере и космическая пыль. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 271 с.
12. *Hitchman M.H., McKay M., Trepte C.R.* A climatology of stratospheric aerosol // J. Geophys. Res. D. 1994. V. 99. N 10. P. 20689–20700.
13. *Deshler T., Hervig M.E., Hofmann D.J., Rosen J.M., Liley J.B.* Thirty years of in situ stratospheric aerosol size distribution measurements from Laramie, Wyoming (41°N), using balloon-borne instruments // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 5. P. 4/1–4/13.
14. *Russell P.B., Livingston J.M., Pueschel R.F., Bauman J.J., Pollack J.B., Brooks S.L., Hamill P., Thomson L.W., Stowe L.L., Deshler T., Dutton E.G., Bergstrom R.W.* Global to microscale evolution of the Pinatubo volcanic aerosol derived from diverse measurements and analyses // J. Geophys. Res. D. 1996. V. 101. N 13. P. 18745–18763.
15. *Махоткина Е.Л., Плахина И.Н., Лукин А.Б.* Некоторые особенности изменения мутности атмосферы на территории России в последней четверти XX в. // Метеорол. и гидрол. 2005. № 1. С. 28–36.
16. *Wu B., Lu D.* Monitoring the evolution of 1991 Pinatubo aerosols over Beijing by combining twilight observations with lidar detection // J. Geophys. Res. D. 1993. V. 98. N 12. P. 22995–23001.
17. *Solomon S., Garcia R.R., Rowland F.S., Wuebbles D.J.* On the depletion of Antarctic ozone // Nature. 1986. V. 321. N 6072. P. 755–758.
18. *Enell C.-F., Steen A., Wagner T., Friess U., Pfeirsticker K., Platt U., Fricke K.-H.* Occurrence of polar stratospheric clouds at Kiruna // Ann. Geophys. 1999. V. 17. N 11. P. 1457–1462.
19. *Угольников О.С., Маслов И.А.* Исследования стратосферного аэрозольного слоя на основе поляризационных измерений сумеречного неба // Косм. исслед. 2009. Т. 47 (в печати).
20. *Зуев В.В., Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Невзоров А.В.* Аномальное аэрозольное рассеяние в атмосфере над Томском в осенне-зимний период 2006/07 г. // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20. № 6. С. 524–530.

*O.S. Ugolnikov, I.A. Maslov.* **Polarization measurements of the twilight sky: atmospheric aerosol investigations from troposphere to mesosphere.**

The description of the results of polarization measurements against the twilight background in Crimean Laboratory of Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, is presented. The main regularities of the behavior of the twilight sky background in zenith are considered in dependence of sun rising beyond the horizon at wavelength of 513–525 nm, as well as influence of aerosol at different layers of the atmosphere on the dependences is described. The effects of increased scattering of stratospheric aerosol in December, 2006 and January, 2008 are considered in detail.