



# Поляриметрия сумеречного неба

О.С.Угольников

Слово «сумерки» знакомо всем с раннего детства. Это время с захода Солнца (когда небо начинает темнеть), плавно переходящее в ночь, а также утро, перед восходом дневного светила. Данное явление одно из самых красивых и масштабных — за каких-нибудь два часа яркость неба меняется в миллионы раз! Мы можем насладиться игрой удивительных красок, которые не видны на голубом дневном небе. Легкие белые облачка становятся ярко-красными, а затем резко темнеют, синеватый цвет неба контрастирует с белой, желтой, красной зарей...

Многообразием красок сумерки обязаны атмосфере нашей планеты, рассеивающей свет заходящего Солнца, благодаря чему ночь на Земле наступает плавно. В сумерки атмосфера показывает всю свою сложность. Именно в это время можно исследовать вертикальное строение нашей газовой оболочки. Ясным солнечным днем основной вклад в свечение неба вносят только самые нижние слои атмосферы, в сумерки же — разные слои, находящиеся тем выше, чем глубже за горизонт заходит Солнце.

Об эффективности зондирования атмосферы в период су-



*Олег Станиславович Угольников, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института космических исследований и Астрокосмического центра Физического института РАН. Область научных интересов — оптика атмосферы, космические гамма-всплески. Автор научно-популярной книги «Небо начала века» (М., 2000), составитель ежегодного справочника «Астрономический календарь».*

мерек говорил еще в 1923 г. выдающийся русский ученый В.Г.Фесенков [1]. Глубокий обзор наблюдательных и теоретических данных о сумерках содержится в монографии Г.В.Розенберга [2]. В этих и многих других работах указывается главная проблема сумеречного зондирования атмосферы — многократное рассеяние. Лучи заходящего Солнца, прежде чем попасть к наблюдателю, испытывают несколько актов рассеяния. А для выяснения оптических свойств определенного слоя атмосферы нужны сведения прежде всего о яркости од-

нократно рассеянной компоненты сумеречного свечения. Многократное же рассеяние представляет собой своеобразный «шум», который нужно вычистить из полной яркости сумеречного неба.

Роль многократного рассеяния в формировании свечения дневного неба сравнительно невелика. Однако в сумерки она существенно возрастает, а ее учет составляет весьма сложную задачу. В книге Розенберга приведено описание предлагавшихся в то время теоретических и экспериментальных методов учета такого рассеяния. Для ре-

шения подобной задачи авторам приходилось вводить самые различные предположения, что подчас приводило к совершенно противоположным суждениям — от возможности полностью пренебречь многократным рассеянием во время сумерек до выводов о его доминировании.

Проблема не была окончательно решена и в последующее время. В 90-х годах прошлого века группа наблюдателей из Астрономической обсерватории Одесского университета [3] экстраполировала зависимость яркости многократно рассеянного света от величины погружения Солнца за горизонт в период темных сумерек (когда многократное рассеяние доминирует) на период светлых сумерек. Однако точность данного метода сильно ограничена, особенно в самой светлой фазе этого отрезка времени.

Открытым оставался вопрос о цветовых и поляриметрических свойствах многократного рассеяния, их влиянии на цвет и поляризацию всего фона сумеречного неба в его различных точках.

Цель нашей работы — изучение роли многократного рассеяния света в различные перио-

ды сумерек, прежде всего в их светлой фазе, для различных точек небесной сферы и значений длины волны. В основу исследований легли поляриметрические наблюдения сумеречного неба, проведенные в 1997 и 2000 гг. Разработанный нами подход в какой-то мере можно считать развитием метода Фесенкова [4]. Мы попытались интерпретировать и наблюдавшиеся ранее цветовые и поляризационные эффекты в период сумерек [5, 6].

### Свойства однократного и многократного рассеяния

Рассмотрим главные свойства однократно и многократно рассеянного света в период сумерек, важные для их разделения по данным поляриметрических наблюдений. В ясную погоду основной вклад в рассеяние света в атмосфере Земли вносит молекулярное (релеевское) рассеяние. Его свойства хорошо известны. Так, рассеивающая способность чистого воздуха обратно пропорциональна длине волны в четвертой степени, что

придает ясному небу голубой цвет. Кроме того, свечение ясного неба поляризовано, и в точках, расположенных в  $90^\circ$  от Солнца, степень поляризации максимальна, а направление поляризации перпендикулярно направлению на Солнце. При рассеянии света под прямым углом для двухатомных молекул воздуха степень поляризации составляет 94% [2]. Однако наблюдаемые значения коэффициента поляризации не достигают этой величины из-за вклада в яркость неба многократного рассеяния и рассеяния на частицах атмосферного аэрозоля. Свойства последнего сильно изменчивы. Зависимость рассеивающей способности от длины волны для аэрозоля не такая сильная (вспомним, что появление дымки делает небо белесым), нежели для молекулярного рассеяния, а поляризация слабее.

Когда дневное светило оказывается на горизонте, точка максимальной поляризации однократно рассеянного света, расположенная в  $90^\circ$  от него, оказывается в зените. По мере того как Солнце опускается все ниже, эта точка смещается в область зари вслед за ним, и, если пренебречь явлением атмосферной рефракции (рассеяние происходит на высотах более 10 км, где рефракция несущественна), ее зенитное расстояние ( $z$ ) равно величине погружения ( $h$ ) Солнца под горизонт (рис.1).

Для многократно рассеянной компоненты источником света служит не Солнце, а все сумеречное небо, и в первую очередь заревой сегмент. Это и определяет ее поляризационные свойства. Точка максимальной поляризации также находится вблизи зенита, однако она не смещается вслед заходящему Солнцу, а степень поляризации многократного рассеяния значительно меньше.

Различные поляризационные свойства однократно и многократно рассеянных ком-

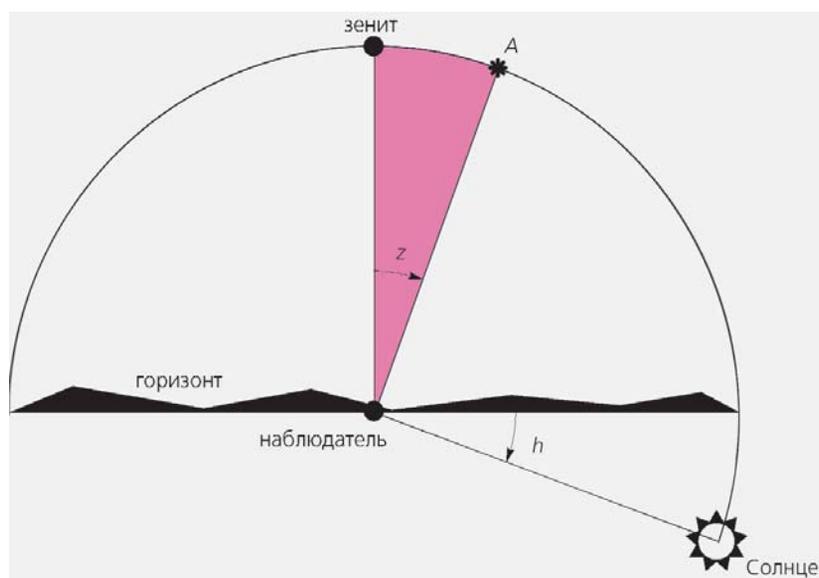


Рис. 1. Положение Солнца и точки максимальной поляризации однократно рассеянного света (А) в солнечном вертикале.

понент свечения в период светлых сумерек (вблизи восхода и захода Солнца) позволяют произвести их разделение при измерении поляризации сумеречного неба в солнечном вертикале (большом круге небесной сферы, проходящем через Солнце и зенит), и прежде всего вблизи зенита.

## Наблюдения и результаты

Поляриметрические наблюдения сумеречного неба в 1997 г. проводились в Астрономической обсерватории Одесского университета на границе видимой и ультрафиолетовой части спектра (длина волны 3560 Å), не попадающей в область селективного поглощения атмосферных газов, в том числе озона. Измерения велись автосканирующим сумеречным фотометром [7] в солнечном вертикале на зенитных расстояниях до 70° [5].

Наблюдения 2000 г. проводились в Крыму, на Южной станции Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга. Фон сумеречного неба регистрировался ПЗС-матрицей ST-6 с широкоугольным объективом, позволяющим охватить область до зенитного расстояния в 15°. Наблюдения проводились в фиолетовой (U), синей (B), желтой (V) и красной (R) цветных полосах [6].

На рис.2 показана зависимость поляризации сумеречного неба в зените от глубины погружения Солнца под горизонт для различных длин волн (цветов). Проведенные наблюдения показали, что степень поляризации вблизи зенита увеличивается от синих лучей к красным, причем это свойство сохраняется в течение всех сумерек. С погружением Солнца под горизонт поляризация некоторое время продолжает очень медленно увеличиваться, а при глубине погружения в 5° она быстро уменьшается для всех длин волн. Интересно, что в тот же

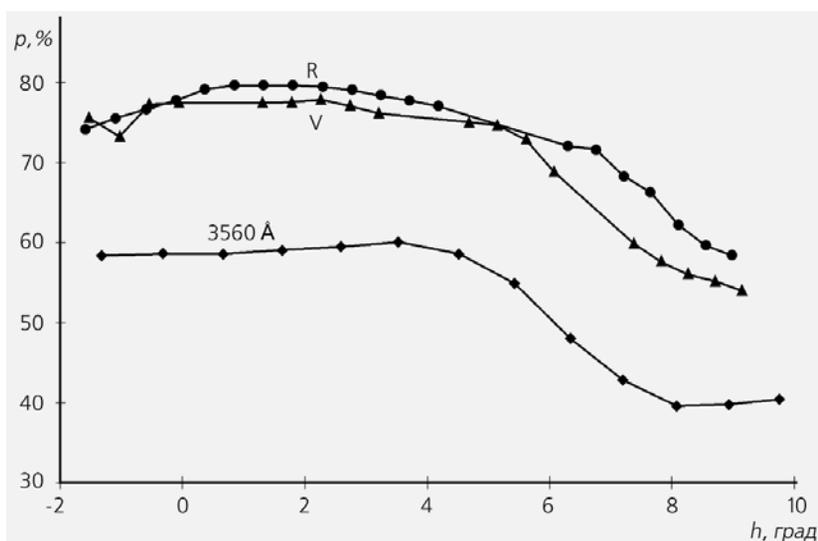


Рис.2. Зависимость степени поляризации ( $p$ ) сумеречного неба в зените от глубины погружения ( $h$ ) Солнца под горизонт на длине волны 3560 Å (по наблюдениям в вечерние сумерки 31.07.1997 г.), в желтых (V) и красных (R) лучах (вечерние сумерки 04.08.2000 г.).

момент начинает изменяться и цвет сумеречного неба — медленно краснее до этого, оно начинает синеть [2, 8]. Оба процесса продолжают до погружения Солнца под горизонт на 8—10°, затем быстрое посинение неба вновь сменяется медленным покраснением, а быстрое уменьшение степени поляризации — ее медленным увеличением. Сразу же возникает вопрос: не имеют ли столь синхронные изменения цвета и поляризации фона сумеречного неба общую причину?

В момент восхода и захода Солнца степень поляризации достигает максимума вблизи зенита. Как уже говорилось выше, по поведению точки максимальной поляризации в период погружения Солнца под горизонт можно судить о балансе однократно и многократно рассеянного света. Если бы все свечение сумеречного неба определялось однократно рассеянным светом, данная точка, двигаясь вдоль солнечного вертикала, оставалась бы на постоянном угловом расстоянии от дневного светила. Напротив, в случае домини-

рования многократного рассеяния точка максимальной поляризации сумеречного свечения была бы практически неподвижной. А что же происходит на самом деле?

Ответ на этот вопрос дан на рис.3. Там представлена полученная из наблюдений зависимость зенитного расстояния ( $z$ ) точки максимальной поляризации от глубины ( $b$ ) погружения Солнца под горизонт для одного наблюдательного дня (величина  $z$  положительна в области зари и отрицательна в противоположной части неба). Во время светлых сумерек эта точка действительно движется вслед за Солнцем, но скорость движения несколько меньше, чем должна быть при чистом однократном рассеянии (пунктирная линия на графике). Следовательно, в данный период сумерек в желтых и красных лучах преобладает однократное рассеяние, хотя роль многократного также значительна.

Мы оценили роль однократного рассеяния в общей яркости неба [5, 6]. В момент восхода

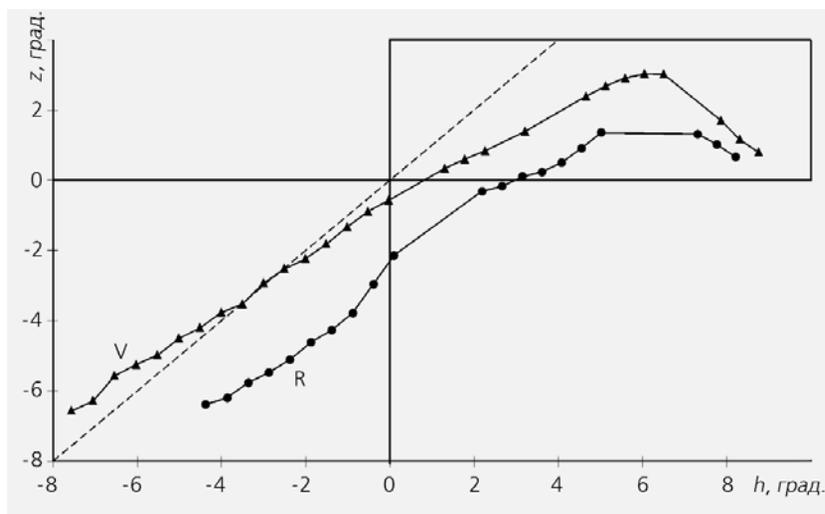


Рис.3. Зависимость зенитного расстояния ( $z$ ) точки максимальной поляризации неба от глубины погружения ( $h$ ) Солнца под горизонт (вечерние сумерки 06.08.2000 г.) в желтых (V) и красных (R) лучах. Пунктирная линия соответствует однократному молекулярному рассеянию.

и захода Солнца однократное рассеяние в зените составляет всего 40% для фиолетовых лучей, возрастает до 60% в синих лучах и до 70% в желтых. В красной полосе точной оценке мешает сильное влияние атмосферного аэрозоля (которое также приводит к небольшому смещению точки максимальной поляризации от зенита в момент захода Солнца), но можно с уверенностью сказать, что вклад однократного рассеяния в светлые сумерки в этой области спектра составляет не менее 80%.

Итак, роль однократного рассеяния в светлые сумерки увеличивается от синих лучей к красным, т.е. многократно рассеянный свет «более синий», чем однократно рассеянный (вопреки мнению Розенберга, высказанному в 60-х годах), и именно многократное рассеяние, наряду с атмосферным озоном [9], позволяет небу сохранять голубой цвет во время сумерек. Вот почему степень поляризации фона неба в синих лучах меньше, чем в красных — многократное рассеяние поляризовано слабее, чем однократное.

С погружением Солнца под горизонт роль однократного рассеяния сначала даже немного увеличивается. Вполне логично, что в это же время происходит медленное покраснение неба и усиление его поляризации. Но когда глубина погружения Солнца достигает 5°, роль однократного рассеяния быстро уменьшается. На рис.3 видно, что точка максимальной поляризации замедляет свое движение, затем останавливается и возвращается в зенит, что однозначно указывает на преобладание многократного рассеяния. Но вспомним, что в это же время небо быстро синее и уменьшается степень его поляризации. Общая причина этих эффектов теперь понятна: сумеречное свечение все в большей степени составляется многократно рассеянным в атмосфере Земли солнечным светом.

Когда глубина погружения Солнца под горизонт достигает 8–10°, однократно рассеянный свет практически исчезает, и процессы посинения и ослабления поляризации фона сумеречного неба останавлива-

ются. Эффекты минимума поляризации и аномально синего неба на этой стадии сумерек известны уже давно, но объяснения им давались самые разные. Так, Розенберг предполагал существование устойчивого аэрозольного слоя на высотах 80–100 км (в мезосфере). Однако подобное предположение иногда приводит к поистине фантастическим оптическим свойствам аэрозольных частиц. В журнале «Атмосферная оптика» была опубликована статья [10], в которой приводится спектральная зависимость коэффициента рассеяния таких частиц более резкая, чем для молекулярной составляющей! Правда, в том же самом журнале была опубликована работа [11], где отмечалось, что поляризационные свойства сумеречного неба в данный этап сумерек должны определяться в первую очередь многократным рассеянием света в атмосфере Земли.

При дальнейшем погружении Солнца под горизонт небо вновь начинает медленно краснеть, а его поляризация немного увеличивается [2, 5]. Это связано уже исключительно со свойствами многократно рассеянной компоненты. Наконец, при погружении Солнца под горизонт более чем на 14° поляризация вновь уменьшается, и на фоне слабеего сумеречного свечения проступает ночное небо.

\* \* \*

Итак, было проведено исследование баланса однократно и многократно рассеянного солнечного света в атмосфере Земли в период сумерек. Как показали наблюдения, многократно рассеянный свет имеет избыток в синей области спектра и пониженную поляризацию. Изменение же соотношения двух компонент сумеречного свечения — основной фактор, влияющий на цвет и поляризацию всего сумеречного неба. Это находится

в полном согласии с синхронным изменением цвета и поляризации фона неба в момент погружения Солнца под горизонт, причем покраснение неба сопровождается усилением его поляризации и наоборот.

Учет значительного вклада многократного рассеяния в яркость сумеречного неба дает

объяснение не только этим, но и многим другим факторам (в частности, движению по небесной сфере нейтральных точек, в которых фон неба неполяризован), которые ранее пытались объяснить влиянием атмосферного аэрозоля, что часто приводило исследователей в тупик. ■

*Автор выражает искреннюю благодарность И.А.Маслову (Институт космических исследований РАН) за поддержку и сотрудничество.*

**Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проекты 00-02-16396 и 01-02-06247.**

## Литература

1. Фесенков В.Г. О строении атмосферы (фотометрический анализ сумерек) // Тр. Гл. рос. астрофизич. обсерватории. 1923. Т.2. С.7.
2. Розенберг Г.В. Сумерки. М., 1963.
3. Zaginailo Yu.I. Determination of the second twilight brightness by the method of the twilight probing of the Earth's atmosphere // Odessa Astronomical Publication. 1993. V.6. P.59.
4. Фесенков В.Г. // Астрон. журн. 1966. Т.43. С.198.
5. Угольников О.С. // Космич. исслед. 1999. Т.37. №2. С.168.
6. Угольников О.С., Маслов И.А. // Космич. исслед. 2002. Т.40. №3.
7. Загинайло Ю.И. Фотоэлектрический фотометр для исследования сумеречного свечения // Атмосферная оптика. 1970. С.193.
8. Угольников О.С. // Космич. исслед. 1998. Т.36. №5. С.458.
9. Угольников О.С. // Звездочет. 1996. Т.2. №4. С.15.
10. Дивари Н.Б. Синий аэрозоль мезосферы и нижней термосферы // Атмосферная оптика. 1974. С.223.
11. Загинайло Ю.И. Определение рассеивающей способности атмосферы по поляризационным наблюдениям сумеречного неба // Атмосферная оптика. 1974. С.149.

### Организация науки

#### Игнобелевские премии 2001 г.

В октябре 2001 г. в Бостоне (штат Массачусетс) состоялась очередная ежегодная церемония: в 11-й раз были оглашены имена людей, выполнивших самые нелепые или самые смешные научные и технические работы. Присуждаемая премия и церемония ее вручения иронически (а в какой-то мере и саркастически) имитирует настоящую Нобелевскую и называется Игнобелевской (*igno* — начальные слоги латинского слова, означающего «невежество»).

Актовый зал Гарвардского университета был заполнен преимущественно научными сотрудниками и в любом слу-

чае — людьми, любящими пошутить. А лауреаты присутствовали далеко не все: не каждому нравится, когда смеются именно над ним. Зато среди оглашавших итоги работы отборочной комиссии присутствовали четверо настоящих нобелевских лауреатов.

Первым виновником торжества был канадец П.Барсс (P.Barss; Макгиллский университет в Монреале): в 2001 г. он завершил серию исследований по медицинской статистике «Частота и серьезность повреждений человеческого организма в результате падения кокосовых орехов». Природной лабораторией он выбрал Новую Гвинею; резюме гласит: «Наиболее тяжелые травмы, как правило, получает тот, кто укладывается спать под кокосовой пальмой».

За медиком следовал физик Д.Шмидт (D.Schmidt; Университет штата Массачусетс). Учитывая всеобщую значимость своей работы «Решение проблемы изгибания занавески в душевой», он сообщил о ней собравшимся самолично. Проведенные автором длительные наблюдения показали, что занавеска чаще всего прогибается не наружу, а внутрь. Добросовестный исследователь установил и причину такого загадочного феномена. На базе последних достижений физической науки он выяснил, что явление есть следствие близости к занавеске тела принимающего душ. Автор с гордостью сообщил, что никаких грантов на свою работу ни от кого не получал и не запрашивал. Вот это уже, действительно, требует похвалы.

Рамейковский