

## ЛУННЫЕ ЗАТМЕНИЯ: ИСТОРИЯ И НАУКА

В лекции рассказывается об истории наблюдений лунных затмений и о научных задачах, которые решались и решаются методом анализа данных явлений. Если в древние времена наблюдения затмений были основой развития теории движения Луны и небесной механики вообще, то сейчас они являются интересным аспектом атмосферной оптики. Наблюдаемые характеристики затмений проявляют связь с вулканическим и полярным стратосферным аэрозолем, атмосферным озоном, глобальным распределением водяного пара. Также заметна корреляция с изменениями солнечной активности. Подробно разбираются результаты наблюдений 5 лунных затмений в 2004-2008 годах в ближней инфракрасной области спектра.

The lecture contains the historical description of the lunar eclipses observations and the scientific problems that had been solved and is being solved now by the lunar eclipses analysis. In ancient times this analysis was the development base of the theory of the motion of the Moon and the celestial mechanics in general. Now the lunar eclipses observations are the interesting topic of the atmosphere optics. The observed characteristics of the eclipses show the relation with the volcanic and polar stratospheric aerosol, atmospheric ozone, global distribution of water vapor. The results of the observations of 5 lunar eclipses in 2004-2008 in near infra-red spectral region are described in details.

### Введение

Лунные затмения являются одними из самых значительных астрономических явлений, наблюдавшихся людьми с древнейших времен. По масштабности они уступают только полным солнечным затмениям. При этом каждое лунное затмение видно со значительной части поверхности Земли, и потому в любой отдельно взятой точке нашей планеты лунные затмения наблюдаются чаще даже частных солнечных затмений, не говоря уже о полных. Это обусловило большое количество упоминаний о лунных затмениях в исторических документах и летописях.

Вид Луны во время затмения бывает непредсказуемым уже при частных фазах. В этом состоит еще одно отличие от солнечных затмений, где картину нельзя в точности описать заранее лишь в короткие мгновения полной фазы. Резкие вариации яркости Луны и ее красная окраска при погружении в земную тень становились причиной панического страха людей, связывающих затмения с войнами, эпидемиями, катаклизмами. Считалось, что Луна во время затмения обливается кровью.

Лунные затмения имеют более сложную геометрию и оптическую схему по сравнению с солнечными. Даже в древние времена было несложно понять, что Солнце затмевается Луной. А для восстановления правильной схемы лунного затмения было необходимо установить, что Луна светит лишь отраженным солнечным светом, а также то, что Земля имеет шарообразную форму, отбрасывая в пространство конус тени. Еще более сложным являлся вопрос о причинах нечеткой границы тени и свечения Луны даже в полной фазе затмения. Ответ на этот вопрос был дан всего несколько веков назад с развитием атмосферной оптики.

Многообразие оптических эффектов, наблюдающихся во время лунного затмения, и связь этих эффектов с атмосферой Земли указывают на возможность исследования самой атмосферы на основе анализа лунных затмений. Геометрия затмения во многом схожа со схемой космических миссий по изучению атмосферы, роль космического аппарата при этом играет Луна, а роль источника излучения — Солнце. До начала космической эпохи лунные затмения были единственным средством изучения различных слоев атмосферы на расстоянии в несколько тысяч километров от пункта наблюдения. Все это предопределило большое внимание ученых к данным явлениям на протяжении многих веков.

## **История наблюдений**

Первое достоверное упоминание о наблюдении лунного затмения содержится в древнекитайских летописях и относится к 1137 году до н.э. По-видимому, китайские астрономы первыми отметили основные закономерности наступления затмений и научились предсказывать их на будущее. Несколькими веками позже это удалось вавилонским астрономам. Они отметили трехлетние циклы, в течение каждого из которых лунные затмения наступают с интервалом в 6 лунных месяцев или около 177 суток. На самом деле, этот цикл

охватывает 4 года, но первые и последние его затмения обычно лишь полутеневые, и в Вавилоне их не замечали.

Объяснить причину наступления лунного затмения удалось древнегреческому ученому и философу Анаксагору в V веке до н.э. Многие идеи Анаксагора опережали свое время. Так, за 2 тысячи лет до Джордано Бруно он утверждал, что звезды подобны Солнцу, но находятся значительно дальше, а обитаемые миры представлены во Вселенной во множестве. В частности, населенной вполне может оказаться даже Луна. Правильное толкование природы лунных затмений указывает на шарообразность нашей планеты — Земли. Данный вывод приписывается Аристотелю, хотя он встречается и раньше у других древнегреческих ученых — Пифагора и Парменида.

Аристарх Самосский, один из первых приверженцев гелиоцентрической системы мира, использовал лунные затмения для определения соотношения размеров Луны и Земли, которое получилось равным  $1/3$ , что достаточно близко к правильному значению. В то же время, размеры Солнца и расстояние до него по Аристарху оказались сильно заниженными.

Так как лунные затмения были видны из той же древней Греции чаще, чем солнечные (которые должны были еще иметь значительную фазу, чтобы быть замеченными), их наблюдения на протяжении десятилетий и веков стали фундаментом для построения теории движения Луны — основной задачи небесной механики на то время. Благодаря прежде всего Гиппарху эта наука существенно продвинулась вперед во II-I веках до н.э. Об уровне ее развития говорит антикитера — механическое устройство, моделирующее движение небесных светил, найденное на дне Средиземного моря в 1901 году. Для точного отображения движения Луны этот механический планетарий содержал спираль с четырьмя витками. Она была разделена на 223 сегмента — именно столько лунных месяцев содержится в саросе, периоде повторяемости солнечных и лунных затмений, составляющем 18 лет и 10.3 дня.

Развитие античной теории движения Луны было увенчано Клавдием Птолемеем в его труде “Альмагест”, на много веков ставшим базовой теорией для небесной механики и астрономии в целом. Основой для теории движения Луны был практически 1000-летний анализ наблюдений лунных затмений, начиная с Древнего Вавилона.

Дальнейшее развитие в Европе астрономическая наука получила только через почти полторы тысячи лет, с началом эпохи Возрождения. После многовекового периода застоя и регресса в научном

познании было необходимо восстановить все утраченное с античных времен. Важным событием для астрономической науки стал перевод “Альмагеста” Птолемея на латынь, доступную европейским ученым того времени. Этот перевод был выполнен во второй половине XV века немецким ученым Иоганном Мюллером, более известным под именем Региомонтан. Он же использовал этот труд для вычисления ежедневных эфемерид Луны и планет на 1475-1506 годы. Фактически это были последние и самые точные эфемериды, рассчитанные на основе теории Птолемея.

Эфемериды небесных светил были нужны не только астрономам. В них остро нуждались мореплаватели. Фиксирование моментов восхода и захода Луны, а также начала и конца лунных затмений давало возможность определить долготу места, что в отсутствие точных хронометров было важной и очень сложной задачей. Поэтому эфемериды Региомонтана были на борту многих кораблей, отправлявшихся в далекие плавания. Взял их с собой и Христофор Колумб, еще не предполагая, что они фактически спасут ему жизнь.

Во время своего четвертого, последнего плавания к берегам Америки в июне 1503 года экспедиция Колумба потерпела кораблекрушение вблизи Ямайки. Колумбу удалось достичь берега, но он вместе с командой был вынужден длительное время ожидать испанских кораблей. Местное население встретило Колумба недружелюбно и через некоторое время отказало ему в поставке продовольствия. Чтобы спастись от голодной смерти, Колумб пошел на хитрость. Зная из таблиц Региомонтана о лунном затмении, предстоящем 29 февраля 1504 года, он пригласил к себе туземных вождей и объявил им, что если поставки продовольствия не возобновятся, он отнимет у них Луну. Вожди не поверили, но как только началось затмение, они прибежали к Колумбу и пали перед ним ниц, умоляя вернуть Луну на небо. Через пару часов Луна была возвращена, а Колумб больше не испытывал проблем с продовольствием.

Данный случай — не единственный пример непосредственного участия лунных затмений в исторических событиях. Древнегреческий историк Фукидид, описывая Пелопонесскую войну между Афинами и Спартой, сообщает о лунном затмении, произошедшем вечером перед отплытием афинского флота. Афиняне увидели в этом затмении дурное предзнаменование, и отплытие флота было отложено. Подробное описание Фукидидом хода затмения позволило установить его дату: 27 августа 413 года до н.э., что во многом уточнило хронологию Пелопонесской войны.

Лунное затмение 21 июня 168 года до н.э. фактически решило судьбу сражения между римской и македонской армиями. Перед сражением римский оратор Сульпиций Галл, который ранее был римским консулом, сообщил войску о лунном затмении, которое должно принести победу, чем сильно ободрил своих воинов. Македонское же войско о затмении не знало, и с его началом обернулось в смятение, а потом и в бегство.

Подобные примеры указывают на важность анализа упоминаний о солнечных и лунных затмениях для датировки исторических событий. С развитием небесной механики и уточнением элементов орбиты Луны вычисление моментов затмений с высокой точностью стало возможным на века и тысячелетия вперед и назад. В XIX веке были изданы каталоги солнечных и лунных затмений на длительные периоды. Среди них нужно выделить, прежде всего, “Канон затмений” австрийского астронома Теодора Оппольцера, охватывающий период с 1207 года до н.э. до 2163 года н.э. Подобная работа велась и в России. В предисловии к “Таблицам показания времени солнечных и лунных затмений с 1840 по 2001 год” их автор, Федор Алексеевич Семенов, отмечает, что одной из целей этого издания было восполнение недостатка подобной литературы на русском языке. За этот труд Ф. А. Семенов в 1858 году был удостоен Золотой медали Русского Географического общества.

Если в механической части теории лунных затмений уже давно наступила полная ясность, и их точное предсказание уже не является сложной задачей, то другая, феноменологическая часть этой науки содержала массу вопросов, ответы на которые получить долго не удавалось. Их анализу посвящена следующая глава работы.

### **Оптика лунных затмений**

Первый вопрос оптики лунных затмений формулируется очень просто — почему Луна остается видимой, даже полностью погрузившись в тень. Правильный ответ был впервые четко сформулирован Иоганном Кеплером. Луну освещают солнечные лучи, преломленные в атмосфере Земли. Эффект преломления (или рефракции) света в атмосфере был известен астрономам давно — его действие увеличивало видимую высоту небесных светил на небе. Особенно сильным этот эффект становится у горизонта, где он достигает  $35'$ . Ход лучей при этом аналогичен лунному затмению, только в последнем случае лучи не только входят, но и выходят из атмосферы. Поэтому мак-

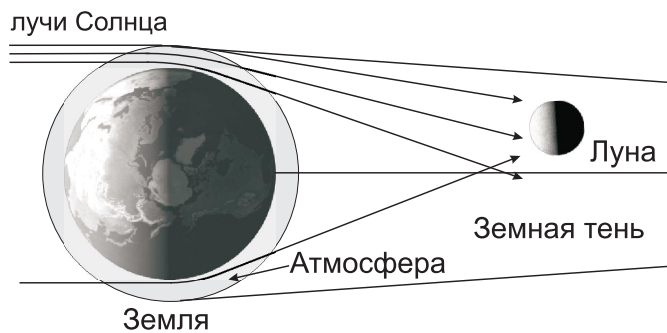


Рис. 1. Оптическая схема лунного затмения

симальный угол преломления оказывается больше  $1.1^\circ$ , что немного превышает горизонтальный параллакс Луны. Поэтому даже самые глубокие области тени оказываются освещенными.

Более сложный вопрос состоял в причине столь необычной окраски Луны во время затмения. Какое-то время казалось, что красные лучи сильнее подвержены явлению рефракции, что и придает затмившейся Луне красный цвет. Подобное объяснение даже сейчас можно встретить в средствах массовой информации. В том, что этот вывод неверен, можно убедиться на характерном примере явления “зеленого луча”, наблюдающегося иногда при заходе Солнца при хороших атмосферных условиях. Эффект наглядно показывает, что в зеленой спектральной области величина преломления в атмосфере немного больше, нежели в красной. Вообще, спектральная зависимость преломляющей способности атмосферы слишком слаба, чтобы вызвать сколь угодно заметные цветовые эффекты во время лунных затмений. Чтобы разобраться в их природе, подробнее рассмотрим оптическую картину лунного затмения (рисунок 1).

Яркость элемента лунного диска, погруженного в тень Земли, определяется тремя основными факторами. Первый из них, наиболее значительный по величине — рефракционная дивергенция или уменьшение потока излучения вследствие расхождения лучей. Этот эффект хорошо виден на рисунке 1: солнечное излучение, захваченное узким кольцом атмосферы над лимбом Земли, далее распространяется на обширное пространство в конусе тени. Очевидно, что его поток при этом уменьшается. Эффект фокусировки, напротив, несколько увеличивает освещенность, особенно в центральных об-

ластях тени. Оба фактора мало зависят от состояния атмосферы и длины волны излучения, легко численно моделируются и не связаны с изменениями вида Луны от затмения к затмению. Их действие во многом аналогично гравитационному линзированию.

Однако, указанная аналогия не распространяется на третий фактор. Это ослабление излучения за счет рассеяния и поглощения в атмосфере Земли. Наша газовая оболочка — смесь нескольких рассеивающих и поглощающих субстанций с разными свойствами. Основная среда — газовая, рассеивающая свет в соответствии с законом Релея. Коэффициент релеевского (или молекулярного) рассеяния сильно зависит от длины волны ( $\sim \lambda^{-4}$ ), что придает ясному дневному небу голубой цвет, а Луне в полной фазе затмения — красный, так как коротковолновое излучение рассеивается в атмосфере и в конус тени практически не проникает. По этой же причине атмосфера оказывается оптически толстой для коротковолнового излучения, идущего вдоль касательной к поверхности Земли. Таким образом, природа красного цвета Луны во время затмений совпадает с природой покраснения Солнца и Луны у горизонта.

Но молекулярное рассеяние не является причиной вариаций яркости Луны во время затмения, так как газовая плотность в фиксированной точке атмосферы сравнительно слабо зависит от времени. Эти изменения создаются рассеянием на частицах пыли и аэрозоля, присутствующих в атмосфере. Их концентрация и оптические свойства постоянно меняются в пространстве и времени. Зависимость коэффициента рассеяния от длины волны существенно слабее, чем для молекулярного рассеяния. Увеличение содержания аэрозоля в атмосфере Земли может вызвать сильное уменьшение яркости Луны в земной тени. Поэтому ее измерения эффективны для исследований глобального распределения атмосферного аэрозоля.

Оптические характеристики лунного затмения, очевидно, должны быть связаны с состоянием атмосферы в тех областях, через которые проходит солнечное излучение, преломляющееся к Луне. Это области лимба Земли, в которых Солнце и Луна во время затмения располагаются вблизи горизонта. Если Луна проходит через северную часть тени, то ее вид определяется атмосферными характеристиками в северной части лимба Земли, если через южную часть тени — то в южной части лимба. Луна имеет значительный угловой диаметр и движется сквозь земную тень в течение затмения, что позволяет исследовать распределение аэрозоля вдоль длинной дуги земного лимба. Помимо этого, разные участки Луны погружаются

в тень на разную глубину, и, как видно на рисунке 1, освещаются солнечными лучами, преломленными на разных высотах в атмосфере Земли. Поэтому фотометрия лунных затмений обеспечивает разрешение не только по горизонтали вдоль лимба, но и по высоте. Аналогичными возможностями обладают только космические исследования атмосферы, начавшиеся в последние десятилетия.

В некоторых спектральных интервалах, особенно в инфракрасном диапазоне, к молекулярному и аэрозольному рассеянию добавляется селективное газовое поглощение на ряде атмосферных составляющих (кислороде  $O_2$ , водяном паре  $H_2O$ , озоне  $O_3$ , углекислом газе  $CO_2$  и других). Проводя спектральные измерения поверхности Луны в этих интервалах, можно также исследовать горизонтальные и вертикальные распределения этих составляющих. Благодаря большой длине касательных лучей сквозь атмосферу данный метод будет достаточно чувствительным.

Помимо изменений яркости и цвета Луны, с земной атмосферой связывались и другие оптические эффекты, наблюдаемые во время лунных затмений. Немецкий астроном Иоганнес Гартман в 1891 году на основе обширной базы визуальных наблюдений прохождения границы тени по лунным кратерам указал, что тень несколько больше своих геометрических размеров. Эффект устойчиво наблюдался от затмения к затмению, и для его учета в настоящее время во всех эфемеридах лунных затмений размеры тени и полутени умножаются на фактор 1.02.

Гартман связал эффект увеличения размеров тени с поглощением света в земной атмосфере. Но в этом случае поглощение должно оставаться существенным до высот порядка 100 км, чего на самом деле не наблюдается. Правильное объяснение эффекта в 1892 году дал другой немецкий астроном Хуго Зеелигер. Видимое увеличение размеров тени связано со свойствами человеческого зрения, имеющего, как известно, логарифмическую зависимость отклика от яркости объекта. Глаз человека фиксирует границу темной тени и светлой полутени там, где перепад логарифма яркости поверхности Луны наиболее резкий. Как будет видно далее на рисунке 3, подобные условия имеют место чуть дальше геометрической границы тени.

### **Лунные затмения и вулканическая активность**

Яркость и окраска Луны во время затмения подвержены существенным вариациям. Наблюдатели отмечали лунные затмения, во



время которых Луна практически исчезала с неба. Случались и затмения, сам факт которых ставился под сомнение случайными очевидцами — настолько яркой оставалась Луна.

Вопрос о причине столь резких изменений прозрачности атмосферы рассматривался учеными с XIX века. И уже тогда было отмечено, что самые темные затмения наблюдались после сильных вулканических извержений. Характерным подтверждением этого стало катастрофическое по своей мощи извержение вулкана Кракатау в Индонезии в августе 1883 года. Извержение унесло многие тысячи человеческих жизней и по сути уничтожило сам вулкан, на месте которого сейчас осталось несколько более мелких вулканов. 4 октября 1884 года в Европе наблюдалось аномально темное лунное затмение. Связь характеристик затмения с извержением вулкана была отмечена известным французским астрономом Камилем Фламарионом. Необходимо обратить внимание на столь длительное по времени загрязнение атмосферы вулканическими выбросами. Темным было не только описанное выше затмение, произошедшее через год после извержения, но и последующие затмения в 1885 году. Это в равной степени коснулось как “северных”, так и “южных” затмений, что указывало на глобальный характер загрязнения атмосферы.

Американский астроном Ричард Кин на основе данных о большом количестве затмений во второй половине XX столетия установил, что все самые темные затмения этого периода также произошли вскоре после мощных вулканических извержений. Среди темных затмений выделяются два явления, произошедших в одну и ту же дату 30 декабря 1963 и 1982 годов. Несомненной была связь с извержениями вулканов Агунг (Индонезия, март 1963 года) и Эль-Чичон (Мексика, апрель 1982 года). Самым сильным извержением XX века стало извержение вулкана Пинатубо на Филиппинах в июне 1991 года. Существенное увеличение содержания аэрозоля в атмосфере отмечалось в течение нескольких последующих лет на основе самых разных измерений, в том числе оптических. Полные лунные затмения не происходили полтора года после извержения, а после этого периода, 9 декабря 1992 года, наблюдалось темное лунное затмение, причем с сильно неоднородной оптической структурой земной тени.

Столь сильное влияние вулканов на оптическое состояние атмосферы объясняется не только их мощностью, но и существованием сразу двух механизмов загрязнения газовой среды. В ее нижний слой, тропосферу, попадает большое количество пылевых частиц и пепла, которые остаются там в течение длительного времени. Более

высокий слой — стратосфера — подвергается химическому загрязнению. Среди продуктов вулканических выбросов в значительной степени присутствует диоксид серы  $SO_2$ . В привычных нам условиях этот газ достаточно химически устойчив. Однако в стратосфере, содержащей активные молекулы и радикалы, такие как озон  $O_3$ , гидроксил  $OH$  и атомарный кислород  $O$ , диоксид серы вступает в химические реакции, продуктом которых является серная кислота  $H_2SO_4$ . Конденсируясь, она образует частицы сульфатного аэрозоля, наподобие тех, что существуют в большем количестве в атмосфере Венеры. Все это оказывает прямое влияние на оптические характеристики лунных затмений, так как именно через верхнюю тропосферу и нижнюю стратосферу проходит излучение Солнца, которое преломляется в область тени Земли.

Здесь же необходимо отметить, что благодаря своему высокому альбедо в видимой части спектра сульфатный аэрозоль отражает солнечное излучение и уменьшает приток солнечной энергии к поверхности Земли. Данный эффект получил название “антипарниковый”, так как его действие противоположно парниковому эффекту, создаваемому водяным паром  $H_2O$ , углекислым газом  $CO_2$  и другими парниковыми газами в атмосфере. Эти газы пропускают солнечное излучение, но задерживают инфракрасные лучи, уходящие от Земли в космос. Облака серной кислоты оберегают поверхность Венеры от еще более сильного разогрева, создаваемого огромным количеством углекислого газа в нижних слоях ее атмосферы.

Подобное свойство сульфатного аэрозоля заложено в основу весьма спорных, но при этом серьезно обсуждаемых предложений компенсировать парниковый эффект выбросом большого количества диоксида серы в стратосферу. Однако, химические процессы, которые начнутся в стратосфере, ставят под сомнение подобный метод остановки процесса “глобального потепления”.

### **Яркость затмений и солнечная активность**

Вулканические извержения не являются единственным фактором, определяющим яркость лунных затмений. Это очевидно хотя бы потому, что атмосфера Земли оказывается загрязненной вулканическими выбросами меньшую часть времени, а оптические характеристики затмений меняются постоянно. Поэтому задача поиска других факторов была и остается актуальной.

Большое внимание этой задаче уделил французский астроном

Таблица 1. Шкала Данжона

0	Затмение очень темное, в середине полной фазы Луна едва заметна на небе
1	Затмение темное, Луна имеет серо-коричневый цвет, детали на ней трудноразличимы
2	Темно-красные, ржавые цвета, темная зона в центре и более светлые края
3	Кирпично-красный цвет, края тени желтоватые, более яркие
4	Ярко-оранжевые, медные цвета, яркая, голубоватая граница тени

Андре Данжон. Он объединил большое количество описаний и результатов наблюдений лунных затмений и в 1920 году ввел их классификацию с оптической точки зрения — известную шкалу Данжона, которая используется и в настоящее время. Во времена Данжона систематической фотометрии поверхности Луны еще не проводилось, и за основу своей классификации он взял визуальные восприятия яркости и цвета затмившейся Луны. Каждому затмению приписывалось от 0 до 4 баллов, в соответствии с таблицей 1.

Естественно, подобная классификация была далека от совершенства. Визуальное восприятие могло не соответствовать истинным оптическим характеристикам. То же самое можно сказать о цветовых оттенках затмения. Исчезновение цвета у темных затмений может быть связано с цветовой чувствительностью глаза, ухудшающейся для темных объектов. Голубая кайма земной тени, которую Данжон рассматривает как признак большой яркости (4 баллов), может наблюдаться как у светлых, так и у темных затмений, как это было, к примеру, 9 декабря 1992 года, и вообще связана не с аэрозолем, а с другой компонентой атмосферы, речь о которой пойдет ниже.

Тем не менее, оценка по шкале Данжона могла использоваться как показатель яркости затмений с целью их систематического анализа, поиска возможной периодичности и связи с какими-либо внешними факторами. Данжон решал эту задачу, сразу отбрасывая темные затмения, произошедшие после вулканических извержений. В результате он обнаружил циклические изменения яркости лунных затмений с периодом 10.87 лет, близким к периоду изменения солнечной активности. При этом яркость постепенно увеличивается в эпоху

нарастания, максимума и спада солнечной активности и резко уменьшается во время ее минимума. Позже было предложено возможное объяснение этого феномена: во время минимума активные области на Солнце появляются, в основном, вблизи экватора, энергичные частицы солнечного ветра в большем количестве распространяются в плоскости эклиптики и достигают земной атмосферы, вызывая образование аэрозоля.

Найденная Данжоном связь не была достаточно четкой. Английский астроном Эдвард Маундер в 1921 году указал на возможные эффекты селекции, вызванные включением глубоких частных лунных затмений в обзор Данжона. Засветка от части диска Луны, не погруженной в тень, может создать восприятие темного затмения. Кроме этого, циклы яркости затмений Данжона не были сопоставлены с реальной зависимостью солнечной активности от времени.

Важнейшим этапом в развитии науки об оптике лунных затмений стал выход в 1956 году монографии чехословацкого астронома Франтишека Линка “Лунные затмения”, переведенной на русский язык в 1962 году [1]. В этой книге содержится обзор теоретических и экспериментальных работ на то время. Особое внимание уделяется вариациям яркости лунных затмений и их возможным причинам. Детально проверялась и гипотеза Данжона с учетом критических замечаний Маундера. На основе этой проверки был сделан вывод, что связь яркости затмений и солнечной активности действительно существует. Но при этом отмечалась необходимость ее дальнейшей проверки, а также решения вопроса о механизмах этой связи. Эти проблемы окончательно не решены и в настоящее время.

В книге Линка сделан обзор исследований оптической структуры земной тени, начавшихся в XX веке с использованием появившихся фотометрических средств. Оптическая структура оказалась далека от симметрии, во время некоторых затмений тень содержала светлые или темные пятна, что указывало на существенную неоднородность атмосферы на разных высотах вдоль лимба Земли. В большинстве случаев экваториальные зоны тени оказывались темнее полярных, а темные пятна часто соответствовали положению циклонов и скоплений облаков над лимбом Земли. Увеличить точность и разрешение поверхностной фотометрии деталей лунной поверхности и проследить связь структуры тени с атмосферными и климатическими особенностями стало возможным на рубеже XX и XXI веков с появлением приемников излучения нового поколения и усовершенствованием вычислительной техники.

## Затмения 2004-2008 годов: наблюдения и результаты

Первое десятилетие XXI века стало урожайным на лунные затмения, видимые из Европейской части России и сопредельных стран. Данный раздел работы написан на основе наблюдений пяти лунных затмений. Поверхностная фотометрия Луны проводилась во время полных затмений 4 мая и 28 октября 2004 года, 4 марта 2007 года и 21 февраля 2008 года в Крымской Лаборатории ГАИШ МГУ, а также во время глубокого частного затмения 16 августа 2008 года в Москве. Приборы состояли из ПЗС-матриц SBIG ST-6 и Sony DSI Pro с объективами “Рубинар-500” и “Юпитер-36В” соответственно. Измерения проводились вне затмения, в полутеневой, частной и полной теневой фазе затмений. В зависимости от камеры, спектральной полосы и фазы затмения экспозиция составляла от 0.005 до 20 секунд. Фотометрический контроль изменения прозрачности атмосферы осуществлялся с помощью измерений стандартной звезды, находящейся рядом с Луной во время затмения.

Фотометрия обоих затмений 2004 года проводилась в двойной спектральной полосе на границе видимого и инфракрасного диапазонов с максимумами на длинах волн 6750 Å и 8550 Å. Эта спектральная область, в основном, свободна от полос селективного поглощения атмосферных газов, лишь несильно задевая полосы озона  $O_3$  и водяного пара  $H_2O$ , что учитывалось при обработке данных. Оптическая карта трех затмений 2007 и 2008 годов строилась в узкой полосе с длиной волны 8670 Å. Эта полоса полностью свободна от селективного поглощения атмосферных газов. Ослабление света в атмосфере в этих спектральных областях создается, прежде всего, молекулярным и аэрозольным рассеянием излучения. Процедура фотометрии фрагментов поверхности Луны и вычитания фона неба, включая лунный ореол, описаны в [2].

Период 2004-2008 годов особенно интересен тем, что он содержит момент минимума солнечной активности. В соответствии с гипотезой Данжона, это должно было привести к резкому уменьшению яркости затмений 2007 и 2008 годов. Данный эффект мог быть еще усилен извержением вулкана Рабаул в Новой Гвинее в октябре 2006 года, после которого в течение нескольких месяцев в атмосфере наблюдался повышенный фон стратосферного аэрозоля [3, 4].

Рисунок 2 содержит распределение величины относительного потемнения поверхности Луны внутри земной тени для четырех лун-

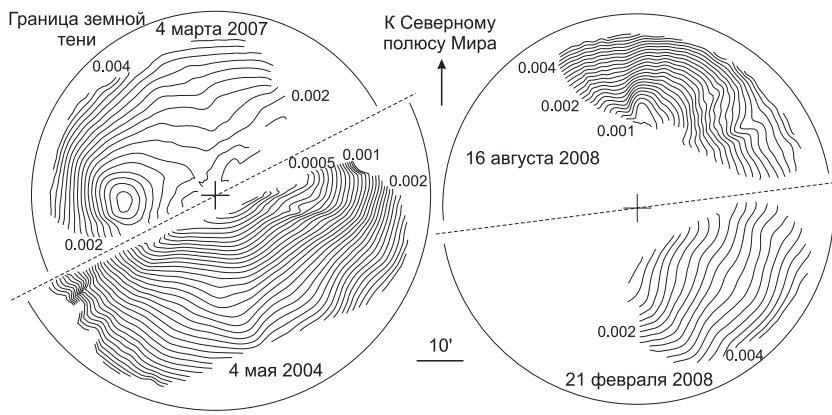


Рис. 2. Оптическая структура земной тени во время затмений 2004-2008 годов

ных затмений в указанных выше спектральных полосах. Сразу можно сказать, что уменьшения яркости затмений в 2007-2008 годах не произошло. Данная величина в эти годы даже несколько выше, чем в 2004 году, однако это связано с большей инструментальной длиной волны. Для затмений 4 мая 2004 года и 4 марта 2007 года обращает на себя внимание существенное потемнение в экваториальной области, в соответствии с [1]. Во втором из этих случаев потемнение вырождается в глубокий минимум яркости, удаленный от центра земной тени точно в экваториальном направлении. Оба затмения 2008 года характеризуются менее типичной оптической структурой тени с потемнением в полярных областях (южной и северной для первого и второго затмения соответственно). Темное пятно в южной полярной области заметно и для затмения 4 мая 2004 года.

На рисунке 3 показаны зависимости относительного потемнения элементов лунной поверхности от углового расстояния до центра тени для затмения 4 мая 2004 года. Символы соответствуют наблюдательным данным для разных позиционных углов в тени, линия — результатам численного моделирования для газовой атмосферы без аэрозоля. На рисунке виден эффект Зеелигера — максимальный градиент яркости лунной поверхности наблюдается чуть дальше геометрической границы тени.

Можно видеть, что во внешней части тени, а также за ее пределами яркость Луны совпадает с данными теоретической газовой

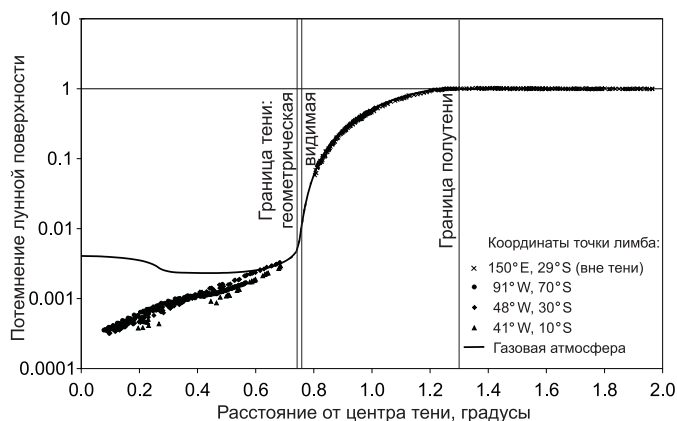


Рис. 3. Экспериментальный и теоретический профиль яркости лунного затмения 4 мая 2004 года

модели, в то время как во внутренних областях тени экспериментальная яркость существенно ниже. Подобная картина наблюдается и для других затмений. Из этого можно сделать вывод, что тропопауза и стратосфера, “ответственные” за внешние области тени, вполне соответствуют газовой модели, а ниже появляется дополнительное ослабление, очевидно связанное с атмосферным аэрозолем. На этом базируется метод решения обратной задачи и определения аэрозольного ослабления на разных высотах над разными точками лимба, подробно описанный в [2, 5].

Результатами подобных вычислений являются значения оптической толщины аэрозоля вдоль луча, проходящего на разных высотах над земной поверхностью. Распределения этих величин для высоты 10.5 км величин вдоль лимба Земли для всех пяти затмений показаны на рисунке 4. Вполне естественно, что темные пятна, наблюдавшиеся на оптических картах лунной тени, соответствуют областям повышенной аэрозольной оптической толщины над лимбом.

Сопоставление полученной картины с метеокартами на даты затмений показывает, что в большинстве случаев областям повышенного содержания аэрозоля на высоте 10.5 км соответствуют зоны облачности на меньших высотах. Во время затмений 4 мая 2004 года и 4 марта 2007 года экваториальная зона лимба пришлась на материковые зоны, тропосфера которых содержит большое количество

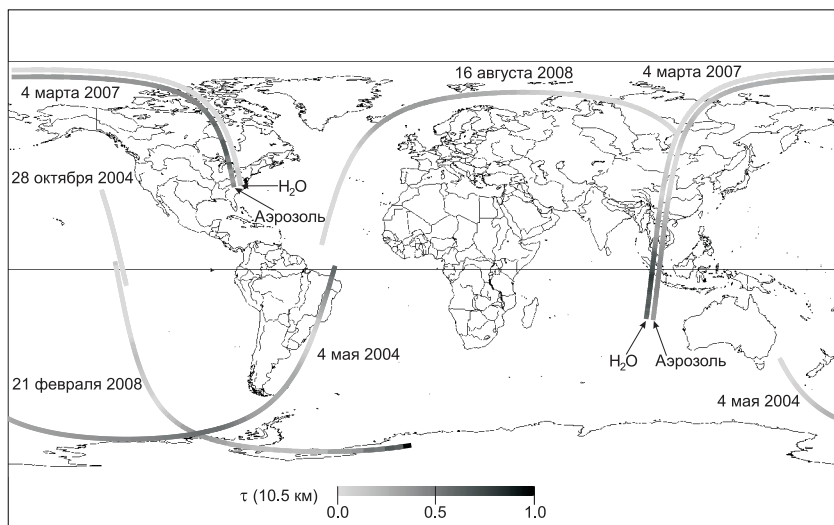


Рис. 4. Распределение аэрозоля в верхней тропосфере на основе данных лунных затмений

аэрозоля, что стало причиной потемнения экваториальных зон тени в эти два затмения. Экваториальная часть лимба затмения 2007 года находится недалеко от вулкана Рабаул, что могло дополнительно увеличить содержание аэрозоля.

Затмения 21 февраля и 16 августа 2008 года раскрывают другую картину: экваториальные зоны лимба приходятся на океаны и оказываются более прозрачными. В то же время облачные районы в Антарктиде и вблизи Исландии задерживают солнечное излучение и вызывают полярное уменьшение яркости тени в первом и втором затмении соответственно. Антарктическая облачность также связана с полярным пятном в тени 4 мая 2004 года.

### Лунные затмения и водяной пар

Как уже говорилось выше, лунные затмения можно использовать для исследования глобального распределения малых газовых примесей в атмосфере. С этой целью поверхностная фотометрия Луны во время затмения 4 марта 2007 года наряду с узкой полосой 8670 Å проводилась в полосе с эффективной длиной волны 9380 Å, попа-



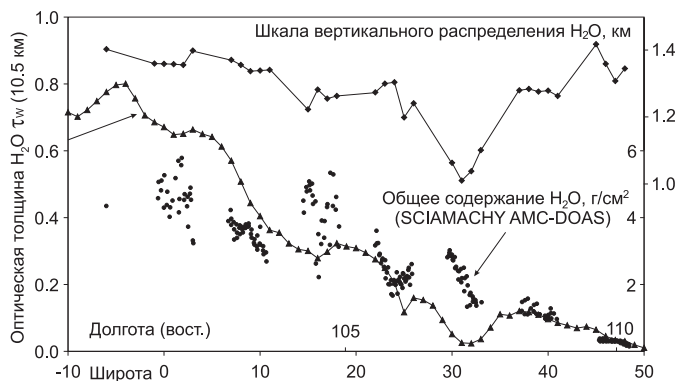


Рис. 5. Характеристики водяного пара по данным затмения 4 марта 2007 года

дающей в область сильного селективного поглощения водяного пара  $H_2O$  (эффективное сечение поглощения молекулы в инструментальной полосе составляет  $5.6 \cdot 10^{-23} \text{ см}^2$ ). Сопоставляя результаты наблюдений в обеих полосах и считая аэрозольное ослабление (которое мало зависит от длины волны) в них одинаковым, мы можем получить значения оптической толщины водяного пара, аналогичные полученным выше значениям для атмосферного аэрозоля.

Оптическая структура земной тени 4 марта 2007 года во второй инструментальной полосе во многом аналогична первой полосе, но темное пятно в экваториальной зоне тени выражено еще более резко [5], что указывает на значительное присутствие водяного пара в экваториальной тропосфере. Этот естественный вывод подтверждается результатами, показанными на рисунке 4.

Получившееся широтное распределение водяного пара в верхней тропосфере оказывается в хорошем согласии с данными космического мониторинга этой атмосферной составляющей. На рисунке 5 приведены зависимости оптической толщины водяного пара по касательной траектории с высотой 10.5 км от координат точек лимба на основе измерений лунного затмения, а также общего содержания  $H_2O$  в атмосфере в тех же районах по данным космической миссии SCIAMACHY [6]. Уверенная корреляция обеих величин позволяет определить величину характерной шкалы вертикального распределения водяного пара в этих районах, также показанную на рисунке 5. Ее значение составляет около 1.3 км, что в 6 раз меньше аналогичной

шкалы для воздуха. Широтные вариации этой величины невелики, заметно лишь ее уменьшение в горных районах юго-восточной Азии.

## Лунные затмения и атмосферный озон

Одна из самых важных малых составляющих земной атмосферы, защищающая живые организмы от солнечного ультрафиолета, является также химически и оптически активной компонентой нашей газовой оболочки. Молекула озона  $O_3$  характеризуется большим количеством полос поглощения не только в ультрафиолетовом, но и в других диапазонах электромагнитного спектра. Наличие инфракрасных полос на длине волны 9.6 мкм включает тропосферный озон в список парниковых газов. Есть у озона полосы поглощения и в видимом диапазоне — полосы Шапюи. Они охватывают зеленую, желтую и красную область, а их максимум приходится на длину волны 6000 Å. Эти полосы не очень сильные, при нормальном содержании озон задерживает лишь 4 – 5% излучения, идущего вертикально через атмосферу. Но если излучение распространяется по касательной сквозь озоновый слой, оно будет существенно поглощаться, изменяя свой спектральный состав и приобретая голубой цвет, присущий концентрированному озону в лабораториях (голубые лучи озоном не поглощаются).

Максимальная концентрация озона достигается в стратосфере на высотах 20-25 км. Молекулярное рассеяние на этих высотах уже невелико, и коротковолновое излучение может пройти по касательной траектории и частично выйти из атмосферы. Угол преломления у него будет также мал, и оно попадает в самые внешние области земной тени. В итоге, если во время лунного затмения лимб Земли пройдет через районы, богатые озоном, внешние области тени могут приобрести весьма нетипичный для затмения голубоватый оттенок. Подобная ситуация имела место 4 марта 2007 года, когда лимб пересекал обширные зоны зимне-весеннего озонового максимума в Азии и Северной Америке. Наличие полос Шапюи позволило уже в первой половине XX века исследовать высотное распределение озона на основе фотометрии лунных затмений [1].

Наблюдения затмений 2004-2008 годов, описанные выше, проводились вне полос поглощения озона (за исключением небольшого перекрытия полос Шапюи и инструментального диапазона 2004 года), и корреляции результатов с распределением озона, по идее, быть не должно. Однако, результаты наблюдений в южной области зем-

ной тени 4 мая 2004 года и 21 февраля 2008 года показали сходство распределения аэрозоля в верхней тропосфере и нижней стратосфере (темных зон в тени) и локальных минимумов общего содержания озона в южных умеренных и полярных широтах. Ситуация обратна случаю истинного озонового поглощения.

Данный факт можно объяснить тем, что в южной полярной стратосфере на высоте 15-17 км эффективен механизм образования перламутровых или полярных стратосферных облаков. Эти облака имеют сложный химический состав, в который входят, в частности, соединения хлора и азота. При освещении Солнцем на поверхности аэрозольных частиц протекают химические реакции, в ходе которых в атмосферу поступает свободный атомарный хлор и окиси “нечетного” азота ( $NO$ ,  $NO_2$ ). Эти химические компоненты активно разрушают стратосферный озон в ходе циклических реакций, сами при этом сохраняясь. Подобным образом один атом хлора может уничтожить несколько миллионов молекул озона. Выброс в атмосферу соединений хлора и брома антропогенного происхождения в XX веке посредством описанного механизма привел к появлению “озоновых дыр” в южной атмосфере. После принятия Монреальского протокола в 1987 году выброс галогеносодержащих соединений в атмосферу сократился, но восстановление озонового слоя продлится, как минимум, несколько десятилетий.

В северном полушарии процесс образования полярного стратосферного аэрозоля идет не столь эффективно, и, к счастью, такого сильного уменьшения количества озона там не наблюдается. Соответственно, корреляция данных “северных” лунных затмений 4 марта 2007 года и 16 августа 2008 года и общего содержания озона также отсутствует.

## **Заключение**

Как мы видим, лунные затмения имеют не только богатую историю наблюдений, но и проявляют связь со многими актуальными проблемами оптики и состава атмосферы Земли. Ряд вопросов, которые казались уже решенными в XX веке, по-прежнему остаются открытыми. К примеру, вывод Данжона об увеличении содержания аэрозоля в атмосфере и потемнении лунных затмений во время минимума солнечной активности не подтвердился в ходе наблюдений 2004-2008 годов. В статистической проверке нуждается связь аэрозольного ослабления и общего содержания озона как в южном, так

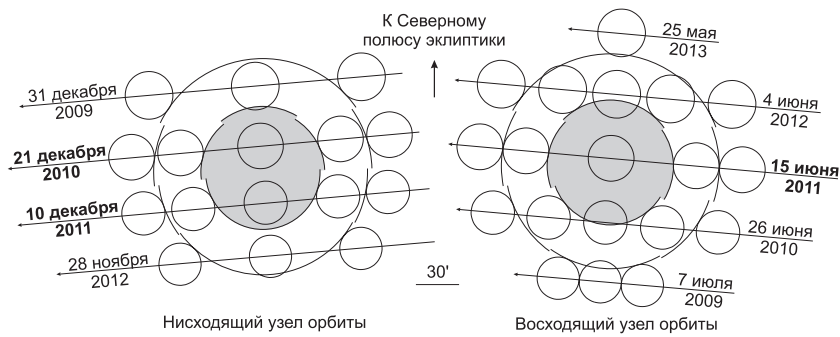


Рис. 6. Лунные затмения с середины 2009 до середины 2013 года

и в северном полушарии.

Все это прибавляет интерес к фотометрическим и спектральным наблюдениям лунных затмений. В заключение кратко опишем лунные затмения, которые произойдут в предстоящие годы. Летом 2009 года начнется новая четырехлетняя “вавилонская серия”, состоящая из 9 лунных затмений, разделенных интервалами в 6 лунных месяцев. В нее войдут 3 полутеневых, 3 частных и 3 полных теневых затмения. Видимый путь Луны сквозь земную тень и полутень во время всех затмений показан на рисунке 6, выполненном в эклиптической системе координат.

Первое теневое затмение этой серии начнется практически одновременно с новым 2010 годом в Уральском Федеральном округе России и будет видно со всей нашей страны. В России будут также хорошо видны два полных теневых затмения 15 июня и 10 декабря 2011 года. Особенно интересным будет первое из этих затмений, во время которого Луна пройдет практически через центр земной тени. Его наблюдения будут эффективны для анализа аэрозоля и малых газовых составляющих экваториального пояса Земли. Второе затмение вновь обратит внимание на проблемы стратосферного аэрозоля и содержания озона в южном полушарии нашей планеты. Необходимо также добавить, что после 2011 года начнется длительный период, неблагоприятный для наблюдений полных лунных затмений из центральных регионов нашей страны.

Автор работы выражает благодарность своему многолетнему коллеге Игорю Алексеевичу Маслову, совместно с которым проводились наблюдения лунных затмений 2004-2008 годов.

## Список литературы

1. *Линк Ф.* Лунные затмения. — М.: Физ.-мат. лит., 1962.
2. *Ugolnikov O. S., Maslov I. A.* Atmospheric Aerosol Limb Scanning Based on the Lunar Eclipses Photometry // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer.* — 2006. — Vol. 102. — P. 499.
3. *Зуев В. В., Бурлаков В. Д., Долгий С. И., Невзоров А. В.* Аномальное аэрозольное рассеяние в атмосфере над Томском в осенне-зимний период 2006/2007 г.г. // *Оптика атмосферы и океана.* — 2007. — Т. 20, вып. 6. — С. 524.
4. *Угольников О. С., Маслов И. А.* Исследования стратосферного аэрозольного слоя на основе поляризационных измерений сумеречного неба // *Космические исследования.* — 2009. — Т. 47. — В печати.
5. *Ugolnikov O. S., Maslov I. A.* Altitude and Latitude Distribution of Atmospheric Aerosol and Water Vapor from the Narrow-Band Lunar Eclipse Photometry // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer.* — 2008. — Vol. 109. — P. 378.
6. *Noel S., Buchwitz M., Bovensmann H., P. Burrows J.* Validation of SCIAMACHY AMC-DOAS water vapour columns // *Atmosphere Chemistry and Physics.* — 2005. — Vol. 5. — P. 1835.