

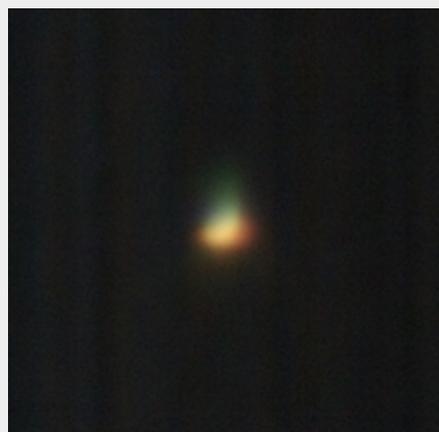
## Съемка планет (II. Атмосфера)

Итак, отраженный планетой свет направляется к нам, и, прежде чем попасть в объектив телескопа, встречает на пути атмосферу Земли. И если обстоятельства видимости той или иной планеты можно точно рассчитать на много лет вперед, то поведение земной атмосферы, наоборот, отличается малой предсказуемостью. Многие начинающие любители астрономии не обращают внимания на состояние атмосферы, сосредотачивая усилия на техническом обеспечении наблюдений. Повседневный опыт говорит нам, что воздух – прозрачный, и если с неба не идет дождь или снег, и видно какие-нибудь звезды, то можно приступать к наблюдениям, ожидая увидеть хорошие изображения небесных тел. Но ведь это тот же самый воздух, который дает опору многотонным самолетам, раскаляет обшивку возвращающихся с орбиты космических кораблей, испаряет или взрывает метеороидные тела. Известное высказывание, что «мы живем на дне воздушного океана» – довольно точно передает реальную ситуацию. Свет звезд и планет, прежде чем достигнуть наших глаз, проходит через многокилометровую толщу воздуха, которая, в свою очередь, состоит из перемещающихся и перемешивающихся слоев разной температуры и плотности. В итоге влияние атмосферных условий на астрономические наблюдения настолько велико, что оказываются целесообразными затраты на размещение больших профессиональных обсерваторий в труднодоступном высокогорье. Но и там приходится применять различные технические хитрости, чтобы преодолеть искажения изображений, все еще вносимые атмосферой. Радикально проблему решают выводом телескопов в космос. Отсутствие атмосферы позволяет выйти на дифракционное разрешение, а также работать в тех диапазонах длин волн, которые блокируются земной атмосферой. Но такой подход пока весьма затратен даже по масштабам международных научных организаций, не говоря об отдельных любителях астрономии.

Поскольку совсем избавиться от влияния атмосферы нам пока не удастся, попробуем определить ее самые «мешающие» свойства.

Если бы мы на минутку представили, что атмосфера превратилась в неподвижную «стеклянную» оболочку вокруг Земли, то увидели бы, что изображение не дрожит и не размывается, но все равно подвержено влиянию **атмосферной рефракции**. Рефракция света в атмосфере создает небольшой подъем светила над горизонтом, который, однако, приводит к тому, что в дни равноденствий продолжительность дня на несколько минут больше продолжительности ночи. Сильнее всего рефракция проявляется у горизонта, что можно видеть невооруженным глазом – Солнце или Луна на закате или на восходе заметно «сплющиваются» из-за того, что рефракция слишком сильно поднимает нижний край диска светила относительно его верхнего края. Солнце или Луна, видимые на горизонте, геометрически находятся под ним и наблюдаются только благодаря рефракции, достигающей на горизонте 35'. На больших высотах над горизонтом влияние рефракции уменьшается и полностью исчезает в направлении зенита. Если бы рефракция только меняла форму объекта, она не представляла бы особой проблемы. Форму можно было бы подправить при обработке снимка. Но так же, как и в стеклянной линзе, в атмосфере существует зависимость величины рефракции от длины волны света (*дисперсия света*).

Чем короче длина волны (чем ближе к синему концу видимого спектра), тем сильнее проявляется рефракция. Из-за этого не только сдвигаются по отношению к друг другу цветовые каналы при съемке цветной камерой, но и появляется размывание изображения в вертикальном направлении в пределах одного канала (особенно сильно для синего), поскольку разделяющие каналы цветные фильтры пропускают довольно широкий диапазон соседних длин волн (в десятки нанометров). Так как рефракция, напомним, наиболее велика у горизонта и спадает до нуля в зените, становится понятной важность наблюдений объекта на как можно большей высоте над горизонтом (а также то, что разные географические широты «не равноправны» с точки зрения планетных наблюдений).



Изображение Меркурия.  
Высота над горизонтом  
10,2°.

Более строгое описание преломляющих свойств атмосферы можно найти в соответствующих источниках, например, здесь (англ.). В приведенном на указанной странице графике под названием «Atmospheric dispersion effect» представлены результаты моделирования величины рефракции для трех типичных диапазонов цветных фильтров (полоса пропускания каждого принята ~90 нм) и яркостного канала как их комбинации (полоса ~270 нм). Видно, что синий канал гораздо сильнее подвержен рефракции, чем красный, а также то, что величина рефракции зависит от высоты нелинейно. По вертикальной оси отложено смещение изображения (размывание) в угловых секундах. На высотах до 15° величина рефракции настолько велика, что в синем канале смещение изображения превышает 3" (сравнимо с пределом разрешения для 40 мм объектива!). А ведь это обычная для наших широт высота Венеры и Меркурия, да и внешние планеты половину своего орбитального периода проводят в южной части эклиптики, которая на наших широтах едва достигает 20-градусной высоты.

Как снизить влияние рефракции? Универсальный совет – «поднять» объект над горизонтом путем переезда куда-нибудь поближе к земному экватору. Или подождать, пока планета поднимется выше над горизонтом при своем суточном движении (это, правда, сильно зависит от обстоятельств видимости планеты – она может годами идти на «неудобной» высоте или же интересующее явление может происходить в «неудобный» момент). Либо

воспользоваться корректором атмосферной дисперсии (atmospheric dispersion corrector, ADC) – оптическим приспособлением, компенсирующим дисперсию атмосферы за счет обратной дисперсии настраиваемой системы стеклянных призм. К сожалению, ADC компенсирует только «статическую» составляющую влияния атмосферы – рефракцию, но бессилён против «динамической» составляющей – турбулентных течений различной плотности, постоянно меняющих ход лучей в атмосфере, которая в реальности совсем не похожа на неподвижный стеклянный купол.

Прежде чем взглянуть на атмосферу в динамике, напомним, что, помимо рефракции, на небольшой высоте над горизонтом в значительной мере проявляется **атмосферная экстинкция** – ослабление света за счет его более долгого пути в атмосфере. Она смягчает яркость Солнца у горизонта (одновременно делая его краснее, т.к. экстинкция усиливается с уменьшением длины волны) и сильно ослабляет свет звезд и планет. Это еще один фактор, который сильно портит наблюдения светил невысоко над горизонтом. Вдобавок, при наблюдениях недалеко от крупных населенных пунктов, к естественной экстинкции часто добавляется поглощение света в городском смоге, печном дыме и т.п. (их действие может проявляться и на сравнительно большой высоте над горизонтом), которое не только сильно уменьшает яркость объекта, но и практически лишает его синей части спектра.

Однако и чистый воздух не является одинаково прозрачным даже в сравнительно узком видимом диапазоне, а также в той части ближнего ИК (инфракрасного света), к которой восприимчивы обычные электронные камеры. Если взглянуть на **график пропускания излучения земной атмосферой**, видно, что она сравнительно прозрачна только в пределах отдельных «окон». Вне их, свет сильно поглощается и практически не может использоваться для получения информации о небесных объектах (всеволновая астрономия появилась с выносом инструментов за пределы плотных слоев земной атмосферы посредством стратостатов, самолетов и космических аппаратов). В диапазоне длин волн 300 – 1000 нм, который качественно соответствует диапазону чувствительности обычных электронных камер и немного шире диапазона, воспринимаемого глазом человека (380 – 780 нм), пропускание атмосферы сравнительно велико, но также неравномерно. Основным компонентом, поглощающим ИК-излучение, является водяной пар. В частности, даже малозаметная на глаз туманная дымка сильно снижает эффективность планетных фильтров, пропускающих ИК (например, Baader IR-pass 685 нм и т.п.). По этой причине (а поглощение более длинноволнового ИК водяным паром еще сильнее), наземные профессиональные ИК-наблюдения проводятся в высокогорье, где в атмосфере почти нет водяного пара. С уменьшением длины волны растет **рэлеевское рассеяние** света на неоднородностях плотности воздуха. На длине волны 1000 нм рэлеевское рассеяние практически отсутствует, а на 500 нм оно составляет уже около 15%, сильно возрастая в синей и фиолетовой части спектра (отсюда голубой цвет дневного неба): на 200 нм рэлеевскому рассеянию подвергается практически весь свет, и его нельзя было бы использовать для получения изображений небесных объектов. Впрочем, свет с длиной волны короче 300 нм и так почти не проникает к земной поверхности – его поглощают кислород и озон. Таким образом, атмосфера Земли изменяет не только яркость планеты, но и, в заметной степени, ее «естественный» цвет, причем степень этих изменений зависит от высоты объекта над горизонтом, от метеоусловий, от высоты места

наблюдений над уровнем моря и от локального загрязнения атмосферы. Впрочем, и это не самая главная «неприятность», связанная с влиянием атмосферы.

Как известно, форма волнового фронта не искажается, если свет распространяется через однородную среду. К сожалению, наша атмосфера далеко не однородна. Несколько упрощая, можно сказать, что существует два основных механизма в атмосфере, влияющих на *качество изображения* (в английских источниках оно часто называется *seeing*, и в виде «сиинг» неформально употребляется и в русскоязычных). Первый механизм – это вертикальное движение воздуха, вызванное подъемом теплого воздуха и его перемешиванием с более холодным наверху; второй – ветры (течения) в высотных слоях, переносящие перед апертурой телескопа сравнительно медленно меняющиеся турбулентные образования, состоящие из воздушных ячеек, имеющих разный размер и температуру. Отличия в температуре вызывают отличия в показателе преломления, что в свою очередь приводит к отставанию или опережению отдельных точек волнового фронта, искажая его форму. Подробное описание источников атмосферной турбулентности и ее влияния на астрономические наблюдения можно найти в [1 (с. 27-32), 2 (с. 36-40, 140-145), 4].

Искажения волнового фронта приводят к тому, что изображения небесных тел страдают от вариаций яркости и разрешения. Нередко именно беспокойная атмосфера не дает рассмотреть или запечатлеть на фото детали поверхности планеты, которые теоретически должны поддаваться имеющемуся телескопу. Для оценки качества изображения (сиинга) по звездам используются 10-бальная шкала Пикеринга, 5-бальная шкала Антониади или измеренный и выраженный в секундах дуги параметр FWHM (полная ширина на половине максимальной амплитуды). Для визуальных наблюдений или фотографии с короткими «планетными» выдержками визуальные числовые шкалы дают более удобный способ оценки сиинга, чем «медленные» измерения FWHM. Однако нужно помнить, что оригинальное описание шкалы Пикеринга составлялось для 125-мм рефрактора, поэтому при значительно отличающейся апертуре имеющегося телескопа, нужно ориентироваться на относительные размеры изображения в сравнении с теоретическим дифракционным пределом. Также для планетных наблюдений описана 5-бальная шкала отдела планет и Луны Московского отделения ВАГО, которая определяется следующим образом: 1 – изображение сильно дрожит, весь диск струится, иногда искажается его форма, он окрашивается в различные цвета; детали не видны; временами изображение совсем расплывается; 2 – изображение колеблется; диск заметно струится, но форма его не искажается; окрашивание невелико; на диске видны только самые крупные детали; слабые внешние части планеты размыты; 3 – изображение почти неподвижно; края диска слегка струятся; видны все основные детали; иногда наблюдаются краткие (1 – 2 сек.) успокоения; 4 – изображение резкое и неподвижное; края диска четкие; видны мелкие детали и самые слабые части планеты, часто наступают моменты полного успокоения; 5 – изображение все время исключительно резкое; дрожание и помутнения редки (через 5 – 8 сек.); самые мелкие детали видны четко, как на рисунке; инструмент выдерживает максимальное для него увеличение [3, с. 147-148]. Отметим также, что иногда плохой сиинг может быть следствием не «бурлящей» атмосферы, а недостаточной юстировки телескопа (или же его собственных аберраций), когда случайные «удачные» искажения волнового фронта атмосферой компенсируют недостатки оптики телескопа и создают моменты хорошей видимости. Нередко тщательная юстировка телескопа улучшает статистику качества изображения.

Одной из характеристик атмосферной турбулентности является *длина* (или радиус) *атмосферной когерентности*  $r_0$  (параметр Фрида), которая обусловлена размером однородных ячеек в атмосфере и которая обычно варьируется в пределах 7 – 20 см (от плохих условий до идеальных), большую часть времени имея значение около 11 см [2, с. 141]. Радиус когерентности также увеличивается с длиной волны (пропорционален  $\lambda^{1,2}$ ), так, если  $r_0 = 11$  см для зеленого света (550 нм), то для красного (650 нм)  $r_0 = 13,5$  см, а для фиолетового (400 нм)  $r_0 = 7,5$  см. Соответственно меняется и параметр *времени когерентности*, показывающий, как долго существующая структура атмосферных ячеек остается неизменной. Его значение лежит в диапазоне 3 – 30 мс, зависит от  $r_0$  и скорости ветра и также показывает зависимость от длины волны (чем ближе к синему, тем меньше время когерентности). Отсюда, к слову, появляется критерий выбора длины экспозиции при планетной съемке.

В итоге, длина атмосферной когерентности обуславливает явление зависимости качества изображения от апертуры телескопа при не идеальном сиинге, которое вольно можно назвать «обратным эффектом апертуры». С одной стороны, известно, что предельное разрешение телескопа прямо пропорционально его апертуре, но при учете влияния атмосферы оказывается, что при апертуре  $D > r$  качество изображения сильнее зависит от состояния атмосферы, которая может уменьшить наблюдаемое разрешение. Для небольших объективов влияние атмосферы также заметно, но оно приводит, в основном, к смещению изображения планеты как целого со сравнительно низкой частотой, что дает возможность отслеживать изображение глазом или получать кадры видеозаписи, на которых диск планеты передается почти без искажений. Для крупной апертуры, «охватывающей» несколько длин когерентности, сильнее проявляется не смещение изображения, а его распад на отдельные, накладывающиеся друг на друга пятна (так называемые *спеклы* [2, с. 134]), формируемые разными атмосферными ячейками. Визуально это проявляется в быстрых, порядка времени когерентности, *вариациях количества видимых деталей и формы объекта* (AVI, 3 МБ) и, в случае сильной турбулентности, бывает непросто отыскать кадры с подходящим разрешением даже среди нескольких тысяч записанных камерой. Отсюда следует, что чем крупнее телескоп, тем ближе к идеальному должен быть сиинг, чтобы полностью проявились преимущества апертуры. К примеру, в некотором наблюдательном пункте 125-мм телескоп показывает теоретическое разрешение в 3 из 4 сеансов наблюдений ( $D$  примерно соответствует  $r_0$ ), а 235-мм телескоп в том же пункте может иметь только 1 удачный сеанс из 4. Это создает очередную трудность планетной съемки, ведь для достижения высокой детализации снимков необходимо высокое разрешение связки «атмосфера-телескоп».

В профессиональных наземных телескопах, у которых апертура в десятки и сотни раз превосходит длину когерентности, для приближения к дифракционному разрешению используются системы адаптивной оптики, с высокой частотой отслеживающие атмосферные вариации волнового фронта и корректирующие его форму подвижками отдельных частей зеркал. Имеющиеся системы любительского уровня, в общем случае, не предназначены для съемки планет, так как требуют наличия точечного источника – звезды, причем довольно яркой и в непосредственной близости от снимаемого объекта, что совпадает очень редко. Поэтому основной тактикой «планетофотографов» является поиск или «поджидание» спокойной атмосферы и съемка нескольких тысяч кадров с последующим усреднением самых

четких из них. При этом можно использовать свойство увеличения  $\theta_0$  с ростом длины волны – большинство электронных камер чувствительно к инфракрасному свету вплоть до 1 мкм и способно работать с ИК-фильтрами (Baader IR-pass 685 nm, Astronomik ProPlanet 742 и т. п.), причем время когерентности в ИК также больше, а значит допустимы более длинные выдержки, что увеличивает отношение «сигнал-шум». Получающееся в ИК изображение нередко четче того, что получается в видимом диапазоне (при том, что теоретическое разрешение оптики уменьшается с ростом длины волны), на него также меньше влияет рефракция. При необходимости получения цветного изображения собираются IR-RGB композиции, когда ИК-изображение работает в качестве яркостного канала, а цвет приходит с изображения, снятого в видимых цветах. Тем не менее, ИК-фильтр – не панацея, он лишь ослабляет влияние турбулентности, но не устраняет его, эффективность фильтра сильно падает при наличии в воздухе туманной дымки (и вообще водяного пара), а также он может оказаться «несовместим» с телескопом, если это, например, рефрактор-ахромат или апохромат, оптимизированный под видимый диапазон.

Помимо высокочастотной «высотной» компоненты турбулентности и более сильной низкочастотной, формирующейся на высотах ниже 500 м, большой вклад в размывание изображения вносят локальные источники – печные трубы, нагретые и/или остывающие крыши зданий и земля, и даже люди, стоящие рядом с апертурой. Поэтому желательно по возможности выбирать место наблюдения так, чтобы планета не оказывалась над такими источниками. И, конечно, пока телескоп не достиг теплового баланса с окружающим воздухом, в самой трубе (особенно в открытых трубах рефлекторов) происходит конвективное движение слоев воздуха, примыкающих непосредственно к главному зеркалу, которое затрудняет даже грубую фокусировку, не говоря уже о достижении идеальной картинки. Поэтому перед наблюдениями требуется позаботиться о выравнивании температур окружающей среды и телескопа.

Днем (при наблюдениях Солнца, планет) атмосфера обычно еще более неспокойна и кадры с хорошим разрешением становятся еще более дефицитными.



Итак, «невидимый» воздух оказывается очень коварной штукой – он влияет на качество изображения планеты самыми разными способами (не говоря уже о банальной облачности),

и даже технически совершенное оборудование не может полностью исключить это влияние. Поэтому любителям астрономии приходится рассчитывать время наилучшей в году видимости той или иной планеты, когда она выше всего поднимается над горизонтом, изучать особенности атмосферы в разной местности, иногда предпринимая дальние экспедиции в высокогорье, и «охотиться» за моментами хорошей видимости. А поскольку почти все нежелательные атмосферные эффекты усиливаются в синей части спектра, при поканальной планетной съемке иногда разумнее не снимать его отдельно, а синтезировать искусственно на основе информации красного и зеленого каналов (см. *Обработка*). Изображение получается эстетически приемлемым, хотя и несколько расходится с «естественной» окраской.

### *Литература*

1. Мартынов Д.Я. Курс практической астрофизики. – М.: Наука, 1977. – 544 с.
2. Уокер Г. Астрономические наблюдения.: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 352 с.
3. Бронштэн В.А. Планеты и их наблюдение. – М.: Наука, 1979. – 240 с.

Часть I. Объекты

Часть III. Телескоп

обновление 20.05.2015