

Часть 2

НАБЛЮДАТЕЛЬНАЯ АСТРОНОМИЯ

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ЛУННОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ИНТЕНСИВНОСТЬ КОРПУСКУЛЯРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА

Количественное исследование люминесценции лунной поверхности осуществлено сравнением контуров широких фраунгоферовых линий спектров лунных деталей с контурами этих линий в солнечном спектре. Удалось установить и измерить люминесцентное свечение системы Аристарх—Геродот. Люминесцентные свойства оказались связанными с белым веществом лучевых систем лунной поверхности. Другие обследованные детали лунной поверхности люминесценции не показали. Эти измерения вместе с измерениями спектральной отражательной способности кратера Аристарх позволили найти кривую люминесценции в зависимости от длины волн. По-видимому, существует две полосы: более яркая ультрафиолетовая с максимумом около 3900 Å и синяя, определенная менее уверенно с максимумом около 4300 Å. Люминесценция кратера Аристарх сильнее после полнолуния. 4 октября 1955 г. наблюдалась особенно сильная люминесценция, превышавшая нормальную в четыре раза. Повышение люминесценции объяснено действием корпускулярного потока Солнца на поверхность кратера. Отсюда определена концентрация протонов в потоке вблизи Луны, оказавшаяся равной $5 \cdot 10^3$ частиц в 1 см^2 . Эти наблюдения и отсутствие свечения на темной стороне лунного диска показывают, что на Луне нет магнитного поля. Высказаны соображения о природе лучевых систем.

Сумеречные явления на Луне не были обнаружены даже при очень тонких исследованиях. Лио и Дольфус своими наблюдениями на коронографе далеко отодвинули верхнюю границу возможной атмосферы Луны, оценив ее в $3 \cdot 10^{-8}$ атмосферы Земли [1]. Однако эта верхняя граница не исключает возможности существования на Луне ионосферы и связанных с нею явлений, например свечения ночного неба Луны. С этой точки зрения представляет интерес изучение спектра темного края лунного диска вблизи новолуния.

На 50-дюймовом рефлекторе Крымской обсерватории перед новолунием в октябре 1955 г. нами были получены такого рода

Козырев Н. А. Люминесценция лунной поверхности и интенсивность корпускулярного излучения Солнца // Изв. Крымск. астрофиз. обсерв. 1956. Т. 16. С. 148—158.

спектрограммы при перпендикулярном расположении щели спектрографа к краю диска. Спектрограммы получены камерой со светосилой 1 : 4 при экспозиции около часа. Так как яркость свечения атмосферы Луны около края должна быть в несколько десятков раз больше, чем над диском, то свечение неба Луны, близкое по яркости к свечению неба Земли, должно было быть заметным на наших снимках. На снимках совершенно отчетливо отделяется спектр пепельного света от более слабого спектра фона неба, но никаких особенностей в спектре неба около края Луны обнаружить не удалось.

Таким образом, на Луне практически отсутствует и ионосфера. Жесткая радиация Солнца должна непосредственно падать на поверхность Луны и вызывать люминесценцию минералов, слагающих ее поверхность. На Земле корпускулярное излучение Солнца вызывает полярные сияния — кагодолюминесценцию ионосферы. На Луне полярные сияния должны разыгрываться прямо на поверхности планеты. При низких температурах ночной стороны Луны, порядка -160° , многие минералы становятся люминофорами с заметным коэффициентом энергетической отдачи. Поэтому на фоне пепельного света полярные сияния поверхности Луны должны были бы наблюдаваться совершенно отчетливо. Подобные явления никогда на Луне не наблюдались; отсюда следует определенное заключение об отсутствии магнитного поля Луны. При отсутствии магнитного поля корпускулярное излучение Солнца должно падать на поверхность Луны вместе с фотонами по тем же геометрическим законам. Следовательно, люминесценция Луны может наблюдаваться только на стороне, освещенной Солнцем.

Линк [2] впервые обнаружил следующие признаки люминесценции лунной поверхности: 1) большие относительные яркости некоторых деталей поверхности Луны во время ее затмения, чем это следует из фотометрических измерений этих деталей при солнечном освещении, что объясняется люминесцентным послесвечением значительной продолжительности; 2) корреляция яркости Луны с возможными колебаниями солнечной постоянной. Колебания яркости Луны могут быть значительными вследствие изменений жесткой радиации Солнца, которая посредством люминесцентного свечения добавляется к отраженному Луной солнечному свету видимой области спектра. Эти признаки — косвенные, и поэтому крайне желательны прямые спектрофотометрические доказательства люминесценции поверхности Луны.

Фотометрическое сравнение непрерывного спектра лунной поверхности со спектром Солнца может определенно показать люминесценцию лишь тогда, когда накладывающийся спектр люминесценции содержит отдельные узкие линии. Обычно же спектр люминесценции минералов состоит из широких полос, наложение которых на отраженный солнечный спектр нельзя

с уверенностью отличить от особенностей спектральной кривой отражения лунной поверхности. Однако с полной определенностью, допускающей точные измерения, люминесценция может быть обнаружена из сравнения контуров фраунгоферовых линий в спектрах Луны и Солнца. Действительно, обозначим через I_{\odot} интенсивность солнечного спектра внутри фраунгоферовой линии по отношению к непрерывному спектру. Очевидно, что при отсутствии люминесценции контур линии в спектре Луны измениться не может и по спектру Луны должны получаться те же значения I_{\odot} . Допустим, что существует люминесценция яркости x по отношению к непрерывному спектру отраженного Луной света. Яркость x будем считать постоянной для всей фраунгоферовой линии. Чтобы получить контур линии в спектре Луны I_{ϵ} , мы должны прибавить к I_{\odot} люминесцентное свечение x :

$$I_{\epsilon} = (I_{\odot} + x)k,$$

где k — некоторый коэффициент пропорциональности, величина которого определяется условием интенсивностей в непрерывном спектре: $I_{\epsilon} = I_{\odot} = 1$. Таким образом,

$$I_{\epsilon} = \frac{I_{\odot} + x}{1 + x}. \quad (1)$$

Отсюда получается возможность определения x сравнением контуров линий в лунном и солнечном спектре:

$$x = \frac{I_{\epsilon} - I_{\odot}}{1 - I_{\epsilon}}. \quad (2)$$

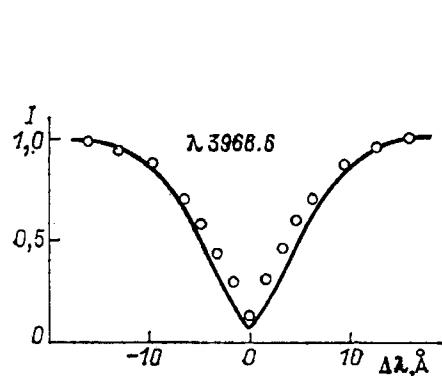
Из формулы (2) видно, что разница яркостей соответствующих точек контура линии лунного и солнечного спектров ($I_{\epsilon} - I_{\odot}$) пропорционально $(1 - I_{\epsilon})$. Следовательно, наибольшее различие контуров должно наблюдаться в центре линии и наименьшее в крыльях. Остаточная интенсивность линии из-за люминесценции будет большей, а полуширина — меньшей, и в результате линия будет казаться более узкой, чем в солнечном спектре. При умеренной дисперсии во избежание инструментальных и фотометрических ошибок следует ограничиться исследованием контуров только особо широких фраунгоферовых линий. С другой стороны, при той же яркости люминесцентного свечения величина x должна быть больше в фиолетовой части спектра, где происходит значительное уменьшение яркости солнечного спектра и отражательной способности лунной поверхности. Поэтому поиски люминесцентного свечения естественно начать с исследования контуров линий Н и К ионизованного кальция.

Спектрограммы различных участков лунной поверхности были получены нами осенью 1955 г. на 50-дюймовом рефлекторе Крымской обсерватории спектрографом с большой камерой,

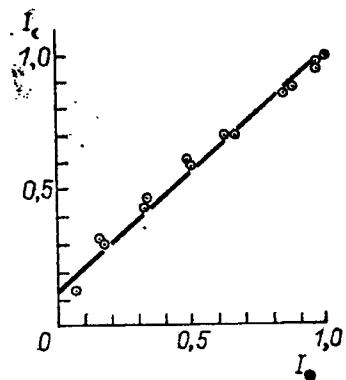
дающей линейную дисперсию около 15 Å/мм близ дублета Н и К. При ширине щели 0,05 мм на пластинках Ильфорд Гиперпанхроматик-3 экспозиции были порядка 2—10 мин для видимого участка спектра и 30—40 мин для получения контуров Н и К. По возможности в дни наблюдений с той же аппаратурой и на тех же пластинках снимался для сравнения спектр Солнца. При наблюдениях Солнца большое зеркало рефлектора закрывалось диафрагмой с 20 отверстиями диаметром 4 мм, расположенным равномерно по поверхности зеркала. Снимки Солнца получались с различными экспозициями от 0,2 до 10 с, а фотометрическая шкала (ступенчатая щель) — с экспозицией около 5—10 мин. Имея набор этих солнечных спектров, можно было на глаз сравнивать вид линий в спектрах Луны и Солнца при одинаковых плотностях непрерывного спектра. Такая возможность очень облегчала поиски люминесцирующих областей лунной поверхности. Были исследованы поверхности лунных морей (Море Ясности и Море Дождей), гористая часть центральной области Луны, дно некоторых кратеров (Платон, Шиккард, Коперник) и пятно Вуда. Эти исследования дали отрицательный результат — контуры линий Н и К оказались одинаковыми с солнечным спектром. Только кратер Аристарх с прилегающим к нему Геродотом, взятый как образец лучевой системы, показал, несомненно, другой контур этих линий. В спектре Аристарха центральная часть линий Н и К выглядит значительно уже, чем в солнечном спектре.

Кратер Аристарх расположен в восточной части лунного диска и имеет следующие селенографические координаты: $\phi = +23^{\circ}0$, $\lambda = -47^{\circ}1$. Угол отражения ϵ , т. е. угол между лучом зрения и нормалью к поверхности кратера, приблизительно равен 46° . Лучевая система кратеров Аристарх — Геродот представляет собой сплошной светлый ореол без отдельных длинных лучей, и поэтому очень удобна для спектральных исследований. Фиг. 1 дает сравнение контуров линии Н (3968,6 Å) Ca^{+} спектров Аристарха 4 октября 1955 г. и Солнца. Для уменьшения ошибок характеристической кривой эти контуры были получены по негативам с одинаковой плотностью негрерывного спектра. Построенный контур в солнечном спектре оказался хорошо согласованным с контуром этой линии по фотометрическому атласу Миннаэрта. Полученное большое различие контуров линии в спектрах Аристарха и Солнца иллюстрирует фиг. 2, на которой по оси абсцисс отложены интенсивности линии в солнечном спектре I_{\odot} , а по оси ординат — интенсивности в спектре Аристарха I_{ϵ} на тех же расстояниях от центра линии. В случае люминесценции согласно формуле (1) должна получаться линейная зависимость I_{ϵ} от I_{\odot} . Эта прямая должна отсекать на оси ординат ($I_{\odot}=0$) отрезок $I_{\epsilon} = \frac{x}{1+x}$. Таким обра-

зом, по этому графику можно сразу найти процент люминесценции по отношению к интенсивности непрерывного спектра, отраженного Аристархом: получается $x=13\%$. Точки на фиг. 2 достаточно хорошо ложатся на прямую, за исключением точки, ближайшей к началу координат, представляющей остаточную интенсивность линии Н. Существенно, что при измерении друг-



Фиг. 1. Сравнение контуров линии Н (3968.6 \AA) в спектрах кратера Ари-старх 4 октября 1955 г. (в кружках) и Солнца (сплошная линия).



Фиг. 2. Сравнение интенсивностей линии Н (3966.6 Å) в спектрах кратера Аристарх 4 октября 1955 г. — I_{c} и Солнца — I_{\odot} .

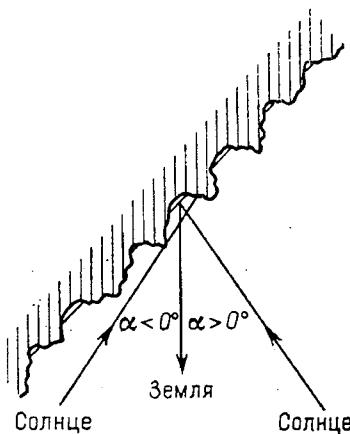
гих контуров получается то же самое: люминесценция повышает остаточную интенсивность глубокой линии значительно меньше, чем это следует по другим точкам того же контура. Очевидно, что причиной этого является некоторая систематическая ошибка, связанная, скорее всего, с эффектом Эберхарда. Действительно, на пластинке плотность фона вблизи сильного почернения всегда меньше нормального значения. Благодаря люминесценции контур линии суживается (фиг. 1), и этот эффект должен проявиться с большей силой, чем в солнечном спектре. В результате плотность в центре линии будет увеличена люминесценцией меньше, чем следует.

Результаты измерений люминесценции кратера Аристарха в различные дни приведены в таблице. В ней α — угол фазы

1955 г. (мировое время)	α , град	i , град	x_H , %	x_K , %	x_K/x_H
28.IX, 18 ^h 0 ^m	-38,5	88	0,0	0,0	—
28.X, 18 30	-35,6	85	$2,2 \pm 0,2$	$3,3 \pm 0,5$	1,5
4.X, 22 00	+41,4	23	13 ± 1	19 ± 1	1,5
4.XI, 22 00	+63,8	31	$3,0 \pm 0,3$	$4,2 \pm 0,3$	1,4

Луны, положительный после полнолуния, i — угол падения солнечных лучей, или зенитное расстояние Солнца для Аристарха в момент наблюдений, x_H — процент люминесценции, измеренный по контуру линии H (3968.6 Å), x_K — по контуру линии K (3933.8 Å), и их отношение.

Таблица показывает, что до полнолуния Аристарх люминесцирует слабее, чем после полнолуния, когда $\alpha > 0^\circ$. 28 сентября



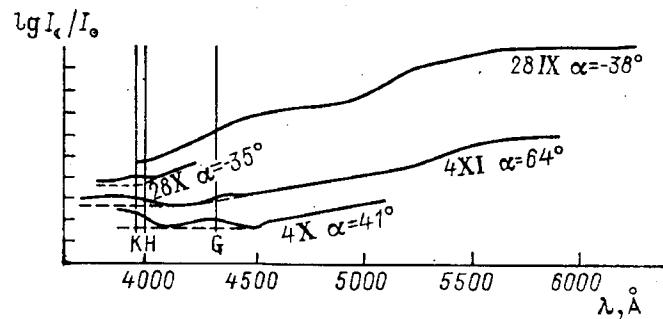
Фиг. 3. Схема освещения поверхности кратера Ари-старх до и после полнолуния.

Штриховкой показаны обычные породы лунной поверхности. Отсутствие штриховки указывает люминесцирующее вещество.

как лучи Солнца падают почти отвесно к поверхности кратера. Другое интересное обстоятельство заключается в том, что люминесценция, определенная по линии К, получается в полтора раза больше, чем по линии Н. Очевидно, дублет Н и К находится на границе полосы люминесценции, интенсивность которой увеличивается в ультрафиолетовую сторону спектра. Теперь, зная интенсивность люминесценции для длин волн Н и К, можно попытаться по распределению энергии в непрерывном спектре Аристарха найти полный контур полосы люминесценции.

На фиг. 4 изображены результаты измерений распределения энергии в спектре Аристарха по отношению к спектру Солнца. По оси ординат отложен логарифм отношения яркости в спектре Аристарха к яркости спектра Солнца для тех же длин волн. Построенные кривые представляют спектральную отражательную способность Аристарха для двух наблюдений до полнолуния и двух после. Нуль-пункт этих кривых по вертикали совершенно произведен. Самая верхняя кривая дает относи-

тельное распределение в спектре Аристарха вблизи термина- тора, когда лучевая система не была видна. Нижние кривые показывают более белое, т. е. нейтральное, отражение лу- чевым ореолом и соответствуют наблюдениям после полнолу- ния. Данные таблицы позволяют отметить (крестики на фиг. 4)



Фиг. 4. Кривые спектральной отражательной способности кратера Аристарх: $\lg(I_e/I_\odot)$.

Одно деление вертикальной оси равняется одной десятой десятичного логарифма отношения яркости в спектре кратера к яркости в спектре Солнца. Нуль-пункт кривых произволен.

интенсивность непрерывного спектра отраженного Луной света без люминесценции для длин волн Н и К. По этим крестикам можно наметить (пунктирная линия) вероятный ход спектраль- ной кривой без люминесценции. В результате получается воз- можность найти x как функцию длины волны. Вероятно, что подъем кривых около полосы G (4308 Å) также обусловли- вается люминесценцией. Вследствие малой глубины полосы G трудно сделать по ее контуру уверенное определение x . Все же можно заметить, что глубина полосы G в спектре Аристарха меньше, чем в солнечном спектре. Это обстоятельство подтвер- ждает реальность второй, синей полосы люминесценций с максимумом около 4300 Å. Постараемся теперь от относительных значений $x(\lambda)$, характеризующих люминесценцию, перейти к а- солютным энергетическим значениям.

Обозначим через L_λ абсолютное значение интенсивности люминесцентного свечения, а через B_λ — интенсивность света, отраженного от поверхности Луны при фазовом угле наблюде-ний. Тогда

$$L_\lambda = x(\lambda) B_\lambda. \quad (3)$$

Под отражательной способностью лунной поверхности будем подразумевать выражение

$$A_\lambda = \frac{\pi B_\lambda}{S_\lambda}, \quad (4)$$

где S_λ — интенсивность солнечной радиации на расстоянии Луны от Солнца, которая может быть выражена через среднюю интенсивность излучения солнечной поверхности F_λ :

$$S_\lambda = 2,16 \cdot 10^{-5} \pi F_\lambda. \quad (5)$$

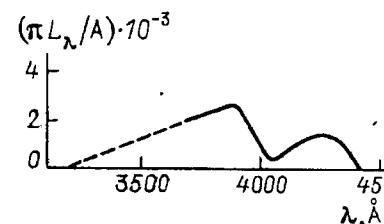
Для полной энергии люминесцентного свечения с единицы пло- щади в секунду в единичном интервале длин волн получается выражение

$$\pi L_\lambda = A(\lambda) x(\lambda) \cdot 2,16 \cdot 10^{-5} \pi F_\lambda.$$

Пользуясь значениями F_λ по измерениям Аббота, обрабо- танным Миннаэртом [3], можно вычислить величину

$$\pi L_\lambda / A_\lambda = x(\lambda) \cdot 2,16 \cdot 10^{-5} F_\lambda. \quad (6)$$

Результаты этих вычислений, выполненных для случая наи- большей люминесценции (4 октября; нижняя кривая фиг. 4),



Фиг. 5. Спектральная кривая люминесцентного свечения кра- тера Аристарх 4 октября 1955 г.

представлены на фиг. 5. Как видно из фиг. 4, отражательная способность $A(\lambda)$ для этой фазы в интересующем нас участке спектра не зависит от длины волны: $A(\lambda) = A = \text{const}$. Таким образом, кривая фиг. 5 воспроизводит интенсивность люминесценции как функцию длины волны. Пунктиром показана вероятная экстраполяция этой кривой для коротковолновой части спектра. Значения πL_λ (фиг. 5) отнесены к интервалу длин волн, равному 100 Å, т. е. единице горизонтального масштаба. Таким образом, для вычисления полной энергии люминесценции достаточно определить площадь этой кривой и умножить ее на 10^3 . Получается

$$\int_0^\infty \pi L_\lambda d\lambda = 1,6 \cdot 10^4 \cdot A \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}). \quad (7)$$

Энергию жесткой радиации Солнца E , которая вызвала люми- несценцию кратера Аристарх 4 октября 1955 г., можно опреде- лить из выражения (7), вводя коэффициент энергетического выхода люминесценции Q нашего вещества. Обозначим через n долю площади, которую занимает светлое люминесцирующее вещество на видимой поверхности кратера. Тогда

$$E = \frac{A}{nQ} \cdot 1,6 \cdot 10^4 \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}). \quad (8)$$

Таким образом, энергия, возбуждающая люминесценцию, получается весьма значительной, порядка процента солнечной постоянной ($S=1,32 \cdot 10^6$).

Данные таблицы показывают, что 4 октября наблюдалась аномально большая люминесценция. Действительно, через месяц (4 ноября) при сходных условиях, т. е. близких значениях a и i , люминесценция оказалась в четыре раза слабее. Скорее всего, эта люминесценция нормальная, поскольку она согласуется с предыдущими наблюдениями 28 октября. Можно считать, что нормальная люминесценция существует постоянно и возбуждается энергией в четыре раза меньше, чем приведенное значение (8). Возбудителем этой люминесценции может быть близкое ультрафиолетовое излучение Солнца: $\lambda < 3000 \text{ \AA}$. Однако это ультрафиолетовое излучение Солнца соответствует температуре обращающегося слоя (4800°) и не может испытывать заметных колебаний. Поэтому аномальная вспышка люминесценций должна вызываться другим агентом.

Источником жестких ультрафиолетовых и рентгеновских лучей Солнца является солнечная корона. Поток этого излучения в основном зависит от концентрации электронного газа в короне и может быть поэтому вычислен с достаточной уверенностью. Как показывают исследования И. С. Шкловского, этот поток на расстоянии Земли составляет лишь доли эрга [4] и совершенно недостаточен для возбуждения люминесценции. Ультрафиолетовое излучение хромосферы в линиях должно быть значительно больше, но и оно недостаточно для объяснения наблюдавшейся люминесценции. Остается считать, что люминесценция возбуждается корпускулярным потоком Солнца. Подсчитаем число частиц — протонов n_p на 1 см^3 в корпускулярном потоке. Поток частиц переносит энергию

$$E = \frac{m_p v^2}{2} n_p v, \quad (9)$$

где $v = 1500 \text{ км/с}$ и $m_p = 1,7 \cdot 10^{-24} \text{ г}$. Сравнивая выражения (8) и (9), находим

$$n_p = \frac{3,2 \cdot 10^4}{m_p v^3} \frac{A}{nQ} = \frac{A}{nQ} \cdot 5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}. \quad (10)$$

Абсолютное значение отражательной способности Аристарха, определяемое выражением (4), было получено А. В. Марковым [5] для визуальной области спектра ($\lambda = 5500 \text{ \AA}$): вблизи полнолуния $A_v = 0,20$. При фазовом угле около $40-50^\circ$ это значение должно быть уменьшено вдвое. Из кривых на фиг. 4 видно, что отражательная способность поверхности Аристарха в ультрафиолетовой части спектра должна быть еще в два раза меньше. Получается $A = 0,05$. Значительно труднее оценить значение коэффициента полезного действия Q . Для фотолюминес-

ценции обычно Q велико и может приближаться к единице. В нашем случае, аналогичном катодолюминесценции, Q должно быть значительно меньше. Люминесцирующее вещество кратера Аристарха существенно светлее других пород лунной поверхности. Поэтому даже при отвесном падении солнечных лучей оно едва ли нагревается до положительных температур. Это обстоятельство способствует повышению Q . Поэтому можно принять $Q \approx 0,1$. Считая далее n порядка $1/2$, находим $A/nQ \approx \approx 1$. Следовательно,

$$n_p \approx 5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}. \quad (11)$$

Наша оценка плотности корпускулярного выброса Солнца находится в соответствии с оценками других авторов, полученными совершенно иными методами. Так, еще в 1929 г. Чепмен и Ферраро [6] нашли, что умеренную магнитную бурю создает корпускулярный поток с плотностью $n \sim 10^3 \text{ см}^{-3}$. С. К. Всехсвятский, считая корональные лучи корпускулярными потоками Солнца, получает для плотности потоков то же значение порядка 10^3 см^{-3} [7].

Окончательное доказательство правильности объяснения люминесценции Луны корпускулярным излучением Солнца должно быть получено из сопоставления интенсивности люминесценции с интенсивностью полярных сияний и магнитных бурь на Земле. Нам представляется, что систематическое наблюдение люминесценции кратера Аристарха и других подобных образований лунной поверхности может дать много ценных сведений о корпускулярном излучении Солнца. Поверхность кратера Аристарха представляет собой естественный люминесцирующий экран, вынесенный за пределы земной атмосферы и совершенно свободный от действия магнитного поля. Большая ширина (свыше 10 \AA) линий Н и К может позволить вести систематические наблюдения над люминесценцией весьма умеренными средствами. Представляется легко осуществимым и прибор, ведущий систематическую запись интенсивности люминесценции.

Следует сказать несколько слов о возможной природе люминесцирующего вещества Аристарха. К сожалению, распределение энергии в спектре люминесценции (фиг. 5) не может привести к однозначному определению люминофора. Дело в том, что ничтожные минеральные примеси могут значительно менять вид этой кривой энергии. С определенностью можно сказать только то, что это вещество не содержит даже ничтожных примесей железа, поскольку железо — очень активный тушитель люминесценции. По-видимому, на Луне люминесцирует светлое вещество лучевых систем, заполняющее углубления и трещины около кратеров, являющихся согласно А. В. Хабакову [8] самыми молодыми формациями лунной поверхности. Это вещество должно быть почти белым со значительным альбедо. По-

скольку для Аристарха среднее альбедо в полнолуние $A_v = 0,20$, визуальное альбедо люминофора при $n = \frac{1}{2}$ должно быть около 0,30—0,40, т. е. порядка альбедо белых песков. Мелкие, невидимые при наблюдениях трещины, содержащие это вещество, могли образоваться преимущественно по радиальным направлениям под действием сил, центром которых был кратер данной лучевой системы. По трещинам могли выделяться газы и растворы, из которых образовался белый люминесцирующий налет. Поэтому очень возможно, что вещество лучевых систем является некоторой разновидностью кварца. С течением времени это вещество должно оказаться засыпанным метеорной, нелюминесцирующей пылью, непрерывно падающей на поверхность Луны. Вероятно, этим объясняется полное отсутствие лучевых систем у кратеров старой формации.

По-видимому, можно считать, что общая масса метеорных пылинок размером меньше $2-3 \mu$, выпадающая на всю поверхность Земли, составляет около одной тонны в сутки. Таким образом, за год на Землю выпадает около 10^8 см^3 этой пыли. Поверхность Земли имеет площадь около $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^2$. Следовательно, за $5 \cdot 10^{10}$ лет эта пыль должна покрыть поверхность слоем в 1 см. Заметное запыление упомянутой пылью должно получиться за 50 млн лет. Отсюда следует, что последний горообразовательный период в жизни Луны был не раньше 50 млн лет тому назад.

Указатель литературы

1. Lyot B., Dollfus A. Recherche d'une atmosphère au voisinage de la Lune//Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de L'Académie des Sciences. 1949. Т. 229. N 24. P. 1277—1280.
2. Link F. Variations lumineuses de la Lune//Colloques internationales du Centre national de la Recherche scientifique. 1947. Vol. 9. P. 308.
3. Унзольд А. Физика звездных атмосфер. М., 1949. С. 42.
4. Шкловский И. С. Ультрафиолетовое излучение короны и хромосферы и ионизация земной атмосферы//Изв. Крымск. астрофиз. обсерв. 1949. Т. 4. С. 88.
5. Марков А. В. Отражательная способность и показатели цвета Земли и деталей Луны по электрофотометрическим промерам//Бюл. Абастуманской астрофиз. обсерв. 1950. № 11. С. 107—142.
6. Chapman S., Ferrago V. C. A. The Electrical State of Solar Streams of Corpuscles//Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 1929. Vol. 89. N 5. P. 470—479.
7. Всехсвятский С. К., Никольский Г. М., Пономарев Е. А., Чередниченко В. И. К вопросу о корпускулярном излучении Солнца//Астрон. журн. 1955. Т. 32. Вып. 2. С. 165—176.
8. Хабаков А. В. Об основных вопросах истории развития поверхности Луны. М., 1949. С. 179.

О НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВАХ АТМОСФЕРЫ МАРСА ПО СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИМ НАБЛЮДЕНИЯМ 1956 ГОДА

В сентябре 1956 г. наблюдалось резкое уменьшение контраста деталей поверхности Марса при малом изменении общего цвета планеты. Отсюда сделан вывод, что помутнение атмосферы Марса произошло только в самых нижних слоях без существенных изменений общих оптических свойств атмосферы. Изучение спектрограмм полярной шапки, наблюдавшейся во второй половине сентября и в начале октября 1956 г., показало, что эта полярная шапка представляла собой атмосферное образование. Полярная шапка образуется сгущением тех же частиц, которые создают обычное рассеяние в верхних слоях атмосферы Марса.

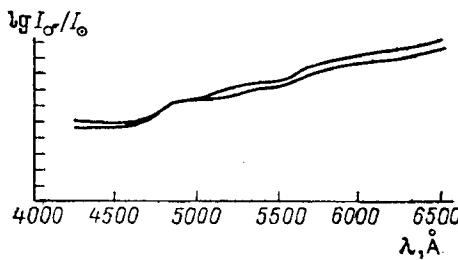
В сентябре и октябре 1956 г. близ великого противостояния Марса автором этой работы совместно с астрономами Харьковской обсерватории В. И. Езерским и А. Т. Чекирда был получен ряд спектрограмм поверхности Марса. Эти спектрограммы были сняты на 1220-мм рефлекторе Крымской астрофизической обсерватории при помощи спектрографа с камерой, дающей линейную дисперсию около 23 \AA у H_{ν} . При ширине щели 0,05 мм на пластинках Ilford HP3 снимки получались с экспозициями: 1 мин, 5 мин и полчаса, чтобы иметь нормальные плотности по всему спектру ($6600-4000 \text{ \AA}$). По возможности ближе к моменту наблюдений Марса снимался спектр Солнца на высоте Марса с той же аппаратурой и на тех же пластинах.

При наблюдениях Солнца большое зеркало рефлектора закрывалось диафрагмой с 20 отверстиями диаметром 4 мм, расположенными равномерно по всей поверхности зеркала. Снимки Солнца получались с экспозициями от 0,2 до 3 с, а фотометрическая шкала — с экспозицией около 5 мин.

Характерной особенностью противостояния 1956 г. была исключительно слабая видимость деталей на поверхности Марса. Даже такое темное море, как Syrtis Major, было едва различимо при наблюдениях на центральном меридиане в первых числах сентября. Результаты измерений в различных длинах волн яркостей Syrtis Major и прилегающего материка 7 сентября 1956 г. по отношению к яркости Солнца представлены на фиг. 1. На этой фигуре по оси ординат отложены десятичные логарифмы яркости деталей Марса по отношению к яркости Солнца. Как видно из фиг. 1, наибольший контраст материка — море в красных лучах составляет всего лишь 15 %. Интересно отметить, что в 1954 г. по нашим измерениям Syrtis Major в красных лучах было вдвое слабее материка, причем

Козырев Н. А. О некоторых свойствах атмосферы Марса по спектрофотометрическим наблюдениям 1956 года//Изв. Крымск. астрофиз. обсерв. 1958. Т. 18. С. 61—65.

контраст постепенно убывал до нуля в фиолетовой части спектра [1]. Это постепенное уменьшение контраста, как подробно разобрано в цитированной работе, объясняется действием атмосферной дымки при сильном поглощении коротковолнового излучения. Действительно, обозначим через $\bar{I}(\lambda)$ и $\bar{I}_1(\lambda)$ собственные отражательные способности материка и моря. Тогда



Фиг. 1. Кривые отражательной способности Syrtis Major и соседнего материка по наблюдениям 7 сентября 1956 г.

Одно деление вертикальной шкалы равняется 0,1 десятичного логарифма.

наблюдаемые альбедо материка и моря $I(\lambda)$ и $I_1(\lambda)$ получатся умножением собственных альбедо на экспоненциальные множители ослабления света при двойном прохождении атмосферы и прибавлением отражательной способности атмосферы $A(\lambda)$:

$$I(\lambda) = \bar{I}(\lambda) e^{-2\tau_\lambda} + A(\lambda), \quad (1)$$

$$I_1(\lambda) = \bar{I}_1(\lambda) e^{-2\tau_\lambda} + A(\lambda),$$

где τ_λ — сумма оптических глубин рассеяния и истинного поглощения:

$$\tau_\lambda = \tau_\sigma + \tau_\kappa. \quad (2)$$

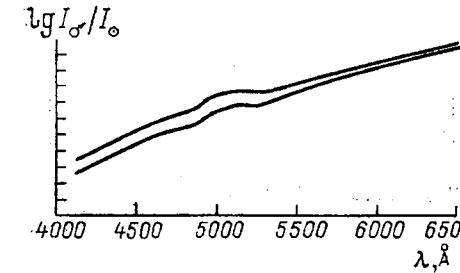
Ограничиваюсь рассеянием только первого порядка, что вполне допустимо для атмосферы с большим поглощением, легко получить выражение для $A(\lambda)$ через коэффициенты рассеяния σ и истинного поглощения κ :

$$A(\lambda) = \int_0^{\tau_\lambda} e^{-2(\tau_\kappa + \tau_\sigma)} d\tau_\sigma = \frac{\sigma}{2(\kappa + \sigma)} [1 - e^{-2\tau_\lambda}]. \quad (3)$$

Из формулы (1) видно, что при больших оптических глубинах контраст деталей должен совершенно исчезнуть и будет виден только свет, отраженный атмосферой. Поэтому приходится заключить, что в фиолетовых лучах $\tau_\lambda > 1$. Но в фиолетовых лучах альбедо Марса очень мало — порядка 0,06. Из формулы (3) следует, что $\kappa/\sigma = 9$, следовательно, атмосфера Марса обладает большим истинным поглощением в фиолетовых лучах. Поверхность любого цвета, рассматриваемая через

такую атмосферу, будет казаться красной. Поэтому красный цвет Марса определяется свойствами его атмосферы.

Резкое уменьшение контраста деталей на Марсе в 1956 г. в сравнении с 1954 г. указывает на сильные изменения свойств атмосферы Марса. Так как цвет Марса определяется его атмосферой, то можно было бы ожидать больших изменений в окраске Марса. Однако, хотя Марс и казался в 1956 г. несколь-



Фиг. 2. Кривые отражательной способности южной полярной шапки и соседнего материка по наблюдениям 4 октября 1956 г.

Одно деление вертикальной шкалы равняется 0,1 десятичного логарифма.

ко белее обычного, больших изменений в цвете не произошло. Из этого обстоятельства может быть сделан следующий вывод. Резкое усиление атмосферной дымки, скрывшей детали поверхности Марса, произошло лишь в самых нижних слоях атмосферы. Цвет же Марса определяется поглощающим слоем, расположенным выше. Этот слой и придает красную окраску поверхности любого цвета, расположенной ниже. Таким образом, малая контрастность деталей на Марсе в 1956 г. объясняется сильной запыленностью самых нижних слоев атмосферы — скорее всего пылевыми бурями.

Во второй половине сентября и в начале октября наиболее заметной деталью на диске Марса была южная полярная шапка. Несмотря на малый размер шапки (меньше 2''), при хороших изображениях, удалось получить вполне удовлетворительные спектрограммы. На фиг. 2 представлены результаты фотометрических измерений спектров полярной шапки и прилегающей поверхности Марса, полученных 4 октября 1956 г. Сразу бросается в глаза обратный ход контрастов на фиг. 1 и 2. Для всякой детали на поверхности Марса контраст должен уменьшаться с уменьшением длины волны. Это означает, что полярная шапка не лежала на поверхности Марса, а в основном представляла собой образование в атмосфере. Действительно, напишем уравнения (1) для случая одинаковых участков планеты, но с разными свойствами атмосферы. Пусть $A(\lambda)$ — отражательная способность обычной атмосферы и $A_1(\lambda)$ — отражательная способность атмосферы в области полярной шапки. Тогда

$$I(\lambda) = \bar{I}(\lambda) e^{-2\tau} + A(\lambda), \quad (4)$$

$$I_1(\lambda) = \bar{I}(\lambda) e^{-2\tau_1} + A_1(\lambda),$$

где $I_1(\lambda)$ — видимая отражательная способность полярной шапки. Из формулы (4) видно, что для атмосферного образования наибольший контраст должен быть при $\tau, \tau_1 > 1$, т. е. в фиолетовых лучах, и почти исчезать при $\tau, \tau_1 \rightarrow 0$, т. е. в красных лучах, когда начинает просвечивать поверхность. Получается ход контраста, обратный обычному для поверхностных образований и соответствующий фиг. 2.

Согласно фиг. 2 наибольший контраст полярная шапка — материк составляет только 25 %. Вместе с тем при непосредственных наблюдениях планеты видно, что полярная шапка по крайней мере вдвое ярче окружающей поверхности. Поэтому малый контраст, полученный на спектrogramмах, следует отнести за счет дрожаний изображений. Можно надеяться, что это замывание спектра полярной шапки не повлияет на правильность некоторых общих заключений.

Тщательное сравнение спектра полярной шапки со спектрами соседних областей Марса и спектром Солнца не показало каких-либо особенностей, отличающих полярную шапку. Как видно из фиг. 2, общий ход распределения энергии в спектре полярной шапки тоже во всех подробностях похож на ход распределения энергии в спектре материка. Горб на этих кривых около 5000—5200 Å является характерной особенностью всех деталей Марса (см. фиг. 2). Исследование спектральных кривых моря и материка, выполненное нами по снимкам 1954 г., показало, что этот горб кривых связан с максимумом отражательной способности атмосферы $A(\lambda)$ и оптической глубины τ_λ около 5200 Å [1]. Максимальное значение $A(\lambda)$ оказалось равным 0,076, в то время как в фиолетовых лучах $A(\lambda)=0,042$. Из формулы (4) следует, что при значительных (τ, τ_1)

$$I_1 - I = \Delta I \cong \Delta A.$$

Вычисляя теперь по кривым фиг. 2 $\Delta I=2,3 I \Delta \lg I$, находим, что функция $\sqrt{\Delta A(\lambda)} \cong \Delta I$ имеет максимум около 5000—5100 Å, т. е. приблизительно там, где расположен и максимум $A(\lambda)$. Принимая для альбедо Марса в этих лучах значение $I=0,15$ (визуальное альбедо), получаем максимальное значение $\Delta A=0,035$ и $\Delta A/A=0,46$. В фиолетовых же лучах $\Delta A=0,016$ и $\Delta A/A=0,38$. Таким образом, отношения $\Delta A/A$ и, вероятно, $\Delta \sigma/\sigma$ не могут сильно зависеть от длины волны.

К сожалению, более точное доказательство независимости от длины волны отношения $\Delta \sigma/\sigma$ в настоящее время едва ли возможно из-за отсутствия надежных определений τ_λ в атмосфере Марса. Однако уже и приблизительное постоянство отношения $\Delta A/A$ позволяет сделать существенное заключение о природе полярной шапки. Полярная шапка представляет собой сгущение тех же рассеивающих частиц, которые существуют всегда в атмосфере Марса и создают атмосферную дымку. Эти частицы должны находиться в верхних слоях атмосферы

Марса, где происходит истинное поглощение коротковолнового излучения, и выше этого слоя. Действительно, распределение яркости по диску Марса в коротковолновых лучах (при $\tau > 1$) показывает не только отсутствие потемнения к краю диска, но даже некоторое повышение яркости к краю. Последнее обстоятельство будет в том случае, когда рассеивающий слой расположен выше поглащающего слоя. Сгущение рассеивающих частиц верхних слоев атмосферы Марса в полярных областях планеты показывает, что образованию этих частиц способствует понижение температуры. Интересно, что в первых числах октября 1956 г. на вечернем крае Марса неоднократно наблюдалось сильное повышение яркости. Полученные спектры этого края показывают ход распределения энергии, вполне соответствующий ходу распределения энергии полярной шапки. Таким образом, полярная шапка и вечерние образования в атмосфере Марса имеют общую природу. Скорее всего, они состоят из микроскопических ледяных кристаллов наподобие изморози в атмосфере наших полярных стран. Разумеется, при некоторых условиях эти кристаллы могут выпадать на поверхность планеты. Тогда полярная шапка, не будучи только атмосферным образованием, должна хорошо различаться в красных и инфракрасных лучах.

Указатель литературы

1. Козырев Н. А. Объяснение цвета Марса спектральными свойствами его атмосферы//Изв. Крымск. астрофиз. обсерв. 1955. Т.15. С. 147—152.

ВУЛКАНИЧЕСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ НА ЛУНЕ

Изучение морфологии поверхности Луны убедительно показывает, что рельеф Луны возникал постепенно в результате неоднократных поднятий и опусканий ее коры. Действительно, наклоненные и «полузатопленные» кратеры, находящиеся на границах морей, показывают, что в этих местах происходили опускания участков коры с образованием трещин и последующим излиянием расплавленных масс. Знаменитая долина в Лунных Альпах шириной около 10—15 км и длиной выше 100 км с подобными друг другу отвествными краями дает пример поднятия лунной коры, сопровождавшегося значительным растяжением. С такими тектоническими процессами, несомненно, должна была быть связана и вулканическая деятельность.

Представим себе выход расплавленных масс из недр Луны на поверхность. При отсутствии атмосферы адсорбированные в расплавах газы должны бурно выходить из них, создавая пенистые структуры. В результате породы внешних слоев Луны должны стать чрезвычайно пористыми, с ничтожным значением коэффициента температуропроводности. Вероятно, этим и объясняется, что коэффициент температуропроводности внешних слоев Луны раз в сто или тысячу меньше, чем во внешних слоях Земли. Если выходы расплавленных масс, т. е. магмы, проходили в отдельных участках лунной поверхности в разные эпохи, то выделявшиеся при этом газы не могли создать у Луны заметной атмосферы. Действительно, постоянная бомбардировка поверхности Луны солнечными корпускулами, жесткой радиацией Солнца и микрометеоритами должна сообщать частицам атмосферы скорости, превышающие параболическую (около 2,4 км/с), т. е. сдувать ее и не давать ей накапливаться. Другое дело, если планета уже имеет обширную атмосферу. Тогда проникновение частиц будет подобно глубинному взрыву, сообщающему энергию большим массам, благодаря чему отдельные частицы газа получат малые скорости, которые не могут повести к диссиляции планетной атмосферы. Поэтому если у Луны сразу не было достаточной атмосферы, то она не могла накопить ее постепенно.

Причина тектонических процессов и внутренней энергии космических тел до сих пор не известна. Во всяком случае, ясно, что большое тело при равных коэффициентах теплопроводности имеет больше возможности сохранять и накапливать внутреннюю энергию, чем тело малых размеров. Казалось бы, что эти соображения говорят против возможности сохранения Луной способности к тектоническим процессам до настоящего времени.

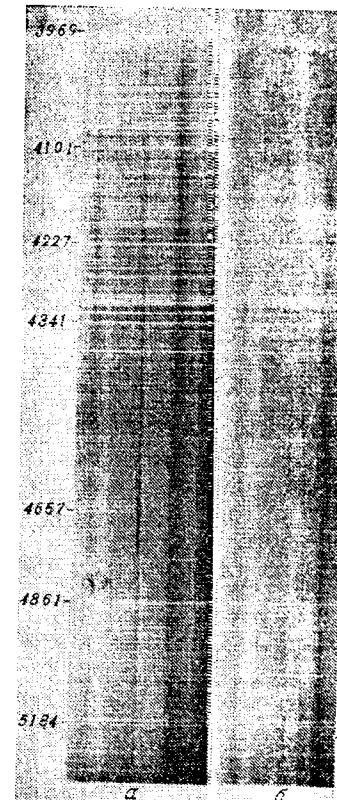
Козырев Н. А. Вулканическая деятельность на Луне//Природа. 1959. № 3. С. 84—87.

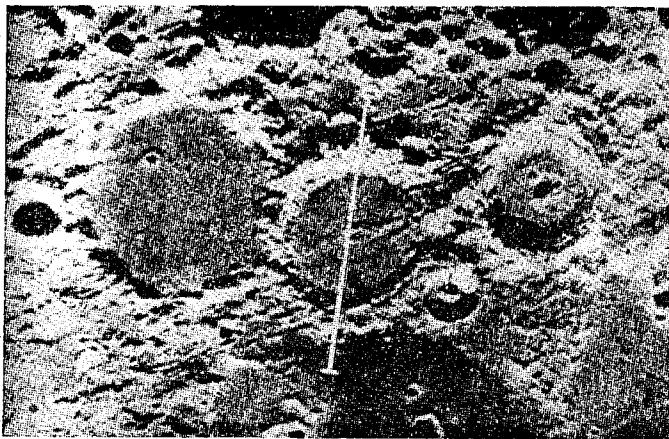
Однако если мы примем во внимание чрезвычайно малую температуропроводность поверхностных слоев Луны, то придем к заключению, что она может лучше накапливать и сохранять внутреннюю энергию, чем наша Земля. Поэтому горообразовательные процессы могут и теперь идти на Луне, и даже более интенсивно, чем на Земле. Получается интересный и несколько парадоксальный вывод: отсутствие атмосферы, вызвавшее пенистую структуру поверхности, резко уменьшая теплоотдачу, способствует накоплению внутренней энергии и развитию горообразовательных процессов.

Топография Луны изучалась весьма тщательно в течение двух столетий. Несмотря на это, до самого последнего времени не удавалось привести ни одного достоверного примера изменений в лунном рельефе. Этот результат не находится в противоречии с заключением о возможности и в настоящее время интенсивной тектонической деятельности на Луне. Действительно, если отвлечься от процессов, связанных с деятельностью воды, воздуха и жизни на Земле, то и с Луны было бы очень трудно установить достоверно наличие горообразовательных процессов на Земле.

Однако с давних пор многие наблюдатели указывали на возможность изменений некоторых кратеров на Луне. Среди наблюдений этого рода особенно интересны указания на появление дымки, вуалирующей детали дна кратеров. К сожалению, эти наблюдения были визуальными и недостаточно убедительными, ибо видимость деталей на Луне очень зависит от условий освещения их Солнцем, а кроме того, может быть связана с качеством изображений, т. е. с состоянием земной атмосферы.

Впервые серьезное и объективное обоснование возможности появления дымки, вуалирующей детали лунной поверхности, получил астроном Динсмор Олтер в октябре 1956 г. на 60-дюймовом рефлекторе Обсерватории Маунт Вильсон в Калифорнии. Он получил серию снимков кратеров Птоломей, Альфонс и Арзахель в голубых и инфракрасных лучах. Из-за рассеяния света земной атмосферой все снимки в голубых лучах получились значительно менее контрастными, чем в инфракрасных. Но детали дна кратера Альфонс оказались особенно замытыми.





Вулканическая деятельность на Луне.

Справа — участок Луны, в центре — кратер Альфонс. Проходящая через изображение центрального пика белая черта показывает относительное положение щели спектрографа. Слева — спектrogramмы кратера Альфонс, снятые: а — 3 ноября 1958 г. с 6 ч 00 мин до 6 ч 30 мин; б — 3 ноября 1958 г. с 6 ч 30 мин до 6 ч 40 мин (время московское).

Рассмотрение опубликованных Д. Олтером фотографий убедило меня в том, что этот эффект заслуживает серьезного внимания и что на дне кратера Альфонс может происходить истечение газов.

Группа из трех перечисленных кратеров, средним из которых является Альфонс (рисунок справа), расположена по меридиану и находится почти в центре лунного диска. Группа этих кратеров древнего происхождения, но этот участок лунной поверхности интересен тем, что здесь проходит ряд меридиональных разломов, появившихся уже после формирования кратеров. Интересен разлом, идущий по диаметру кратера Альфонс, а также трещины и темные пятна на дне этого кратера. Кратер Альфонс имеет диаметр около 120 км. Поднимающийся весьма круто, его центральный пик достигает высоты около 1400 м над уровнем дна кратера. Расположенный же к северу от Альфонса кратер Птолемей является типичным большим цирком, в котором нет центрального пика. Строение дна и вала кратеров данной группы подтверждает высокую тектоническую активность этого участка лунной поверхности.

Рассмотрим теперь вопрос, каким образом может получиться эффект замывания деталей при выделении газов. Разумеется, подобный эффект замывания не может быть создан рассеянием света в выделяющихся газах. Для этого необходим столб газа порядка земной атмосферы, т. е. порядка 10^{25} молекул над квадратным сантиметром поверхности. Но если газы могут флюоресцировать под действием жесткой солнечной радиации, то

для создания вуали будет достаточно столб газа, способный поглотить всю жесткую радиацию Солнца. Коэффициент поглощения жесткого, т. е. корпускулярного, рентгеновского и крайнего ультрафиолетового излучения должен быть очень большим. Поэтому можно думать, что столб газа порядка 10^{15} молекул, т. е. около 10^{-10} земной атмосферы, уже создает заметную флюоресценцию. Возникновение же такой локальной атмосферы при истечении газов из кратеров Луны представляется вполне возможным. Остается только вопрос — достаточна ли интенсивность жесткой радиации Солнца, чтобы создать флюоресцентное излучение в видимой части спектра, заметное на фоне обычного, отраженного Луной солнечного спектра. Надо заметить, что такое флюоресцентное свечение могут давать не только газы, но и минералы, находящиеся на поверхности Луны.

В 1955 г. автор настоящей статьи спектральным методом из сравнения контуров фраунгоферовых линий солнечного и отраженного Луной спектров получил прямое доказательство существования флюоресценции в лучевой системе кратера Аристарх, интенсивность которой достигала в фиолетовых лучах около 15 % от обычного, отраженного Луной света. Этот результат показал, что и существование истечения газов на дне лунных кратеров можно пытаться доказать спектральным методом по их флюоресценции.

В октябре и ноябре 1958 г. совместно с астрономом Харьковской обсерватории В. И. Езерским я занимался спектральными исследованиями Марса на 50-дюймовом рефлекторе в Крымской обсерватории Академии наук СССР. Попутно я решил систематически получать фотометрически стандартизованные спектrogramмы некоторых деталей Луны, и в частности кратера Альфонс, для решения вопроса о возможности истечения газов.

При наблюдениях щель спектрографа всегда располагалась по прямому восхождению. На снимках линейная дисперсия составляла 23 Å в 1 мм вблизи Ну при масштабе деталей около $10''$ в 1 мм. Нормальная экспозиция на пластинах Kodak 103 AF занимала от 10 до 30 мин.

До ночи со второго на третье ноября никаких особенностей на спектrogramмах Альфонса не было замечено. Утром 3 ноября были получены три спектrogramмы кратера Альфонс, причем щель спектрографа пересекла этот кратер по диаметру, проходя через его центральный пик, как показано на рисунке справа. При получении первой спектrogramмы (в 4 ч по московскому времени) во время гидирования по изображению на щели меня удивила сильная размытость и необычный красноватый оттенок центрального пика. После получения этой спектrogramмы согласно программе пришлось перейти к спектрографированию Марса. Поэтому следующая спектrogramма Альфонса была получена после перерыва от 6 ч 00 мин до 6 ч 30 мин. Как

только центральный пик кратера Альфонс оказался на щели, меня поразила его необычайная яркость и белизна. При гидировании я не отрывал глаз от визирной трубы и вдруг заметил, что яркость пика внезапно упала до обычной. Тогда экспозиция была сразу же прекращена и начата следующая с 6 ч 30 мин до 6 ч 40 мин при том же положении щели. Своим зрительным впечатлением я не придавал серьезного значения и думал, что все эти особенности связаны с изменением качества изображений. Поэтому получилось несколько неожиданно, что после проявления спектрограмм все замеченные глазом изменения оказались совершенно реальными и действительно происходили в центральном пике Альфонса.

На первой спектрограмме центральный пик заметно ослаблен в фиолетовых лучах по сравнению с соседними деталями кратера, чего не наблюдалось на обычных спектрограммах. Измерение этого снимка показало, что поглощение изменялось, как λ^{-1} , и вычисленное общее поглощение получилось равным 15—20 % в видимой части спектра.

На второй спектрограмме это поглощение незаметно, и бросается в глаза эмиссионный газовый спектр, состоящий из ряда широких полос, наложенных на обычный спектр центрального пика (рисунок слева, а).

Третья спектрограмма показала обычное состояние кратера (рисунок слева, б). Таким образом, явление выделения газов длилось не более 2 ч 30 мин и не менее 0 ч 30 мин.

Следующей ночью, с третьего на четвертое ноября, удалось получить еще две спектрограммы Альфонса. Эти спектрограммы показали, что состояние кратера продолжало оставаться нормальным. Вечером 4 ноября наступила последняя четверть, и Альфонс перестал быть доступным для следующих наблюдений.

Итак, ранним утром 3 ноября 1958 г. в центральном пике кратера Альфонс происходило исключительно интересное явление — вулканический процесс. Сначала была выброшена пыль — вулканический пепел, а затем, как обычно, выделились газы. Выход газов, вероятно, происходил из поднявшейся к поверхности магмы, которая должна содержать газы, адсорбированные в глубинах при высоком давлении.

Самой характерной особенностью эмиссионного спектра центрального пика Альфонс является группа полос, начинающаяся с 4754 Å и сравнительно резко очерченная со стороны длинных волн (рисунок слева, а). Яркость этих полос достигает 40 % от нормальной яркости пика в соответствующих длинах волн. Заметно, что наложенная эмиссия слегка сдвинута в сторону Солнца. Этот сдвиг, составляющий около 0'',7, или около 1,5 км на лунной поверхности, вероятно, объясняется тем, что жесткая радиация Солнца, возбуждавшая свечение, могла проникнуть только в обращенные к Солнцу части газового столба,

выходившего из центра пика. Надо полагать, что свечение этих газов происходило подобно свечению комет. Радиация Солнца производила диссоциацию сложных родительских молекул на оптически активные молекулярные остатки — радикалы, которые и создавали наблюдаемый спектр. Интересно сопоставить поверхностную яркость свечения выделявшихся газов с поверхностной яркостью комет.

Вблизи полнолуния при отвесном падении солнечных лучей отражательная способность центрального пика кратера Альфонс равняется 0,13, т. е. почти в два раза больше средней отражательной способности лунной поверхности. В момент наблюдений высота Солнца над горизонтом кратера Альфонс равнялась только 18°. Согласно данным харьковского астронома В. А. Федорец отражательная способность центрального пика при этой высоте Солнца уменьшается в десять раз по сравнению с отражательной способностью в полнолуние. Если принять, что в среднем по всем длинам волн яркость дополнительного свечения газов составляла десять процентов от яркости пика, то поверхностная яркость наблюдавшегося газового свечения получается равной одной пятидесятий средней поверхностной яркости Луны в полнолуние. Так как в полнолуние яркость Луны составляет —5,5 звездной величины с квадратной минуты, то поверхностная яркость свечения газов получается порядка —1 звездной величины с квадратной минуты. Поверхностная же яркость комет составляет около девятой величины с квадратной минуты.

Таким образом, наблюдавшееся свечение газов было в десять тысяч раз интенсивнее свечения комет. Это показывает, что количество выделившихся газов было с избытком достаточно для поглощения всей жесткой радиации Солнца. Заметим, что, несмотря на такую яркость, свечение газов едва ли можно было бы обнаружить около полнолуния при высоком положении Солнца. Вообще его было бы очень трудно наблюдать, будь отражательная способность Луны выше. Надо помнить еще, что свечение вулканических газов может происходить только тогда, когда данная деталь Луны освещается Солнцем, поэтому в пепельном свете такое явление наблюдаться не может.

Для получения полного представления об эмиссионном спектре необходимо произвести шаг за шагом по всему спектру вычитание из яркости спектра центрального пика яркость спектра соседнего участка dna кратера. Такие измерения, требующие большой тщательности, еще не закончены. Но некоторые выводы можно сделать уже и сейчас.

В яркую группу полос, которая начинается с 4754 Å и постепенно ослабляется к фиолетовой стороне спектра, входит как главная составляющая полоса Свана молекулы углерода C_2 . Отчетливый максимум на длине волны 4737 Å соответствует

началу системы вибрационных полос этой молекулы. Существование C_2 подтверждается наличием других, значительно более слабых групп полос Свана с максимумами: 5165 и 5636 Å.

Таким образом, существование молекулы C_2 в выделявшихся газах можно считать установленным. В районе от Нδ до линии Н Ca⁺ существует система слабых полос, наблюдающаяся, как и полосы Свана, в спектре головы комет и принадлежащая линейной молекуле C_3 . Характерным отличием от спектров комет является полное отсутствие в спектре выходивших газов ультрафиолетовой полосы CN 3883 Å. Присутствуют сравнительно яркие полосы в участке спектра от 4600 до 4250 Å и в других местах большое количество слабых полос. Определить молекулы, которым принадлежат эти полосы, пока не удалось. Надо отметить, что все полосы этого спектра сильно размыты. Полосы Свана должны быть совершенно резкими со стороны длинных волн, но и они оказались размытыми приблизительно на 5 Å. Скорее всего, это явление связано с процессом типа преддиссоциации: полосы наблюдались в основном только в момент рождения оптически активных молекулярных остатков из сложных родительских молекул.

Совокупность наблюдавшихся явлений говорит о том, что в центральном пике кратера Альфонс происходило подлинное вулканическое извержение. Во всяком случае это не могло быть слабым истечением газов из трещин лунной поверхности, которое, вероятно, наблюдал Д. Олтер. По-видимому, это заключение подтверждается сообщением английских наблюдателей П. Уилкинса и Ф. Брииона о появлении небольшого красноватого пятна непосредственно около центрального пика Альфонса с южной от него стороны. Это пятно они наблюдали 19 ноября 1958 года и утверждают, что оно не существовало до ноября 1958 года.

Возможно, что описанное здесь наблюдение еще долгое время будет оставаться единственным. Но независимо от этого оно показывает, что внутренняя энергия и возможности горообразовательных процессов сохранились на Луне до настоящего времени. Совпадение наблюдавшегося процесса с положением центрального пика не может быть случайным и показывает, что основной рельеф Луны возник эндогенно, а не в результате падения метеоритов на ее поверхность.

ВУЛКАНИЗМ НА ПЛАНЕТАХ

Краткое содержание. Спектральные наблюдения показали, что вулканическая активность на Луне проявляется часто. Характерной особенностью Луны, по-видимому, является присутствие молекулярного углерода и отсутствие натрия в вулканических газах.

Две специфические полосы поглощения в спектре дыма вулкана Ключевского на Камчатке были также обнаружены на спектрограммах Венеры. На этой планете вулканические процессы, вероятно, более активны, чем на Земле.

Отсутствие таких полос в спектре Марса свидетельствует о незначительной вулканической активности на нем.

Введение. Для изучения Земли и других космических тел невозможно построить модель достаточных размеров, чтобы допустить экспериментальную проверку теоретических выводов. Тем не менее существование других планет — объектов, подобных Земле, — дает аналоги нашей Земли, имеющиеся налицо в природе. Поэтому исследование таких объектов может быть полезным при решении многих проблем геофизики. Например, весьма важно сравнить внутреннюю энергию Земли с таковой у других планет. С точки зрения астрономической наличие внутренней энергии у планет может быть обнаружено легко путем наблюдения проявлений вулканизма на этих телах. Спектр поверхности или атмосферы планеты должен обладать некоторыми особенностями, обусловленными вулканизмом. Луна представляет объект особого интереса в этом смысле. Поскольку она находится весьма близко к Земле, нам нетрудно удостовериться в наличии вулканических процессов на ней и изучить их на основе спектральных наблюдений отдельных деталей на ее поверхности.

Спонтанные извержения на Луне. До недавнего времени астрономы рассматривали особенности рельефа лунной поверхности как результат действия метеоритов, солнечного облучения и других внешних причин. Однако выброс газов из центральной горки кратера Альфонс, зарегистрированный 3 ноября 1958 г., полностью опровергает это мнение [1]. Газовая эмиссия длилась приблизительно около часа, причем было выброшено около 10^8 м³ газа (в перерасчете на земное атмосферное давление). На полученной спектрограмме отчетливо выступает эмиссионная полоса с ядром у λ 4737 Å. Заметна также слабая эмиссия в районе длин волн 4330—4460 Å с максимумом около λ 4400 Å. Возможно, эта слабая эмиссия представляет систему

полос D и E хлористой меди. Таким образом, углерод — первый из элементов, составляющих тело Луны, который обнаружен путем непосредственных наблюдений.

23 октября 1959 г. лунный кратер Альфонс снова стал активным. В этом случае очаг вулканической активности представлял не центральный пик, а побочный конус, расположенный в 11 км к юго-востоку. На полученной спектрограмме нет отчетливо выраженной газовой эмиссии, но можно установить заметное различие во внешнем виде спектров для длин волн меньше и больше, чем λ 5500—5300 Å. В желтых и красных лучах можно видеть узкую (<1 км) деталь с непрерывным спектром, который, очевидно, представляет спектр лавового потока с температурой порядка 900—950 °С. В голубой части спектра эта деталь не видна, но она замещена широким ярким спектром с широкой тенью. Этот яркий спектр, как и его тень, очевидно воспроизведены частицами выброшенного дыма или газа, который ответствен за рассеяние коротковолновой солнечной радиации. Таким образом, 23 октября 1959 г. вулканическое извержение из кратера Альфонс имело интенсивность, сходную с силой большого земного извержения.

Лунные фумаролы. Кроме таких мощных самопроизвольных извержений мы наблюдали на Луне относительно стабильную эмиссию газов, напоминающую фумаролы земных вулканов. 25 и 27 ноября, а также 3 декабря 1961 г. были получены спектрограммы кратера Аристарх, показывающие эмиссию газов в центре кратера на площади 1—2 км². На них можно видеть группу эмиссионных полос с резкой границей у λ 4634±1 Å с красной стороны спектра. В целом эта группа полос простирается до λ 4390 Å и имеет несколько максимумов. В результате анализа было найдено, что эта эмиссия произведена системой молекулярных линий водорода H₂. Эта система начинается в голубой части спектра с исключительно яркой линией параводорода, которая как раз приходится на длину волны 4634 Å. Химический анализ показывает, что газы земных вулканов также содержат значительное количество водорода. Отсутствие эмиссионных полос водорода в спектре пламени земных вулканов является результатом низкой температуры пламени, которая недостаточна для того, чтобы возбудить эти молекулы, тогда как люминесценция на Луне возбуждается высокотемпературной радиацией Солнца.

Частота наблюданности проявлений лунного вулканизма свидетельствует о существовании внутренней энергии, которая не менее (по удельной массе), чем энергия Земли. Луна, как и Земля, должна обладать достаточно высокой температурой в недрах для того, чтобы расплавить составляющие ее породы на определенных глубинах. Трудности сравнения химического состава Луны и Земли возникают вследствие совершенно недостаточного изучения спектров пламени земных вулканов.

Спектроскопия земных вулканов. В 1959 г. первые надежные данные относительно спектроскопии земных вулканов были получены Дельсемом [2], который получил фотографии спектра вулкана Нийрагонго в Африке. На его спектрограмме получились линии натрия и кальция, большое количество молекулярных полос, а также непрерывная эмиссия в спектральной области от λ 6600 Å до 5600 Å. Полосы были убедительно отождествлены Дельсемом как системы A, B, C и D, принадлежащие хлористой меди (CuCl).

В августе 1962 г. автор получил несколько снимков спектров лавового озера и пламени над ним в кратере вулкана Плоский Толбачек на Камчатке. Сравнение с солнечным спектром показало, что температура лавы составляла 990 °С с ошибкой ±20°. В спектре пламени имелись яркая линия натрия и полосы систем D и E хлористой меди. Отсутствие полос системы A и лишь слабое присутствие признаков полос B и C в спектре показывает, что исследуемое пламя обладало гораздо более высокой температурой, чем пламя Нийрагонго, которое наблюдал Дельсем. Полосы Свана молекулярного углерода вообще отсутствуют в спектре пламени обоих вулканов, хотя температуры достаточно высоки для их возбуждения. Таким образом, присутствие молекулярного углерода и отсутствие натрия в вулканических газах являются характерной особенностью Луны. Возможно, этот факт указывает на существенное различие химического состава Луны и Земли. Это также может указывать на различное происхождение названных двух тесно связанных тел.

Наша экспедиция на Камчатку кроме спектров вулканического пламени получила также абсорбционные спектры дымов и газов вулканов Плоский Толбачек, Ключевский, Безымянный и фумарол кратера Былинкина. Для того чтобы обнаружить абсорбционные полосы, производилось фотометрическое сравнение спектров Солнца или ярких площадок неба путем фотографий, снятых сквозь дым и за его пределами. В визуальной области спектра дымы вулканов Толбачек и Ключевского, а также фумаролы кратера Былинкина обнаруживают две слабые полосы поглощения с резкими фиолетовыми краями. Более интенсивная полоса (глубиной около 20 %) имеет край у λ 4382 Å и ширину около 100 Å. Вторая слабая полоса имеет длину волны на краю 4109 Å при ширине около 50 Å. В спектре дыма вулкана Безымянный вообще не выявлено таких полос (этот тип вулканов не проявляет в своем составе хлористых соединений). Происхождение описанных выше полос остается неясным. Любопытно заметить, что точно такие же полосы были найдены автором на спектрограммах Венеры, полученных в 1953 г. В октябре 1954 г. эти полосы были также обнаружены в обычном спектре земной атмосферы. Последние сведения были получены из спектральных фотографий небесных тел,

снятых вблизи горизонта в Крымской астрофизической обсерватории. По интенсивности полос можно сделать вывод, что число молекул, ответственных за их образование, в атмосфере Венеры в шесть раз больше, чем в нормальной атмосфере Земли, тогда как в дымах вулканов — в пятьдесят раз больше. По всей вероятности, эти полосы в атмосферах Земли и Венеры происходят вследствие выбросов вулканических газов. Таким образом, мы имеем доказательство наличия вулканических процессов на Венере, которые на ней, вероятно, более активны, чем на Земле. Отсутствие таких полос в спектре Марса указывает на незначительную вулканическую активность этой планеты.

Заключение. Итак, из спектральных наблюдений представляется возможным установить существование вулканизма на Луне и подтвердить со всей вероятностью вулканическую активность Венеры. Поэтому мы можем заключить, что вулканические явления представляют характерную особенность не только Земли, но также и других планет. Схожесть такого рода процессов указывает на идентичную природу внутренней энергии космических тел.

Указатель литературы

1. Koz yrev N. A. Physical observations of the lunar surface//Physics and Astronomy of the Moon/Ed. by Z. Kopal. N. Y.; L., 1962. Chapter 9. P. 361—383.
2. Delsemme A.-H. Spectroscopie de flammes volcaniques//Bulletin des Séances de l'Académie Royale des Sciences d'Outre-Mer (Bruxelles, Belgique). 1960. Nouvelle série. Vol. 6. N 3. P. 507—519.