

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

523.164

РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ ПЛАНЕТ*)

Дж. Робертс

ВВЕДЕНИЕ

В течение долгого времени планеты считались сравнительно спокойными астрономическими объектами. Обладающие незначительными внутренними источниками энергии, они видны благодаря отражению солнечного света; излучение планет в инфракрасном диапазоне связано только с их нагреванием до нескольких сотен градусов Кельвина за счет излучения, приходящего от Солнца. Максимум теплового излучения находится в инфракрасной части спектра, а в радиодиапазоне остается только излучение на «хвосте» Рэля — Джинса, где поток излучения уменьшается пропорционально λ^{-2} . В соответствии с этим предполагали, что необходимы антенны больших размеров и чувствительные приемники, работающие в микроволновом диапазоне, чтобы зарегистрировать радиоизлучение планет.

В 1954 г. Берк и Франклин¹ с удивлением обнаружили интенсивные радиовсплески Юпитера в области коротких волн. Вслед за этим неожиданным открытием через несколько лет было зафиксировано тепловое излучение Венеры, Юпитера и Марса в микроволновом диапазоне. Первыми исследователями в этой области были Мейер, Мак-Каллох и Слонейкер²⁻⁴ из Морской исследовательской лаборатории США, и в течение нескольких лет ни одна другая группа не была в состоянии повторить их наблюдения. Теперь, однако, исследования микроволнового излучения планет проводятся в ряде стран; результатом явились измерения теплового излучения всех планет от Меркурия до Сатурна. Подобные измерения дают информацию о тех слоях планеты, которые не могут наблюдаться в оптическом или инфракрасном диапазонах. В одних случаях — это более глубокие слои атмосферы, в других — подповерхностные слои самой планеты.

Наблюдение излучения Юпитера в микроволновом диапазоне привело к следующему удивительному открытию: в 1958 г. Слонейкер^{6,7} обнаружил не тепловое излучение Юпитера на волне 10 см. Как показали дальнейшие исследования, оно возникает в мощном радиационном поясе, окружающем планету. Особенно успешными в этой области были работы группы радиоастрономов Калифорнийского технологического института; их экспериментальные⁸⁻¹⁰ и теоретические¹¹ исследования позволили установить в первом приближении характеристики радиационных поясов. В последнее время усиленно изучались и декаметровые всплески Юпитера. При этом наиболее значительные результаты были

*) J. A. Roberts, Radio Emission from the Planets, Planetary and Space Science 11, 221 (1963). Перевод В. И. Семеновской, под редакцией В. В. Железнякова.

получены Уорвиком^{12, 13}, который зарегистрировал динамические спектры иовианских шумовых бурь и тем самым внес существенный вклад в наши знания об этих всплесках.

В настоящем обзоре излагается история и современные представления о радиоизлучении планет. В такой быстро развивающейся области своевременное составление обзоров — дело весьма желательное, однако оно может быть проведено только в сотрудничестве со многими радиоастрономами.

Надо отметить, что на характере обзора несомненно сказались личные интересы автора; поэтому обзор в некоторых отношениях может оказаться ограниченным. Обзоры, в которых подчеркнуты другие аспекты планетной радиоастрономии, недавно составлены Мейером¹⁴, Берком¹⁵ и Галле¹⁶. В последующих разделах излучение каждой планеты рассматривается

отдельно, в порядке увеличения их расстояния от Солнца. Более трех четвертей обзора — обсуждение двух типов нетеплового излучения Юпитера.

I. МЕРКУРИЙ

Близость Меркурия к Солнцу вызывает определенные трудности при его наблюдении. Единственные известные измерения радиоизлучения планеты были выполнены Говардом, Барретом и Хэддоком^{17, 18} в период максимальной элонгации Меркурия в январе 1960 г. Исследования проводились на Мичиганском 25-м телескопе, причем в одних случаях использовался приемник с ЛВВ на 3,75 см, в других — приемник с мазером на волне 3,45 см. Было сделано 49 сканирований и 8 измерений при наведении антенны на Меркурий. Результаты сканирования приведены на рис. 2. Рис. 3 изображает фазовый ход эффективной температуры для среднего расстояния от Солнца до Меркурия.

Наблюдения Меркурия в инфракрасной части спектра обнаруживают сильные изменения температуры диска в зависимости от фазы планеты, т. е. от степени освещенности ее солнечными лучами, что характерно для планет с разреженной атмосферой (Меркурий, Марс), а также для Луны. Температура Меркурия в инфракрасных лучах, полученная Петтитом¹⁹, нанесена на рис. 3 сплошной кривой. Значения эффективной температуры в радиодиапазоне превышают температуру в радиодиапазоне и температуру планеты в инфракрасных лучах примерно в два раза при одной и той же фазе. Кроме того, изменение температуры в зависимости от фазы в радиодиапазоне значительно меньше, чем в инфракрасной области.

Меркурий обращен к Солнцу всегда всегда одной стороной²⁰, если не учитывать медленных либраций на $\pm 24^\circ$ с периодом в 88 дней. В случае не очень большой тепловой инерции планеты можно ожидать, что тем-

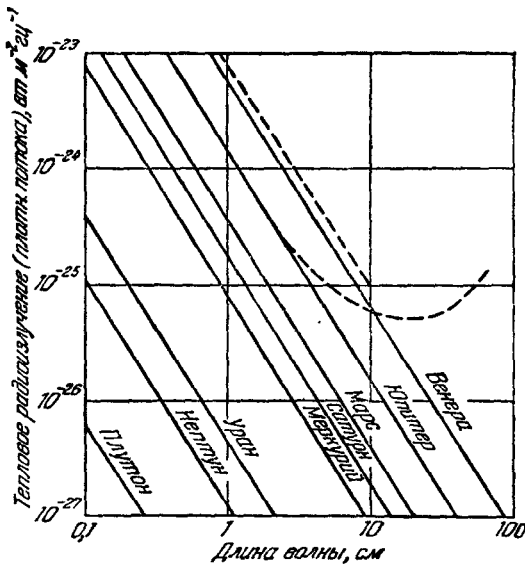


Рис. 1. Предполагаемое тепловое радиоизлучение планет.

Пунктирные кривые показывают излучение, наблюдаемое в действительности в случае Венеры и Юпитера⁹.

пература планеты даже на глубине, где генерируется трехсантиметровое излучение, близка к температуре самой поверхности (определяемой измерениями в инфракрасном диапазоне). Наблюдения, однако, не соответствуют такому выводу. Уокер²¹, а вслед за ним Говард и др. отметили, что противоречие может быть разрешено при значительном радиоактивном нагревании планеты изнутри. Если этот источник является достаточно мощным, а проводимость поверхностных слоев небольшая, то радиоактивное нагревание может значительно увеличить температуру подповерхностных слоев по сравнению с температурой поверхности. Такой источник тепла не зависел бы от фазы солнечного освещения.

Необходимость дальнейших наблюдений Меркурия совершенно очевидна. В-первых, измерения на 3 см должны подтвердить имеющиеся данные о высокой эффективной температуре и уточнить фазовый ход

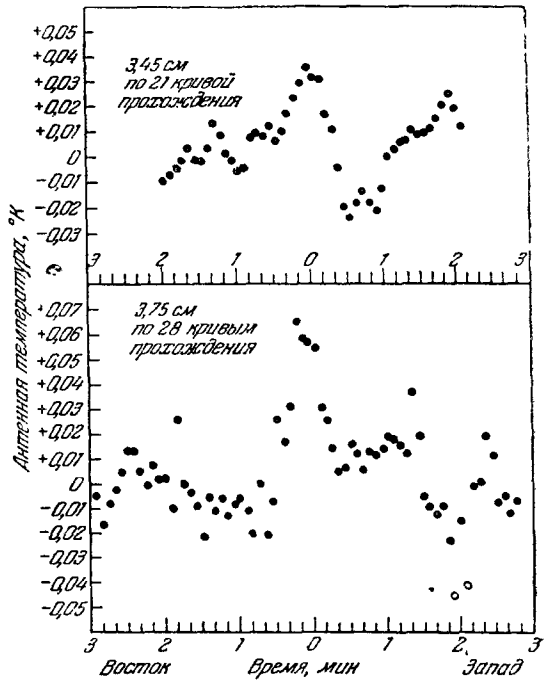


Рис. 2. Наблюдения радиоизлучения Меркурия Говардом и др.¹⁸.

и уточнить фазовый ход

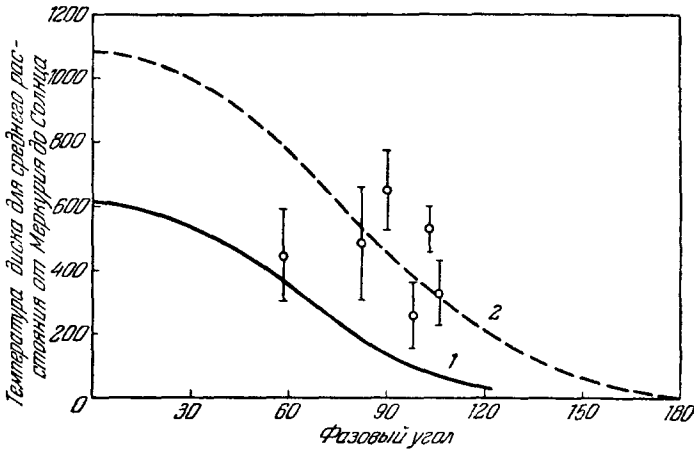


Рис. 3. Наблюдаемые значения эффективной температуры диска Меркурия на волне 3 см¹⁸, показанные по отношению: 1 — к фазовой кривой инфракрасного излучения (Петит¹⁹) (сплошная кривая); 2 — к фазовой кривой, наиболее соответствующей результатам радионамерений, вычисленной Говардом и др.¹⁸ в предположении, что гладкая неподвижная планета не имеет атмосферы и нагревается за счет солнечного излучения (пунктирная кривая).

температуры. Во-вторых, желательны наблюдения на других частотах для определения спектра радиоизлучения anomalously высокой интенсивности.

II. ВЕНЕРА

Во время нижнего соединения Венера имеет самый большой угловой диаметр по сравнению с другими планетами. Она оказалась первой планетой, у которой было обнаружено радиоизлучение в микроволновом диапазоне. Наблюдения, произведенные Мейером, Мак-Каллохом и Слонейкером^{2, 3} на волне 3,15 см, показали, что интенсивность излучения в два с лишним раза больше, чем можно было ожидать по инфракрасной температуре планеты ($\sim 225^\circ \text{K}$). Последующие исследования проводились в диапазоне от 4 мм до 21 см (рис. 4). Вблизи нижнего соединения эффективная температура возрастает от 350°K на волнах 4 и 8 мм до значения $\sim 600^\circ \text{K}$ для длин волн от 3 до 21 см*).

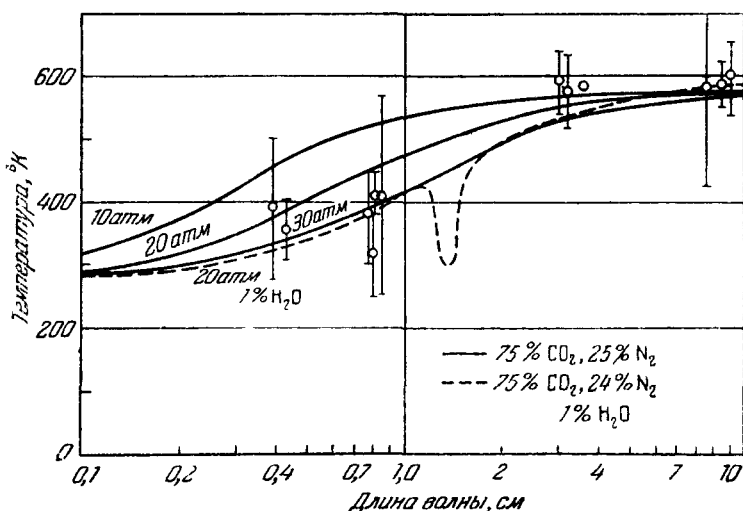


Рис. 4. Спектр микроволнового излучения Венеры.

Точками отмечены значения эффективной температуры диска, которые взяты из следующих работ: 4 мм — 25, 23, 24; 8 мм — 22, 23, 26, 27; 3 см — 2, 4, 28, 14; 10 см — 2, 4, 14, 29. Кроме того, Лилли³⁰ сообщил о температуре примерно 600°K на 21 см. Кривые показывают предполагаемые температуры при нескольких значениях параметров в модели Баррета^{31, 32}.

Были высказаны различные предположения относительно источника необычайно интенсивного радиоизлучения Венеры в области сантиметровых волн. Тот факт, что эффективная температура диска не зависит от длины волны в диапазоне от 3 до 21 см, служит сильным аргументом в пользу теплового происхождения радиоизлучения. Однако Кузьмин и Саломонович^{23, 33} утверждают, что температура диска на 21 см не постоянна, а изменяется день ото дня на несколько сотен градусов; приводятся значения эффективной температуры диска до $1000 \pm 150^\circ \text{K}$. Дрейк²⁹, напротив, считает, что на волнах порядка 10 см изменения температуры ото дня ко дню не превышают 2%; при двух независимых наблюдениях, сделанных через 8 мин, значения температуры отличались не более чем на 7%. Конечно, здесь необходимы дальнейшие исследования, но до тех пор, пока не будет доказано, что полученные изменения не свя-

*) Кузьмин и Саломонович²³ пришли к выводу, что около нижнего соединения температура на 3 см составляет всего лишь $375 \pm 75^\circ \text{K}$. Однако этот результат, полученный путем экстраполяции измеренных значений в районе $500-600^\circ \text{K}$, находится в противоречии с другими наблюдениями.

заны с неточностью измерений; кажется более разумным считать температуру диска относительно постоянной.

О другом наблюдении, относящемся к вопросу о происхождении радиоизлучения, сообщили Мейер, Мак-Каллох и Слонейкер³⁴: линейная поляризация излучения на 3,15 см оказалась меньше 2%.

Когда Венера находится неподалеку от нижнего соединения, ее радиоизлучение в сантиметровом диапазоне сравнительно легко измерить

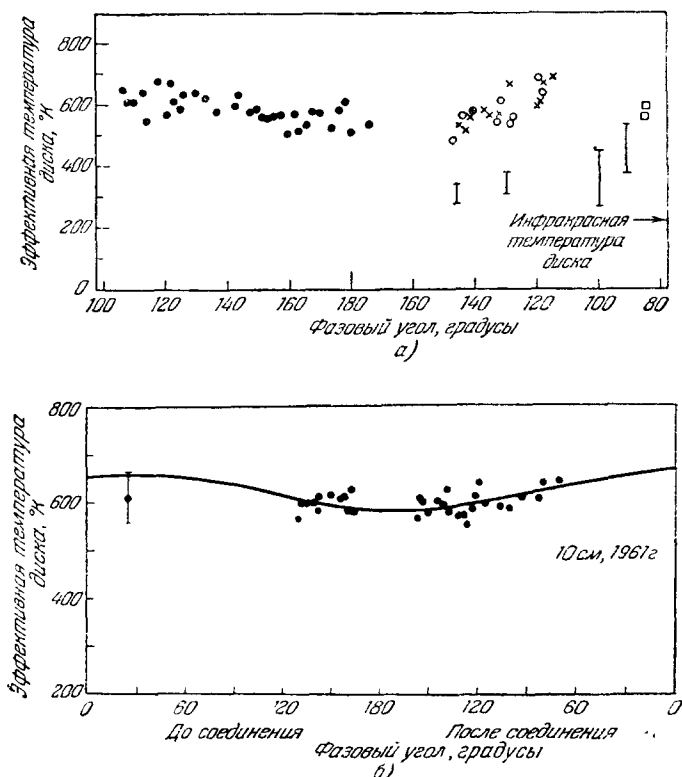


Рис. 5. Фазовые вариации эффективной температуры диска Венеры.

а) Результаты более ранних наблюдений Морской исследовательской лаборатории на волнах 3 и 10 см, взятые Мейером из работ^{2, 4, 14, 28}, и данные Кузьмина и Саломоновича²² по измерениям на 8 мм. 1 8,0 мм, 1959 г. 22; ● 3,15 см, 1956 г. 2, 4; ⊕ 9,4 см, 1956 г. 2; ○ 3,4 см, 1958 г. 14; □ 3,37 см, 1958 г. 28; × 10,2 см, 1959 г. 14. б) Результаты, полученные Дрейком²⁹ в 1961 г. на волне 10 см вблизи нижнего соединения, и синусоидальная волна, найденная методом наименьших квадратов. Также указано значение температуры, измеренной недавно Дрейком²⁵ около верхнего соединения.

с помощью современной аппаратуры. Однако по мере удаления от нижнего соединения расстояние ее до Земли быстро возрастает, и принимаемый на Земле поток радиоизлучения значительно уменьшается. Около верхнего соединения он составляет $1/30$ часть по сравнению с потоком, принимаемым в период нижнего соединения. Это обстоятельство затрудняет определение фазового хода эффективной температуры. Мейер¹⁴ изучил данные Морской исследовательской лаборатории по изменению температуры диска на волнах 3 и 10 см в зависимости от фазы солнечного освещения планеты и пришел к выводу, что среднее по диску значение температуры составляет около 550° К вблизи нижнего соединения и достигает 600° К за месяц до или после соединения (рис. 5, а). Более поздние наблю-

дения Морской исследовательской лаборатории на 3 см дают тот же результат (Мейер и др.³⁴). Дрейк²⁹ наблюдал излучение Венеры на волне 10 см в течение пяти месяцев вблизи соединения 1961 г. (рис. 5, б) и получил значительно меньшие изменения. Применяв метод наименьших квадратов к полученным результатам, Дрейк нашел, что фазовый ход температуры $622 \pm 39 \cos(i \pm 17^\circ)^\circ \text{K}$, где i — фаза солнечного освещения, а знак + (—) соответствует измерениям (после) до нижнего соединения. Тот же автор недавно сообщил об измерениях потока излучения Венеры вблизи верхнего соединения, когда он нашел, что температура диска равна $610 \pm 55^\circ \text{K}$. Как видно из рис. 5, б, такой результат наводит на мысль, что фазовые изменения еще меньше, чем получается по методу наименьших квадратов из измерений вблизи нижнего соединения.

Имеются указания на то, что фазовые вариации более заметны на коротких волнах. Это следует особенно из измерений Кузьмина и Саломоновича²² на 8 мм, которые приведены на рис. 5, а. Кроме того, сообщение Кузьмина и Саломоновича о более поздних наблюдениях на волнах 4 и 8 мм также указывает на сильную фазовую зависимость. Такой эффект, очевидно, может быть очень важным для теории радиоизлучения, поэтому дальнейшие наблюдения весьма желательны *).

1. Теории радиоизлучения Венеры

Венера совершенно закрыта толстым слоем облаков, которые при визуальных наблюдениях кажутся исключительно однородным образованием. В зависимости от степени освещенности солнечными лучами планета проходит все фазы подобно Луне, но в инфракрасном диапазоне ее излучение остается почти постоянным с незначительным отличием между освещенной и затененной полусферами (Петтит¹⁹, Синтон³⁶). Эффект потемнения лимба показывает, что излучение возникает там, где температура уменьшается с высотой. В центре диска температура в инфракрасных лучах составляет около 235°K , в то время как среднее значение по всему диску равно примерно 225°K . Предполагают, что инфракрасное излучение частично приходит от CO_2 над облаками и частью из самих облаков. Из распределения интенсивности колебательно-вращательных полос CO_2 Чэмберленом и Койпером³⁷ была определена температура на более низкой высоте в атмосфере. Измеренная температура 285°K является для CO_2 средним значением температуры вдоль пути отраженного солнечного света, и Койпер³⁸ оценивает температуру в нижней точке этого пути приблизительно в 320°K .

За исключением попытки объяснить особенности спектра радиоизлучения Венеры разрядами между частицами в атмосфере планеты (Голберт и Стрейтон³⁹), во всех теориях предполагается, что излучение с эффективной температурой 350°K и излучение с температурой 600°K связано с различными слоями планеты или ее атмосферы. В одной из таких тепловых теорий, лучше удовлетворяющих современным данным, считается, что источником сантиметрового излучения с температурой 600°K служит поверхность планеты, а миллиметровое излучение с эффективной температурой 350°K генерируется атмосферой. В этом случае атмосферу считают оптически плотной для волн миллиметрового диапазона и относительно прозрачной для сантиметровых волн. Альтернативная модель, предложенная Джонсом^{40, 41}, основана на том, что плотная ионосфера

*) Об изменениях эффективной температуры Венеры см. также работы¹²⁹⁻¹³¹. Особенно интересны измерения Гибсона и Корбетта¹³⁰, согласно которым в линии поглощения водяного пара ($\lambda = 1,35 \text{ см}$) эффективная температура оказалась весьма высокой: $520 \pm 40 \text{ K}$, что близко к значениям на более длинных волнах. (Прим. ред.)

определяет излучение в области сантиметровых волн с температурой 600°K , а поверхность планеты или атмосфера создают излучение с эффективной температурой 350°K . В этой модели ионосфера предполагается прозрачной для более коротких волн.

Каждая из моделей имеет свои трудности *). Ионосферная модель может объяснить наблюдаемый спектр радиоизлучения лишь при очень высокой электронной концентрации в ионосфере Венеры ($n_e \sim 10^{10}\text{ см}^{-3}$, $\int n_e^2 dz \sim 4 \cdot 10^{25}\text{ см}^{-5}$), хотя теория и предполагает, что такие плотности могут поддерживаться за счет корпускулярной бомбардировки. Сильным аргументом против этой теории служит относительное постоянство температуры диска во времени и в широком интервале длин волн ($3 \div 20\text{ см}$). Такое постоянство наводит на мысль, что источник связан с твердой поверхностью. Дрейк²⁹ отметил, что ионосферное излучение на различных длинах волн будет генерироваться разными слоями, которые, вероятно, имеют разную температуру. В настоящее время этот аргумент остается спорным, поэтому необходимы дальнейшие наблюдения по проверке постоянства температуры.

Если новые исследования подтвердят постоянство температуры и независимость от длины волны в сантиметровом диапазоне, это будет весьма убедительным основанием для предположения, что источником сантиметрового излучения является твердая поверхность планеты. В таком случае придется объяснить, что является причиной высокой температуры поверхности ($\sim 600^\circ\text{K}$ по сравнению с температурой излучения $\sim 250^\circ\text{K}$), каков механизм поглощения и генерации миллиметровых волн атмосферой.

Широко обсуждался возможный способ поддержания высокой температуры поверхности за счет «парникового эффекта», когда падающее солнечное излучение проходит сквозь атмосферу и нагревает планету, а переизлученные поверхностью длинные волны задерживаются атмосферой. В 1940 г. Уилдт предсказал, что температура на поверхности Венеры может достигать 408°K из-за парникового эффекта, вызванного большим количеством CO_2 в атмосфере. Последующая дискуссия (Койпер⁴³, Эпик⁴⁴) привела к более низкой оценке ($\sim 350^\circ\text{K}$). Саган^{45, 46} предположил, что повышенный парниковый эффект обусловлен наличием водяных паров в атмосфере. Он нашел, что $1\text{ г}\cdot\text{см}^{-2}$ водяного пара в атмосфере Венеры достаточно для нагревания поверхности до 600°K , если, в согласии с радиолокационными экспериментами Виктора, Стивенса и Голомба⁴⁷, планета обращена к Солнцу всегда одной стороной. Это количество водяного пара значительно превышает найденное Стронгом⁴⁸ ($2 \cdot 10^{-3}\text{ г}\cdot\text{см}^{-2}$), но если в модели Сагана учесть лишь ту измеримую часть водяного пара, которая лежит выше облачного слоя из ледяных кристаллов, соответствие с результатами Стронга будет удовлетворительным. Выводы Сагана критиковались Эпиком⁴⁴. Кроме того, вычисления Ястрова и Рейсула⁴⁹ показали, что температура поверхности только $\sim 320^\circ\text{K}$ даже при $10\text{ г}\cdot\text{см}^{-2}$ пара.

Эпик⁴⁴ предложил совершенно иной метод поддержания высокой поверхностной температуры Венеры, а именно нагревание за счет вязкости ветров. Согласно золотосферной теории Эпика облака Венеры состоят из пыли, которая попадает в атмосферу с поверхности планеты. Эта пыль препятствует уходу инфракрасного излучения с горячей поверхности во внешнее пространство, а ветры в нижних слоях атмосферы нагревают поверхность до температуры $\sim 600^\circ\text{K}$. Дрейк²⁹ критиковал эту теорию

*) Более подробное обсуждение обеих моделей генерации радиоизлучения Венеры можно найти в книге¹²⁸, § 34. (Прим. ред.)

на том основании, что она предсказывает постоянную температуру с точностью до малых долей градуса в течение длительных промежутков времени и, следовательно, не соответствует наблюдаемым фазовым вариациям, которые составляют, вероятно, $\sim 50^\circ \text{K}$.

В случае Меркурия был предложен внутренний источник нагревания: модели, рассмотренные для Венеры, к Меркурию неприменимы, так как последний не имеет атмосферы. Критическая оценка возможных внутренних источников нагревания Венеры была бы очень желательной.

Баррет^{31,32} рассмотрел другую сторону проблемы: можно ли ожидать, что атмосфера будет прозрачной для сантиметровых волн и оптически плотной для волн миллиметрового диапазона при высокой температуре поверхности?

В частности, он рассчитал, какой будет температура диска для модели, в которой поверхностная температура равна 580°K , а атмосфера, состоящая из 75% CO_2 , 22—25% N_2 и 0—3% H_2O , находится в адiabатическом равновесии ниже облачного слоя и в тепловом равновесии при температуре 285°K выше облаков.

На рис. 4 четыре кривые, рассчитанные Барретом, сравниваются с наблюдаемым микроволновым спектром. Сравнение показывает, что поглощение в атмосфере (более холодной) будет достаточным, чтобы объяснить более низкие температуры миллиметровых волн, только при очень глубокой атмосфере.

Если атмосфера не содержит водяного пара, давление на поверхности должно составлять не менее 30 земных атмосфер. При наличии 1% H_2O такой же эффект достигается при давлении 20 атм. Это количество водяного пара значительно выше, чем наблюдал Стронг выше слоя облаков (отношение H_2O к CO_2 равно $2 \cdot 10^{-5}$). Если указанное соотношение имеет место и ниже облачного слоя, то влияние водяных паров пренебрежимо мало.

Таким образом, имеющиеся данные свидетельствуют в пользу модели с высокой температурой поверхности, но есть две трудности: 1) поддержание высокой температуры поверхности и 2) поглощение миллиметровых волн в холодной атмосфере. Заманчивым решением проблемы могло бы быть существование еще не обнаруженной до сих пор компоненты атмосферы, которая обеспечила бы и повышенный парниковый эффект, и поглощение волн миллиметрового диапазона. Конечно, очень существенны дальнейшие экспериментальные работы по определению температуры диска в зависимости от времени и длины волны *).

*) Сделанное выше заключение в пользу модели горячей поверхности доступно экспериментальной проверке¹²⁷. Согласно ионосферной модели оптическая толщина ионосферы $\tau_{\text{и}}$ должна быть порядка единицы на $\lambda \sim 1,3 \text{ см}$ (т. е. в переходной области — от эффективной температуры 350°K на миллиметровых к температуре 600°K на сантиметровых волнах) и убывает по мере уменьшения длины волны. Поэтому в интервале $1 \div 2 \text{ см}$ следует ожидать увеличения яркости на краю диска Венеры вследствие роста $\tau_{\text{и}}$ на периферии, а следовательно, и увеличения роли горячей ионосферы (за счет большей протяженности ионизированного слоя вдоль луча зрения на краю диска). Напротив, в модели горячей поверхности с отрицательным градиентом температуры в атмосфере должно быть не «уярчение», а «потемнение» к лимбу Венеры, так как рост оптической толщины атмосферы $\tau_{\text{а}}$ при удалении от центра диска приведет к уменьшению вклада горячей поверхности в наблюдаемое радиоизлучение.

Проведенные эксперименты по исследованию распределения радиояркости по диску Венеры с космической ракеты «Маринер-2»¹²⁸ свидетельствуют о падении эффективной температуры к краю диска на $\lambda = 1,9 \text{ см}$. Судя по этому результату, предпочтение должно быть отдано модели горячей поверхности; однако для уверенного выбора между двумя рассматриваемыми моделями настоятельно необходимы дальнейшие эксперименты по проверке данных, поступивших с «Маринер-2». (Прим. ред.)

2. Декаметровые всплески

В 1956 г. Краус^{50, 55} сообщил о наблюдении радиовсплесков Венеры, но позднее⁵² в значительной степени отказался от своего утверждения. Карр и др.⁵³, наблюдавшие радиоизлучение Венеры на частоте 18 и 27,6 Мгц в течение нескольких сотен часов в 1958 и 1959—1960 гг., не обнаружили ни одного всплеска с потоком излучения выше $\sim 5 \cdot 10^{-22}$ *вт.м⁻².гц⁻¹*.

:‡

[III. МАРС

Радиоизлучение Марса исследовалось дважды, причем оба наблюдения были выполнены Морской исследовательской лабораторией (Вашингтон) на волне около 3 см. Используя промышленный приемник, Мейер, Мак-Каллох и Слонейкер^{3, 4} смогли измерить излучение во время великого противостояния в сентябре 1956 г., усреднив по 70 отдельным сканированиям планеты. Измеренный поток соответствовал эквивалентной температуре диска $218 \pm 50^\circ \text{K}^*$.

Джордмейн, Олсон, Таунс и Мейер⁵⁴ измерили поток излучения Марса, используя радиометр с мазером, на волне 3,14 см через шесть недель после противостояния в ноябре 1958 г. Найденное значение эффективной температуры составило $211 \pm 20^\circ \text{K}$.

Мейер¹⁴ обсудил полученные результаты в связи с наблюдениями в инфракрасных лучах. Так как атмосфера Марса весьма разрежена, почти все инфракрасное излучение приходит с поверхности планеты (как и в случае Луны). Достаточно большие размеры планетного диска позволяют определить распределение инфракрасного излучения по поверхности (Сингтон³⁶, Петтит¹⁹). Вблизи противостояния лимб на $\sim 100^\circ \text{K}$ холоднее центра диска, а затененная сторона, вероятно, имеет еще более низкую температуру. Средняя температура освещенного диска $\sim 250^\circ \text{K}$ (Петтит и Никольсон⁵⁵, Мензел, Кобленц и Лэмплэнд⁵⁶), что примерно на 40° выше измеренного значения радиотемпературы.

Мейер¹⁴ считает, что такое отличие действительно имеет место и связано с разницей температур поверхности, где образуется инфракрасное излучение, и слоев несколько ниже поверхности, ответственных за генерацию радиоизлучения на 3 см. Он полагает, что тепловая инерция на такой глубине велика по сравнению с периодом вращения Марса (~ 25 часов), так что температура диска на 3 см приближается к средней температуре всей поверхности планеты. Если среднюю температуру излучения (217°K), вычисленную Койпером, принять в качестве оценки температуры поверхности, то имеет место хорошее соответствие с радиоизмерениями.

Если объяснение Мейера правильно, то радионаблюдения устанавливают нижний предел тепловой инерции поверхностных слоев планеты. Доказательством могут явиться дальнейшие исследования на более коротких волнах и не во время противостояний.

IV. ЮПИТЕР *

Радиоизлучение Юпитера было зарегистрировано в двух диапазонах волн: всплески излучения в декаметровой части спектра (8—60 м)^{*} и непрерывное излучение в микроволновой области (3—70 см). Сначала описываются наблюдения всплесков, а затем наблюдения микроволнового излучения. Далее обсуждаются теории происхождения микроволнового излучения, а также генерация всплесков.

*) Указанное значение ошибки дано Мейером¹⁴.

§ 1. Наблюдения декаметрового излучения
(всплесков) Юпитера

Как уже отмечалось во введении, отождествление Берком и Франклином¹ всплесков на частоте 22 *Мгц* с излучением Юпитера было открытием радиоизлучения планет. Интенсивность иовианских всплесков в декаметровом диапазоне очень часто превышает интенсивность любого другого космического источника радиоизлучения, за исключением возмущенного Солнца. Излучение имеет спорадический характер и состоит из серий коротких всплесков, образующих бурю, которая продолжается от нескольких минут до нескольких часов (см. рис. 11). Всплески появляются гораздо чаще на частотах около 18 *Мгц*, чем на частотах, отличающихся на ± 5 *Мгц*, хотя в настоящее время всплески и зарегистрированы в широком интервале частот от ⁵⁷ 4,8 до ⁵¹ 43 *Мгц*. Однако и на частотах ~ 18 *Мгц* даже в годы высокой активности Юпитера всплески регистрируются только в течение $\frac{1}{3}$ времени наблюдений.

1. Период вращения и локализации источников

После открытия Берка и Франклина Шейн^{58, 59} изучил записи космического шума, сделанные в 1951 г. на частоте 18,3 *Мгц*, и показал, что в тот период часто регистрировалось излучение Юпитера, но отбрасывалось как возможные помехи. Особенно полезной оказалась серия наблюдений, выполненных с помощью антенны, способной принимать радиоизлучение Юпитера около восьми часов в день, т. е. в течение 0,8 периода

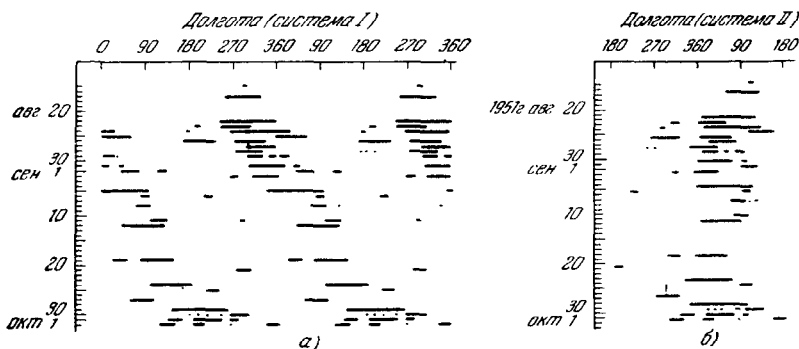


Рис. 6. Долгота центрального меридиана Юпитера при появлении радиовсплесков на 18,3 *Мгц* по наблюдениям в Сиднее в августе — сентябре 1951 г.⁵⁹

вращения планеты. Наблюдения за время 120 оборотов Юпитера установили определенную тенденцию повторения с периодом вращения.

Сопоставление моментов всплесковой активности с долготой центрального меридиана Юпитера в системе I обнаружало заметный дрейф (рис. 6, а), однако при переходе к системе II (рис. 6, б) дрейф оказался очень небольшим. Эти две долготные системы характеризуют среднюю скорость вращения облаков в экваториальной области и в умеренном поясе планеты.

Шейн пришел к выводу, что источник излучения вращается вместе с планетой со скоростью, приблизительно равной скорости системы II, но несколько большей последней, как показывает небольшой отрицательный дрейф на рис. 6, б.

С учетом этого небольшого дрейфа по долготе были совмещены все линии на рис. 6, чтобы получить гистограммы частоты появлений излучения как функцию долготы центрального меридиана (рис. 7). Этот рисунок, который, вероятно, следует рассматривать как экваториальный разрез полярной диаграммы излучения планеты, наводит на мысль, что вокруг Юпитера существует один или несколько источников, с шириной полярных диаграмм излучения меньше 180° каждый. Однако Шейн отметил, что из-за близости Солнца и Земли, если смотреть со стороны Юпитера (радиус вращения Юпитера равен 5,2 а. е.), возможна другая интерпретация этой диаграммы. Она может характеризовать чувствительность возможных излучающих областей на Юпитере к возбуждению солнечными лучами, например ультрафиолетовым излучением.

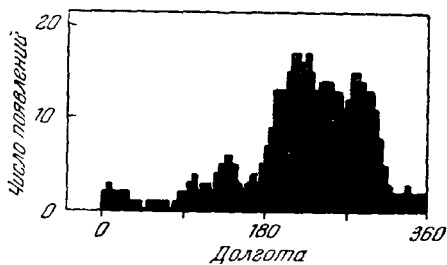


Рис. 7. Гистограмма, показывающая вероятность появления всплесков Юпитера на $18,3 \text{ Мгц}$ ⁵⁹. Долгота центрального меридиана — в системе III (1957, 0).

Результаты классического анализа прежних наблюдений, проделанного Шейном, полностью подтвердились многочисленными последующими работами. Галле и Боулс⁶⁰, Галле^{16, 61}, Берк⁶², Франклин и Берк⁶³, Гарднер и Шейн⁶⁴, Карр и др.^{65, 66}, Смит и Карр⁶⁷, Дуглас⁶⁸ и Берк¹⁵ пришли к заключению, что радиоизлучение Юпитера на частотах от 15 до 30 Мгц статистически повторяется с периодом, несколько меньшим периода системы II. Это хорошо видно из рис. 8 (Берк¹⁵), который указывает на существование наиболее активно излучающей области, устойчивой в течение девяти лет, и нескольких меньших пиков, также имеющих тенденцию к повторению.

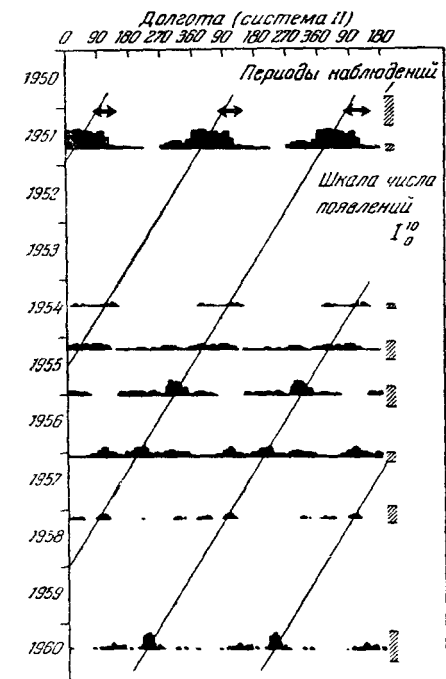


Рис. 8. Гистограммы для разных лет и на различных частотах, собранные Берком¹⁵.

Гистограммы приведены в долготной системе II; наклонные линии находятся на долготе 210° в системе III.

Дуглас⁶⁸ и Галле¹⁶ рассмотрели вопрос о постоянстве периода. По мнению Галле, есть основание считать, что в 1956—1957 гг. период был на $\sim 1^\circ$ длиннее, чем среднее значение периода в 1951—1957 гг., но Дуглас не обнаружил никаких статистически заметных изменений.

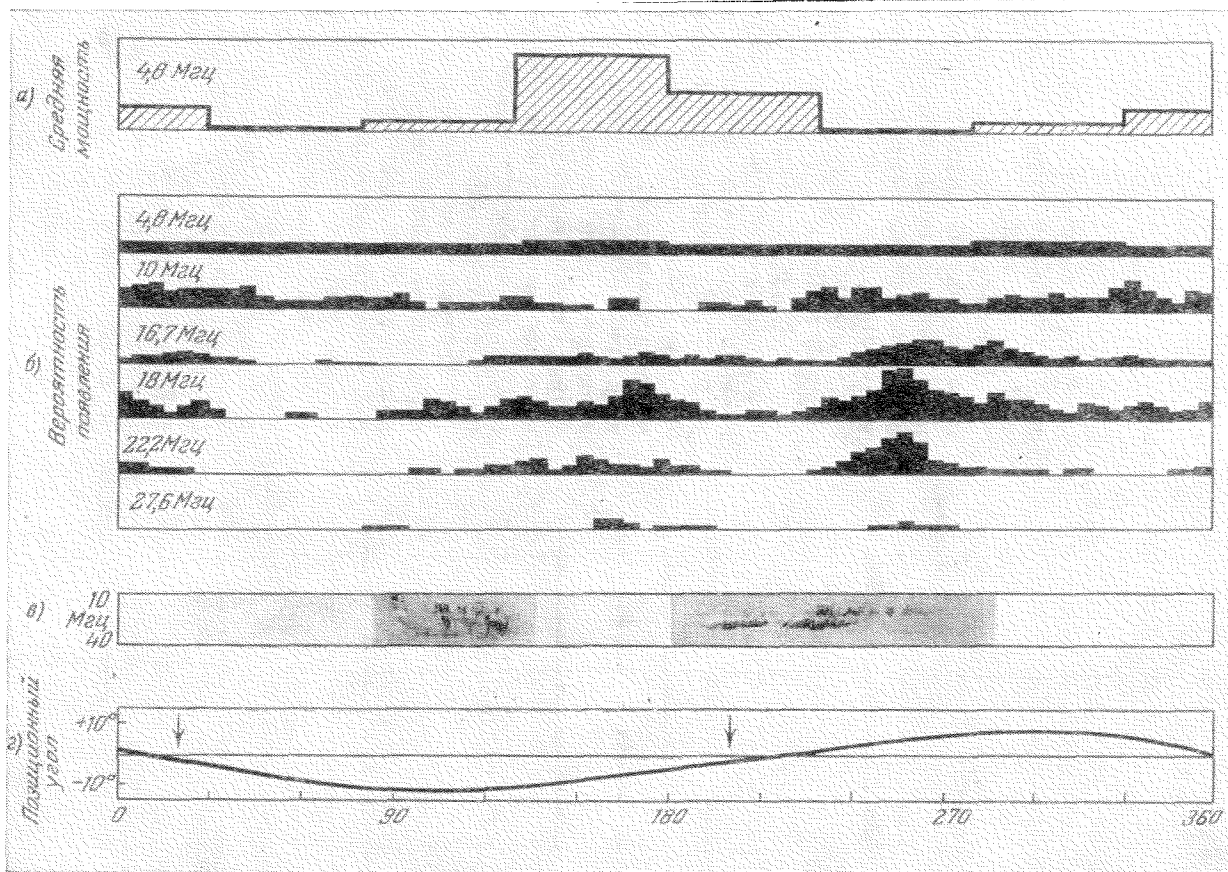


Рис. 9. Гистограммы всплесковой активности Юпитера в дециметровом диапазоне. Все параметры являются функциями долготы центрального меридиана планеты в системе III (1957,0).

а) Средняя интенсивность всплесков на частоте 4,8 Мгц⁵⁷. б) Вероятность появления всплесков на шести частотах: 4,8 Мгц⁵⁷; 10 и 16,7 Мгц (Чили, 1960 г.)⁶⁶; 18, 22,2 и 27,6 Мгц (Флорида, 1960 г.)⁶⁶. в) Спектр излучения в зависимости от долготы, составленный Уорвином¹³, показывающий моменты регистрации излучения в плоскости частота — время. Степень почернения указывает число случаев, когда наблюдалась активность Юпитера. г) Положение электрического вектора микроволнового излучения по данным Морриса и Берджа¹⁰. Моменты, когда магнитные полюсы планеты обращены к Земле, отмечены стрелками.

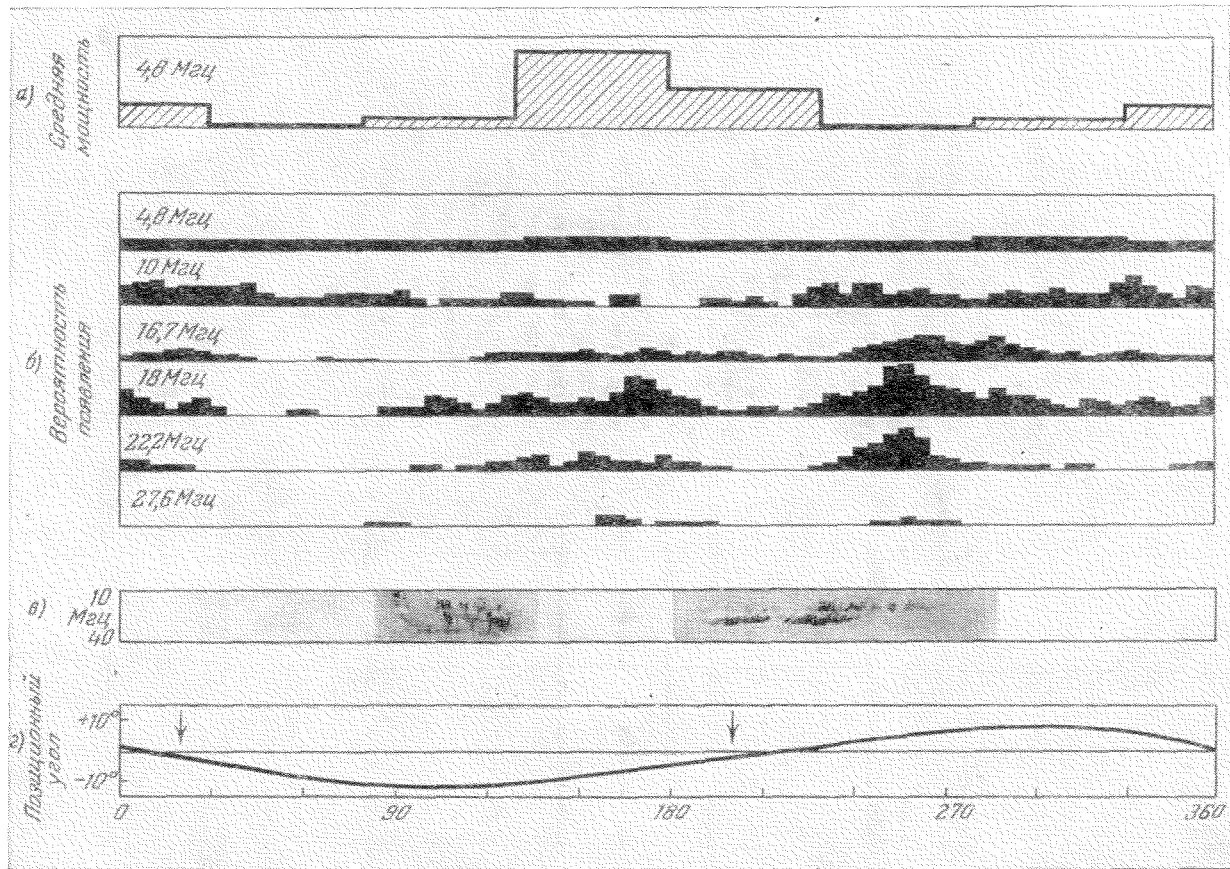


Рис. 9. Гистограммы всплесковой активности Юпитера в декаметровом диапазоне. Все параметры являются функциями долготы центрального меридиана планеты в системе III (1957,0).

а) Средняя интенсивность всплесков на частоте 4,8 Мгц⁵⁷. б) Вероятность появления всплесков на шести частотах: 4,8 Мгц⁵⁷; 10 и 16,7 Мгц (Чили, 1960 г.)⁶⁶; 18, 22,2 и 27,6 Мгц (Флориды, 1960 г.)⁶⁶. в) Спектр излучения в зависимости от долготы, составленный Уорвиком¹², показывающий моменты регистрации излучения в плоскости частота — время. Степень почернения указывает число случаев, когда наблюдалась активность Юпитера. г) Положение электрического вектора микроволнового излучения по данным Морриса и Берджа¹⁰. Моменты, когда магнитные полюсы планеты обращены к Земле, отмечены стрелками.

При изображении гистограмм излучения, очевидно, лучше всего использовать систему долготы, вращающуюся с тем же периодом, что и источники радиоизлучения. В этом направлении были сделаны некоторые предположения. В дальнейшем мы будем использовать долготную систему III (1957, 0), рекомендованную рабочей группой Комиссии-40 Международного астрономического союза⁶⁹. Новая система вращается с периодом $9^h 55^m 29^s,37$ и совпадает с системой долготы II в 0^h всемирного времени 1 января 1957 г.

Значения долготы центрального меридиана в этой системе для 1961, 1962 и 1963 гг. были даны Моррисоном⁷⁰.

2. Гистограммы — результаты наблюдений на одной частоте

Гистограммы, характеризующие вероятность излучения в зависимости от долготы центрального меридиана планеты, были даны многими исследователями. Практически все гистограммы, построенные для разных лет и различных частот, устанавливают наличие основного пика, лежащего между $\lambda_m = 200$ и 280° , и вторичного пика между 90 и 160° . Другие особенности менее определены, однако до 1958 г. можно было выделить еще один пик около $\lambda_m = 300^\circ$, сливающийся в 1951 г. с главным пиком.

Франклин и Берк⁶³, Гарднер и Шейн⁶⁴ отметили, что главный пик становится уже на более высоких частотах. Эта особенность хорошо иллюстрируется результатами наблюдений Карра и др.⁶⁶, приведенными на рис. 9. Изменение ширины главного пика в зависимости от частоты, полученное на основании данных Карра и др.⁶⁶, показано на рис. 10. Эти авторы пришли к выводу, что долгота основного источника также уменьшается в среднем на более высоких частотах.

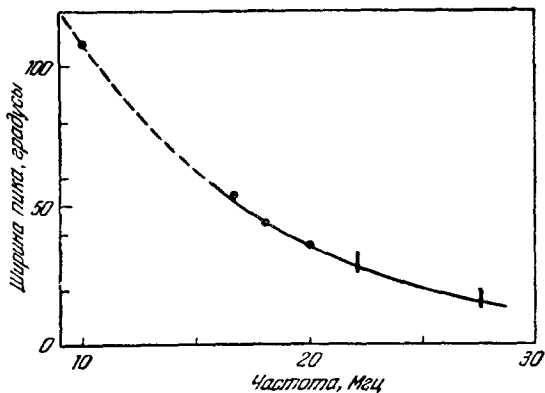


Рис. 10. Изменение ширины основного максимума на гистограмме излучения Юпитера в зависимости от частоты.

Результаты получены Карром и др.⁶⁶.

Интересной особенностью, которая видна из рис. 9, является изменение характера гистограмм на низких частотах. На частоте 10 МГц дискретные источники выделяются с трудом, а недавние исследования Эллис⁵⁷ показывают, что на $4,8 \text{ МГц}$ вероятность появления по существу не зависит от долготы. Однако Эллис указывает, что интенсивность всплесков на $4,8 \text{ МГц}$ обнаруживает зависимость от частоты (рис. 9, а). Интенсивность имеет наибольшее значение на долготах от 130 до 230° , т. е. между двумя основными пиками на более высоких частотах. Если подобный результат подтвердится и другими наблюдениями, это будет иметь большое значение для теории происхождения всплесков.

Для сравнения с имеющимися гистограммами на рис. 9, в приведен составной спектр излучения в зависимости от долготы, полученный Уорвиком (см. п. 3). На рис. 9 изображена также зависимость направления поляризации микроволнового излучения от долготы, измеренная Моррисоном

и Берджем¹⁰. На основании этих данных можно сделать вывод (см. ниже), что магнитная ось планеты наклонена к оси вращения на 9° , а магнитные полюсы расположены на долготе ~ 20 и $\sim 200^\circ$, как указано стрелками.

3. Гистограммы — спектральные данные

При двух последних наблюдениях Уорвик^{12,13} зарегистрировал спектр радиовсплесков Юпитера сначала в диапазоне от 15 до 34 *Мгц*, а затем от 7,6 до 41 *Мгц*. Спектры отдельных бурь будут рассмотрены позже, здесь мы хотим обратить внимание на замечательные результаты, касающиеся гистограмм. Уорвик нашел, что во время продолжительных шумовых бурь излучение имеет место в некотором диапазоне частот в течение всей бури. Примеры приводятся на рис. 13, а—в.

Уорвик обнаружил положительный частотный дрейф на более ранних долготах и отрицательный дрейф на более поздних¹². В настоящее время, располагая более обширными результатами наблюдений, Уорвик¹³ сообщает, что наиболее характерные особенности спектра имеют тенденцию повторяться при одной и той же долготе центрального меридиана и их продолжительность составляет от нескольких часов до нескольких минут: более мелкие детали не повторяются. Благодаря большому количеству записей особенности отдельных спектров могут быть сопоставлены с точностью примерно до одной минуты ($\frac{3}{4}^\circ$ долготы). Сравнивая хорошие образцы дрейфующих бурь (пять случаев положительного дрейфа и семь случаев отрицательного) с двумя спектрами, выбранными в качестве моделей, Уорвик построил составной спектр излучения в зависимости от долготы, который показан на рис. 9, в. Видно, что спектр главного пика имеет отрицательно дрейфующую полосу с резким верхним пределом частоты около 30 *Мгц*. Частотный дрейф этого пика находится в соответствии с данными Карра и др.⁶⁸, полученными путем измерений на отдельных частотах. Второй пик между $\lambda_{\text{III}} = 90$ и 160° имеет противоположное направление дрейфа.

Уорвик исследовал достоверность полученного профиля путем сопоставления его с большим числом менее характерных бурь. Соответствие между бурями с отрицательным дрейфом оказалось очень хорошим, но кажется, что бури с положительным дрейфом возникают позднее до противостояния, чем после противостояния. Это изменение противоречит теории солнечной стимуляции Шейна⁵⁸. На рис. 9, в приведен спектр излучения в зависимости от долготы во время противостояния.

Ширина повторяющихся особенностей динамических спектров не может быть больше 20° . Для более низких частот это значительно меньше, чем получается из гистограмм, соответствующих измерениям на отдельных частотах (см. рис. 10).

4. Тонкая структура излучения

Примеры записей иовианских всплесков на частоте около 20 *Мгц* приведены на рис. 11, где ярко выражена тенденция всплесков собираться в группы, содержащие от нескольких всплесков до нескольких десятков всплесков (рис. 11, в и г). Кроме того, совершенно типичными являются приведенные здесь серии отдельных групп всплесков разной продолжительности, образующих бурю, с резко выраженным началом и концом (рис. 11, а). При постоянной времени $\sim 1/2$ сек перо самописца возвращается на основной уровень только между группами, а не между всплесками одной группы. На частоте 10 *Мгц* всплески имеют аналогичные

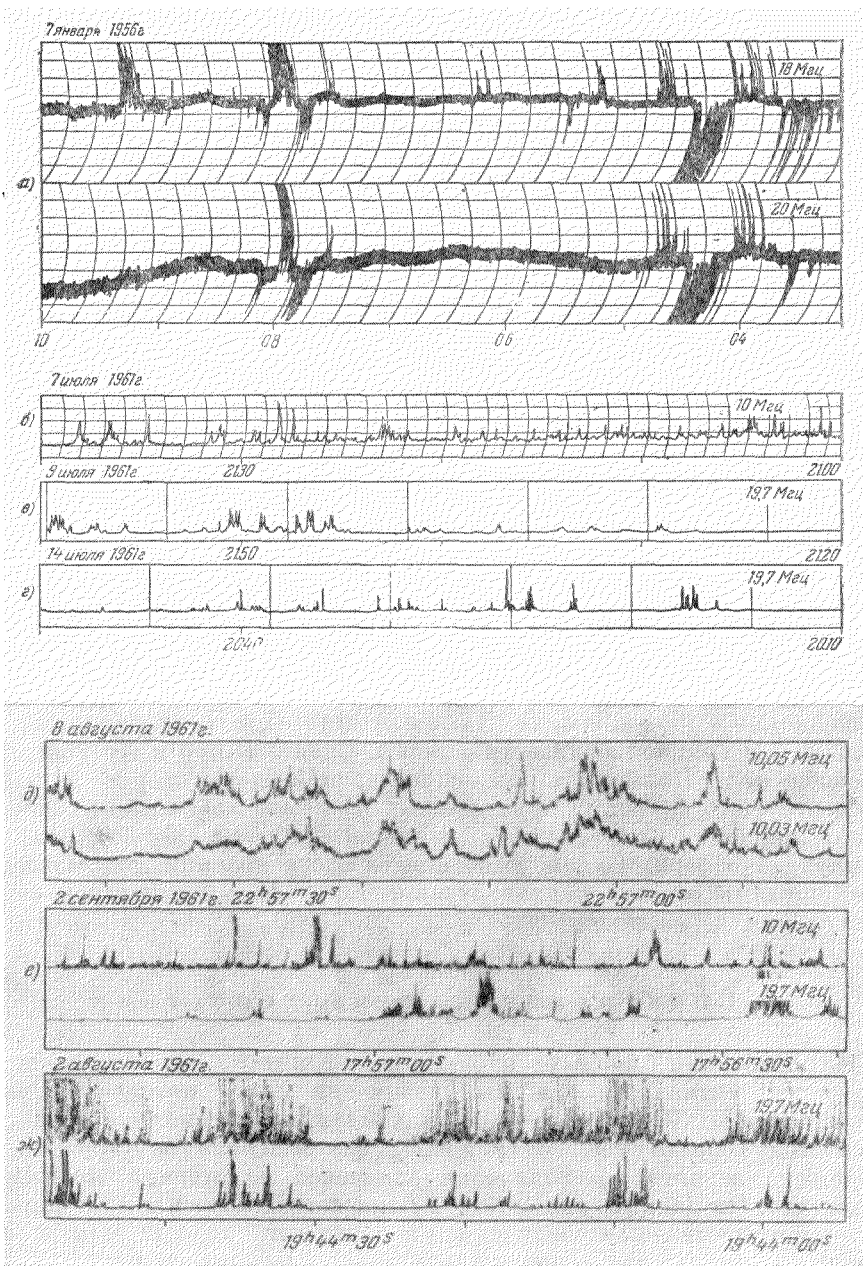


Рис. 11. Примеры записей ювианских шумовых бурь, сделанных с разными скоростями.

Образцы записей охватывают период около 7 час в случае а), 40 мин в случаях б—г) и около 1 мин для д, е и ж). Время увеличивается справа налево. а) Запись, сделанная с помощью интерферометра с фазовым переключением, показывает типичную бурю, продолжающуюся ~ 1 часа. В данном случае имеет место хорошее соответствие между периодами активности на частотах 18 и 20 Мгц. б) Запись на 10 Мгц отличается почти непрерывной активностью, что характерно для данной частоты. в—г) Записи на 19,7 Мгц иллюстрируют бури, в которых всплески имеют разную продолжительность. Каждая из записей показывает начало бури: активность отсутствует в первые полчаса. д) Записи с высокой скоростью на двух близких частотах. Записи очень похожи, с незначительными отличиями. е) Записи с высокой скоростью на сильно разнесенных частотах характеризуются отсутствием корреляции. Продолжительность всплесков очень короткая на обеих частотах. ж) Всплески очень короткой продолжительности на частоте 19,7 Мгц. Чтобы доказать, что эти короткие всплески генерируются Юпитером, верхняя запись была сделана с помощью «ножевой» диаграммы, направленной на Юпитер, а нижняя — с помощью такой же диаграммы, но слегка отклоненной от направления на планету. Образцы записей а) взяты у Галле¹⁶. Записи б—ж) были сделаны в Сиднее С. Хиггинсом и Т. Карром.

характеристики, однако на $4,8 \text{ Мгц}$, как сообщает Эллис ⁵⁷, более сильные всплески часто налагаются на относительно постоянный слабый фон. Далее, по крайней мере некоторые всплески существенно непрерывны и не обнаруживают заметных изменений амплитуды в течение нескольких минут.

Большинство отдельных всплесков продолжается в основном от нескольких десятых секунды до нескольких секунд (Галле ¹⁶, Гарднер и Шейн ⁶⁴, А. Дж. Смит ⁷¹), как видно из рис. 11, б и д. Шейн ⁵⁹ сообщил, что продолжительность всплесков возрастает, когда Юпитер находится близко к Солнцу, достигая нескольких минут. Он получил записи, имеющие такой вид, какой имели бы обычные записи, выполненные с очень большой постоянной времени. По мнению Шейна, этот эффект, вероятно, связан с рассеянием в солнечной короне. Необходимы дополнительные данные по этому вопросу.

Краус ⁷², Галле и Боулс ⁶⁰ (см. также Галле ¹⁶) сообщили о наблюдении очень коротких всплесков длительностью 10^{-2} — 10^{-3} сек. Галле отмечает, что в 1956—1957 гг. всплески появлялись очень редко, но, появившись, продолжались около получаса и больше. В 1955—1956 гг. Гарднер и Шейн ⁶⁴ не обнаружили каких-либо коротких всплесков, которые приходили бы со стороны Юпитера, и до недавнего времени не было никаких дополнительных доказательств их существования. Однако в 1960 г. такие всплески были зарегистрированы в Чили (Карр, частное сообщение), а в 1961 г. в Йеле (Дуглас и Смит ⁷³), в Чили (Карр, частное сообщение) и группой радиоастрономов в Сиднее (Карр и Хиггинс, частное сообщение). Примеры таких всплесков приведены на рис. 11, е и ж.

Очень часто на форму принимаемых на Земле ионосферных всплесков влияют мерцания, связанные с мелкомасштабными неоднородностями в земной ионосфере. Однако особенности этого явления, рассмотренные ниже, показывают, что радиоизлучение имеет форму всплесков еще до прохождения через ионосферу.

5. Спектральные характеристики

На основании первых наблюдений Юпитера предполагали, что всплесковая активность планеты ограничена узким интервалом частот вблизи 18 Мгц . В результате последующих измерений оказалось, что дело обстоит гораздо сложнее. На рис. 12, взятом из работы Карра и др. ⁶⁶, изображена вероятность появления всплесков Юпитера в зависимости от частоты. Эти данные соответствуют прежним измерениям и характеризуются существенным увеличением вероятности около 18 Мгц , а также наводят на мысль, что вероятность возрастает снова на частотах ниже 15 Мгц . Наблюдения Карра и его коллег (неопубликованное частное сообщение) в 1961 г. на частотах 5, 10, 15, 18 и 22 Мгц показывают неизменное увеличение вероятности появления с увеличением частоты.

Записи динамических спектров отдельных всплесков и шумовых бурь были очень полезными при изучении солнечной активности. Аналогичные записи радиоизлучения Юпитера оказались не менее ценными. Основные особенности динамических спектров, полученных с помощью спектрографа в Боулдере (Уорвик ¹²), уже отмечались выше. Спектрографы, перекрывающие более узкую полосу частот, но с более высокой разрешающей способностью по частоте и по времени использовались группой радиоастрономов в Йеле (Дуглас ⁶⁵) и во Флориде (Карр и др. ⁶⁶, Смит ⁷¹). Эти инструменты дают возможность изучать особенности

отдельных всплесков, которые не разрешаются спектрографом в Боулдере, имеющем период повторения 1,3 сек.

Рис. 13 и 14 представляют наиболее общие примеры спектров, зарегистрированных спектрографом в Боулдере во время бури. Продолжительные интенсивные бури с отрицательным дрейфом показаны на рис. 13, *a* и *b*, а рис. 13, *в* соответствует буре с положительным дрейфом. События, приведенные на рис. 13, *a* и *b*, были использованы Уорвиком при составлении спектра, изображенного на рис. 9, *в*.

На рис. 13, *г* показан необычный случай, когда излучение остается в пределах 15—18 *Мгц* в течение часа, по временам имея ширину всего ~0,5 *Мгц*. Рис. 13, *в* изображает, по словам Уорвика, наиболее обычный тип спектра. Излучение на диаграмме частота — время представляет

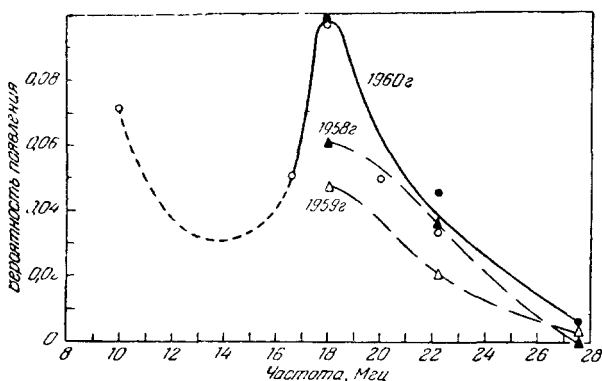


Рис. 12. Изменение вероятности появления активности Юпитера в зависимости от частоты по данным Карра и др.⁶⁶

Результаты 1961 г. показали постоянное увеличение вероятности появления с уменьшением частоты (Карр, частное сообщение). ○ — Чили, 1960 г., ● — Флорида, 1960 г., △ — Флорида, 1959 г., ▲ — Флорида, 1958 г.

отдельные области с узкими полосами и малой продолжительности. Распределение этих отдельных областей излучения соответствует в общих чертах контурам составного спектра главного пика. Уорвик полагает, что такие случаи возникают, когда на слабый источник влияют сильные ионосферные мерцания, которые нарушают когерентность ювианских всплесков, принимаемых двумя антеннами интерферометра при определении спектров.

Другой пример спектра, на котором заметно сильное влияние ионосферы, приведен на рис. 14. Видно, что большие флуктуации интенсивности сопровождаются заметными смещениями «видимого» положения, как показывает перемещение интерференционных лепестков по шкале частот. Такое поведение типично для эффекта мерцания.

Что касается тонкой структуры излучения, спектральные записи подтверждают ранние наблюдения, свидетельствующие об отсутствии корреляции между всплесками на частотах, отличающихся на несколько *Мгц*. Ширина полосы отдельных всплесков составляет от нескольких десятых долей *Мгц* до нескольких *Мгц*; часто в этом интервале появляются многочисленные пики. Дуглас⁶⁸ сообщает, что отдельные всплески находятся одновременно в интервале порядка 0,7 *Мгц* менее 0,1 сек. Однако группы всплесков могут обнаруживать заметный частотный дрейф, возникающий из-за эффекта модуляции, при котором более поздние

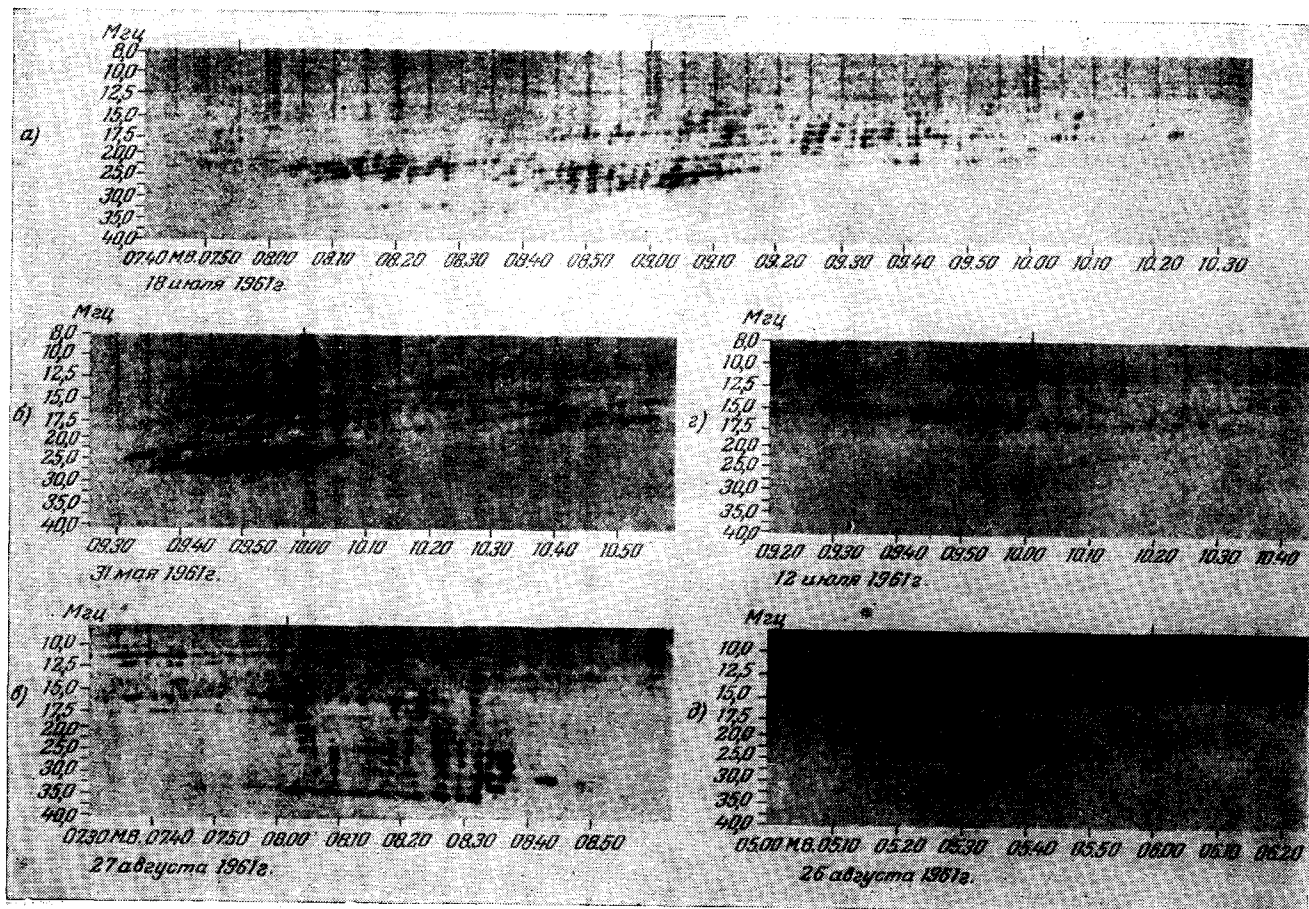


Рис. 13. Спектры повиванских декаметровых бурь, зарегистрированные Уорвиком с помощью интерферометра с фазовым переключением.

Время увеличивается слева направо, а частота сверху вниз для каждого спектра. Диапазон частот 8—40 Мгц. Пятиминутные интервалы отмечены вертикальными линиями. Интенсивность излучения определяется степенью потемнения. Яркие наклонные линии есть следствие многолепестковой диаграммы направленности интерферометра. Бури с отрицательным дрейфом показаны на рис. а—б), а с положительным — на рис. в). На рис. г) излучение представляет серию отдельных точек на диаграмме частота—время. Есть предположение, что это явление связано с земной ионосферой.

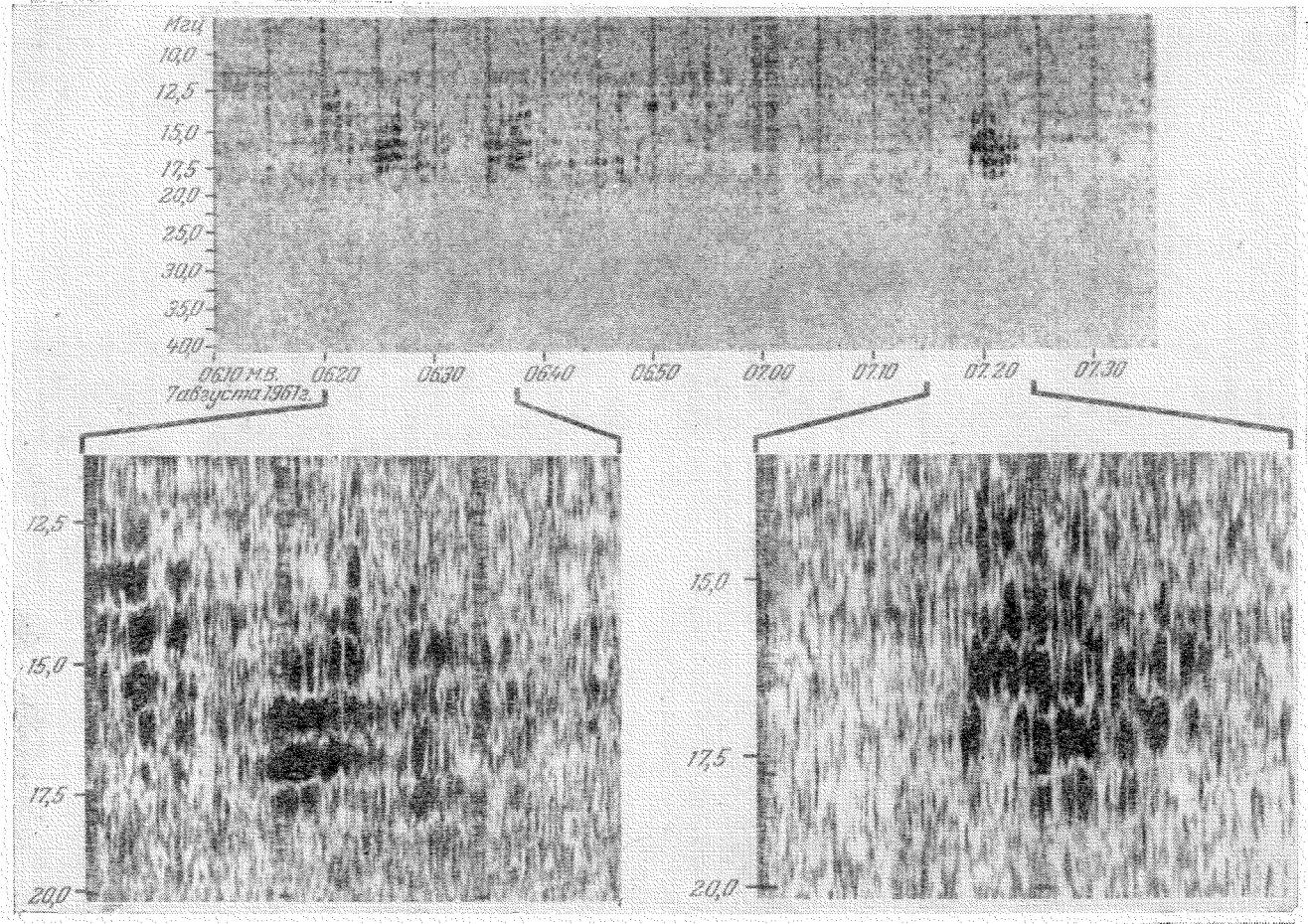


Рис. 14. Детали одного из спектров юпитерской бури, полученного Уорвиком, обнаруживающие быстро дрейфующие особенности, которые могут быть вызваны поносферными неоднородностями.

всплески в группе становятся сильнее на более высоких (низких) частотах (рис. 15). Возможно, что дрейфующие «всплески» на спектрах в Боулдере (см. рис. 14, б) в действительности составлены из недрейфующих всплесков, которые не разрешаются этим инструментом.

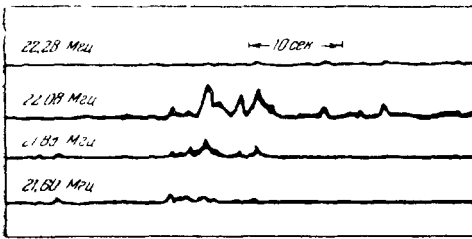


Рис. 15. Одновременные записи ювианской бури, сделанные на четырех близких частотах ⁶⁸.

Заметим, что отдельные всплески возникают одновременно на всех частотах, но огибающая модуляции дрейфует по частоте. По всей вероятности, отдельные всплески образуются на Юпитере, в то время как модуляция с дрейфом по частоте создается земной ионосферой.

всплески имеют сильную циркулярно поляризованную компоненту с вращением по правому кругу. Из совпадения знака поляризации при исследованиях на станциях как северного, так и южного полушарий заключили, что поляризация не связана с земной ионосферой.

Недавно Барроу ⁷⁴ сообщил об одновременных измерениях поляризации на частотах 18,3 и 24 Мгц в течение трех ночей. На 24 Мгц почти все всплески имели эллиптическую или циркулярную поляризацию по правому кругу, в то время как поляризация всплесков на частоте 18,3 Мгц была в основном хаотической. Это подчеркивает необходимость дальнейших поляризационных исследований всплесков Юпитера в более широком интервале частот. До сих пор о таких исследованиях не сообщалось.

Результаты большого числа наблюдений на 22,2 Мгц были представлены Франклином и Берком ⁶³, Карром и др. ⁶⁶ (см. также Смит и Карр ⁶⁷). Около 90% зарегистрированных всплесков имели вращение по правому кругу. Сюда относятся всплески как от главного источника ($200^\circ \sim \lambda_{III} < 280^\circ$), так и от двух более слабых, расположенных на долготе $\lambda_{III} \sim 120^\circ$ и $\sim 300^\circ$. Однако, как отмечают Франклин и Берк, всплески от источника на долготе $\lambda_{III} \sim 120^\circ$ имели больше случаев смешанной поляризации и поляризации с вращением по левому кругу, чем от главного источника.

Карр и др. нашли, что все три источника характеризуются очень близкими значениями ($\sim 0,3$) среднего отношения осей эллипса поляризации (или степени поляризации) *) с возможными небольшими отличиями между ними.

Отношение осей (или степень поляризации), измеренное для всплесков, следующих один за другим, обычно имеет очень большой разброс

*) Карр и др. измерили интенсивность право- и левополяризованных компонент излучения, что недостаточно для полного определения поляризации. Авторы предполагают, что излучение полностью поляризовано, и интерпретировали свои наблюдения как определение эллиптичности излучения. Другим, но возможно более реальным является предположение о том, что в составе излучения имеется циркулярно поляризованная компонента и неполяризованная составляющая; тогда измерения будут давать степень поляризации.

6. Поляризация

Первоначальные наблюдения поляризации всплесков Юпитера, произведенные Берком и Франклином ⁶³ на частоте 22,2 Мгц, а также Гарднером и Шейном ⁶⁴ на частоте 19,6 Мгц, показали, что

в пределах от 0,2 до 0,8. При определении средних значений по десяти следующим один за другим изменениям были получены несколько меньшие систематические изменения. Очевидно, необходимо значительно больше подобных измерений.

7. Роль ионосферных флуктуаций

Гарднер и Шейн⁶⁴ сделали первую попытку определить, в какой мере ионосфера создает или видоизменяет короткопериодическую структуру иомианского декаметрового излучения. С помощью трех пар записей,

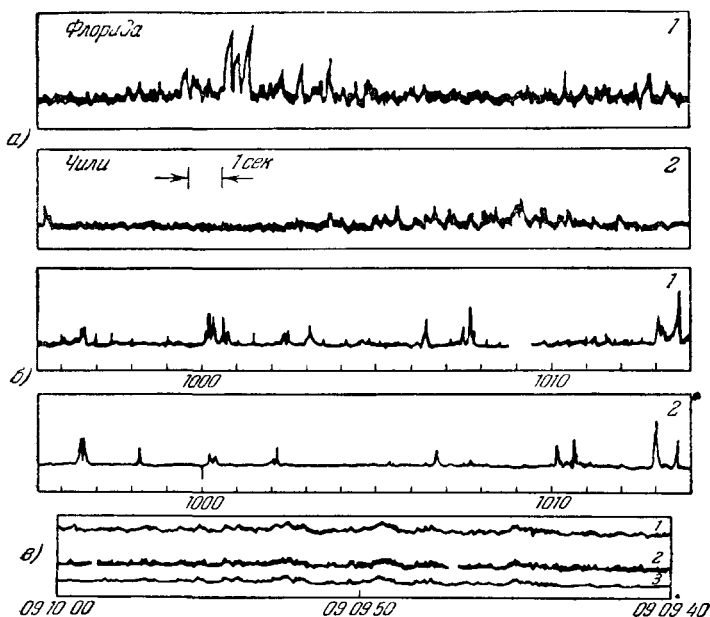


Рис. 16. Одновременные записи иомианских декаметровых бурь, сделанные на различных станциях.

а) Наблюдения во Флориде и Чили на 18,0 Мгц, обнаруживающие очень малую корреляцию⁷⁶ б) Наблюдения на 19,6 Мгц на двух станциях, расположенных на расстоянии 25 км, имеющие некоторую степень корреляции⁶⁴ в) Пример высокой корреляции между станциями, находящимися на расстоянии 30 км (станция 3) и 100 км (станция 2) от станции 1⁷³ ✓

сделанных на двух станциях, которые были расположены на расстоянии 20 км, они нашли значительные различия во временных вариациях излучения. Последующие исследования были проведены Х. Дж. Смитом и Дугласом^{68, 73, 75} с базой от 15 до 100 км и А. Дж. Смитом⁷⁶ и его сотрудниками с базой более 7000 км.

Из совокупности этих измерений следует, что возможна самая различная степень корреляции. По временам корреляция очень мала, причем целые группы всплесков, полученные на одной станции, отсутствуют на другой (рис. 16, а). Иногда имеет место частичное соответствие (рис. 16, б): некоторые всплески или группы всплесков наблюдаются на одной станции и не обнаруживаются на другой, в то время как другие регистрируются в обоих пунктах, но с большим искажением. В ряде случаев (рис. 16, в) может быть очень высокая корреляция даже для всплесков продолжительностью $\sim 10^{-2}$ сек (Дуглас и Смит⁷³).

Эти результаты соответствуют предположению, что излучение Юпитера еще до ионосферы Земли имеет форму всплесков продолжительностью от нескольких секунд до 10^{-2} сек и при прохождении к Земле оно лишь несколько модулируется ионосферными флуктуациями. Сравнительно хорошие записи, сделанные во Флориде и в Чили, Смит и др.⁷⁶ определили среднюю продолжительность этих флуктуаций в 30—45 сек, что близко к периоду мерцания радиозвезд. Так же, как и в случае радиозвезд, особенности флуктуаций зависят от времени суток или года⁷³. Возможно, что и модуляция групп всплесков с дрейфом по частоте, описанная Дугласом⁶⁸, — ионосферного происхождения (ср. Уайлд и Робертс⁷⁷).

Результаты наблюдений, опубликованные до настоящего времени, не дают ответа на вопрос, в какой мере тенденция всплесков образовывать группы является результатом ионосферной модуляции. Должно быть, ответить на этот вопрос можно будет при изучении записей с хорошей корреляцией.

8. Связь с оптическими явлениями на Юпитере

Были сделаны попытки отождествить оптические особенности облачного слоя Юпитера с источниками радиовсплесков. В недавнем обзоре Смита и Карра⁷⁸ показано, что из хорошо известных особенностей Юпитера только одна, вращающаяся (в пределах экспериментальных ошибок) с той же скоростью, что и источники радиоизлучения, наблюдалась в 1955—1957 гг. на широте Южного тропического возмущения. Производились также исследования Юпитера в белом свете (Карр и др.⁶⁶) и в линии H_{α} (Карр и др.⁶⁶, Джелли и Петфорд⁷⁹) во время радиовсплесков. Ни в том ни в другом случае каких-либо световых импульсов зарегистрировано не было.

9. Корреляция с солнечной активностью

Определению изменений степени активности Юпитера от года к году радиоастрономы придавали очень большое значение. Начиная с 1954 г., когда было обнаружено излучение планеты, активность заметно уменьшалась при увеличении солнечной деятельности. Карр и др.⁶⁶, используя одну и ту же аппаратуру в течение нескольких лет, получили кривые, представленные на рис. 17, где, однако, значения для 1956—1957 гг. взяты из работы Галле¹⁶. Имеющиеся данные наводят на мысль об обратной корреляции с солнечной активностью. Однако точная зависимость может быть установлена только в результате многолетних наблюдений, в частности, потому, что период вращения Юпитера и продолжительность солнечного цикла составляют ~ 11 лет каждый.

Наряду с этим было несколько сообщений о кратковременной положительной корреляции с солнечной активностью. Так, например, Краус⁵¹ и Уорвик^{80, 81, 13} представили результаты, на основании которых можно предположить, что активность Юпитера увеличивается вблизи периода высокой солнечной деятельности. Более обширные данные Уорвика¹³ (рис. 18) дают основание предполагать, что увеличение общего уровня активности Юпитера наступает спустя несколько дней после регистрации повышенного солнечного радиоизлучения, однако это увеличение отмечается не очень уверенно. Дуглас⁶⁸ также находит, что активность Юпитера увеличивается через несколько дней после солнечных всплесков или повышенного излучения. Однако он считает этот эффект статистически

незначительным. Если же Уорвик использует только те дни, когда излучение Юпитера наблюдалось на частотах выше 30 Мгц (зачерненные на рис. 18), то ясно видно увеличение активности планеты за день или через день или два после повышенного солнечного излучения. Показанная здесь корреляция выглядит уже более значительной, и если окажется, что та же картина соответствует более обширным данным, будет установлена весьма интересная корреляция.

Карр, Смит и Боллхэген^{66, 82}, также желающие проверить предположение, что иовианские всплески вызываются заряженными частицами, выбрасываемыми Солнцем (Карр⁸³), использовали возмущения магнитного поля Земли в качестве индикатора выброса таких частиц. Они показали, что в период май — август 1960 г. имело место сходство между диаграммами ежедневного индекса активности Юпитера и диаграммами геомагнитного индекса A , полученными на восемь дней раньше. Пытаясь выяснить вопрос о том, насколько велика эта связь, автор вычислил кросс-корреляцию между двумя указанными кривыми. Результат,

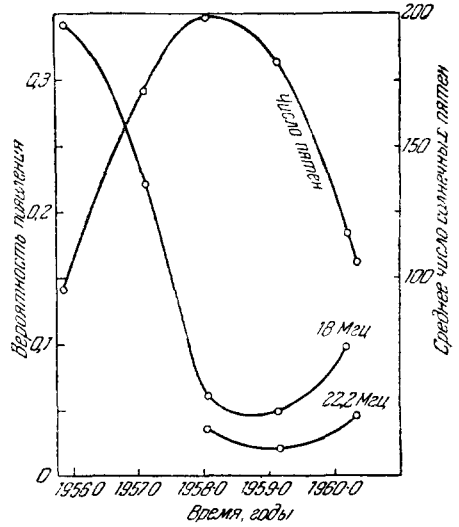


Рис. 17. Ежегодные изменения всплесковой активности Юпитера по сравнению с уровнем солнечной деятельности. Часть данных, с 1957 по 1960 г., взята из работы Карра и др.⁸⁶, а для 1956—1957 гг. использованы результаты, полученные Галле¹⁶.

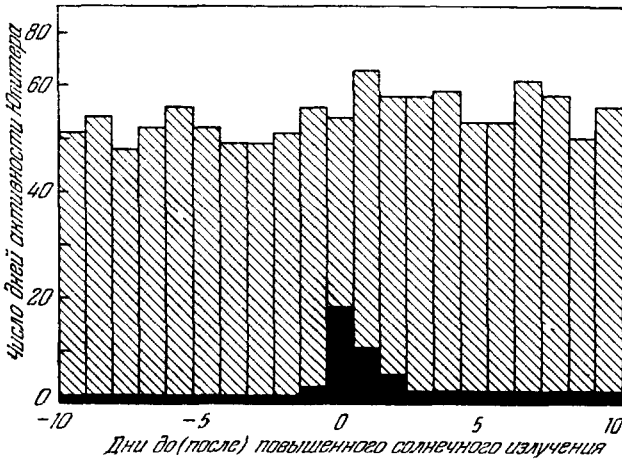


Рис. 18. Полученная методом наложения эпох диаграмма, показывающая число случаев, когда активность Юпитера наблюдалась через несколько дней (после) до появления повышенного солнечного излучения в декаметровом диапазоне.

Черным выделены случаи, когда Юпитер излучал на частоте выше 30 Мгц (данные¹³).

приведенный на рис. 19, имеет заметный пик, соответствующий запаздыванию активности Юпитера на восемь дней по сравнению с геомагнитной.

Однако существует и другой пик, примерно равный по величине, который соответствует аналогичному запаздыванию активности Земли по отношению

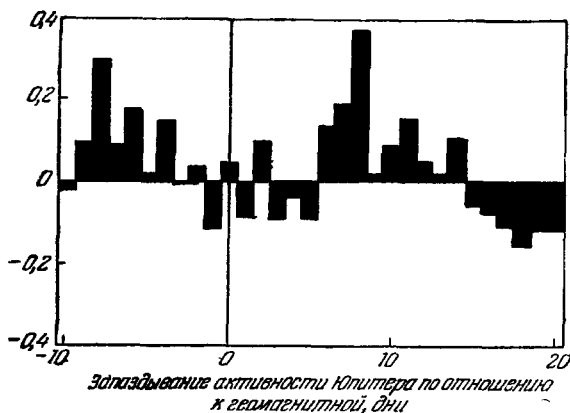


Рис. 19. Коэффициент корреляции между геомагнитным индексом A и индексом запаздывания всплесков Юпитера, полученный Карром и Боллхэгеном ⁸².

к Юпитеру. Такие же наблюдения были сделаны Хиггинсом в Сиднее (частное сообщение) на частоте $19,7 \text{ МГц}$ в течение части указанного периода (июнь — август 1960 г.). Он не обнаружил максимума, соответствующего запаздыванию иовианской активности по отношению к геомагнитной: самый резкий пик соответствовал обратному запаздыванию в шесть-семь дней. При исследованиях в 1959 г. Хиггинс получил заметные пики, отвечающие запаздыванию активности Юпитера на пять дней по сравнению с геомагнитной активностью, а также пики, соответствующие запаздыванию геомагнитной активности на семь дней по отношению к иовианской.

Из сказанного ясно, что все отмеченные корреляции легко могут оказаться статистическими флуктуациями и ясность в этот вопрос могут внести дальнейшие исследования.

§ 2. Наблюдения микроволнового излучения Юпитера

Вскоре после открытия микроволнового излучения Венеры в 1956 г. Мейер, Мак-Каллох и Слонейкер ^{3,4} зарегистрировали радиоизлучение Юпитера на волне $3,15 \text{ см}$. Эффективная температура диска оказалась равной $145 \pm 26^\circ \text{ K}$, т. е. в разумном соответствии с инфракрасной температурой 130° K (Мензел, Кобленц и Лэмпленд ⁵⁶). Подобные значения температуры были получены и в результате других измерений на волнах около 3 см (Дрейк и Ивен ⁸⁴, Джордмейн, Олсон, Таунс и Мейер ^{28, 54}). Однако в 1958 г. Слонейкер ^{6, 7, 85} нашел, что на волне 10 см температура излучения составляет около 600° K . Это послужило толчком к исследованию излучения на более длинных волнах дециметрового диапазона, и наблюдения на волне 21 см (Дрейк и Хватум ⁸⁶, Мак-Клейн ⁸⁷ и Эпштейн ⁸⁸), на 31 см (Робертс и Стенли ⁸), на 68 см (Дрейк и Хватум ⁸⁶) показали, что поток излучения планеты мало меняется с изменением длины волны в диапазоне от 10 до 70 см (рис. 20, а). Таким образом, эффективная температура диска возрастает с увеличением длины волны, достигая величины $\sim 5 \cdot 10^4 \text{ K}$ на 70 см (рис. 20, б).

1. Угловой размер радиисточника

Из всех теорий, предложенных для объяснения этого нетеплового излучения, наибольшее внимание привлекает теория Дрейка и Хватума ⁸⁶, согласно которой наблюдаемое излучение есть магнитотормозное излучение быстрых электронов в иовианском поясе Ван-Аллена. Определение угловых размеров области, излучающей в радиодиапазоне, могло под-

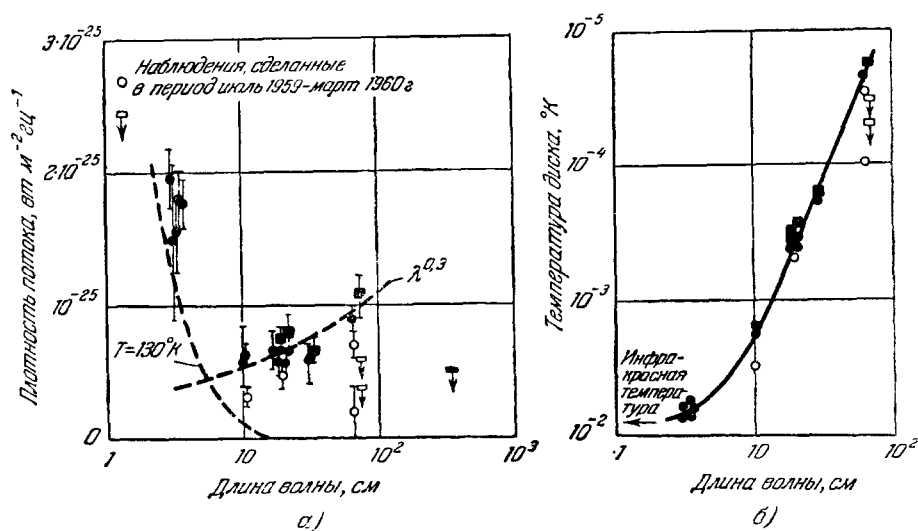
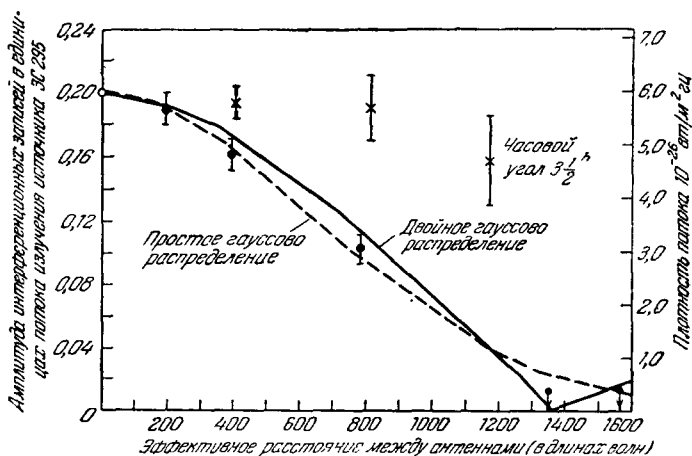


Рис. 20. Микроволновый спектр Юпитера.

а) Измеренные плотности потока приведены к расстоянию до Юпитера: 4,04 а. е. (полярный радиус $22,75^\circ$). Указанные значения, отмеченные квадратами, представляют сумму потоков с двумя взаимно перпендикулярными поляризациями. Остальные значения дают удвоенный поток, измеренный в одной плоскости поляризации. Пунктирные кривые показывают в 1) предполагаемый поток излучения черного тела при инфракрасной температуре, 2) поток, изменяющийся как $3,0 (\lambda \text{ см})^{0,3} \cdot 10^{-26} \text{ вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}$, что с достаточной степенью точности соответствует наблюдаемому потоку, если исключить тепловую компоненту излучения.

б) Эффективная температура диска, соответствующая измеренным значениям потока (оптический диск). Приведенные данные взяты из следующих работ: 3 см—3, 4, 54; 10 см—7, 6, 85; 20 см—10, 89, 90, 87, 88, 91; 30 см—10, 8; 70 см—89, 92, 93; 350 см—94.

Рис. 21. Амплитуда интерференционных записей неполяризованной компоненты излучения Юпитера на 31 см в зависимости от разнесения антенн (по данным ¹⁰).

Для сравнения с измеренными значениями приведены теоретические кривые, полученные в предположении, что: 1) источник с гауссовым распределением интенсивности в экваториальном направлении имеет диаметр, на уровне $1/e$ в 3,3 раза превышающий полярный диаметр видимого диска (пунктирная кривая), и 2) источник с двойным симметричным гауссовым распределением имеет экваториальное расстояние между максимумами 3,7 диаметра (сплошная кривая). \circ — Измерение с одной антенной, 1959 г.; \bullet — база восток — запад, апрель — май 1960 г.; \times — база север — юг, январь—февраль 1961 г.

твердить правильность этой гипотезы, и в апреле 1960 г. соответствующие измерения были сделаны с помощью двух 27-метровых антенн Калифорнийского института технологии, действующих как интерферометр (Радхакришнан и Робертс⁹). Измерение на волне 31 см показало, что в экваториальном направлении диаметр источника составляет примерно 2', т. е. в три раза больше диаметра планеты. Моррис и Бердж¹⁰, используя тот же самый прибор в качестве интерферометра с базой, ориентированной в направлении север—юг, произвели дальнейшие наблюдения на 31 и 22 см.

Результаты всех наблюдений приведены на рис. 21 и 22, взятых из работы Морриса и Берджа¹⁰. Рис. 21 показывает изменение средней

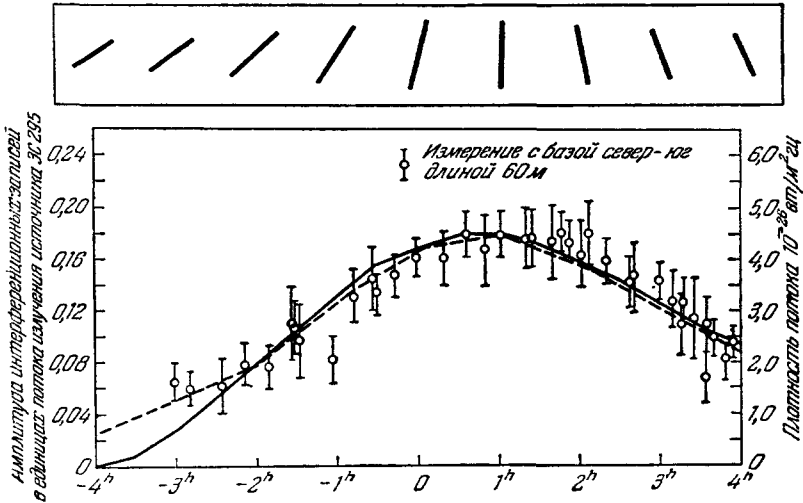


Рис. 22. Радиоизлучение Юпитера на 22 см.

Амплитуда интерференционных записей в зависимости от часового угла с базой длиной 480 м, ориентированной в направлении север—юг (неполяризованная компонента). Наклонные линии вверх показывают ориентацию плоскости интерферометрических лепестков по отношению к оси Юпитера; — — простое гауссово распределение; — источник с двойным гауссовым распределением.

амплитуды интерференционных записей на волне 31 см в зависимости от эффективного расстояния между антеннами при измерениях с базами север—юг и запад—восток. Эти измерения относятся к неполяризованной компоненте излучения (см. ниже). Во время наблюдений ось вращения Юпитера изменялась в пределах $\pm 12^\circ$ по отношению к направлению север—юг, так что в хорошем приближении измерения с базами север—юг и запад—восток определяли размеры источника соответственно в полярном и экваториальном направлениях.

Из результатов наблюдений, указанных на рис. 21, видно, что размеры источника в экваториальном направлении в несколько раз превышают диаметр планеты, а в полярном — того же порядка, что и диаметр. Пока еще недостаточно данных, чтобы судить о точном распределении интенсивности. Сравнение с приведенными на рисунке теоретическими кривыми показывает, что результаты наблюдений согласуются с предположением об одnogорбом или двугорбом распределении интенсивности в экваториальном направлении. Чтобы выбрать между этими моделями, необходимы наблюдения с более разнесенными антеннами.

На рис. 22 показаны результаты измерений на волне 22 см, где амплитуда интерференционных записей при базе север—юг длиной

480 м является функцией часового угла (неполяризованное излучение). Для сравнения приведена также амплитуда неразрешенного источника (измеренная с базой длиной 60 м). Для лучшего понимания имеющихся данных в верхней части рисунка короткими отрезками указана ориентация плоскости интерферометрических лепестков относительно оси вращения Юпитера. Таким образом, вблизи 1^h наблюдения определяют размеры источника в полярном направлении, а перед прохождением меридиана — размеры в экваториальном направлении.

Результаты измерений снова неполные, но они соответствуют эллиптическому источнику с гауссовым сечением, экваториальный диаметр которого на уровне $1/e$ в 2,9 раза больше оптического диаметра, а размеры в полярном направлении на уровне $1/e$ составляют 1,2 оптического диаметра. Предположение об источнике с двойным гауссовым распределением (сплошная кривая) снова согласуется с полученными результатами: расстояние между максимумами составит 3,2 диаметра.

По мнению Морриса и Берджа, небольшие отличия в размерах, полученные при измерениях на 22 и 31 см, являются несущественными. Подобные значения для размеров излучающей области были получены недавно при наблюдении затмения Юпитера Луной на волне 74 см с помощью 60-метрового австралийского телескопа⁹⁵. Таким образом, размеры источника нетеплового излучения, по-видимому, почти не зависят от частоты.

2. Поляризация

После того как Филд⁹⁶ предсказал, что излучение электронов в поясе Ван-Аллена должно быть сильно поляризованным, Радхакришнан и Робертс⁹ произвели измерение поляризации на волне 31 см. Ими была обнаружена линейно поляризованная компонента, составляющая примерно 0,3 общего излучения с электрическим вектором, параллельным экваториальной плоскости Юпитера (в пределах $\pm 12^\circ$). Было показано также, что циркулярно поляризованная компонента составляет меньше 0,06 общего излучения.

В результате более обширных наблюдений Моррис и Бердж¹⁰ нашли, что среднее значение степени линейной поляризации равно $0,33 \pm 0,07$ на волне 31 см и $0,28 \pm 0,06$ на волне 22 см. На этой волне циркулярно поляризованная компонента в составе излучения во всяком случае не превышает 0,05 общего излучения. Моррис и Бердж обнаружили более низкую степень поляризации при частичном разрешении источника на 31 см (при больших часовых углах с базой 480 м, ориентированной в направлении север—юг). Этот результат подтверждает эффект, отмеченный Радхакришнаном и Робертсом, и означает, что мелкомасштабные структуры в источнике поляризованы меньше.

Наблюдая поляризацию излучения на волне 22 см на протяжении семи дней по восемь часов каждую ночь, Моррис и Бердж сделали важное открытие, что направление электрического вектора испытывает колебания на $\pm 9^\circ$ с периодом вращения планеты (рис. 9, з). Так как поляризация колебаний, по-видимому, связана с магнитным полем, они заключили, что магнитная ось Юпитера наклонена на 9° к оси вращения. Это интересное открытие дает возможность определить, чему равен примерно период вращения твердого тела планеты. По данным Морриса и Берджа различить периоды систем II и III невозможно; однако результаты наблюдений в течение более длительного промежутка времени должны дать точные значения.

Во время наблюдений долгота магнитных полюсов в системе III (1957,0) составляла $20 \pm 10^\circ$ в южном полушарии и $200 \pm 10^\circ$ — в северном.

Этот результат сравнивался с измерениями декаметровых всплесков, приведенными в предыдущем разделе*).

Направление электрического вектора, усредненное по периоду вращения планеты, по-видимому, отклоняется от направления, перпендикулярного оси вращения, на угол, примерно равный $+3^\circ$ (рис. 9, e). По порядку величины и по направлению вращения похоже, что эффект связан с фарадеевым вращением в ионосфере Земли.

3. Изменения во времени

Вариации температуры Юпитера в микроволновом диапазоне были отмечены многими исследователями (Джордмейн и др.⁵⁴, Мак-Клейн⁸⁷, Мак-Клейн и Слонейкер⁷, Слонейкер⁶, Слонейкер и Боуленд⁸⁵, Мак-Клейн, Николс и Уак⁹⁰, Дрейк и Хватум⁹², Лонг и Элсмор⁹³, Эпстейн⁸⁸, М. Робертс⁹⁷, Моррис и Бердж¹⁰). В настоящее время, пожалуй, нет сомнения в том, что во многих случаях зафиксированные вариации были связаны с малыми значениями отношения сигнала к шуму или с ограниченной стабильностью аппаратуры, трудностями выделения источника на фоне космического радиоизлучения (особенно при использовании антенн сравнительно малых размеров на более длинных волнах) или поляризацией источника. Что касается действительных изменений общей интенсивности (для обеих плоскостей поляризации), то они обнаруживают два максимума за период вращения планеты. Максимумы, которые примерно на 10% больше минимумов, наблюдаются на долготе 110° и 230° (система III), т. е. когда наклон плоскости поляризации к экватору является наибольшим. Этот эффект был обнаружен Моррисом и Берджем¹⁰ на 22 см и подтверждается результатами неопубликованных измерений, произведенных Комесаровым и автором на той же длине волны**). По мнению Комесарова, такой эффект может быть связан с направленностью синхротронного излучения***).

Другим эффектом, который действительно может иметь место, является зарегистрированное уменьшение излучения во II половине 1959 г. и в начале 1960 г. на 10 см (Слонейкер и Боуленд⁸⁵), на 20 см (Мак-Клейн, Николс и Уак⁹⁰) и на 70 см (Дрейк и Хватум⁹², Лонг и Элсмор⁹³). Для исследования подобных эффектов необходимы дальнейшие измерения потока излучения в течение длительных промежутков времени.

§ 3. Происхождение микроволнового излучения Юпитера

Микроволновое излучение Юпитера состоит, по-видимому, из двух компонент: тепловой, которая определяет, по существу, все радиоизлучение планеты на волнах короче 3 см, и нетепловой составляющей, преобладающей на более длинных волнах. Как и в случае Венеры, инфракрасное излучение Юпитера приходит от облаков в атмосфере планеты, состоящих из метана и аммиака. Эти облака должны быть оптически плотными

*) Недавние неопубликованные наблюдения Комесарова и автора подтверждают, что колебания плоскости поляризации при вращении планеты действительно имеют место и вместе с результатами Морриса и Берджа устанавливают, что период колебаний равен периоду системы III $\pm 3^\circ$.

***) Мак-Клейн и др.⁹⁰, работая с антенной значительно меньшей собирающей площади и измеряя только одну плоскость поляризации, получили один максимум за период вращения — увеличение $\sim 20\%$ вблизи долготы 100° . Возможно, несоответствие с описанным выше эффектом объясняется тем, что колебания плоскости поляризации могли давать дополнительное периодическое изменение с одним максимумом за вращение, а именно увеличение примерно на 6% на долготе около 110° .

***) А также данными, полученными Гэри¹³². (Прим. ред.)

для волн порядка нескольких сантиметров, а температура тепловой компоненты излучения — примерно равной инфракрасной температуре 130°K (Мензел и др. ⁵⁶). Однако на более длинных волнах облака станут прозрачными, и излучение будет генерироваться более глубокими слоями атмосферы. Филд ⁹⁸ и Джордмейн ⁹⁹ пытались оценить предполагаемый вклад теплового излучения при этих условиях. Несмотря на то, что их вычисления не совпадают в деталях, ясно, что большую часть трехсантиметрового излучения, но пренебрежимо малую часть излучения на волнах длиннее 15 см можно объяснить таким путем.

В настоящее время единственным экспериментальным основанием для разделения микроволнового излучения на две компоненты является изменение наклона спектра около 10 см (см. рис. 20, а). Дальнейшие доказательства, по всей вероятности, могут быть получены при измерениях диаметра излучающей области, а также поляризации излучения на более коротких волнах. Вероятно, тепловая компонента не поляризована и исходит из видимой части планетного диска.

Если исключить эту предполагаемую тепловую компоненту, то спектр излучения оказывается медленно меняющейся функцией длины волны (рис. 20, а). Поток, по-видимому, увеличивается с длиной волны примерно как $\lambda^{0,3}$. Вскоре после открытия нетепловой компоненты были предложены различные теории ее происхождения (Дрейк и Хватум ⁸⁶, Филд ⁹⁸, Робертс и Стенли ⁸, Джордмейн ⁹⁹). Однако после того, как было обнаружено, что излучение имеет сильную линейно поляризованную компоненту и возникает в области, в несколько раз превышающей размеры планеты, основное внимание было обращено на предположение Дрейка и Хватума ⁸⁶, что Юпитер имеет радиационный пояс, подобный поясу Вап-Аллена, окружающему Землю. Предполагается, что магнитное поле Юпитера захватывает частицы и радиоизлучение возникает при ускорении электронов, движущихся по спиральям вдоль силовых линий. Особенности излучения зависят от энергии электронов, при этом имеют место качественные отличия для нерелятивистских электронов (циклотронное излучение) и релятивистских (синхротронное излучение). Первый случай особенно широко рассматривался Филдом ^{96, 100}; последний кратко обсуждался в работах Дрейка и Хватума ⁸⁶, Филда ⁹⁸, Робертса и Стенли ⁸, Радхакришнана и Робертса ⁹ и наиболее подробно Чэнгом ¹¹.

Рассматривая теорию магнитотормозного излучения, все авторы предполагали, что магнитное поле Юпитера носит дипольный характер, и пытались определить величину дипольного момента. Оптических доказательств существования магнитного поля планеты нет, и так как в спектре видны только молекулярные полосы, было бы трудно определить поле именно таким путем. Единственным доказательством магнитного поля является круговая поляризация декаметровых всплесков. Эта поляризация наводит на мысль, что поле, напряженность которого составляет по меньшей мере несколько гаусс, существует в области образования всплесков или выше. Экспериментальных данных о высоте, на которой генерируются всплески, нет, однако согласно теории Уорвика, изложенной в следующем разделе, радиоизлучение в форме всплесков возникает в ионосфере близ поверхности планеты.

1. Ц и к л о т р о н н о е и з л у ч е н и е

Рассматривая нерелятивистский случай, Филд ⁹⁶ предположил, что электроны заключены в тонкой оболочке, расположенной параллельно магнитным силовым линиям поля диполя (рис. 23). Электроны движутся по спирали вдоль силовых линий между точками отражения, положение

которых определяется в зависимости от угла между скоростью электронов и напряженностью магнитного поля на экваторе. Нерелятивистские электроны излучают на основной частоте вращения их в магнитном поле, которое называется циклотронной или гирочастотой, f_g . Эта частота пропорциональна напряженности магнитного поля B ($f_g = 2,8 B \text{ МГц}$, где B измеряется в гауссах). Следовательно, различные частоты создаются

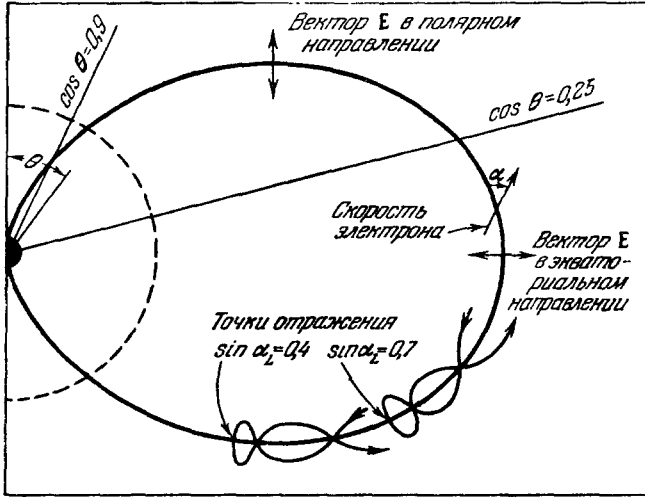


Рис. 23. К теории микроволнового излучения Юпитера. Показана силовая линия поля диполя. Рассматривается излучение электронов, заключенных в тонкую оболочку, которая образуется вращением силовой линии вокруг оси диполя. Излучающие электроны захвачены магнитным полем и движутся по спиралям между точками отражения, положение которых определяется углами наклона α и скорости электронов к магнитному полю на экваторе. Указано положение точек отражения для электронов, имеющих на экваторе углы наклона $\arcsin 0,7 = 44,5^\circ$ и $\arcsin 0,4 = 23,5^\circ$. Черный кружок в центре и нанесенный пунктиром полукруг определяют размеры планеты, соответствующие двум рассматриваемым моделям циклотронного излучения. Пунктирная кривая представляет также поверхность планеты для синхротронной модели.

в различных частях оболочки, причем наиболее высокие генерируются ближе к полюсам, а более низкие — вблизи плоскости магнитного экватора. Минимальная частота ($f_{\text{мин}}$) будет определяться наименьшим значением поля в электронном поясе, а максимальная — положением зеркальных точек.

Поляризация излучения также тесно связана с областью генерации, а следовательно, и с частотой. Циркулярно поляризованная компонента отсутствует из-за симметрии. На самых низких (и самых высоких) частотах, где поле почти параллельно оси диполя, имеет место высокая степень линейной поляризации и электрический вектор параллелен экваториальной плоскости (рис. 23 и 24). Промежуточные частоты генерируются в области, где поле параллельно магнитному экватору, что приводит к преимущественной линейной поляризации в направлении оси диполя. В этом случае степень поляризации (рис. 24) меньше из-за компенсации циркулярно поляризованных компонент. Три района с высокой степенью поляризации разделены двумя областями, где поляризация становится хаотической.

Некоторые следствия рассматриваемой теории противоречат важным особенностям излучения, полученным в результате наблюдений. Из

рис. 24 видно, что имеется две области значений $\cos \theta$ ($\cos \theta \approx 0,25$ и $0,9$), где предсказываемая теорией степень поляризации излучения в экваториальном направлении могла бы совпадать с наблюдающейся на волнах 20 и 30 см. Если обратиться к рис. 23, то нетрудно видеть, что при $\cos \theta \approx 0,9$ размеры источника в полярном направлении должны составлять ~ 7 диаметров, если в соответствии с результатами наблюдений предположить, что экваториальный размер источника примерно в три раза больше диаметра планеты. Однако наблюдаемая протяженность источника в полярном направлении ~ 1 диаметра*). Следовательно, остается единственная возможность $\cos \theta = 0,25$. В этом случае наименьшее значение магнитного поля в оболочке было бы примерно 300 гс, а соответствующая минимальная частота около 800 Мгц. Так как излучение наблюдается, начиная с частот, составляющих половину этой величины, то и решение $\cos \theta = 0,25$ также оказывается неприемлемым. Филд¹⁰⁰ отметил, что указанной трудности можно избежать, если вместо предполагаемой тонкой оболочки рассмотреть толстый слой. Однако и в этом случае минимальное значение поля равно приблизительно 100 гс, и если в качестве источника электронов рассматривать солнечную плазму, то невозможно, по мнению Филда, решить проблему инжекции**).

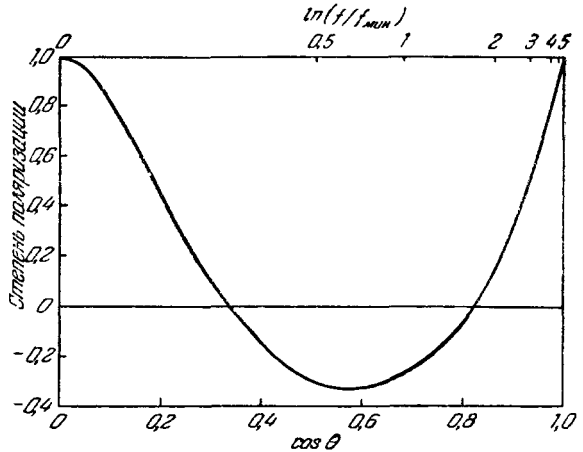


Рис. 24. Степень поляризации циклотронного излучения тонкой оболочки электронов, вычисленная Филдом⁹⁶.

Вследствие симметрии поляризация является линейной с вектором E , перпендикулярным (знак $+$) или параллельным (знак $-$) оси диполя. Угол θ отсчитывается от оси диполя (рис. 23); соответствующая шкала частот по отношению к минимальной частоте в оболочке приведена в верхней части рисунка.

ны, то и решение $\cos \theta = 0,25$ также оказывается неприемлемым. Филд¹⁰⁰ отметил, что указанной трудности можно избежать, если вместо предполагаемой тонкой оболочки рассмотреть толстый слой. Однако и в этом случае минимальное значение поля равно приблизительно 100 гс, и если в качестве источника электронов рассматривать солнечную плазму, то невозможно, по мнению Филда, решить проблему инжекции**).

2. Синхротронное излучение

Дэвис и Чэнг¹⁰¹ и Чэнг¹¹ рассмотрели аналогичную модель тонкой оболочки, но с релятивистскими электронами. В этом случае электроны излучают в широком диапазоне частот в каждой точке своего пути, так что особенности распределения источника и поляризации сравнительно не зависят от частоты. Авторы показали, что наблюдаемые свойства излучения Юпитера могут быть объяснены в рамках этой модели при подходящем выборе параметров.

*) В распоряжении Филда¹⁰⁰ не было результатов измерений полярного диаметра Моррисом и Берджем¹⁰, когда он обсуждал эту возможность. Филд исключил полученное решение на основании исследования временных вариаций.

**) Следует обратить внимание и на то обстоятельство, что сам факт линейной поляризации радиоизлучения Юпитера свидетельствует против циклотронного механизма. Дело в том, что при больших напряженностях магнитного поля, необходимых для действия циклотронного механизма, электронная концентрация плазмы в источнике должна быть очень малой (по оценкам¹²⁶, § 33, — менее $3 \div 30$ электронов в см^{-3} , что маловероятно). В противном случае происходит деполяризация наблюдаемого излучения за счет эффекта Фарадея в области генерации. Для синхротронного механизма оценки более благоприятные: концентрация не должна превышать $5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ в области, удаленной на два радиуса планеты от ее поверхности. (Прим. ред.)

Чэнг¹¹ рассчитал распределение интенсивности и поляризации излучения по источнику при нескольких значениях параметров. Некоторые из полученных им результатов указаны на рис. 25. Во всех приведенных случаях энергетический спектр движущихся по спирали электронов имеет вид

$$N(E) dE \propto E^{-(1+\gamma)} dE,$$

а распределение электронов по углам является изотропным в пределах, которые в плоскости экватора равны α_L и $\pi - \alpha_L$. При этих условиях

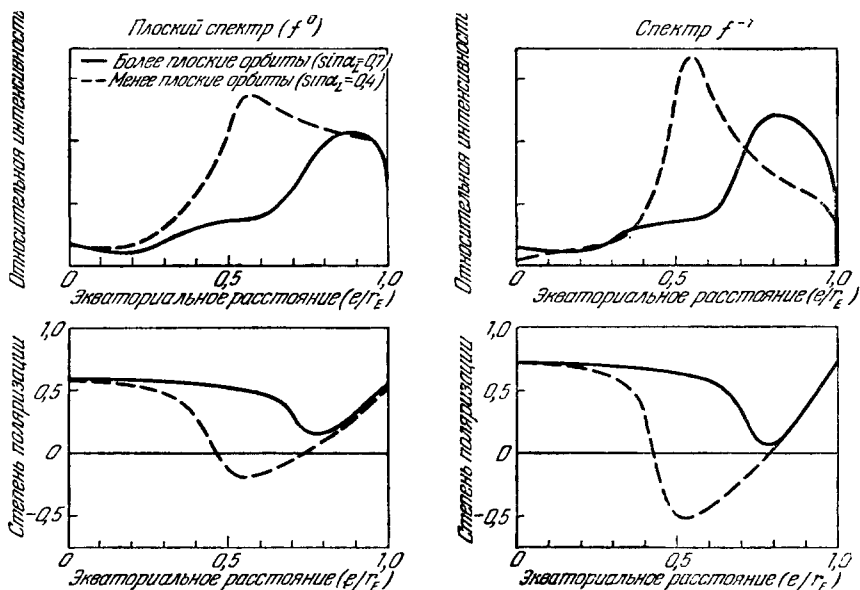


Рис. 25. Экваториальное распределение интенсивности (вверху) и степень поляризации (внизу) для четырех моделей синхротронного излучения Юпитера, рассчитанные Чэнгом¹¹.

Быстрые электроны движутся по спиралам вдоль силовых линий дипольного поля в тонкой оболочке, радиус которой в плоскости экватора равен трем радиусам планеты. Дифференциальный энергетический спектр электронов пропорционален $E^{-(1+\gamma)}$, диаграммы в левой части рисунка получены при $\gamma = 0$ (что приводит к пологому частотному спектру), в правой части — при $\gamma = 2$ (что дает спектр, изменяющийся как f^{-1}). Распределение электронов по углам в экваториальной плоскости является изотропным в пределах от α_L до $\pi - \alpha_L$. Поляризация из-за симметрии является линейной, электрический вектор перпендикулярен (знак +) или параллелен (знак -) ось диполя. Учтено экранирование планетой части излучающей области.

распределение излучения и поляризации не зависит от частоты, а интенсивность излучения изменяется с частотой как $f^{-\frac{1}{2}\gamma}$.

Интенсивность источника, измеренная с помощью интерферометра с переменной базой (амплитуда интерференционных записей), является фурье-преобразованием функции распределения радиояркости по источнику. Поэтому Чэнг, чтобы упростить сравнение с интерференционными наблюдениями, вычислил фурье-преобразование экваториальной и полярной составляющих интенсивности и поляризации. Сравнение некоторых из полученных Чэнгом результатов, приведенных на рис. 26 и 27, с наблюдениями (рис. 21 и 22) показывает, что в рамках модели этого типа можно объяснить наблюдаемые особенности. Размеры излучающей области в экваториальном направлении автоматически превышают полярные размеры в несколько раз (ср. рис. 26 и 27), и при соответствующем выборе размеров оболочки экваториальные размеры источника могут

совпадать с наблюдениями. Теоретическое распределение интенсивности в экваториальном направлении является двугорбым (рис. 25), что приводит к появлению резкого второго максимума в фурье-преобразованиях, изображенных на рис. 26. Для проверки этого предположения необходимы интерференционные наблюдения при больших расстояниях между антеннами. Предсказанное удвоение возникает частично из-за экранирования планетой, но возможно, что этот эффект является следствием предположения о тонкой оболочке и необходим расчет толстой оболочки, более близкой к реальной.

Так как большая часть излучения создается электронами вблизи зеркальных точек, Дэвис высказал предположение, что большинство электронов должно иметь сравнительно плоские орбиты (см. рис. 23) для объяснения наблюдаемой в экваториальном направлении степени поляризации. Вычисления Чэнга подтвердили правильность такого предположения, что легко видеть из рис. 26 и 27, где степень поляризации всего излучения определяется при $k = 0$. При углах наклона в плоскости экватора больше $23\frac{1}{2}^\circ$ ($\sin \alpha_L = 0,4$) степень поляризации слишком низкая или даже противоположная, что связано, по-видимому, с положением зеркальных точек. Ограничение углов наклона на экваторе значениями, большими $44,5^\circ$ ($\sin \alpha_L = 0,7$), дает для степени поляризации значение около 0,4, и, таким образом, это ограничение более жесткое, чем необходимо. Ясно, однако, что необходимо исключить более плоские орбиты, чтобы получить соответствие с наблюдаемыми значениями порядка $\sim 0,3$.

Из рис. 26 видно также, что рассматриваемая модель не дает наблюдаемого уменьшения поляризации при увеличении базы интерферометра. Дэвис предположил, что наблюдаемый эффект может быть связан с наличием другого, внутреннего пояса с электронами, орбиты которых имеют большие углы наклона в экваториальной плоскости.

Синхротронная модель в отличие от циклотронной накладывает определенные требования не на величину магнитного поля, а на произведение величины магнитного поля и общего числа излучающих электронов. Если напряженность поля в поясе составляет 0,1 гс, электроны с энергиями $\sim 10-100$ Мэв будут излучать в микроволновом диапазоне и для создания наблюдаемого потока необходимо, чтобы плотность электронов была $\sim 10^{-2}$ см⁻³ в объеме, превышающем объем планеты в 10 раз. Для поля 10 гс соответствующий интервал энергий становится равным 1—10 Мэв, а требуемые значения плотности уменьшаются до $\sim 10^{-4}$ см⁻³.

Такие величины плотности энергии значительно больше, чем наблюдающиеся в поясе Ван-Аллена Земли, где напряженность поля равна $\sim 10^{-2}$ гс и плотность электронов с энергиями больше 1 Мэв составляет всего лишь $\sim 10^{-6}$ см⁻³. Кроме того, энергетический спектр электронов в поясе Земли очень крутой с $\gamma \approx 5$ (Вернов и др. ¹⁰²), в то время как иовианский частотный спектр приводит к $\gamma \approx 1$. Однако современные данные говорят в пользу синхротронной теории объяснения сверхтеплого излучения Юпитера; указанные особенности иовианского пояса следует рассматривать, вероятно, как экспериментальный факт и должно быть найдено теоретическое объяснение различий между радиационными поясами Юпитера и Земли. В связи с этим Дэвис и Чэнг ¹⁰⁴ уже рассмотрели вопрос об ускорении электронов крупномасштабными флуктуациями на Юпитере и пришли к выводу, что это явление может привести к высоким плотностям электронов с большими энергиями, имеющих плоские орбиты. Однако в этом случае необходима значительная магнитная активность, и, если магнитные возмущения связаны с Солнцем, неясно, почему на Юпитере они должны быть больше, чем на Земле. Возможно, впрочем,

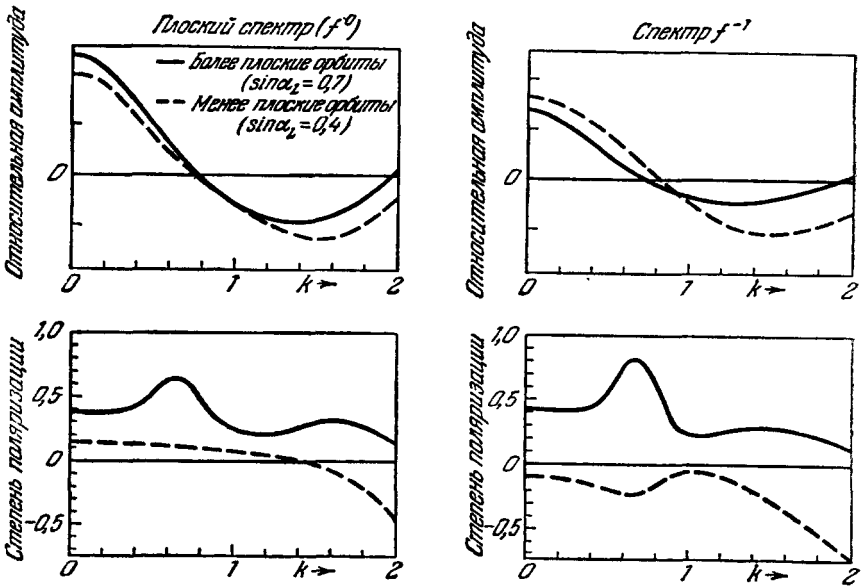


Рис. 26. Вверху — фурье-преобразования распределений интенсивности, приведенных на рис. 25. Внизу — отношение фурье-составляющей поляризованной компоненты к фурье-составляющей общей интенсивности.

Эти диаграммы представляют интенсивность и поляризацию, которые могут быть измерены на двухэлементном интерферометре с фазовым переключением с базой, ориентированной под прямым углом к оси диполя, и разнесением антенн на k/π длины волн, где ω — угловой размер радиуса Юпитера (в радианах). Заметим, что степень поляризации, измеряемая с помощью аппаратуры, принимающей все излучение, определяется при $k \rightarrow 0$.

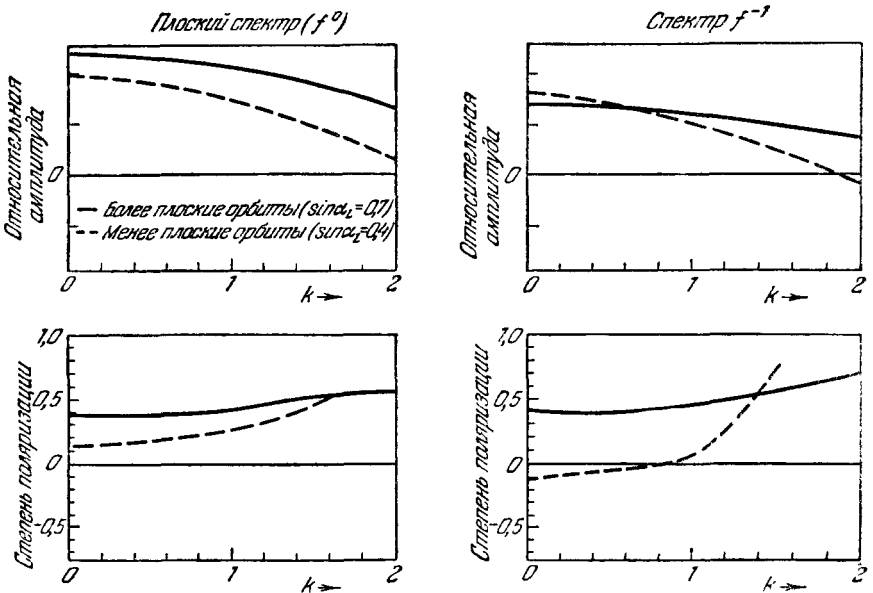


Рис. 27. Полярные фурье-составляющие, соответствующие экваториальным компонентам, приведенным на рис. 26.

Вследствие больших ошибок значения степени поляризации в области малой интенсивности не приводятся.

что это связано с модификацией ударных волн при их распространении в межпланетной плазме. Во всяком случае мы далеки от полного понимания происхождения и поддержания радиационных поясов как Земли, так и Юпитера.

§ 4. Происхождение декаметровых всплесков Юпитера

В то время как природа микроволнового излучения Юпитера кажется в настоящее время достаточно понятной, пока нет общепринятой теории о происхождении декаметровых всплесков. Экспериментаторы часто сравнивали всплески Юпитера с солнечными всплесками. Между солнечными всплесками I типа (шумовыми бурями) на частоте ~ 100 Мгц и иовианскими всплесками много общего. И те и другие всплески имеют характер бурь, продолжающихся в течение части периода вращения небесного тела. Они возникают только при определенной долготе центрального меридиана, и в обоих случаях излучение обладает повышенной направленностью на более высоких частотах. Обычно оба излучения в значительной степени циркулярно поляризованы. Похожи также и отдельные всплески. Продолжительность обычных солнечных всплесков I типа ~ 1 сек, ширина полосы составляет несколько Мгц, частотного дрейфа нет. Эти характеристики справедливы также и для всплесков Юпитера.

Совершенно ясно, что условия в солнечной атмосфере, где образуются всплески I типа, очень отличаются от условий в соответствующих областях Юпитера. Следовательно, было бы почти неверно, если бы солнечные и иовианские всплески были похожи во всех деталях. Однако общего между ними достаточно для предположения об аналогии механизмов генерации в обоих случаях, и интересно отметить, что теории, которые в настоящее время являются наиболее обещающими для объяснения свойств иовианских всплесков, подобны теориям, используемым для объяснения солнечных шумовых бурь¹⁰³.

После первоначального предположения об иовианских грозовых разрядах почти все теории предполагали, что всплески Юпитера образуются при взаимодействии быстрых заряженных частиц или ударных волн с ионосферой, окружающей планету. Для объяснения наблюдаемой круговой поляризации излучения предполагают, что Юпитер имеет магнитное поле, которое сильно изменяет процесс генерации или выход излучения. Это требует такой напряженности магнитного поля в ионосфере, чтобы гирочастота $f_g = eB/2\pi mc = 2,8$ Мгц на гаусс была сравнима или больше излучаемой частоты, т. е. напряженность поля должна составлять по крайней мере несколько гаусс.

Согласно большинству теорий гистограмма представляет собой полярную диаграмму излучения одного основного и нескольких второстепенных источников, расположенных на планете. Альтернативное предположение Шейна⁵⁹, что профиль излучения в зависимости от долготы характеризует чувствительность к солнечному возбуждению, кратко рассматривалось Дугласом⁶⁸. При исследовании внутренних источников возбуждения Галле⁶¹ предположил, что вулканы планеты могут возбуждать расположенную над ними ионосферу. Однако Карр⁸³ и Уорвик⁸⁰ нашли, что источник возбуждения может быть вне планеты, а некоторые области планеты фокусируют возбуждение. В качестве фокусирующих факторов были предложены магнитные поля, но так как находящийся в центре диполь соответствовал бы двум одинаковым источникам, отличающимся по долготой на 180° (что противоречит наблюдениям), они предположили, что или диполь расположен не в центре, или вблизи поверхности имеют место сильные мультипольные эффекты.

1. Теория Уорвика^{12, 13, 80}

Уорвик высказался за это предположение и развил теорию, которая соответствует основным особенностям активности Юпитера. Достоинство теории в том, что она объясняет как декаметровые всплески, так и микроволновое излучение на основе нескольких общих предположений. По мнению Уорвика, всплески образуются, когда быстрые электроны уходят из радиационных поясов под действием магнитных возмущений. Предполагается, что электроны движутся вдоль силовых линий и, входя в ионосферу, генерируют излучение Черенкова. Далее Уорвик полагает, что это излучение имеет место на частотах, близких к гирочастоте, и направлено в сторону движения частиц, т. е. вниз к планете. Затем излучение

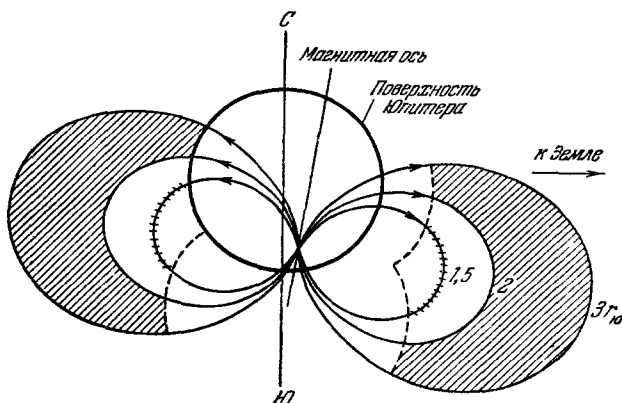


Рис. 28. Конфигурация дипольного магнитного поля Юпитера и радиационные пояса в соответствии с теорией Уорвика¹³. Показано поперечное сечение на долготу $\lambda_{III} = 200^\circ$. Пунктирные кривые соответствуют границам радиационных поясов, определяемым соударениями с планетой.

отражается либо более плотными слоями ионосферы, либо поверхностью планеты, и только при соответствующих ориентациях магнитного поля и поверхности планеты отраженное излучение будет приниматься на Земле. Такова геометрия отражений, которая объясняет наблюдаемый характер гистограмм (рис. 9, в).

Уорвик предполагает, что поле имеет только дипольную составляющую и диполь наклонен на 9° к оси вращения, как установили Моррис и Бердж¹⁰ при измерении поляризации микроволнового излучения. На основании наблюдений микроволнового излучения предполагается также, что основной радиационный пояс находится между магнитными силовыми линиями на расстоянии в 2 и 3 ювианских радиуса от диполя (рис. 28). Следовательно, электроны, уходящие из пояса, будут двигаться по спиралам вдоль силовых линий в этой области. Уорвик считает, что излучение Черенкова, генерируемое электронами, заключено в пределах $\pm 10^\circ$ по отношению к силовым линиям. Затем при некоторых предположениях, касающихся локализации диполя внутри планеты, он вычисляет геометрию отраженного излучения, которое достигает Земли. Для каждого из лучей, приходящих на Землю, определяется соответствующая интенсивность магнитного поля в области генерации и таким образом находятся обобщенные спектры излучения в зависимости от долготы.

Методом проб и ошибок было найдено, что профили излучения будут похожи на наблюдаемые, если диполь расположен (рис. 28):

1) вблизи оси вращения, но достаточно далеко от экваториальной плоскости, чтобы получить медленно дрейфующий спектр;

2) южнее экваториальной плоскости и ближе к Земле, когда долгота центрального меридиана составляет 200° (чтобы получить правильный знак частотного дрейфа на любой долготе, отличной от 200°) (рис. 9, в) и

3) недалеко от плоскости $\lambda_{III} = 200^\circ$ (чтобы получить малую асимметрию спектра вблизи $\lambda_{III} = 200^\circ$).

Лучшее решение приведено на рис. 28, который представляет поперечное сечение планеты на долготе $\lambda_{III} = 200^\circ$. Предполагается, что диполь

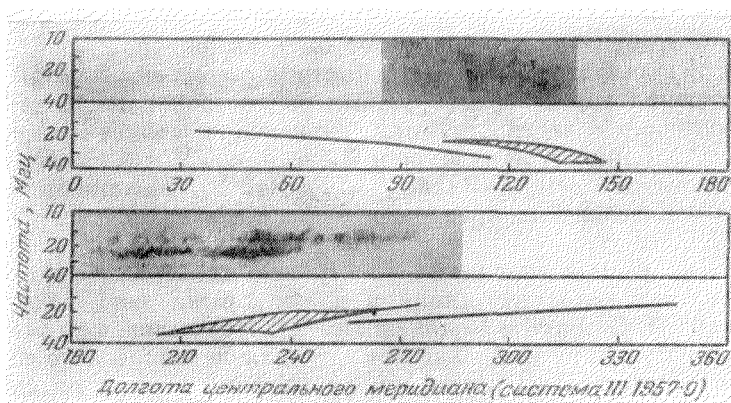


Рис. 29. Сравнение наблюдаемого спектра излучения ювианских декаметровых всплесков в зависимости от долготы со спектром, полученным в теории Уорвика.

смещен из плоскости чертежа в сторону от наблюдателя примерно на $0,4$ радиуса планеты. Результирующий спектр, приведенный на рис. 29, сравнивается с наблюдаемым спектром.

Видно, что наблюдаемые особенности воспроизводятся очень хорошо. Чтобы получить соответствие по диапазону частот, магнитный момент диполя нужно принять равным $4,2 \cdot 10^{30}$ гс см³.

Таким образом, рассматриваемая модель объясняет два главных источника декаметровых всплесков и их частотный дрейф. Кроме того, Уорвик указывает, что второй, внутренний радиационный пояс, существование которого предположили Чэнг и Дэвис¹¹, может объяснить вторичные пики, иногда наблюдаемые на гистограммах. На рис. 29 изображена спектральная гистограмма, полученная для предполагаемого тонкого внутреннего пояса, расположенного на расстоянии в $1,5$ радиуса (см. рис. 28). На частоте 20 Мгц такой пояс создает источники вблизи долготы 50 и 290° , что иногда и наблюдается (см. рис. 7—9). Теория определяет также знак дипольного поля. Излучение Черенкова соответствует необыкновенной волне, поэтому северный полюс планеты должен быть искомым северным магнитным полюсом, чтобы отраженные волны, принимаемые на Земле, были поляризованы по правому кругу (как и наблюдается), т. е. магнитное поле имеет противоположный знак по отношению к магнитному полю Земли.

2. Обсуждение теории

Основным достоинством изложенной выше теории Уорвика является возможность качественного объяснения морфологии ювианских бурь. Что касается количественных оценок и объяснения отдельных деталей, теория пока еще очень схематична. Не производя подробного

анализа теории, ограничимся некоторыми наиболее важными замечаниями.

Теория требует, чтобы Юпитер имел ионосферу, частота плазменных колебаний которой ~ 10 Мгц. Железняков¹⁰⁵, Филд⁹⁸ и Ришбец¹⁰⁶ рассмотрели вопрос о возможности существования такой ионосферы. Из краткого анализа фотохимических процессов, которые могут иметь место в ионосфере Юпитера, Железняков пришел к выводу, что максимальная плотность электронов может быть $\sim 10^7$ см⁻³ ($f_0 = 30$ Мгц), в то время как значение, данное Ришбецом, несколько меньше ($f_0 = 20$ Мгц). Таким образом, это требование теории может быть выполнено.

Процесс, в результате которого быстрые электроны дают излучение при прохождении через ионосферу, был рассмотрен раньше для других радиоисточников, в частности, при объяснении солнечных всплесков (Маршалл¹⁰⁷, Денисс¹⁰³, Гинзбург и Железняков^{108,109}, Смерд и др.¹¹⁰), а также излучения Земли (Эллис¹¹¹, Галле¹¹²). Механизм генерации иовианских всплесков был предложен раньше Железняковым¹⁰⁵ и Гарднером и Шейном⁶⁴.

Теория излучения отдельных электронов, движущихся по спиральям вдоль магнитных силовых линий в плазме, была дана Эйдманом¹¹³, Коломенским¹¹⁴, Ситенко и Коломенским¹¹⁵. Не ссылаясь на эти работы, а используя результаты Пайнса и Бома¹¹⁶ для черенковского излучения в плазме в отсутствие магнитного поля, Уорвик оценил интенсивность излучения.

Он предполагает, что излучающие электроны представляют собой малоэнергичную компоненту радиационного пояса. Считая плазменную частоту колебаний ионосферы равной 10 Мгц, а толщину 10^5 м, Уорвик находит, что среднее наблюдаемое излучение может быть создано электронами, уходящими в ионосферу, если поток электронов с энергиями около 10 кэв равен $4 \cdot 10^{10}$ см⁻² сек⁻¹. Это примерно в 30 раз больше потока частиц с низкими энергиями в радиационном поясе Земли. Уорвик полагает, что поток частиц с малыми энергиями в иовианском поясе может превышать такой же поток в радиационном поясе Земли на фактор $\sim 10^3$, т. е. на такую же величину, которая необходима для объяснения микроволнового излучения релятивистскими электронами. Но даже при таких плотностях необходимо, чтобы частицы малых энергий в радиационном поясе Юпитера заменялись каждые 6 мин. Правда, аналогичное условие, по всей вероятности, должно выполняться и в случае Земли (Браун¹¹, Андерсон и Энемарк¹¹⁸).

Оценки, основанные на поведении отдельной частицы, следует рассматривать как нижний предел получаемой мощности. Условия черенковского излучения тесно связаны с условиями возбуждения неустойчивых колебаний в пучке, движущемся в плазме¹¹⁹. Если возбуждаются неустойчивые колебания, то энергия, передаваемая плазменным волнам, может быть значительно больше, чем получается при рассмотрении поведения отдельной частицы.

В самом деле, как подчеркнул Радхакришнан¹²⁰, из существования излучения в форме всплесков можно предположить, что генерация включает некоторый процесс усиления.

Возможно также, что нужно рассматривать поведение электронного потока, а не отдельного электрона, чтобы получить излучение в направлении, указанном Уорвиком. Особенности углового спектра излучаемых волн не были даны Эйдманом, но Коэн¹²¹ нашел, что в отсутствие магнитного поля плазменные волны, генерируемые одной частицей, излучаются в основном под прямыми углами к направлению движения частицы. Однако если имеется поток частиц, он может действовать подобно диэлектрическо-

му волноводу и ограничивать излучение внутри потока, т. е. в направлении движения, как предположил Смерд и др.¹¹⁰.

Рассматриваемая теория вместе с синхротронной теорией микроволнового излучения приводит к довольно подробному описанию магнитного поля и радиационных поясов Юпитера. Конфигурация магнитного поля была показана выше (рис. 28). Магнитный момент, требуемый для объяснения частотного спектра, приводит к значению поля 0,43 гс в радиационном поясе на расстоянии в 3 радиуса. Эта величина находится в середине ряда значений поля, рассмотренных Чэнгом при интерпретации микроволнового излучения. Самое большое значение поля на поверхности планеты, вблизи южного полюса должно быть около 10^3 гс.

Теоретические трудности при объяснении смещения диполя от центра, несомненно, очень велики. Интересно, что при таком смещении появляется естественное ограничение на углы наклона скорости электронов по отношению к магнитному полю: орбиты должны быть сравнительно плоскими, так как электроны с более наклонными орбитами будут сталкиваться с планетой.

Этот эффект ограничивает углы между скоростью и магнитным полем на экватор значениями $|\sin \alpha_L| \geq 0,4$, однако не дает более строгого ограничения $|\sin \alpha_L| \geq 0,6$, которое необходимо для объяснения поляризации микроволнового излучения.

Некоторые положения теории нуждаются в проверке. Так, середина источника микроволнового излучения должна быть смещена примерно на 0,75 радиуса или на 15'' при наименьшем расстоянии до Юпитера, к югу от центра диска. Определение такого смещения лежит на пределе точности современной аппаратуры. Хорошо было бы обнаружить также предсказываемые малые изменения интенсивности микроволнового излучения при вращении планеты. Если некоторая часть электронов должна уходить из радиационных поясов для генерации интенсивных декаметровых бурь, следует ожидать корреляции между температурой микроволнового излучения и всплесковой активностью на низких частотах. Однако такой эффект может быть незначительным, если уходят только электроны с малыми энергиями. Для теории специфично предположение, что декаметровые бури вызваны магнитными возмущениями вблизи Юпитера. Дальнейшее исследование вопроса о связи с солнечной активностью также необходимо *).

V. САТУРН

Из-за большого сходства с Юпитером Сатурн представляет интересный объект для радионаблюдений. Однако вполне вероятно, что кольца Сатурна, как показал Дрейк¹²², могут препятствовать образованию радиационных поясов планеты. В Мичиганском университете Кук, Кросс, Бэр и Арнольд¹²³ измерили радиоизлучение на волне 3,45 см с помощью 25-м телескопа и рубинового мазера (рис. 30). Усреднение 14 записей прохождения планеты дало эффективную температуру диска $106 \pm 21^\circ \text{K}$, отнесенную к оптическому диску без колец **). Полученное значение находится в разумном соответствии с инфракрасной температурой Сатурна (125°K), измеренной Мензелом, Кобленцом и Лэмплендом⁵⁶ и Петтитом¹⁹.

*) Подробное обсуждение современного состояния теории декаметрового радиоизлучения Юпитера (возможных механизмов генерации и получаемых на их основе характеристик ионосферной и наблюдаемого радиоизлучения) проведено в 123 и 126, § 32. (Прим. ред.)

***) Ранними измерениями Дрейка и Ивена⁸⁴, выполненными при помощи антенны с собирающей площадью в восемь раз меньшей, вероятно, следует пренебречь.

До настоящего времени нет никаких данных о сильном непрерывном излучении Сатурна на более длинных волнах микроволнового диапазона, какое имеет место в случае Юпитера. Однако из-за меньшего углового диаметра Сатурна такое излучение, если оно и существует, слабее повиданского на порядок величины, и, следовательно, его наблюдение ограничено возможностями современной аппаратуры. В связи с этим следует отметить, что недавно Дрейк¹²² измерил радиоизлучение Сатурна на волне 10 см и получил эффективную температуру диска $196 \pm 44^\circ \text{K}$.

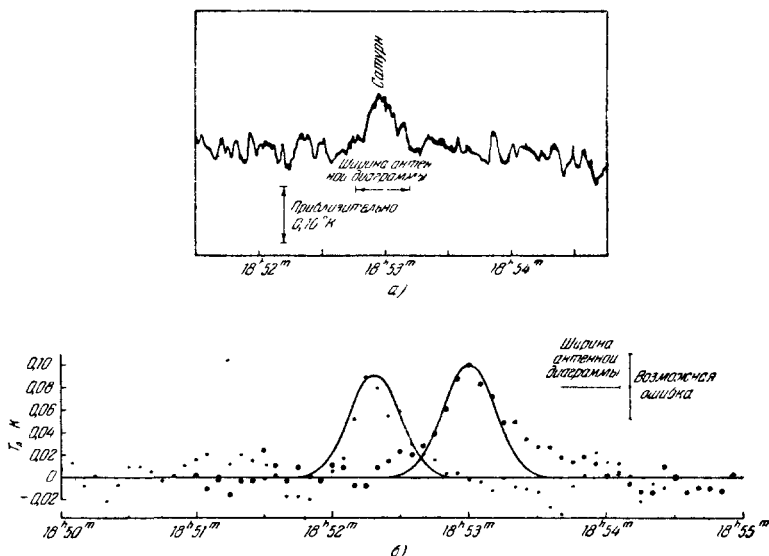


Рис. 30. Результаты наблюдений радиоизлучения планеты Сатурн на 3 см Куком и др.

а) Запись прохождения источника с постоянной времени 12 сек; б) результаты усреднения семи таких записей в двух сериях наблюдений, разделенных интервалом в пять дней.

Так как антенная температура должна была составлять всего 10^{-2}°K , подтверждение этих наблюдений было бы очень желательно *).

С другой стороны, если и декаметровые всплески Сатурна слабее, чем всплески Юпитера, примерно в 10 раз, наиболее сильные из них могут легко наблюдаться на Земле. Две группы радиоастрономов в Йеле (Х. Дж. Смит и Дуглас⁷⁵, Х. Дж. Смит¹²⁴) и во Флориде (А. Дж. Смит и Карр⁶⁷, Карр и др.⁶⁶) исследовали всплески Сатурна в течение несколь-

*) Данные Дрейка недавно подтвердили Роуз, Болонья и Слонейкер¹³⁴, получившие вместе с тем новые, весьма интересные данные о поляризации Сатурна на λ 9,4 см. Значительная степень линейной поляризации (не менее $20 \pm 8\%$) свидетельствует о том, что радиоизлучение Сатурна (как и в случае Юпитера) создается, по-видимому, и нижними слоями атмосферы, и радиационными поясами. Интересно отметить, что в отличие от Юпитера, где плоскость поляризации близка к экваториальной, на Сатурне она ориентирована в направлении, близком к полярному.

Последнее обстоятельство согласно¹³⁵ и¹²⁶, § 33, можно объяснить тем, что магнитное поле Сатурна, имеющее близ его поверхности обычный дипольный характер (с диполем, ориентированным вдоль оси вращения), существенно деформировано в области источника излучения (т. е., вероятно, на расстоянии от ее поверхности порядка радиуса планеты). Именно, силовые линии вытянуты вдоль экватора, а не перпендикулярны к нему, как на малых высотах, вследствие дифференциального вращения плазмы в экзосфере планеты. Такой характер вращения, по предположению, связан с увлечением хорошо проводящей плазмы частицами, входящими в состав колец Сатурна. (Прим. ред.)

ких лет на волнах от 18 до 23 *Мгц*. Обе группы сообщают о наблюдении нескольких десятков всплесков, очевидно, приходящих от Сатурна. Сравнение показывает, что в редких случаях всплески регистрировались двумя станциями одновременно, однако на основании такого результата нельзя еще сомневаться в возможности их существования. Тем не менее мы должны сделать вывод, что в настоящее время нет доказательств существования всплесков Сатурна в декаметровом диапазоне, и, конечно, любое излучение Сатурна значительно слабее соответствующего иовианского излучения.

VI.] ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Не исключено, что наибольшая ценность обзора заключается в определении области дальнейших исследований. Ниже для каждой из изучаемых в настоящее время планет указаны наиболее очевидные направления исследований, естественным образом вытекающие из этого обзора.]

1. М е р к у р и й

Необходимы наблюдения на других длинах волн, чтобы определить спектр излучения повышенной интенсивности, а также измерения во всем интервале фазовых углов, чтобы исследовать изменения излучения в зависимости от степени освещенности солнечными лучами.

2. В е н е р а

Необходимы дополнительные наблюдения, чтобы выяснить вопрос как о кратковременных вариациях излучения, так и об изменениях в зависимости от фазы солнечного освещения. Большую ценность представляют более точные измерения на волнах 20 см и длиннее, в то же время исследования на волнах $\sim 1,5$ см могли бы дать информацию о переходной области между температурами сантиметрового и миллиметрового диапазонов.

3. М а р с

Если объяснение низкой яркостной радиотемпературы, предложенное Мейером, правильно, то изменений температуры в зависимости от фазы быть не должно — факт, который нуждается в проверке. Измерения на миллиметровых волнах могут обнаружить фазовые вариации. Очевидно, необходимы наблюдения в более широком интервале длин волн.

4. Ю п и т е р

В микроволновом диапазоне необходимо дальнейшее исследование изменений как интенсивности, так и поляризации в зависимости от времени. Для точного определения периода вращения планеты нужны наблюдения колебаний плоскости поляризации в течение длительного промежутка времени. Необходима дополнительная информация об изменениях общей интенсивности при вращении планеты, а также за более длительные промежутки времени. Измерения интенсивности и поляризации должны быть распространены на более длинные волны. Были бы очень ценными более полные данные о распределении интенсивности и поляризации по источнику и измерения этого распределения на нескольких частотах для сравнения с теоретическими моделями. Хотелось бы зафиксировать

какое-либо смещение микроволнового источника по отношению к оптическому диску, которое предсказывает теория Уорвика.

Что касается декаметрового излучения, исследование спектральных характеристик всплесков и, в частности, структур малой длительности внутри спектров, ведущее к классификации всплесков, находится все еще в зачаточном состоянии. Изменение формы всплесков и уровня активности от измерения к измерению, а также от года к году требует объяснения. Изучение изменения г и с т о г р а м м в зависимости от частоты является наиболее важным в теории иовианских всплесков. Так как в настоящее время совершенно ясно, что излучение наблюдается на частотах, начиная с $4,8 \text{ Мгц}$, должны быть сделаны попытки измерить излучение на более низких частотах во время приближающегося минимума солнечной активности, а также с помощью аппаратуры, установленной на спутниках. Это очень важно, так как, если поле в радиационном поясе $\sim 1 \text{ гс}$, ц и к л о т р о н н о е *) излучение (по всей вероятности, более многочисленных) нерелятивистских электронов должно преобладать на частотах порядка нескольких Мгц . В самом деле, это циклотронное излучение может объяснить сравнительно постоянную компоненту излучения, наблюдающуюся на частоте $4,8 \text{ Мгц}$ (Эллис ⁵⁷).

Необходимы также дальнейшие исследования зависимости поляризации от частоты и долготы для всплесков различной продолжительности. Важной проблемой, предъявляющей очень высокие требования к измерительной аппаратуре, является измерение угловых размеров декаметровых источников. В связи с этим особую ценность представляют наблюдения лунных затмений Юпитера несколькими станциями вдоль полосы полной фазы затмения и станций вне этой полосы. Большой интерес вызывает также излучение всех имеющихся данных по возможным затмениям источника спутниками Юпитера (ср. Шейн ⁵⁹). Необходимо дальнейшее исследование влияния земной ионосферы на иовианские всплески и выяснение связи, если таковая имеется, между всплесками Юпитера и солнечной активностью.

5. С а т у р н

Необходимо больше наблюдений в более широком диапазоне длин волн. Из-за сходства планеты с Юпитером следует установить верхние пределы интенсивности любого нетеплового излучения в микроволновой части спектра.

Наконец, интересно представить земное излучение, как оно наблюдается вне Земли. В значительной части микроволнового диапазона тепловое излучение поверхностных слоев Земли дало бы температуру диска $\sim 280^\circ \text{ К}$. Фазовый ход был бы очень маленьким, так как температура поверхности на глубине ниже 10 см имеет незначительные суточные изменения. На более коротких волнах сантиметрового диапазона и на миллиметровых волнах облака, а также сама атмосфера стали бы оптически плотными и можно было бы измерить температуру, соответствующую этим областям и изменяющуюся в зависимости от облачности и общего содержания водяного пара в атмосфере. Из-за низкой плотности релятивистских электронов в поясе Ван-Аллена и слабого магнитного поля синхротронное излучение этого источника было бы пренебрежимо малым.

На более длинных волнах станет существенной оптическая толщина ионосферных слоев и излучение этих областей. Однако рассматриваемые

*) Эллис ¹²⁵ опубликовала недавно теорию, согласно которой все иовианские всплески связаны со смещенным по Доплеру циклотронным излучением.

слои могут отражать некоторые длины волн без заметного поглощения, в результате яркостная температура могла быть сравнительно низкой. На частотах ~ 100 кГц может иметь место синхротронное излучение пояса Ван-Аллена, а на более низких частотах ~ 30 кГц снова циклотронное излучение.

Вполне вероятно также, что могли бы оказаться существенными процессы, имеющие место при генерации иовианских всплесков, так что могут быть всплески излучения, но, по-видимому, на более низких частотах, чем в случае Юпитера. Однако необходимо внимательно рассмотреть условия распространения низкочастотного излучения, так как частота собственных колебаний окружающей плазмы составляет, по всей вероятности, ~ 100 кГц.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. B. F. Burke and K. L. Franklin, *Nature* **175**, 1074 (1955); *J. Geophys. Res.* **60**, 213 (1955).
2. C. H. Mayer, T. P. McCullough and R. M. Sloanaker, *Astrophys. J.* **127**, 1 (1958).
3. C. H. Mayer, T. P. McCullough and R. M. Sloanaker, *Proc. IRE* **46**, 260 (1958).
4. C. H. Mayer, T. P. McCullough and R. M. Sloanaker, *Astrophys. J.* **127**, 11 (1958).
5. C. H. Mayer, *Sci. Amer.* **205** (5) (May 1961).
6. R. M. Sloanaker, *Astron. J.* **64**, 346 (1959).
7. Е. Ф. Мак-Клейн и Р. М. Слонейкер, в сб. «Радиоастрономия», М., ИЛ, 1961, стр. 66.
8. J. A. Roberts and G. J. Stanley, *Publ. Astron. Soc. Pacif.* **71**, 485 (1959).
9. V. Radhakrishnan and J. A. Roberts, *Phys. Rev. Letts.* **4**, 493 (1960).
10. D. Morris and G. L. Berge, *Astrophys. J.* **136**, 276 (1962).
11. D. B. Chang, *Synchrotron Radiation as the Source of the Polarized Decimetre Radiation from Jupiter*, Ph. D. Thesis (California Inst. of Tech., 1962); D. B. Chang and Davis Leverett, Jr., *Astrophys. J.* **136**, 567 (1962).
12. J. W. Warwick, *Ann. New York Acad. Sci.* **95**, 39 (1961).
13. J. W. Warwick, *Astrophys. J.* (представлено в марте 1962).
14. С. Х. Мейер, в сб. «Планеты и спутники», М., ИЛ, 1963, стр. 391.
15. Б. Ф. Берк, в сб. «Планеты и спутники», М., ИЛ, 1963, стр. 416.
16. Р. М. Галле, в сб. «Планеты и спутники», М., ИЛ, 1963, стр. 439.
17. W. E. Howard, III, A. H. Barrett and F. T. Haddock, *Astron. J.* **66**, 287 (1961).
18. W. E. Howard, III, A. H. Barrett and F. T. Haddock, *Astrophys. J.* **136**, 995 (1962).
19. Е. Петтит, в сб. «Планеты и спутники», М., ИЛ, 1963, стр. 353.
20. А. Дольфус, в сб. «Планеты и спутники», М., ИЛ, 1963, стр. 469.
21. J. C. G. Walker, *Astrophys. J.* **133**, 274 (1961).
22. А. Д. Кузьмин и А. Е. Саломонович, *Астрон. ж.* **37**, 297 (1960).
23. А. Д. Кузьмин и А. Е. Саломонович, *Астрон. ж.* **38**, 1115 (1961).
24. А. Г. Кисляков, А. Д. Кузьмин и А. Е. Саломонович, *Радиофизика* **4**, 573 (1961); *Астрон. ж.* **39**, 410 (1962).
25. C. R. Grant and H. H. Corbett, *Astron. J.* **67**, 115 (1962).
26. Дж. Е. Гибсон и Р. Дж. Мак-Ивен, в сб. «Радиоастрономия», М., ИЛ, 1961, стр. 56.
27. J. E. Gibson, *Astrophys. J.* **137**, 611 (1963).
28. Л. Е. Олсон, Дж. А. Джордмейн, С. Х. Таунс и С. Х. Мейер, в сб. «Радиоастрономия», М., ИЛ, 1961, стр. 73.
29. F. D. Drake, *Publ. Nat. Radia Astron. Obs.* **1**, 165 (1962).
30. A. E. Lilley, *Astron. J.* **66**, 290 (1961).
31. A. H. Barrett, *J. Geophys. Res.* **65**, 1835 (1960).
32. A. H. Barrett, *Astrophys. J.* **133**, 281 (1961).
33. А. Д. Кузьмин и А. Е. Саломонович, *Астрон. циркул. АН СССР* № 221, 3 (1961).
34. C. H. Mayer, T. P. McCullough and R. M. Sloanaker, Report presented at the 11th International Astrophysical Symposium, Liege, 1962.
35. F. D. Drake, *Nature* **195**, 894 (1962).
36. У. М. Синтон, в сб. «Планеты и спутники», М., ИЛ, 1963, стр. 380.

37. J. W. Chamberlain and G. P. Kuiper, *Astrophys. J.* **124**, 399 (1956).
38. G. P. Kuiper, *The Threshold of Space* (ed. M. Zelickoff), University of Chicago Press, Chicago, 1957, стр. 78.
39. C. W. Tolbert and A. W. Straiton, *J. Geophys. Res.* **67**, 1741 (1962).
40. D. E. Jones, *Planet. Space Sci.* **5**, 166 (1961).
41. C. Sagan, K. M. Siegel and D. E. Jones, *Astron. J.* **66**, 52 (1961).
42. R. Wildt, *Astrophys. J.* **91**, 266 (1940).
43. G. P. Kuiper, *The Atmospheres of the Earth and Planets*, 2nd ed. (ed. G. P. Kuiper), University of Chicago Press, Chicago, 1952, стр. 306.
44. E. J. Öpik, *J. Geophys. Res.* **66**, 2807 (1961).
45. C. Sagan, *Astron. J.* **65**, 352 (1960).
46. C. Sagan, *Science* **133**, 849 (1961).
47. W. K. Victor, R. Stevens and S. W. Golomb, *Radar Exploration of Venus*, California Institute of Technology, Jet Propulsion Laboratory, Tech. Report, 32—132 (1961).
48. J. Strong (цитируется по 44 и 46).
49. R. Jastrow and S. I. Rasool, *J. Geophys. Res.* **67**, 1642 (1962).
50. J. D. Kraus, *Nature* **178**, 33, 103, 159, 687 (1956).
51. J. D. Kraus, *Proc. IRE* **46**, 266 (1958).
52. J. D. Kraus, *Nature* **186**, 462 (1960).
53. T. D. Carr, A. G. Smith, H. Bollhagen, M. F. Six, Jr., and N. E. Chatterton, *Astrophys. J.* **134**, 105 (1961).
54. J. A. Giordmaine, L. E. Also, C. H. Townes and C. H. Mayer, *Astron. J.* **64**, 332 (1959).
55. E. Pettit and S. B. Nicholson, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **124**, 269 (1924).
56. D. H. Menzel, W. W. Coblentz and C. O. Lampland, *Astrophys. J.* **63**, 177 (1926).
57. G. R. A. Ellis, *Nature* **194**, 667 (1962).
58. C. A. Shain, *Nature* **176**, 836 (1955).
59. C. A. Shain, *Austr. J. Phys.* **9**, 61 (1956).
60. R. M. Gallet and K. H. Bowles, *Astron. J.* **61**, 194 (1956).
61. R. M. Gallet, *Trans. IRE AP-5*, 327 (1957).
62. B. F. Burke, *Carnegie Institution of Washington Yearbook* **56**, 90 (1957).
63. K. L. Franklin and B. F. Burke, *J. Geophys. Res.* **63**, 807 (1958).
64. F. F. Gardner and C. A. Shain, *Austr. J. Phys.* **11**, 55 (1958).
65. T. D. Carr, A. G. Smith, R. Pepple and C. H. Barrow, *Astrophys. J.* **127**, 274 (1958).
66. T. D. Carr, A. G. Smith, H. Bollhagen, M. F. Six, Jr., and N. E. Chatterton, *Astrophys. J.* **134**, 105 (1961).
67. A. G. Smith and T. D. Carr, *Astrophys. J.* **130**, 641 (1959).
68. J. N. Douglas, *A Study of Non-Thermal Radio Emission from Jupiter*, Ph. D. Dissertation (Yale University, 1960).
69. *Intern. Astron. Union Inform. Bull.* **8** (March 1962).
70. Bernice, L. Morrison, *U. S. Naval Observ. Circ.* **92** (May 1962).
71. A. G. Smith, *Science* **134**, 587 (1961).
72. J. D. Kraus, *Astron. J.* **61**, 182 (1956).
73. J. N. Douglas and H. J. Smith, *Nature* **192**, 741 (1961).
74. C. H. Barrow, *Astrophys. J.* **135**, 847 (1962).
75. Х. Дж. Смит и Дж. Н. Дуглас, в сб. «Радиоастрономия», М., ИЛ, 1961, стр. 59.
76. A. G. Smith, T. D. Carr, H. Bollhagen, N. Chatterton and M. F. S., *Nature* **187**, 568 (1960).
77. J. P. Wild and J. A. Roberts, *J. Atmos. Terr. Phys.* **8**, 55 (1956).
78. A. G. Smith and T. D. Carr, *Quart. J. Fla Acad. Sci.* **24**, 185 (1961).
79. J. V. Jelley and A. D. Petford, *Observatory* **81**, 104 (1961).
80. J. W. Warwick, *Science* **132**, 1250 (1960).
81. J. W. Warwick, *Ark. Geophys.* **3**, 497 (1961).
82. T. D. Carr, A. G. Smith and H. Bollhagen, *Phys. Rev. Letts.* **5**, 418 (1960).
83. T. D. Carr, Report to American Astronom. Society Meeting, Gainesville Florida, 1958 (не опубликовано).
84. F. D. Drake and H. I. Ewen, *Proc. IRE* **46**, 53 (1958).
85. R. M. Sloanaker and J. W. Boland, *Astrophys. J.* **133**, 649 (1961).
86. F. D. Drake and S. Hvatum, *Astron. J.* **64**, 329 (1959).
87. E. F. McClain, *Astron. J.* **64**, 339 (1959).
88. E. E. Epstein, *Nature* **184**, 52 (1959).
89. J. A. Roberts and M. Komisaroff (1962) (не опубликовано).
90. E. F. McClain, J. H. Nichols and J. A. Wakk, Possible Variations in the Centimetre Wave Emission from Jupiter, Paper presented at the 13th General Assembly of U. R. S. I. (London, 1960).

91. A. Boischot, M. Ginat and I. Kazos, *Compt. rend.* **254**, 2527 (1962).
92. F. D. Drake and S. Hvatum, Paper presented at the 13th General Assembly of U. R. S. I. (London, 1960).
93. R. J. Long and B. Elsmore, *Observatory* **80**, 112 (1960).
94. B. Y. Mills, A. G. Little, K. V. Sheridan and O. B. Slee, *Proc. IRE* **46**, 67 (1958).
95. F. J. Kerr, *Sky and Telescope* **24**, 254 (1962).
96. G. B. Field, *J. Geophys. Res.* **65**, 1661 (1960).
97. M. S. Roberts, *Astron. J.* **67**, 280 (1962).
98. G. B. Field, *J. Geophys. Res.* **64**, 1169 (1959).
99. J. A. Giordmaine, *Proc. Nat. Acad. Sci., Washington* **46**, 267 (1960).
100. G. B. Field, *J. Geophys. Res.* **66**, 1395 (1961).
101. L. Davis, Jr., and D. B. Chang, *J. Geophys. Res.* **66**, 2524 (1961).
102. С. Н. Вернов, А. Ю. Чудаков, П. В. Вакулови Я. И. Логачев, *Астронавтика* **4**, 23 (1959); *ДАН СССР* **125**, 304 (1959).
103. J. F. Denisse, Address at the 13th General Assembly of U. R. S. I., 1960.
104. L. Davis, Jr., and D. B. Chang, *J. Geophys. Res.* (представлено в 1962).
105. В. В. Железняков, *Астрон. ж.* **35**, 230 (1958).
106. H. Rishbeth, *Austr. J. Phys.* **12**, 466 (1959).
107. L. Marshall, *Astrophys. J.* **124**, 469 (1956).
108. В. Л. Гинзбург и В. В. Железняков, *Астрон. ж.* **35**, 694 (1958).
109. В. Л. Гинзбург и В. В. Железняков, *Астрон. ж.* **38**, 3 (1961).
110. S. F. Smerd, J. P. Wilg and K. V. Sheridan, *Austr. J. Phys.* **15**, 180 (1962).
111. G. R. A. Ellis, *Planet. Space Sci.* **1**, 253 (1959).
112. R. M. Gallet and R. A. Helliwell, *J. Res. Nat. Bur. Stand.* **63D**, 21 (1959).
113. В. Я. Эйдман, *ЖЭТФ* **34**, 131 (1958).
114. А. А. Коломенский, *ЖЭТФ* **24**, 167 (1953).
115. А. Г. Ситенко, А. А. Коломенский, *ЖЭТФ* **30**, 511 (1956).
116. D. Pines and D. Bohm, *Phys. Rev.* **85**, 338 (1952).
117. R. R. Brown, *J. Geophys. Res.* **66**, 1379 (1961).
118. K. A. Anderson and D. C. Ene mark, *J. Geophys. Res.* **65**, 3521 (1960).
119. V. L. Ginzburg, V. V. Zhelezniakov and V. Ya. Eidman, *Phil. Mag.* **75**, 451 (1962).
120. V. Radhakrishnan, частное сообщение (1961).
121. M. H. Cohen, *Phys. Rev.* **123**, 711 (1961).
122. E. D. Drake, *Nature* **195**, 893 (1962).
123. J. J. Cook, L. G. Cross, M. E. Va ir and C. B. Arnold, *Nature* **188**, 393 (1960).
124. H. J. Smith, *Astron. J.* **64**, 41 (1959).
125. G. R. A. Ellis, *Austr. J. Phys.* **15**, 344 (1962).

ЛИТЕРАТУРА, ДОБАВЛЕННАЯ ПРИ ПЕРЕВОДЕ

126. В. В. Железняков, *Радиоизлучение Солнца и планет*, М., «Наука», 1964.
127. У. Реллог и К. Саган, *Атмосферы Марса и Венеры*, М., ИЛ, 1962.
128. A. H. Varret and E. Lilley **25**, 192 (1963).
129. C. R. Grant, H. H. Corbett and J. E. Gibson, *Astrophys. J.* **137**, 620 (1963).
130. J. E. Gibson and H. H. Corbett, *Sky and Telescope*, **25**, 3 (1963).
131. C. H. Ma yer, T. P. McCullough and R. M. Sloanaker, *La Physique des planets*, t. 24, Univ. de Liège, 1962, стр. 357.
132. В. Гару, *Astron. J.* **68**, 568 (1963).
133. В. В. Железняков, *Астрон. ж.* (в печати).
134. W. K. Rose, J. M. Bologna and R. M. Sloanaker, *Phys. Rev. Letts.* **10**, 123 (1963).
135. В. В. Железняков, *Астрон. ж.* (в печати).

...
...
...
...

...
...
...
...

...
...
...
...

...
...
...
...

...
...
...
...
...
...
...
...
...