

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ**РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ
ВЕРХНИХ СЛОЁВ АТМОСФЕРЫ**

Наблюдение внеземного радиоизлучения, помимо непосредственного интереса в связи с изучением его источников (Солнца, «радиозвёзд» и др.), позволяет также исследовать земную атмосферу, а именно, получать сведения об ионосферных слоях, необходимые для удовлетворительного расчёта прохождения радиоволн на линиях связи. Поскольку мы имеем здесь дело с новым методом, интересно рассмотреть, в какой мере радиоастрономические данные согласуются с данными, полученными при помощи обычной ионосферной аппаратуры, и какие сведения, недоступные для обычных методов, могут быть извлечены из них.

В настоящее время имеется очень мало сведений о слоях, лежащих выше слоя F_2 . Обычная ионосферная техника таких данных предоставить не может вследствие того, что возможные отражения от этих слоёв полностью экранируются слоем F_2 , обладающим наибольшей критической частотой. Намёки на существование ионизации выше слоя F_2 были получены в виде так называемых «растянутых» отражений от слоя F_2 и отражений от слоя G . Полагают, что первые вызываются неоднородностями с повышенной плотностью ионизации, расположенными выше уровня максимальной ионизации слоя F_2 , а последние — регулярным слоем, наблюдаемым в редких случаях выше слоя F_2 , когда плотность ионизации последнего падает ниже плотности слоя G . Однако такое заключение недостаточно надёжно и убедительно, ибо имеется много возражений против предположения о существовании слоя G .

Для решения вопроса о существовании и характере ионизации выше слоя F_2 могут быть привлечены радиоастрономические методы, ибо внеземные радиоволны, проходя сквозь всю толщу земной атмосферы и подвергаясь её воздействию, будут нести на себе отпечаток и от прохождения ионизованных слоёв. Таким образом, они могут служить дополнительным источником информации о верхних слоях атмосферы.

Во время радиоастрономических наблюдений уже исследовались следующие ионосферные явления:

- 1) ионосферная рефракция,
- 2) поглощение в ионосфере,
- 3) «мерцание радиозвёзд»,
- 4) внезапные ионосферные возмущения.

Рефракция и поглощение в ионосфере.

Положение источника радиоизлучения на небесной сфере определяется кажущимся углом склонения, измеряемым на Земле с помощью радиотелескопа. Этот угол является суммой угла склонения источника без учёта влияния атмосферы и угла рефракции, которую испытывает радиоволна от источника при прохождении ионосферы и тропосферы. Когда определяют рефракцию в ионосфере, то предполагают, что тропосферная рефракция

и физическое положение источника не зависят от частоты и времени. Поэтому, если измеряются углы склонения источника, например, на двух разных частотах одновременно, то разность измеренных углов определяет собою только разность углов рефракции в ионосфере на этих частотах. Очевидно, что угол рефракции в ионосфере зависит от того, насколько частота принимаемого излучения внеземного источника отличается от критической частоты слоя F_2 . На частотах, значительно больших критической, рефракция будет малой, так как радиоволна пронизывает ионосферу, почти не отклоняясь от прямолинейного пути, а на частотах, близких к критической, угол рефракции будет наибольшим и, наконец, внеземное излучение на частотах, меньших критической, совсем не достигает Земли, полностью отражаясь от слоя F_2 .

Были проведены² измерения рефракции шумов Солнца одновременно на двух частотах: 60 и 200 *Мгц*. При радиолокации Луны на частоте 20 *Мгц* также были отмечены³ значительные углы ионосферной рефракции. В обоих случаях, с целью сравнения полученных результатов с теорией, были рассчитаны величины рефракции в ионосфере по известным формулам для плоской Земли и параболического распределения плотности ионизации в верхних слоях атмосферы, а также были вычислены поправки на кривизну поверхности Земли. Оказалось, что измеренные углы ионосферной рефракции примерно в три раза больше рассчитанных.

При исследовании ионосферного поглощения³ также были установлены значительные расхождения с теорией. Указанные факты послужили основанием для целого ряда гипотез, предложенных с целью согласовать наблюдаемые расхождения между измерениями и теорией. Таковы гипотезы о наличии слоя G , о наличии³ неоднородностей значительных размеров в слое F_2 , о заметном отличии распределения ионизации в слое F_2 от параболического закона¹ и другие. Однако до сих пор ещё не сделано сколько-нибудь исчерпывающих вычислений в обоснование высказанных предположений. Поэтому до сих пор нет и окончательных выводов.

«Мерцание радиозвёзд» (движение неоднородностей).

Явление «мерцания радиозвёзд», или дискретных источников внеземных радиоволн, состоит в том, что принимаемая мощность шумов непрерывно хаотически флуктуирует, имея характер случайных федингов.

При этом средний период флуктуаций составляет около одной минуты, а средняя мощность источника остаётся постоянной. Внеземное излучение принимается на антенны с высокой направленностью и большими коэффициентами усиления. Принятое излучение затем усиливается приёмником, обладающим малым уровнем собственных шумов и стабилизированным коэффициентом усиления. На выходе приёмника включается обычно шлейфовый осциллограф, который и записывает на медленно движущейся ленте принятые антенной и усиленные приёмником флуктуации шумов дискретного источника. В качестве последних почти всегда используются самые мощные из известных источников внеземных радиоволн, а именно, источники в созвездии Кассиопеи (склонение $58^{\circ}32'$, прямое восхождение $23^{\text{h}} 21^{\text{m}}$) и в созвездии Лебеда (склонение $40^{\circ}35'$, прямое восхождение $19^{\text{h}} 57^{\text{m}}$). На волне 3,7 *м* они имеют интенсивность излучения⁵ порядка $2 \cdot 10^{-22}$ *вт м⁻² гц⁻¹*. Доказательство земного происхождения флуктуаций было проведено путём наблюдений на разнесённых приёмниках⁴. Приёмники вместе со своими антеннами (радиотелескопы) устанавливались на некотором расстоянии друг от друга. Определялось наличие корреляции между флуктуациями в этих точках. Оказалось, что корреляция начинает исчезать при разнесении приёмников на расстояние больше четырёх километров. Это свидетельствует о том, что причина федингов лежит не где-то в межзвёздной среде, а в атмосфере Земли. Действи-

тельно, если бы это было не так, тогда при продолжительности замирания порядка 30 сек размеры диффракционной картины должны бы быть порядка 900 км (орбитальная скорость Земли $30 \text{ км} \cdot \text{сек}^{-1}$). Отсутствие корреляции между записями, полученными на приёмниках, разнесённых друг от друга на расстояние, значительно меньшее, чем 900 км, показывает, что реально наблюдаемая диффракционная картина имеет много меньшие размеры. Следовательно, результаты наблюдений можно объяснить только в предположении, что диффракционная картина движется вместе с Землёю и имеет земное происхождение. Источником флуктуаций в связи с этим естественно считать ионосферу, ибо она наиболее подвержена нерегулярным изменениям, могущим заметно влиять на распространение радиоволн. Сравнение наблюдений мерцаний за значительный период времени с сильными возмущениями слоя E не коррелируют друг с другом. Изучение корреляции с возмущениями более высокого и более сильно ионизованного слоя F дал сравнительно хорошие результаты. Наблюдается тесная связь между флуктуациями и «растянутыми», или диффузными, отражениями от слоя F_2 . Как первые, так и вторые показывают быстрый рост от 20 ч. 00 м. до 22 ч. 00 м., имея максимум при 01 ч. 00 м. по местному времени, и последующее уменьшение к утру. В настоящее время принято считать, что фединги на метровых волнах внеземного излучения появляются в результате прохождения последних через нерегулярный диффракционный экран, состоящий из электронных облаков в слое F_2 ионосферы. Частоты, на которых наблюдаются фединги, велики, поэтому поглощение в ионосфере будет очень мало и при расчётах его не учитывают. Неоднородности ионизации в этом случае будут вызывать только нерегулярные изменения фазы в проходящем фронте волны, подобно тому как это имеет место в оптике в случае прохождения света через пластинку неоднородной толщины (подробно этот вопрос рассмотрен в сборнике «Проблемы современной физики» 1953 г., выпуск 11, стр. 171—176). Высота этого диффракционного экрана точно неизвестна, но полагают, что она лежит между максимумом ионизации в слое F_2 и экзосферой.

Радиоастрономические наблюдения, проводившиеся одновременно на трёх приёмниках, установленных в вершинах равнобедренного треугольника с длиной сторон 2—3 км, позволили определять довольно малые разности времени появления отдельных флуктуаций на соответствующих станциях⁶. По разности времён появления флуктуаций были рассчитаны скорость и направление движения диффракционной картины вдоль поверхности Земли, которые определяются дрейфом электронных облаков в ионосфере. В результате многочисленных наблюдений⁵ было установлено, что средняя скорость дрейфа неоднородностей, вызывающих флуктуации, равна 200 м сек^{-1} . Скорости от одной ночи к другой, в общем, значительно изменяются и обнаруживают тесную связь с возмущениями магнитного поля Земли. Они постоянны в стабильных геомагнитных условиях, например, в течение любой данной ночи. Движение диффракционного экрана почти всегда направлено по линии восток—запад, причём до полуночи — преобладающее направление на запад, а после полуночи — на восток. Изменение направления движения в полночь происходит за очень короткое время (30—60 минут) и отличается заметным постоянством.

Отмечена линейная зависимость между скоростью дрейфа и частотой флуктуаций (числом максимумов в минуту), причём для скоростей в пределах 30—1000 м сек⁻¹ эта зависимость имеет разброс всего лишь 20%. Это обстоятельство позволило составить таблицу для определения скоростей дрейфа диффракционного экрана по скорости флуктуаций, что сильно облегчило обработку записей наблюдений (см. табл. I).

Было предположено далее, что подобно тому как изменение частоты мерцания видимых звёзд связано с изменениями ветра в тропосфере, изменение частоты флуктуаций радишума от радиозвёзд вызывается

изменением скорости движения неоднородностей в верхних слоях ионосферы. Такое предположение кажется правдоподобным в свете изложенных выше данных (табл. I).

Таблица I

Частота флуктуаций (максимумов в мин.)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Скорость дрейфа (м/сек) . . .	50	120	190	270	330	390	440	480	530

В последнее время стало очевидным, что вся область атмосферы, от высоты порядка 90 км и до самых верхних частей слоя F_2 , охвачена ветрами больших скоростей. Доказательства существования ветров были получены из различных по природе источников, например, наблюдений метеорных следов, серебристых облаков, светящихся полос, измерений движущихся неоднородностей и других. В целях сравнения результаты сведены в таблицу II²:

Таблица II

Прибли- зительная высота в км	Метод	Прибли- зительный размер не- однородно- стей	Скорость дрейфа (м/сек)	Примечания
300—500	Движение неоднородностей, являющихся причиной флуктуаций излучения «радиозвёзд»	5 км	100—200	Неоднородности возможно идентичны с неоднородностями, вызывающими диффузные отражения
250	а) Движение ионосферных неоднородностей. б) Движение ионосферных границ	500 км — 200 м 100—500 км	100—200 80,35—350	Преобладающее движение на восток
100	а) Движение неоднородностей. б) Светящиеся полосы. в) Светящиеся облака в полярных сияниях	Больше 200 м	80 60—240	Быстрые перемены направления движения
70—100	Метеорные следы		50 170 80—100	

Одновременные наблюдения за флуктуациями радиозвёзд, которые имеют различные координаты на небесной сфере, дают возможность наблюдать и сравнивать движения в ионосфере на площадях, значительно отстоящих друг от друга. Так, например, околополярные источники в созвездиях Лебеда и Кассиопеи, различаясь по прямому восхождению на $3^h 24^m$, проходят последовательно свою верхнюю и нижнюю кульминации, во время которых их и можно регистрировать с помощью радиотелескопов. Поскольку углы склонения источников разные, то и в ионосфере наблюдаются области, различные по географическому положению. Таким образом удалось показать⁵, что в областях ионосферы, находящихся на расстоянии 800 км друг от друга, направления дрейфа совпадают в пределах 10° , а разница в скорости дрейфа составляет меньше 30%. Так как наблюдавшиеся области по своему географическому положению соответствуют разным широтам, то было сделано предположение о том, что зоны, имеющие значительную протяжённость в широтном направлении, охвачены однородными ветрами больших масштабов. Конечно, необходимы более подробные наблюдения, чем уже выполненные, для установления точной степени корреляции между скоростями и направлениями движения неоднородностей в слое F_2 при больших расстояниях между точками наблюдения.

Очень интересны результаты наблюдений, проводившихся из средних широт (Англия), за частотой флуктуаций в зоне полярных сияний⁶. Известно, что в высоких широтах ионосфера почти всегда находится в возмущённом состоянии. Это подтверждается повышенной частотой флуктуаций из этой области. Измеренная средняя скорость движения неоднородностей здесь 360 м сек^{-1} вместо 200 м сек^{-1} в умеренных широтах.

Т а б л и ц а III

Метод	Слой	Применения
Ионосферная рефракция	F_2	Структура области, особенно выше слоя $F_{2\text{макс}}$. Физика атмосферы на этих высотах
Ионосферное поглощение	F_2 D	Структура области. Физика атмосферы на высотах слоя F_2
Флуктуации (фединги) радиоизлучения	F_2	Неоднородности слоя F_2 и диффузные отражения. Ионизация в зоне полярных сияний и в высоких широтах (?) [*] . Движение неоднородностей на высотах слоя F_2 . Физика атмосферы на этих высотах
Измерения во время внезапных ионосферных возмущений		Сверхионизация в слое D . Связь между излучением Солнца в радиои ультрафиолетовых областях спектра (?)

^{*}) Вопросительным знаком отмечены ещё не проводившиеся исследования.

На волне 3,7 м были зарегистрированы фединги внеземного излучения во время полярных сияний и магнитных бурь⁶. Отмечалась полная корреляция между частотой флуктуаций и интенсивностью названных явлений. Частота флуктуаций в их присутствии возрастала примерно в 4 раза. Исследования показали, что повышение частоты флуктуаций во время полярных сияний и магнитных бурь связано с увеличением скорости ионосферных ветров и что, вообще, скорость этих ветров пропорциональна геомагнитному индексу K .

Эти факты нашли весьма любопытные подтверждения в теории геомагнитных бурь и суточных возмущений в атмосфере⁷. Согласно этой теории магнитные возмущения происходят благодаря электрическим токам, циркулирующим в ионосфере, а эти последние вызываются потенциалами, получающимися в результате разделения зарядов движущихся ионизованных частиц в присутствии магнитного поля Земли. В умеренных широтах суточная составляющая магнитного возмущения требует зональных ветров большого масштаба, которые дуют в направлении на запад с 12 ч. 00 м. до 00 ч. 00 м. по местному времени и в направлении на восток после этого⁷.

Исследования атмосферы радиоастрономическим методом только начались и ещё далеки от завершения. Возможные направления таких исследований представлены в таблице III¹ (см. стр. 457).

Н. Т.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. A. P. Mitra, *Ind. J. Phys.* **26**, 495 (1952).
2. R. Payne-Scott, L. McCready, *Ter. Mag. Atmos. Elec.* **53**, 429 (1948).
3. F. I. Kerr, C. A. Shain, *PIRE* **39**, 230 (1951).
4. C. Little, A. Maxwell, *Philos. Mag.* **42**, 267 (1951).
5. A. Maxwell, *Dagg. Philos. Mag.* **45**, 551 (1954).
6. C. Little, A. Maxwell, *J. Atm. and Ter. Phys.* **2**, 356 (1952).
7. E. H. Vestine, *J. Geophys. Res.* **58**, 539 (1953).