

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ИНСТИТУТ ЗЕМНОГО МАГНЕТИЗМА, ИОНОСФЕРЫ
И РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН

Препринт № 21(106)

Н.П.Бенькова, К.И.Гримгауз, С.С.Чавдаров,
С.А.Намазов, С.К.Лебедева

РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ В СССР

МОСКВА 1974

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

**ИНСТИТУТ ЗЕМНОГО МАГНЕТИЗМА, ИОНОСФЕРЫ
И РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН**

Препринт № 21(106)

**Н.П.Безькова, К.И.Грингауз, С.С.Чаадаров,
С.А.Нимазов, С.К.Лебедева**

РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ В СССР

МОСКВА 1974

УДК 551, 510, 535

Радиофизические исследования ионосферы
в СССР. Н.П.Бенькова, К.И.Грингауз,
С.С.Чавдаров, С.А.Намазов, С.К.Лебедева.
ИЗМИРАН. Препринт № 21(106). 1974 г.

Представлена краткая характеристика ионосферных исследований в СССР. В §1 (составленном Н.П.Беньковой) дан общий обзор работ за последние 3-5 лет. В §2 (составленном К.И.Грингаузом) приведены результаты исследования ионосферы с помощью ракет и спутников. В §3 (составленном С.С.Чавдаровым) приведена краткая история развития ионосферных исследований в г.Ростове-на-Дону за 35 лет. §4 (составленный С.А.Намазовым) и §5 (составленный С.А.Намазовым и С.К.Лебедевой) посвящены некоторым методическим вопросам вертикального зондирования ионосферы.

Перечисленные материалы представлены на Всесоюзную конференцию по ионосфере, г.Ростов-на-Дону, 16-18 октября 1974 г.

056(02)2

(С) ИЗМИРАН, 1974 г.

**Radiophysics investigations of ionosphere
in USSR. N.P.Benkova, K.I.Oringaus, S.S.Chav-
darov, S.A.Namazov, S.K.Lebedeva. IZMIRAN.
Preprint N 24(106). 1974.**

The characteristic of ionospheric research in the USSR is presented. In §1 (compiled by N.P.Benkova) the common review of the works for 3-5 last years is given. In §2 (compiled by K.I. Oringaus) the results of ionosphere investigations using rocket and satellite technique are adduced. In §3 (compiled by S.S.Chavdarov) the history of ionosphere investigation development in Rostov-na-Donu for 35 years. §4 (compiled by S.A.Namazov) and §5 (compiled S.A.Namazov and S.K.Lebedeva) is devoted to some methodical questions of the ionosphere vertical sounding.

The enumerating materials are presented to All-Union conference on ionosphere, Rostov-na-Donu, 16-18 october 1974 .

§1. Радиофизические исследования ионосферы в СССР

В связи с развитием космических исследований возросло научное значение исследования ионосферы, как ближайшей к поверхности части плазменной оболочки Земли. Намечалась тенденция комплексного исследования свойства заряженных и нейтральных компонент атмосферы и построение теорий, рассматривающих все слои атмосферы (тропосфера-стратосфера-ионосфера-экзосфера) в их взаимосвязи. Ниже дается краткая характеристика основных направлений исследований в СССР.

I. За последние годы широкое развитие приобрели проблемы моделирования ионосферных процессов (построение эмпирических и гибридных моделей). Имеются попытки разработки глобальных моделей (профилей различных параметров заряженных компонент от нижнего края области D до плазмплаузы), однако, чаще разрабатывались модели отдельных параметров ν для конкретных условий. Необходимо отметить разработку теоретических и гибридных моделей для средних широт в Иркутске (ИГУ и СибИЗМИР), теоретических и эмпирических моделей для средних широт в ИЗМИРАН, глобальную аналитическую модель f_oF_2 в ИЗМИРАН (представление глобального распределения f_oF_2 рядами сферических гармоник для всех уровней солнечной активности), теоретические и эмпирические модели заряженных и нейтральных компонент в ИПГ и ряд других работ. При этом в модельных работах советских ученых присутствует физический анализ роли отдельных членов, попытки аналитического решения задач для области F при допущении многокомпонентной плазмы (ИЗМИРАН) и решения задач вдоль силовой линии (СибИЗМИР), что является безусловно прогрессивными шагами.

2. Некоторые успехи достигнуты в СССР за последние годы в отношении освоения новых радиофизических методов исследования ионосферы: применение и модификация метода частичных отражений для исследования нижней ионосферы (НИРЧН, ЛГУ), исследование малых возмущений и волновых процессов интерференционными методами (СибИЗМИР, АН КазССР). В ИЗМИРАН начата разработка фазового метода измерений динамических процессов в ионосфере-магнитосфере (наземная передача и прием, прямо-ответчик на ИСЗ).

3. Особо необходимо отметить исследование нелинейных явлений в ионосфере (НИРЧН), принципиально отличающееся по своим задачам и методам от предшествующих работ.

4. Изучение глобальных ионосферных возмущений (бурь) развивалось по трем направлениям:

4(1). Теоретическое моделирование среднеширотных возмущений в F области путем численного решения уравнений баланса ионизации при допущении изменений во время возмущения температуры и нейтрального состава.

4(2). Исследование эффектов электронно-ионных вторжений в полярные и субполярные широты; решение обратных задач определения спектральных характеристик потоков по ионосферным данным (включая низкоэнергичную часть спектра, влияющую на ионизацию области F).

4(3). Комплексные исследования глобальных характеристик ионосферных возмущений с магнитосферными процессами, параметрами солнечного ветра (скорость, плотность, магнитные поля) и геоэффективными солнечными явлениями. Эти исследования имеют своим выходом научное обоснование краткосрочного прогноза ионосферной возмущенности и условий распространения. Начаты первые попытки

перехода от качественного прогноза к количественному и внедрению машинных вычислительных методов.

На ближайшие годы, нам представляется, одной из основных задач моносферных исследований является развитие экспериментальной базы: проведение комплексных прямых методов изучения верхних слоев атмосферы, развитие некогерентного зондирования, как комплексного метода изучения различных параметров всей толщ моносферы, развитие фазовых методов и расширение исследований нижней моносферы.

В плане теоретических и морфологических исследований представляется необходимым продолжение работ по построению глобальных эмпирических и теоретических моделей, с учетом особенностей полярной и экваториальной моносферы. Усилия теоретиков нужно направить на изучение моносферно-магнитосферного взаимодействия (проблемы распространения энергии через магнитосферу в моносферу, динамические характеристики систем в целом, и т.д.), а также на проблемы нижней моносферы и взаимодействие моносферы с нейтральной атмосферой. Особо перспективным представляется переход от линейной физики моносферы к нелинейным явлениям, имея в виду как нелинейное воздействие сильных радиоволн, так и естественные нелинейные процессы в моносфере-магнитосфере.

§2. Обзор полученных в 1973-74гг. результатов исследований области F, проведенных на ракетах и спутниках
Интеркосмоса

В докладах [1,2] в 1972г. были приведены первые результаты моносферных исследований, выполненных совместно с социали-

стическими странами по программе Интеркосмос [3-7]. В настоящем обзоре излагаются основные результаты дальнейших ионосферных исследований по указанной программе (см., например, [8-10]).

Дальнейший анализ результатов измерений концентрации положительных ионов при помощи сферических ионных ловушек на спутнике "Интеркосмос-2" позволил выявить различие в поведении ионов O^+ и H^+ в районе ночной экваториальной аномалии на высотах 800-1200 км; показано, что максимумы концентрации H^+ в широтном распределении заряженных частиц лежат на геомагнитных широтах $\sim 26-30^\circ$, а ионы O_2 распределены иным образом. На рис.1 показано десять ночных широтных распределений концентрации H^+ в районе геомагнитного экватора, полученных с 1 по 14 января 1972г. [8]. Измерения эффективной электронной температуры $Te_{эфф}$, проведенные на том же спутнике методом в.ч.зонда в ночной экваториальной области ионосферы, позволили выявить особенности тонкой структуры распределения $Te_{эфф}$ [9]. Примером может служить рис.2, где кривая 1 получена 7.1.1970г., 2 - 2.1.1970г., 3 - 15.1.1970г. и 4 - 30.12.1969г. У каждой кривой указано местное время, соответствующее пересечению геомагнитного экватора. Резкое увеличение температуры около 5 часов утра (кривая 4) объясняется предрассветным нагревом ионосферы фотоэлектронами из магнитно-сопряженной области.

Ведется обработка ионосферных данных, полученных со спутника "Интеркосмос-8", запущенного 1.12.1972г. (наклонение к экватору 71° , перигей 214 км, апогей 679 км). На спутнике проводились зондовые измерения глобальных распределений концентрации и температур частиц ионосферной плазмы. На рис.3 показаны типичные раскре-

деленка $T_{\text{эф}}$ вдоль орбиты по данным в.ч.зонда: сплошная кривая - усреднена по трем орбитам спутника в магнито-спокойный день 12.12.1972г., а пунктирная - усреднена по трем орбитам в сильно магнитно-возмущенный день 13.12.1972г. По оси абсцисс отложены географические широты, высоты и местное время (наверху). Видно, что при гесмагнитных возмущениях на высоких широтах в монофере появляются мощные дополнительные источники нагрева (возможно выпадания энергичных частиц). В районе магнитного экватора $T_{\text{эф}}$ ночью во всех случаях внезапно превышает 1000°K .

На геофизических ракетах "Вертикаль-1" (1971г.) и "Вертикаль-2" (1972г.) проводились комплексные измерения параметров верхней атмосферы и моноферы до высот ~ 470 км, включавшие, в частности, определения высотных распределений скорости ионообразования и коэффициента рекомбинации в области F, методами, указанными в [11]. В этой работе в уравнении баланса ионизации в члене $\text{div}(n\bar{V})$, отображающем перемещение заряженных частиц, учитывалась только вертикальная диффузия. В [10] для пусков ракеты "Вертикаль-1" 20.11.1970г. и "Вертикаль-2" 20.8.1971г. д-ром Дж.Кингом (Англия) по просьбе авторов экспериментов были рассчитаны вертикальные распределения скоростей моноферных дрейфов V по методике, изложенной в работе [12]. Эти значения V были использованы при определении величины $\text{div}(n\bar{V})$ в уравнении баланса ионизации из которого определялись β на различных высотах. Учет моноферных дрейфов существенно повлиял на высотный ход β в области F. При скоростях моноферных дрейфов выше 10 м/сек, движение частиц влияет на процесс деионизации в области F сильнее, чем изменения химического состава нейтральной верхней атмосферы.

§3. Тридцать пять лет ионосферных исследований

в г. Ростове-на-Дону

В июле 1936 года состоялась беседа между профессором Е.Е. Богословским, доцентом Томского госуниверситета В.Н. Кессенихом и ассистентом РГУ С.С. Чавдаровым. В ней обсуждались современные достижения науки в области распространения радиоволн. С.С. Чавдарову было рекомендовано организовать исследования распространения радиоволн в ионосфере.

Осенью 1939 года были получены первые отражения радиоволн от ионосферы на длинах 42 и 84 метров. Тогда же были организованы измерения коэффициента отражения.

21 сентября 1941 года, несмотря на близость фронта, были проведены наблюдения во время частного затмения Солнца. 24 сентября станция пришлось демонтировать вследствие увеличения активности действий немецких войск. В ноябре передатчик станции был передан 56 армии для осуществления радиосвязи ПВО Ростовского дивизиона.

При эвакуации факультета материалы полуторагодичных наблюдений были вывезены и использованы в кандидатской диссертации С.С. Чавдарова и статье в сборнике "Ученые записки РГУ" (т. IX в. 5, 1947 г.).

При активном содействии профессора В.Н. Кессениха в 1946 году станция была восстановлена, и с 1948 года начались регулярные наблюдения на скользящей частоте в диапазоне 1-12 Мгц. В это же время А.М. Свечниковым были организованы работы по измерению поглощения радиоволн и представлению ежечасных данных в ИЗМИРАН. Я.А. Вполюжским начаты были исследования спорадического слоя E.

Коллективом ионосферщиков было организовано наблюдение ионосферы во время полного солнечного затмения 30 июня 1954 года. Помимо уменьшения критических частот было обнаружено наличие дрейфа крупномасштабных неоднородностей с составляющей вдоль меридиана 100 м/сек.

В этот период большую помощь в развитии ионосферных исследований оказывал директор ИЗИРАН'а И.В.Пушков.

Безусловно существенное развитие ионосферные исследования получили в связи с проведением 3 Международного геофизического года, участником выполнения программы которого явился Ростовский госуниверситет. При активном участии С.С.Чавдарова и А.Н.Свечникова вплоть до руководства строительными работами, было построено здание ионосферной станции и проведено его оборудование современной аппаратурой.

Проведение вертикального зондирования панорамным монозондом АМС позволило значительно повысить качество получаемых ионосферных данных и наладить систематическую передачу их в центр хранения Б-2 (Х.З.Шаткин), значительный сдвиг получили исследования поглощения радиоволн (А.М.Свечников, П.К.Часовитин), начаты были наблюдения дрейфа неоднородностей ионосферы (В.Л.Позигун). Значительно увеличилось число публикаций в центральной печати. К этому времени относится организация аспирантской подготовки.

В диссертациях Д.К.Часовитина (1963г.) и С.П.Чернышевой подробно рассмотрены вероятности появления спорадического слоя E, его связь с солнечной активностью, исследована устойчивость отражений от него и ее зависимость от ряда факторов. В диссертации С.П.Чернышевой (1967г.) показано, что вероятность появления отражений от спорадического слоя E на различных частотах зависит от

величины поглощения.

Н.П.Давыдкин в диссертации (1964г.) проанализировал процессы в ионосфере, происходящие во время солнечного затмения, впервые в Ростове для исследования ионосферы применил расчеты на ЭВМ, и один из первых в СССР использовал расчеты по обеим магнитным компонентам.

В.Л.Позыгуин (1969г.) рассмотрел структурные и динамические характеристики области E ионосферы, экспериментально определял степень мутности слоев E и E_s различных типов, исследовал временные изменения диффузности области E.

О.А.Чальцева в диссертационной работе (1970г.) теоретически обосновала возможность расчета по висотно-частотным характеристикам распределения электронной концентрации ниже области E, а также ее влияние на точность расчетов Nh -профилей ионосферы. Ее внесены ряд уточнений в расчеты ионизации в долине. Рассмотрен вопрос о применении метода фазового интеграла для повышения точности определения высот отражения от ионосферы. Методы расчета Nh -профилей ионосферы, разработанные О.А.Чальцевой, использованы в ряде работ нашего коллектива и сотрудников ИЗМИРАН'а, в которых она является соавтором.

Б.Г.Барбахов в диссертационной работе (1970г.) провел исследование многолучевого распространения дециметровых волн, разработал метод расчета распространения на одноканальных трассах, позволяющий повысить точность расчета и прогнозирования физико-технических характеристик СВ каналов. Проведены работы по оценке влияния на параметры многолучевости кривизны ионосферы, геомагнитного поля, горизонтальных градиентов электронной концентрации. Разработаны вероятностные модели многолучевого распространения для

различных сезонов и уровней солнечной активности. Предприняты эксперименты по ИЗ с использованием сигналов, кодированных кодом Баркера.

В диссертационной работе И.К.Рысс (1971г.) путем использования данных вертикального зондирования и измерения поглощения радиоволн методом АГ проведено разделение интегрального поглощения на поглощение выше и ниже 100 км, рассмотрены изменения этих частей поглощения в сезонном и суточном разрезах, получены их характеристики, рассмотрена связь поглощения со стратосферным нагревом и "зимней аномалией".

А.М.Свечниковым и Д.Н.Фаером в 1970 году были предприняты измерения поглощения на 5 частотах.

В 1972 году Д.Н.Фаером была завершена установка по измерению поглощения радиоволн на разделенных магнитных компонентах на 10 частотах с автоматическим суммированием амплитуд отраженных импульсов. В диссертационной работе (1973 г.) Д.Н.Фаер провел ряд измерений, показавших хорошее качество этой установки и перспективность дальнейшего ее развития.

Организация измерений поглощения на разделенных магнитных компонентах позволила Н.П.Данилкину разработать совместно с П.Ф.Денисенко метод расчета \sqrt{h} -профилей ионосферы, а также использовать эти измерения для уточнения расчетов Nh -профилей.

В.Т.Родионовой проведено решение уравнения баланса ионизации с учетом явлений переноса. Определены константы ионно-молекулярных реакций и диссоциативной рекомбинации, коэффициента амбиполярной диффузии и скорости вертикального дрейфа. Получены суточные вариации этих параметров на различных высотах F области. Проведено фотохимическое рассмотрение вариаций ионного состава с учетом

малых составляющих и рассмотрен вклад в баланс ионизации возбужденных состояний молекул и нейтралов.

Научно-исследовательские работы в связи с назначением С.П. Чернышевой заведующей кафедрой РИСИ вышли за рамки физического факультета РГУ. На этой кафедре под ее руководством организован из бывших студентов нашего факультета активно работающий коллектив. Этот коллектив, насчитывающий 8 научных работников, в тесном контакте с кафедрой ФИРР, продолжает работы по исследованию спорадических образований в области E моносферы. Проведен анализ механизмов и закономерностей образования среднеширотного спорадического слоя E. Исследуются эффекты сопряженности некоторых явлений, в частности ПВ. Рассмотрены механизмы их образования, выявлены и объяснены закономерности появления ПВ. Предприняты работы по изучению воздействия магнитосферных и ионосферных электрических полей на процессы в моносфере. Совместно с НИИ ГУГМС (В.К. Часовитиним) проводятся исследования теплового баланса в области E моносферы.

Не прекращаются совместные работы кафедры ФИРР с кафедрой физики РИСИ. Так И.К. Рысс в содружестве с работниками РИСИ проводит исследования по стратосферно-ионосферным связям с точки зрения динамики общей циркуляции атмосферы. Исследуются земные аномальные явления в атмосфере.

Н.П. Данилкиным в настоящее время весьма энергично устанавливаются связи с организациями, ведущими космические исследования. Коллективом моносферной станции проводится совместная работа с рядом организаций на хозяйственных началах (ИЗМИРАН, ИРЭ, ИКИ и др.). Этот коллектив принимает участие в наблюдениях по программе "Интеркосмос", является координатором по расчету Nh -профилей моно-

сферы спутных станций СССР для ИСЗ "Коперник-500".

Таковы итоги тридцатипятилетней работы коллектива физиков-ионосферщиков Ростова-на-Дону. Созданы неплохие условия для развития дальнейших работ. Пожелаем ионосферщикам Ростова дальнейшей дружной, плодотворной работы.

§4. О разрешающей способности при импульсном зондировании ионосферы

На основе широко применяемой в радиолокации диаграммы неопределенности обсуждается разрешающая способность по высоте и частоте при импульсном зондировании ионосферы с применением простого и сложного сигналов. Для сложных сигналов рассматриваются случаи со скатнем по времени и частоте. Показано, что методы скатня сложных сигналов по времени и частоте являются равнозначными при регистрации монограмм с дифференцированием импульсов. При одновременной регистрации времени запаздывания и смещения частоты преимущество имеет метод скатня по частоте. В этих случаях целесообразно применение сигналов с шириной спектра 40-50 кГц. Если помимо времени запаздывания и смещения частоты ведется также регистрация структуры отраженного сигнала, то следует применять сложные сигналы со скатнем по времени. Целесообразно применять сложные сигналы с шириной спектра порядка 100 кГц.

§5. О механизме образования диффузных отражений

Эксперименты с применением импульсов длительностью 10 мксек показывают, что в 30% случаев измерения при невозмущенной ионосфере (по данным стандартных ионосферных станций) наблюдается диф-

фузные отражения. В этих условиях рефракция волны в слое может играть существенную роль. Целью данного доклада является сравнительная оценка с учетом рефракции роли возможных механизмов образования диффузных отражений при зондировании ионосферы.

Вертикальное зондирование. При излучении симметрично относительно вертикальной оси рассматриваются следующие четыре возможных механизма: "обратное" рассеяние, рассеяние "назад" с последующим переотражением, частичное отражение в области $\xi \rightarrow 0$ и рассеяние на магнитно-ориентированных неоднородностях. Результаты выполненных расчетов показывают, что механизм обратного рассеяния может приводить к диффузности лишь на частотах $\omega > 0,9\omega_{кр}$ при $\frac{\Delta N}{N} \geq 5 \cdot 10^{-2}$. При рассеянии "назад" с последующим переотражением от вышележащих уровней характер диффузности аналогичен случаю обратного рассеяния. При $\frac{\omega}{\omega_{кр}} < 0,8$ рассеянные сигналы запаздывают относительно зеркального луча ($\tau_2 > 0$), а при $\frac{\omega}{\omega_{кр}} > 0,9$ - опережают ($\tau_2 < 0$). Такой результат оказывается несколько неожиданным и показывает на важность учета рефракции в слое. В целом эти два механизма не могут приводить к существенной диффузности.

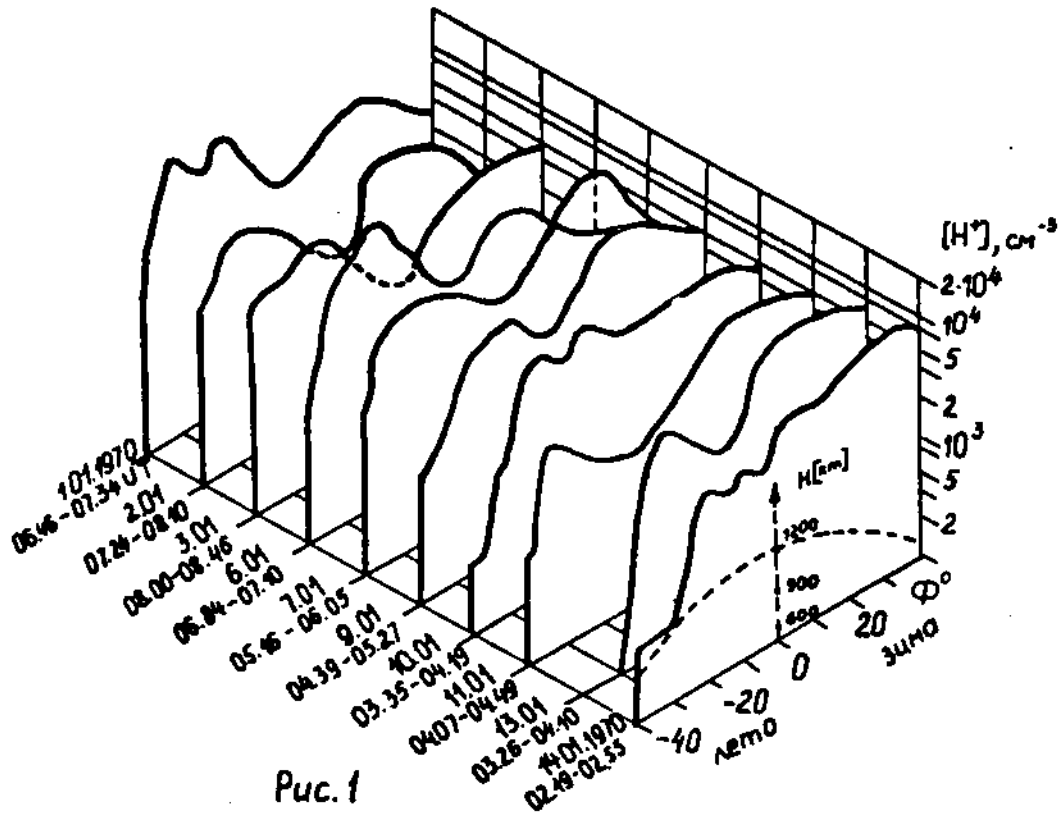
Механизм частичных отражений становится все более существенным по мере приближения к области полного отражения ($\xi \rightarrow 0$) и может создавать заметную диффузность, опережающую зеркальный луч. Рассеяние на магнитно-ориентированных неоднородностях показывает следующие особенности. В плоскости меридиана протяженность диффузного сигнала зависит от магнитного наклонения. На низких широтах отбавшая диффузного сигнала имеет симметричный вид во всех случаях, на средних широтах вид отбавшей зависит от значения τ_2 . Протяженность диффузного сигнала растет по мере продвижения от высоких широт к низким.

Из рассмотренных возможных механизмов возникновения диффузных отражений в плоскости меридиана преобладающим на низких и средних широтах является рассеяние на магнито-ориентированных неоднородностях, а в широтной плоскости - механизм частичных отражений.

Наклонное зондирование. В этом случае диффузная структура сигнала может быть объяснена механизмом рассеяния вперед на дискретных неоднородностях слоя. При известных средних параметрах слоя углы рассеяния и приема оказываются однозначно связанными со временем группового запаздывания. Это позволяет определить индикатрису рассеяния неоднородности и ширину углового спектра рассеянных волн.

Литература

1. К.И.Грингауз. X-я Всесоюзная конференция по распространению радиоволн, Тезисы докладов, секция I, стр.62.
2. В.А.Рудаков. Там же, стр.69.
3. К.Бишофф, К.И.Грингауз и др., Космические исслед., 102, 228, 1972.
4. К.И.Грингауз, К.Б.Серафимов, К.Г.Шмеловский, Я.Шмиллауэр. Космические исслед., II, I, 95, 1973.
5. Г.Л.Гдалевич, Б.Н.Горожанкин, И.С.Тутнев и др., Космические исслед., II, 2, 245, 1973.
6. В.В.Афонин, Г.Л.Гдалевич и др., Космические исслед., II, 2, 254, 1973.
7. К.Бишофф, Г.Л.Гдалевич и др., Космические исслед., II, 2, 267, 1973.
8. K.Serafimov, B.N.Gorozhankin, K.I.Grindam, G.L.Gdalevich, I.Kutiev, S.Charkinov "Equatorial anomaly in the distribution of the ionic components established by satellite data" Preprint, Sofia, 1974.
9. Я.Шмиллауэр, К.И.Грингауз, В.В.Афонин. Некоторые результаты измерения электронной температуры T_e в ионосфере методом в.ч.зонда на спутнике "Интеркосмос-8". Доклад, представленный на Симпозиум МАГА в Киото, 1973г.
10. К.И.Грингауз, Н.М.Штте. Ракетные исследования скорости ионизации и рекомбинации в области F с учетом дрейфов заряженных частиц. Доклад, представленный на симпозиум МАГА в Киото, 1973.
11. К.И.Грингауз, Г.Л.Гдалевич, В.А.Рудаков, Н.М.Штте. Сб. "Ионосферные исслед." №20, 43, 1972.
12. Г.Коул, Дж.Кинг. Сб. "Ветер в ионосфере", пер. под ред. Казимировского, Гидрометеониздат, Л., 51, 1969.



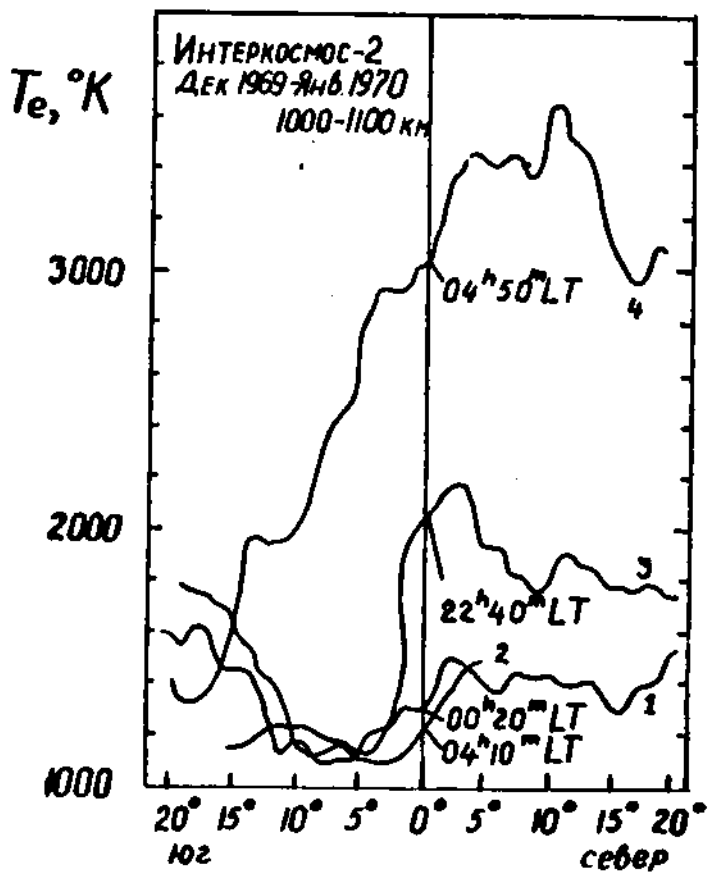


Рис. 2

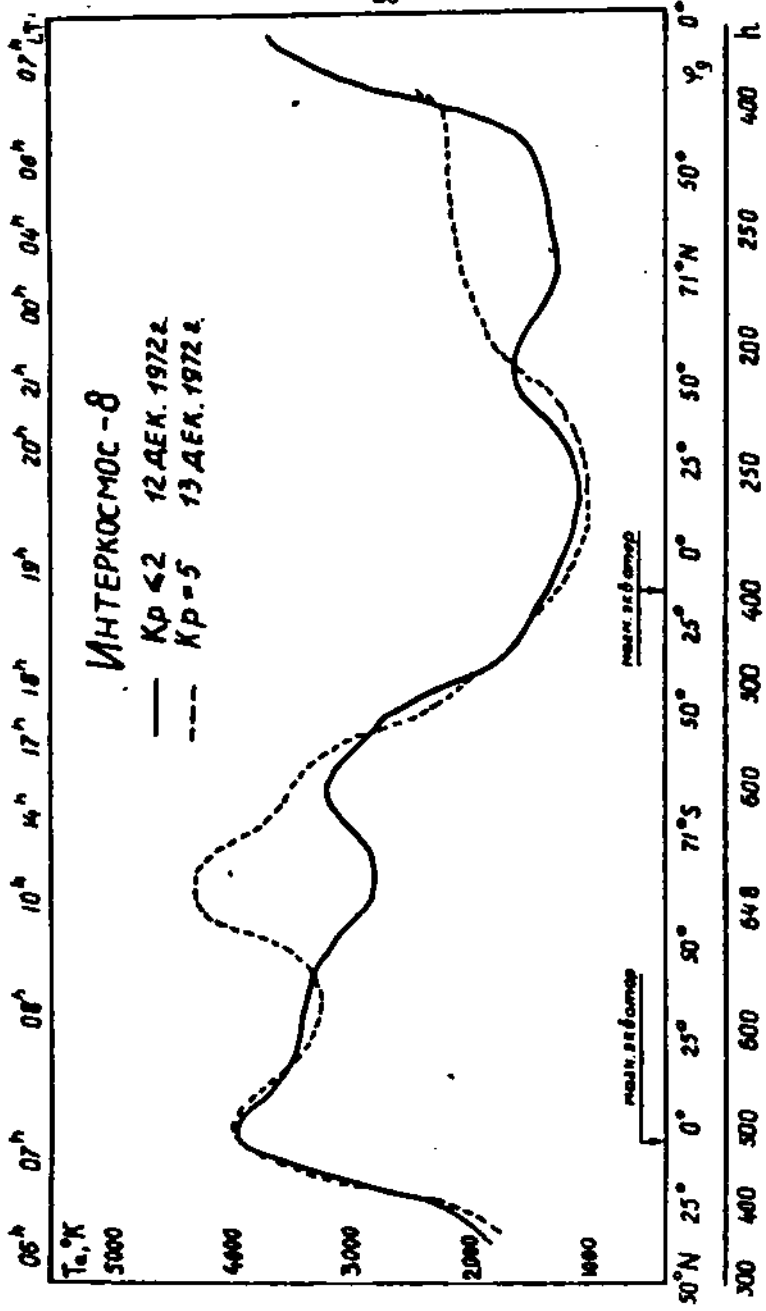


Рис. 3

Подписано к печати 23.10.74 г.
Заказ 235.Бесплатно. Т15797. Тираж 150.

Отпечатано в ОНТИ ИЗМИРАН
142092 Моск. обл. п/с Академгородок