

5. Derishev E V et al. *Phys. Rev. D* **68** 043003 (2003)
6. Derishev E V, Aharonian F A, Kocharovskiy V I *Astrophys. J.* **655** 980 (2007)
7. Nagano M, Watson A A *Rev. Mod. Phys.* **72** 689 (2000)
8. Hillas A M, in *Cosmology, Galaxy Formation and Astroparticle Physics, Oxford, UK, 2006* (Eds H-R Klockner et al.) (in press); astro-ph/0607109
9. Зацепин Г Т, Кузьмин В А *Письма в ЖЭТФ* **4** 114 (1966)
10. Greisen K *Phys. Rev. Lett.* **16** 748 (1966)
11. Berezhinsky V *Nucl. Phys. B: Proc. Suppl.* **81** 311 (2000)
12. Fermi E *Phys. Rev.* **75** 1169 (1949)
13. Гинзбург В Л, Сыроватский С И *Происхождение космических лучей* (М.: Изд-во АН СССР, 1963)
14. Крымский Г Ф *ДАН СССР* **234** 1306 (1977)
15. Bell A R *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **182** 147 (1978)
16. Malkov M A, Drury L O'C *Rep. Prog. Phys.* **64** 429 (2001)
17. Aharonian F et al. *Astron. Astrophys.* **448** L43 (2006)
18. Niemiec J, Ostrowski M *Astrophys. J.* **641** 984 (2006)
19. Lemoine M, Pelletier G, Benoit R *Astrophys. J.* **645** L129 (2006)
20. Stern B E *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **345** 590 (2003)
21. Urry C M, Padovani P *Publ. Astron. Soc. Pacific* **107** 803 (1995)
22. Mészáros P *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **40** 137 (2002)

PACS numbers: 41.20.Jb, 52.35.Mw, **94.20.** – y

Модификация ионосферы Земли мощным коротковолновым радиоизлучением

В.Л. Фролов, Н.В. Бахметьева, В.В. Беликович, Г.Г. Вертоградов, В.Г. Вертоградов, Г.П. Комраков, Д.С. Котик, Н.А. Митяков, С.В. Поляков, В.О. Рапопорт, Е.Н. Сергеев, Е.Д. Терещенко, А.В. Толмачева, В.П. Урядов, Б.З. Худукон

1. Введение

Ионосфера, являясь верхней частью атмосферы Земли, определяющим образом влияет как на характер жизнедеятельности на Земле, так и на свойства различных каналов теле- и радиокommunikаций. В связи с этим она привлекает к себе пристальное внимание исследователей уже в течение многих десятилетий. Диапазон проводимых работ по исследованию ионосферы чрезвычайно широк и охватывает такие проблемы, как физика плазموобразования, динамика плазмы и механизмы ее турбулизации, химия ионосферы, распространение радиоволн различных диапазонов и т.п. С началом использования активных экспериментов в ионосфере, включающих модификацию плазмы пучками мощных радиоволн от наземных коротковолновых (КВ) радиопередатчиков и с борта космических летательных аппаратов, а также инжекцию пучков заряженных частиц и выбросы химических реагентов с борта искусственных спутников Земли (ИСЗ) и геофизических ракет, традиционные методы исследования ионосферы в значительной степени расширились. Успехи, достигнутые в активных экспериментах, позволили рассматривать ионосферу как естественную космическую лабораторию для моделирования различных процессов, протекающих в плазме [1]. Достаточно высокая стабильность и фактическая безграничность объема ионосферной плазмы, а также вариации в широких пределах возможных значений ее параметров позволяют успешно изучать на

экспериментальной основе большой класс из стоящих на сегодня задач.

Впервые с изменением свойств ионосферы в поле мощных радиоволн столкнулись более 70 лет назад в связи с открытием в 1933 г. люксембург-горьковского эффекта [2]. Определяющая роль в теоретической интерпретации этого эффекта принадлежит В.Л. Гинзбургу, А.В. Гуревичу и И.М. Виленскому. Объяснение люксембург-горьковского эффекта привело к пониманию роли нелинейных свойств ионосферной плазмы, проявляющихся при ее нагреве мощной радиоволной, которые детально были рассмотрены В.Л. Гинзбургом и А.В. Гуревичем в [3]. Проведенные исследования стимулировали строительство специализированных мощных нагревных стенов для модификации ионосферы. В СССР первый стенд начал работать в 1961 г. в Научно-исследовательском институте радио (Москва). Позднее в США были построены стенды "Боулдер" в 1970 г. и "Аресибо" в 1971 г. В Научно-исследовательском радиофизическом институте (НИРФИ) это направление исследований было инициировано Г.Г. Гетманцевым, под руководством которого в 1973 г. около Нижнего Новгорода (бывший г. Горький) был построен стенд "Зименки". В 1976 г. усилиями Полярного геофизического института (ПГИ) Кольского филиала АН СССР в полярных широтах около Мурманска был построен стенд "Мончегорск".

Уже в первых экспериментах по модификации ионосферы мощными радиоволнами, выполненными в 1960–1970 годы, был обнаружен, помимо ожидаемых крупномасштабных изменений температуры и концентрации плазмы, ряд новых явлений, связанных с генерацией искусственных плазменных колебаний и искусственных неоднородностей плотности плазмы с масштабами поперек геомагнитного поля от нескольких долей метра до нескольких километров [4, 5], был открыт "эффект Гетманцева" [6], было экспериментально доказано образование искусственных периодических неоднородностей плотности ионосферной плазмы в поле мощной стоячей радиоволны [7]. Возникло новое направление исследований, которое вскоре стало одним из приоритетных в радиофизике и нашло разнообразные приложения в геофизике, физике плазмы и физике космоса. Важным обстоятельством является то, что модификация ионосферы мощными радиоволнами не вносит загрязнения в окружающую среду и не приводит к нежелательным экологическим последствиям, поскольку такое воздействие на ионосферу по мощности пренебрежимо мало по сравнению с воздействиями природного характера. В то же время имеется возможность регулярно проводить многократно повторяемые измерения характеристик верхней атмосферы Земли с использованием хорошо развитых радиофизических методов дистанционной диагностики искусственно вызываемых плазменных возмущений.

Полученные результаты стимулировали строительство новых, более мощных нагревных стенов в северной Норвегии ("Tromsø", 1980 г.) и в СССР ("Сура", 1981 г.). Позднее в 1990-х годах было начато строительство стенда на Аляске (США) по проекту HAARP (от англ. High Frequency Active Auroral Research Program), первая очередь которого была введена в конце 1990-х годов; усовершенствование стенда с целью увеличения его потенциала продолжается до сих пор. Среди других построенных в 1980–1990 годах стенов — "Гиссар" (Таджикистан, 1981 г.), стенд около Харькова (1987 г.) и

стенд HIPAS (от англ. — High Power Auroral Simulation) (США, 1990 г.). Сегодня эксперименты по модификации ионосферы проводятся в основном на трех стендах: HAARP и "Tromsø" в полярных широтах и "Сура" в средних широтах. Остальные стенды либо оказались по разным причинам разрушенными, либо сейчас активно уже не используются. В последние годы англичанами начато строительство стенда SPEAR (от англ. Space Plasma Exporation by Active Radar) на о. Шпицберген, в области полярной шапки. В 2004 г. введена первая очередь SPEAR и начаты нагревные эксперименты.

В настоящем докладе приведен краткий обзор результатов экспериментов по искусственному воздействию на ионосферу мощным КВ-радиоизлучением наземных передатчиков. Их основу составляют выполненные в НИРФИ в кооперации со многими российскими и зарубежными организациями исследования свойств искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ), генерации ионосферным источником сигналов комбинационных частот в диапазонах очень низких (ОНЧ), сверхнизких (СНЧ) и ультранизких (УНЧ) частот, исследования различных слоев ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей. Эти исследования были начаты на стенде "Зименки" и продолжены на стенде "Сура".

Стенд "Сура" (НИРФИ), получивший статус уникальной установки России (регистрационный № 06-30), включает в себя три коротковолновых передатчика ПКВ-250 с непрерывной мощностью излучения 3×250 кВт в диапазоне частот 4–25 МГц. Каждый передатчик нагружен на свою антенную решетку, имеющую полосу частот 4,3–9,5 МГц. Все три модуля стенда могут работать независимо, излучая волну с обыкновенной или необыкновенной поляризацией на своей частоте, в собственном временном режиме с длительностью импульсов начиная от 50 мкс и вплоть до непрерывного излучения. В когерентном режиме излучения всех трех модулей стенда (полный размер антенного поля при этом 300×300 м) максимальная эффективная мощность излучения составляет 80–280 МВт, возрастающая с увеличением частоты излучаемой волны. Имеется возможность отклонять луч антенны стенда в плоскости геомагнитного меридиана в пределах $\pm 40^\circ$ от вертикали. Вокруг стенда "Сура" развернуты различные диагностические установки, служащие для зондирования ионосферы и детектирования плазменных возмущений, индуцированных мощной радиоволной.

2. Искусственная ионосферная турбулентность

Взаимодействие мощной КВ-радиоволны, имеющей обыкновенную поляризацию, с плазмой сопровождается возбуждением различного типа ИИТ, определяемой развитием таких нелинейных явлений, как: 1) генерация высокочастотной (различные плазменные колебания и волны) и низкочастотной (в первую очередь неоднородности температуры и плотности плазмы различных масштабов) плазменной турбулентности; 2) модификация профиля плотности плазмы под действием сил стрикционного и теплового давления, приводящая к формированию фокусирующей (в F_2 -области) и дефокусирующей (в E- и F_1 -областях) линз, а также искусственных периодических неоднородностей под дей-

ствием мощной стоячей радиоволны; 3) ускорение электронов до сверхтепловых энергий, вызывающих дополнительную ионизацию плазмы и свечение нейтрального газа в оптическом и дециметровом диапазонах длин волн; 4) генерация вторичных электромагнитных излучений (в частности искусственного радиоизлучения ионосферы); 5) возбуждение электрических и магнитных флуктуационных полей и др. Важно, что выполненные в течение последних трех десятилетий широкомасштабные экспериментальные и теоретические исследования, главные результаты которых суммированы в ряде специальных выпусков журналов [4, 8–13], позволили детально изучить особенности взаимодействия мощной радиоволны с различными областями ионосферной плазмы, исследовать особенности генерации и свойства ИИТ, а также разработать новые методы диагностики процессов, протекающих в магнитоактивной плазме.

В разделах 2.1–2.4 кратко сформулированы основные свойства ИИТ, возбуждаемой мощной радиоволной обыкновенной поляризации при ее отражении от F_2 -области ионосферы.

2.1. Стадии развития взаимодействия мощного радиоизлучения с плазмой

В развитии взаимодействия мощной радиоволны обыкновенной поляризации с плазмой F_2 -области ионосферы можно выделить четыре стадии [14]. На первой стадии, длящейся 5–20 мс от момента начала воздействия и характеризующейся уменьшением интенсивности отраженного от ионосферы сигнала волны накачки (ВН) на 10–20 дБ, происходит развитие *стрикционной параметрической неустойчивости* [15] вблизи уровня отражения мощной радиоволны, в результате чего наблюдается генерация ленгмюровской плазменной турбулентности и ускорение электронов до сверхтепловых энергий. На второй стадии, длящейся 0,5–3 с (до начала развития эффекта аномального ослабления), наблюдается восстановление уровня отраженного сигнала ВН, сопровождающееся появлением его характерных квазипериодических осцилляций. Пока нет удовлетворительного объяснения этого явления. На третьей стадии через 0,5–10 с после включения ВН в результате развития *тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости* [16, 17] наблюдается генерация верхнегибридной плазменной турбулентности и мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) размером $l_{\perp} \leq 30$ –50 м в ортогональном к магнитному полю Земли направлении, рассеяние мощной радиоволны на которых приводит к ее *аномальному ослаблению* (АО) — уменьшению отраженного от ионосферы сигнала на 10–30 дБ. Четвертая стадия, наступающая через 10–30 с после включения ВН, определяется развитием *самофокусирующей неустойчивости* мощной радиоволны [17, 18], что вызывает рост интенсивности среднемасштабных ($l_{\perp} \approx 0,1$ –1 км) искусственных ионосферных неоднородностей (ИИН), которые приводят к появлению сильных флуктуаций радиоволн, отраженных от возмущенной области ионосферы, и к образованию уширения F_{spread} на ионограммах следов отраженных от ионосферы сигналов зондирующего передатчика, характерного при распространении радиоволн в турбулентной среде. Генерация более крупномасштабных неоднородностей с $l_{\perp} \geq 1$ –2 км связывается с усилением естественных неоднородностей плотности плазмы.

Эффекты модификации ионосферы значительно усиливаются, когда выполняются условия для распространения пучка мощных радиоволн вдоль магнитного поля в области резонансного взаимодействия ВН с плазмой — эффекта "магнитного зенита" [19]. При этом в результате самофокусировки ВН на вытянутых вдоль геомагнитного поля Земли неоднородностях, размеры которых в поперечном к геомагнитному полю направлении составляют несколько сотен метров и которые заполнены МИИН с $l_{\perp} \approx 1-10$ м, происходит сильный локальный разогрев плазмы за счет аномального поглощения энергии мощной радиоволны с обыкновенной поляризацией при ее рассеянии на МИИН в верхнегибридных плазменных волнах. Это приводит к формированию каверн, в которых оказывается запертым поток мощного радиоизлучения, расслоившийся на узкие пучки.

2.2. Динамические и спектральные характеристики искусственных ионосферных неоднородностей

Времена развития $\tau_{\text{разв}}$ ИИН с $l_{\perp} \approx 1-10^3$ м зависят от их масштаба (как $l_{\perp}^{0.5}$), мощности ВН (как $P_{\text{эфф}}^{-1}$), временного режима ее излучения (через эффекты послепействия), а также от ионосферных условий [14]. В среднем, $\tau_{\text{разв}} \approx 2-5$ с при $l_{\perp} \approx 10$ м и $P_{\text{эфф}} \approx 20$ МВт. Времена релаксации $\tau_{\text{рел}}$ ИИН определяются масштабом неоднородностей l_{\perp} [14]: при $l_{\perp} \leq l_{\perp}^*$ имеет место квадратичная зависимость $\tau_{\text{рел}}(l_{\perp}) \propto l_{\perp}^2$, при $l_{\perp} \geq l_{\perp}^*$ — более слабая зависимость, $\tau_{\text{рел}}(l_{\perp}) \propto l_{\perp}^{0.5}$ ($l_{\perp}^* \approx 3-20$ м — некоторый характерный масштаб неоднородностей, величина l_{\perp}^* уменьшается при переходе от дневных к ночным условиям проведения измерений). Считается, что в области квадратичной зависимости $\tau_{\text{рел}}(l_{\perp})$ релаксация МИИН связана с поперечной амбиполярной диффузией, а при $l_{\perp} > l_{\perp}^*$ обусловлена продольной амбиполярной диффузией плазмы. Конкретные значения времен релаксации неоднородностей зависят также от времени суток, высоты отражения ВН $h_{\text{отр}}$, местоположения неоднородностей внутри возмущенной области, режима излучения ВН, уровня возмущенности ионосферы и др. При $l_{\perp} \approx 10$ м и $h_{\text{отр}} \approx 240$ км времена релаксации в спокойной геомагнитной обстановке составляют 5–10 с в дневное время, увеличиваясь до 15–20 с в вечерние часы и до 20–40 с в ночные часы.

На основе результатов измерения сечения ракурсного рассеяния радиоволн коротковолновых и ультракоротковолновых (УКВ) диапазонов на анизотропных МИИН и мерцаний сигналов ИСЗ при прохождении радиоволн через возмущенную область ионосферы был измерен спектр флуктуаций плотности плазмы в области масштабов $l_{\perp} \approx 1-4 \times 10^3$ м [14, 20, 21]. Для кусочно-степенной аппроксимации зависимости $\Phi_N(l_{\perp}) \propto l_{\perp}^p$ было определено, что $p \approx 4-5$ для $l_{\perp} \approx 1-3$ м, $p \sim 2-3$ для $l_{\perp} \approx 3-20$ м, $p \sim -(0,5-1)$ для $l_{\perp} \approx 50-200$ м, $p \sim 3$ для $l_{\perp} \approx 200-400$ м, $p \sim 1,5-2$ для $l_{\perp} \approx 600-800$ м, $p \sim 3-4$ для $l_{\perp} \approx 0,8-4$ км. Максимум $\Phi_N(l_{\perp})$ в области масштабов $l_{\perp} \approx 50$ м, близких к длине мощной радиоволны в вакууме, обусловлен механизмом генерации неоднородностей вследствие развития тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости. Второй максимум, наблюдающийся в области масштабов $l_{\perp} \approx 400-600$ м, связывается с проявлением самофокусирующей неустойчивости ВН в плазме. Характерные значения

относительных флуктуаций плотности плазмы на стационарной стадии развития ИИТ составляют в среднем: $\delta N \approx 5 \times 10^{-3}-10^{-2}$ для $l_{\perp} \approx 1-2$ км, $\delta N \sim 10^{-3}-2 \times 10^{-3}$ для $l_{\perp} \approx 200-600$ м, $\delta N \sim 5 \times 10^{-4}-10^{-3}$ для $l_{\perp} \approx 3-30$ м. В первые несколько секунд после включения ВН, вследствие более быстрого развития неоднородностей с $l_{\perp} \approx 1-3$ м, спектр МИИН имеет инверсную форму с максимумом $\Phi_N(l_{\perp})$ в области масштабов $l_{\perp} \approx 2-3$ м [14]. Измерения при различных углах наклона пучка мощных радиоволн в плоскости геомагнитного меридиана позволили установить, что наиболее интенсивные МИИН генерируются при углах наклона $\sim 12^{\circ}-16^{\circ}$ к югу от вертикали [21].

Таким образом, изменяя мощность, частоту, поляризацию и режим излучения ВН, можно управлять спектральными характеристиками ИИН, что имеет важное значение для использования ИИТ при решении исследовательских и прикладных задач [22].

Доплеровские измерения спектра рассеянных на МИИН радиоволн КВ- и УКВ-диапазонов позволяют получать информацию о движении рассеивающих неоднородностей внутри возмущенной области ионосферы. На основе измерения доплеровских спектров рассеянных сигналов в [23] было установлено, что во время нагрева в возмущенной области ионосферы индуцируются радиальные движения МИИН от ее центра к периферии. Кроме того, этот метод позволяет изучать характеристики перемещающихся ионосферных возмущений [24] и локальных геомагнитных пульсаций [25], а также измерять напряженность электрического поля в F-области ионосферы [26]. В работах [27, 28] исследовано явление уширения доплеровского спектра рассеянного сигнала в условиях, когда частота ВН порядка или немного выше частоты гармоники гирорезонанса в области взаимодействия ВН с плазмой. Последнее может указывать на то, что в процессах, определяющих динамику декаметровых МИИН, существенную роль играют возбуждаемые мощной радиоволной электронные бернштейновские плазменные колебания.

2.3. Искусственное радиоизлучение ионосферы

Начиная с момента обнаружения искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ) [29, 30] уже более 30 лет продолжают интенсивные исследования его свойств. Это излучение появляется в результате различного рода взаимодействий электромагнитных волн и высокочастотных плазменных колебаний с низкочастотной плазменной турбулентностью, в образовании и эволюции которой определяющую роль играют МИИН. Взаимосвязь и взаимовлияние различных плазменных процессов при генерации ИРИ в магнитоактивной плазме обуславливают его широкие диагностические возможности для изучения свойств как искусственной, так и естественной плазменной турбулентности. Сегодня известно более 15 компонент ИРИ, подробное описание которых можно найти в обзоре [31]. К основным его компонентам, спектральные и динамические характеристики которых изучены наиболее детально, относятся:

- 1) главный спектральный максимум излучения (down-shifted maximum, DM);
- 2) широкополосное излучение в области отрицательных отстроек (broad continuum, BC);
- 3) максимум в области положительных отстроек (up-shifted maximum, UM);

4) широкополосное излучение в области положительных отстроек (broad up-shifted maximum, BUM), генерация которого наблюдается, когда частота ВН близка к частоте гармоник гиорезонанса в области взаимодействия мощной радиоволны с плазмой или немного превышает ее (в условиях выполняемых на стенде "Сура" измерений значение гирочастоты электронов $f_{ce} \approx 1,3 - 1,35$ МГц);

5) стрикционная узкополосная компонента излучения (ponderomotive narrow continuum, NC_p), наблюдаемая на стадии развития стрикционной параметрической неустойчивости;

6) тепловая узкополосная компонента излучения (thermal narrow continuum, NC_{th}), наблюдаемая на стадии развития тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости;

7) подобное BUM широкополосное излучение в области положительных отстроек, которое обнаруживается в областях частот между гирогармониками (broad up-shifted structure, BUS).

Генерация различных компонент в спектре ИРИ в сильной степени зависит от частоты и мощности ВН, а также от ионосферных условий. Выполненные на стенде "Сура" исследования [32] во всем диапазоне его частот 4,3–9,5 МГц показали (рис. 1), что, во-первых, вид спектра ИРИ изменяется кардинальным образом в узкой области частот ВН, когда $f_{ВН} \approx n f_{ce}$, где n — номер гирогармоники, во-вторых, излучение наиболее интенсивно в области между частотами четвертой и пятой гирогармоник и, в-третьих, влияние гиорезонансов проявляется также и достаточно далеко от областей, в которых $f_{ВН} \approx n f_{ce}$.

На основе ИРИ были развиты методы диагностики высокочастотной и низкочастотной плазменной турбулентностей, позволившие провести измерения характерных времен развития и релаксации ленгмюровских и верхнегибридных плазменных волн [33], изучить влияние МИИН на генерацию различных компонент ИРИ [34], а также исследовать эффекты, наблюдающиеся при

нелинейном взаимодействии двух мощных радиоволн в магнитоактивной плазме [35]. С помощью метода диагностического ИРИ были изучены особенности процессов переноса в верхней ионосфере [36]. Установлено, что характерные скорости распространения плазменных возмущений вдоль геомагнитного поля $V_{||}$ оказываются порядка значения тепловой скорости электронов $V_{Te} \approx 2 \times 10^7$ см с⁻¹ для типичных условий экспериментов, проводимых нами в F₂-слое ионосферы, или даже могут значительно превышать V_{Te} . Это может указывать на важность учета потоков тепловых и ускоренных электронов, а также токов короткого замыкания по фоновой плазме в механизмах генерации ИИТ вдали от областей резонансного взаимодействия мощной волны с плазмой [36–38].

В последние годы была обнаружена генерация искусственного радиоизлучения в дециметровом диапазоне длин волн (на частотах ~ 600 МГц) [39]. Считается, что ИРИ здесь возникает при переходе электронов между высокими ридберговскими уровнями молекул нейтральных компонент ионосферной плазмы, возбужденных ускоренными электронами.

2.4. Пространственная структура возмущенной области ионосферы

Впервые измерения с помощью метода спутниковой радиотомографии пространственной структуры возмущенной области ионосферы над стендом "Сура" были выполнены в августе 2002 г. [40] и повторены в августе 2005 г. На рисунке 2 представлены томограммы, полученные в вечерние (рис. 2а, б) и ночные (рис. 2в, г) часы наблюдений, когда ВН отражалась вблизи максимума F₂-слоя ионосферы на высотах $\sim 270 - 300$ км. Представлены томограммы как для плотности плазмы (рис. 2а, в), так и для разностной реконструкции (рис. 2б, г), показывающей флуктуации плотности плазмы относительно ее среднего значения. Обработка экспериментальных данных проводилась с использованием байесовского вероятностного подхода в лучевой (фазовой)

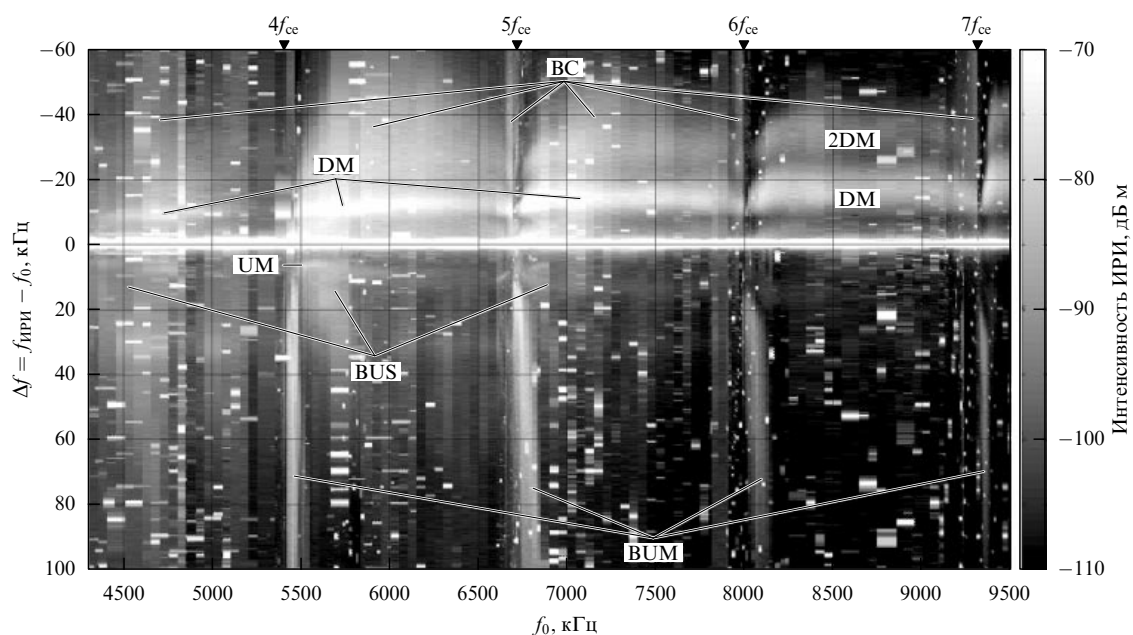


Рис. 1. Зависимость спектральной структуры ИРИ от частоты волны накачки в диапазоне 4,3–9,5 МГц.

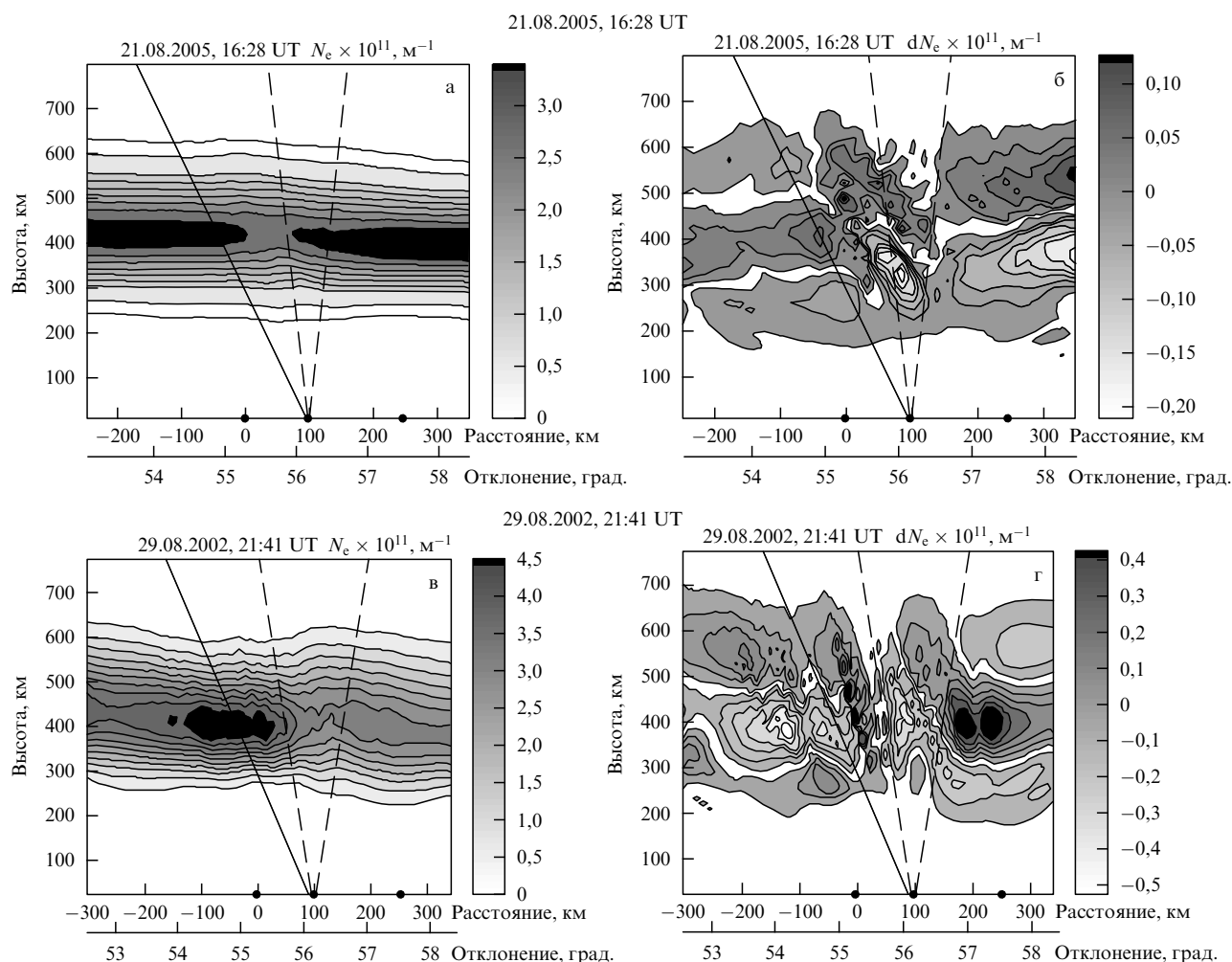


Рис. 2. Томографическая реконструкция профиля плотности плазмы (а, в) и вариаций плотности (б, г) для условий вечерней ионосферы (а, б) и ночной ионосферы (в, г).

томографии, основанного на теории стохастического обращения [41].

Из рисунка 2 хорошо видно, что возмущения плотности плазмы имеют выраженную ориентацию вдоль силовых линий геомагнитного поля, наблюдаются во всем возможном при данной геометрии эксперимента интервале высот, от ~ 200 км до ~ 600 – 700 км, и возбуждаются в более широкой горизонтальной области (± 200 км относительно центра луча мощных радиоволн), чем область ионосферы, засвеченная главным лепестком диаграммы направленности антенны стэнда (~ 60 – 100 км). Диаграмма направленности основного лепестка антенны стэнда показана штриховыми линиями, направление геомагнитного поля для местоположения стэнда "Сура" изображено сплошной линией. Из представленных томограмм также видно, что в южном секторе диаграммы направленности антенны стэнда развиваются полости с сильным (до 20 %) обеднением плазмы. С использованием нагрева наклонными пучками мощных радиоволн установлено, что такие структуры наиболее эффективно возбуждаются, когда направление излучения мощной радиоволны в ионосфере близко к направлению линий геомагнитного поля, и представляют собой проявление *эффекта магнитного зенита* [19]. Также установлено, что неоднородности

плотности плазмы с $l_{\perp} \approx 100$ – 1000 м, отвечающие за сцинтилляции прошедшего через возмущенную область ионосферы сигнала, сосредоточены преимущественно в крупномасштабных образованиях с сильным уменьшением плотности плазмы.

Обращает на себя внимание наличие областей с выраженной волнообразной формой возмущений плотности плазмы, которые появляются на высоте отражения ВН и уходят вверх вдоль геомагнитного поля до высот ~ 500 – 600 км. Из рисунка 2 видно, что такие возмущения сосредоточены в узких силовых трубках геомагнитного поля с поперечными размерами ~ 30 км и имеют характерный масштаб вдоль поля ~ 75 км для вечерней ионосферы и ~ 55 км для ночной. Природа образования таких возмущений пока не ясна.

Модификация в условиях дневной ионосферы, когда ВН отражается на высотах ~ 200 – 220 км, не приводит к образованию областей с сильным обеднением плазмы, возмущения плотности плазмы имеют меньшие, чем ночью, значения и большие (≥ 50 – 100 км) масштабы. На этих высотах не наблюдаются также отмеченные выше вытянутые вдоль геомагнитного поля волнообразные структуры.

В 2005 г. в НИРФИ начались исследования индуцированных излучением стэнда "Сура" плазменных возмуще-

ний на высотах ~ 710 км с помощью французского микро-спутника DEMETER (от англ. — Detection of Electromagnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions), который обладает уникальным набором инструментов, позволяющим измерять различные параметры плазменных возмущений. Первые измерения, выполненные в рамках программы "Сура"–DEMETER при нагреве ночной F_2 -области ионосферы немодулированной ВЧ, отражающейся вблизи максимума F_2 -слоя ионосферы, позволили установить следующее [42]:

- на высотах ~ 710 км наблюдаются сильные (до 5–10 %) искусственные флуктуации температуры T_e и плотности N_e электронов и плотности ионов N_i ; вариации температуры ионов T_i не превышают значений 1–2 %, определяемых уровнем ее естественных фоновых вариаций;

- появление искусственных флуктуаций T_e , N_e и N_i регистрируется на расстояниях до 400 км от центра возмущенной геомагнитной трубки, опирающейся на область ионосферы, засвеченную пучком мощных радиоволн;

- в центральной части возмущенной геомагнитной трубки наблюдается возбуждение колебаний электрического поля на частотах $f \leq 1$ кГц.

Нетрудно видеть, что, в целом, имеется хорошее согласие вариаций плотности плазмы, измеренных радиотомографическими и спутниковыми методами.

В заключение этого раздела отметим, что, несмотря на большой объем выполненных исследований свойств ИИТ, до сих пор остается неизученным ряд принципиальных вопросов. Так, отсутствие адекватных теоретических моделей генерации различных компонент ИРИ сдерживает развитие на его основе методов диагностики естественной и искусственной плазменной турбулентности. Остаются пока еще слабо изученными причины, приводящие к генерации ИИТ далеко за пределами центральной части возмущенной области, в которой происходит развитие стрикционной и тепловой (резонансной) параметрических неустойчивостей и наблюдается интенсивный разогрев плазмы. Требуют также дальнейшего изучения вопросы, связанные с природой индуцированных мощной радиоволной в возмущенной области ионосферы дрейфовых и волнообразных движений. Необходимо более детально изучить различные проявления влияния ускоренных плазменной турбулентностью электронов на динамику развития взаимодействия мощной радиоволны с плазмой и на генерацию различных составляющих ИИТ.

В данном докладе мы не ставили целью представить результаты исследований управления каналом распространения КВ- и УКВ-радиоволн за счет их рефракции на крупномасштабных ИИН или рассеяния на МИИН. Эти исследования составляют отдельную важную область проводимых на стенде "Сура" экспериментов, значительная часть которой относится к изучению механизмов дальнего распространения КВ-радиоволн в контролируемых условиях. Отметим только, что в [43] была экспериментально показана возможность управления дальним распространением коротких радиоволн путем вывода волноводных мод из ионосферного канала за счет ракурсного рассеяния на МИИН. В работе [26] было продемонстрировано, что спорадический Е-слой оказывает существенное влияние на появление сигналов с частотой, превышающей максимально применимую

частоту (МПЧ) F-области, когда их вывод на поверхность Земли может осуществляться за счет ракурсного рассеяния на МИИН. Важной вехой в проведении исследований по данной тематике является выполненный в 2006 г. в рамках проекта RPO-1334-NO-02 Американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF) эксперимент "Сура"–HAARP. В этом эксперименте была создана управляемая с двух концов трасса дальнего канального распространения КВ-радиоволн. Возбуждение волноводных мод ионосферного волноводного канала происходило при рассеянии радиоволн на МИИН, индуцируемых в ионосфере излучением HAARP, а вывод канальных мод осуществлялся за счет их ракурсного рассеяния на МИИН, индуцируемых стендом "Сура" [44]. Наличие такой трассы открывает новые возможности исследования свойств канального распространения радиоволн.

3. Развитие исследований эффекта генерации низкочастотных радиоволн в ионосфере под воздействием мощного модулированного коротковолнового радиоизлучения

С самого начала исследований на еще сравнительно маломощном стенде "Зименки" (мощность передатчика 100 кВт) руководителем работы Г.Г. Гетманцевым была поставлена задача по обнаружению эффекта генерации низкочастотных радиоволн в ионосфере при воздействии на нее модулированными мощными КВ-радиоволнами. Постановка этой задачи была основана на теории нелинейных явлений в плазме, развитой еще в 1950-х годах В.Л. Гинзбургом и А.В. Гуревичем [3], согласно которой при воздействии на ионосферную плазму электромагнитным сигналом, содержащим в спектре две несущие частоты, должны появиться сигналы на комбинационных частотах $f_1 \pm f_2$. После ряда попыток эффект генерации сигнала комбинационной частоты (СКЧ) на частоте $\Omega = f_1 - f_2$ был обнаружен [6, 45]. Более детальные исследования характеристик СКЧ — спектральные, поляризационные измерения, определение высоты источника низкочастотного излучения — привели к однозначному выводу о природе этого радиоизлучения. Было установлено, что механизм генерации наблюдаемых СКЧ непосредственно связан с модуляцией квазистационарных ионосферных токов, постоянно присутствующих в ионосфере на высотах динамо-области (≈ 70 –130 км) [46, 47]. В 1981 г. было зарегистрировано открытие "Явление генерации электромагнитных волн ионосферными токами под воздействием на ионосферу модулированного коротковолнового радиоизлучения". Открытый эффект получил название "эффект Гетманцева" [48]. При современных потенциалах нагревных стендов ($P_{эфф} \approx 100$ –300 МВт) и развитых методах диагностики низкочастотные излучения уверенно регистрируются не только в ОНЧ-диапазоне на частотах 0,5–10 кГц, но и в диапазоне геомагнитных пульсаций на частотах ≤ 10 Гц.

После ввода в строй в 1981 г. стенда "Сура" (суммарная мощность КВ-передатчиков стенда $P = 750$ кВт), появилась возможность проводить исследования на качественно новом уровне, поскольку в несколько раз повысился уровень ионосферного сигнала, что позволило выполнить более тщательную проверку положе-

ний развитой к тому времени теории эффекта генерации СКЧ [49, 50]. Кроме того, специально для проведения исследований эффектов в нижней ионосфере в 1985 г. на базе стенда "Сура" были дополнительно построены два СВ-передатчика (с суммарной мощностью $P = 200$ кВт), нагруженных на 8-элементную антенную решетку зенитного излучения волн с круговой поляризацией на частоте, близкой к гирочастоте электронов в ионосфере. Это обеспечило более эффективный омический нагрев плазмы и существенно расширило возможности проводимых исследований. Результаты выполненных на стенде "Сура" экспериментов и их сопоставление с теоретическими представлениями суммированы в обзоре [51].

Проведенные на стендах "Зименки" и "Сура" эксперименты позволили изучить:

- спектральные характеристики СКЧ;
- суточный ход интенсивности СКЧ и ее зависимость от частоты, поляризации и мощности ВН;
- поляризационные характеристики СКЧ;
- тонкую структуру ионосферных токов;
- зависимость параметров низкочастотного сигнала от высоты положения источника.

В настоящее время достаточно хорошо отработаны методики приема и обработки СКЧ, найдены оптимальные условия их генерации. Это позволяет сегодня использовать эффект Гетманцева для диагностики параметров нижней ионосферы (динамо-области, в которой протекают наиболее мощные ионосферные токи) и магнитосферы, а также для глубинного зондирования земной поверхности. При этом можно получать информацию относительно:

- электрических полей и токов в ионосфере и магнитосфере Земли;
- волноводных и резонансных свойств ионосферы и условий распространения низкочастотного излучения в волноводе Земля–ионосфера, прохождения излучения через ионосферу и его распространения в магнитосфере Земли;
- характеристик взаимодействия низкочастотных волн с энергичными протонами в радиационных поясах Земли;
- влияния сейсмической активности и внутренних гравитационных волн на динамику верхней атмосферы;
- глубинного распределения проводимости земной поверхности, что дает сведения о ее геологической структуре.

С использованием предоставляемых стендом "Сура" возможностей управления пучком мощных радиоволн в пространстве были выполнены исследования нового типа ионосферного источника — антенны бегущей волны в диапазоне нескольких килогерц — и изучены диаграммные свойства движущегося ионосферного источника [52], что, по сути, представляет собой излучение Вавилова–Черенкова от сверхсветового "зайчика", формирующегося в ионосфере качающейся диаграммой направленности. Способность стенда работать одновременно на двух частотах ω_1 и ω_2 позволила также исследовать кубическую тепловую нелинейность, что, в свою очередь, дало возможность генерировать в ионосфере низкочастотный сигнал с частотой $\Omega = \omega_1 - \omega_2$ без использования амплитудной модуляции радиоволн, посылаемых в ионосферу [53].

В работе [54] было предсказано, что в ионосфере должна существовать естественная резонансная струк-

тура — ионосферный альвеновский резонатор (ИАР), расположенный на высотах 100–1000 км, который был открыт экспериментально в [55]. Измерение его параметров сейчас широко используется для диагностики верхней ионосферы.

Развитые в процессе проведения исследований техника и методы измерения слабых низкочастотных электромагнитных излучений с успехом применяются для изучения естественного шумового фона в диапазоне частот 10^{-3} –10 Гц, который занимает особое место в геофизических исследованиях, поскольку в этот диапазон попадают частоты основных резонансов околоземного пространства: магнитогидродинамические (МГД) резонансы магнитосферы Земли, альвеновские резонансы отдельных силовых трубок геомагнитного поля, шумовые резонансы полости Земля–ионосфера, частоты альвеновских мазеров — генераторов короткопериодных геомагнитных пульсаций, а также частоты ионосферного альвеновского резонатора. Это позволяет проводить исследования динамики процессов в магнитосфере Земли, изучать свойства МГД-волн в области ИАР на высотах F-области ионосферы, изучать эффективность возбуждения ИАР различными источниками (магнитосферными, ОНЧ-излучением от нагревного стенда, потоками энергичных частиц), диагностировать верхнюю ионосферу на высотах 300–3000 км по характеристикам пространственно-временного поведения спектра атмосферного шумового фона, вариации которого связаны с изменениями геофизических условий и крупномасштабной структурой профиля электронной концентрации в верхней части F-области.

Низкочастотные сигналы, генерируемые в ионосфере стендом "Сура" в диапазоне крайне низких частот (КНЧ), используются в качестве контролируемого источника для развития новых методов измерений пространственных характеристик радиоволн с частотой менее 30 Гц. В частности, в 2005 г. был опробован дифференциальный метод градиентометрии [56], основой которого является возможность регистрации на шумовом фоне большой мощности слабых сигналов путем регистрации амплитуды в двух пространственно разнесенных точках с последующим их вычитанием. Например, поскольку грозовой шум однороден на больших пространственных масштабах, синхронные записи, полученные в двух разделенных несколькими десятками или даже несколькими сотнями километров пунктах обладают высокой степенью когерентности. Это позволяет (рис. 3) выделять и экспериментально исследовать слабые эмиссии с малыми масштабами когерентности.

В настоящее время исследования эффекта генерации низкочастотных радиоволн ионосферным источником интенсивно развиваются в США в экспериментах на нагревных стендах HAARP и HIPAS. Цель этих исследований — поиск возможностей повышения интенсивности и надежности ионосферного источника до уровня требований, необходимых для решения задач связи, зондирования земных недр и магнитосферы. Что касается стенда "Сура", то перспективы его использования связаны с развитием современных автоматизированных систем управления параметрами и режимом его работы, с восстановлением радиопередаточного комплекса с частотой излучения, близкой к гирочастоте электронов, использование которого значительно расширяет возможности стенда для генерации СКЧ, а также с разработкой

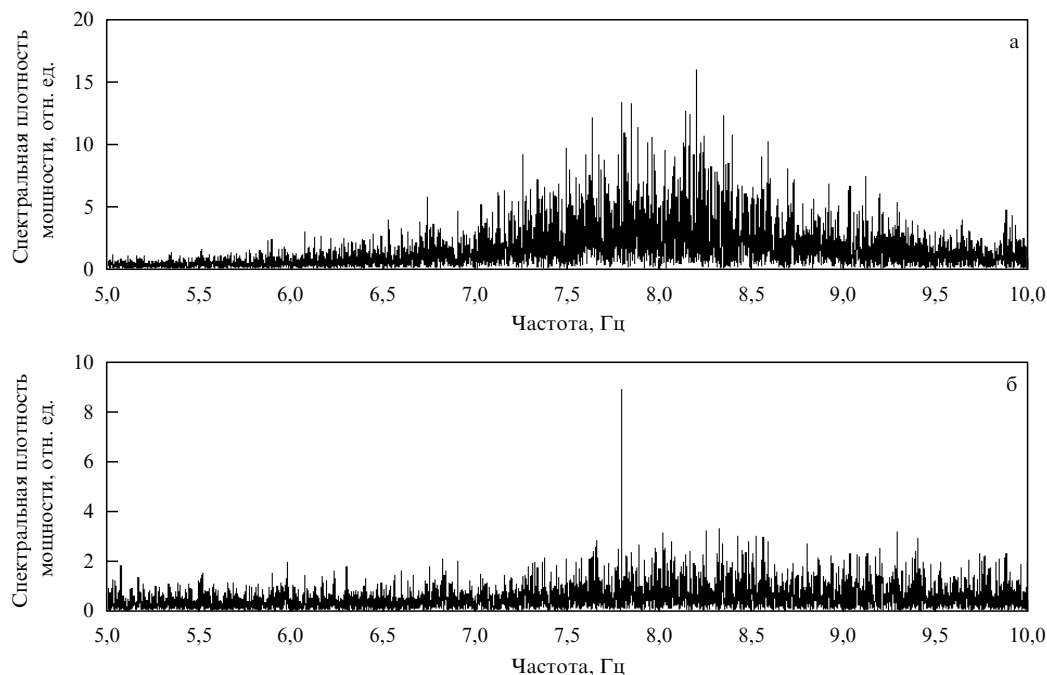


Рис. 3. Спектральные плотности мощности сигналов двух датчиков (а) и спектральная плотность мощности разностного сигнала (б), где хорошо виден сигнал на частоте 7,8 Гц.

новых сверхмощных импульсных оконечных каскадов. Это даст возможность продолжить на новом уровне исследования с целью развития практических приложений ионосферной генерации низкочастотных радиоволн.

4. Искусственные периодические неоднородности

Воздействие мощных радиоволн на ионосферную плазму сопровождается не только развитием ИИТ, но и созданием упорядоченных структур. К ним, в первую очередь, относятся искусственные периодические неоднородности (ИПН), которые создаются в поле мощной стоячей радиоволны, возникающей в результате интерференции падающей и отраженной от ионосферы волн. В 1970 г. И.М. Виленский предсказывал в [57], что в пучностях стоячей волны будет происходить нагрев электронного газа с образованием периодической температурной структуры с пространственным периодом, равным половине длины мощной радиоволны. Температурные неоднородности в свою очередь будут формировать неоднородности электронной концентрации.

Эксперименты по обнаружению ИПН были инициированы Г.Г. Гетманцевым в начале выполнения исследований на нагревном стенде "Зименки" (НИРФИ). Такие неоднородности были обнаружены в 1975 г. [7]. Дальнейшие исследования показали, что ИПН формируются в высотном интервале от ~ 60 км до высоты отражения мощной радиоволны в ионосфере. На основе теоретических и экспериментальных исследований было установлено, что процессы образования и релаксации ИПН, которые оказались значительно сложнее, чем предсказывалось И.М. Виленским, имеют разную физическую природу в разных слоях ионосферы. Так, на высотах области D ($h \approx 50-90$ км) образование ИПН обусло-

влено температурной зависимостью коэффициента прилипания электронов к молекулам кислорода; в области E ($h \approx 90-130$ км) неоднородности создаются вследствие диффузионного перераспределения плазмы под действием избыточного давления электронной компоненты, нагретой в пучностях стоячей радиоволны; наконец, в области F ($h \approx 200-350$ км) ИПН образуются под действием пондеромоторной стрикционной силы с возбуждением ионно-звуковых колебаний [58].

Поскольку ИПН упорядочены в пространстве, то рассеянные ими радиоволны будут иметь значительную амплитуду только в случае синфазного сложения сигналов от всех неоднородностей, находящихся в исследуемом объеме. Это накладывает определенные условия на длины волн мощного передатчика и импульсного радиолокатора. Условие резонансного рассеяния (условие Брэгга – Вульфа) в случае обратного рассеяния от ИПН означает выполнение равенства $\lambda_1 = \lambda_2$, где λ_1 и λ_2 — соответственно длины волн мощного радиоизлучения, создающегося в плазме ИПН, и радиолокатора. Это обстоятельство обусловило другое часто употребляемое название метода — метод резонансного рассеяния радиоволн. Условие $\lambda_1 = \lambda_2$ можно выполнить в двух случаях, которые, по сути, определяют два возможных способа наблюдения и регистрации ИПН. Первый способ, который применялся в большинстве экспериментов, основан на создании и локализации ИПН волнами одной частоты и поляризации. В этом случае условием регистрации ИПН является равенство $f_1 = f_2$ и рассеянный сигнал наблюдается со всех высот, на которых ИПН имеют достаточную амплитуду. Второй способ требует для создания ИПН и их локализации применения радиоволн с разной частотой и разной поляризацией. Тогда условием регистрации рассеяния от ИПН будет соотношение $f_1 n_1^{o,x} = f_2 n_2^{x,o}$, где n_1 и n_2 — показатели преломления обыкновенной (верхний индекс "о") и необыкновенной

(верхний индекс "х") волн на соответствующих частотах. При заданных частотах f_1 и f_2 последнее условие практически однозначно определяет электронную концентрацию, что лежит в основе определения высотной зависимости электронной концентрации $N(h)$.

Для получения высотного профиля электронной концентрации $N_e(h)$ необходимо перестраивать радиолокатор в диапазоне ~ 1 МГц около частоты нагревного передатчика и регистрировать высоты сигналов, рассеянных на ИПН. Важной особенностью метода является возможность измерения $N_e(h)$ -профиля в долине (межслоевой впадине) между областями E и F. В этом методе верхний (по высоте) предел измерения обусловлен высотой отражения мощной волны, а нижний — шириной спектра зондирующего импульса Δf_2 . При $f_1 - f_2 < \Delta f_2$ пространственный синхронизм между волной, создающей ИПН, и зондирующей их диагностической волной выполняется почти на всех высотах области D, поэтому определить высоту рассеянного сигнала становится трудно. Преодоление этой трудности возможно путем измерения фазы рассеянного сигнала, так как набег фазы по высоте пропорционален интегральной величине электронной концентрации. На этом основан фазовый способ измерения электронной концентрации [58].

Для создания ИПН обычно используются волны с необыкновенной поляризацией, поскольку они не возбуждают неустойчивостей ионосферной плазмы и, следовательно, с меньшими потерями отражаются от F-области ионосферы, причем отраженная волна обладает более регулярными характеристиками. Как правило, мощная радиоволна излучается на частотах $\sim 4-6$ МГц. Измерения методом резонансного рассеяния проводятся следующим образом. Воздействие на ионосферу осуществляется с периодом в несколько десятков секунд. В каждом цикле измерений для создания ИПН мощный передатчик несколько секунд работает в непрерывном режиме, излучая вертикально вверх волны с необыкновенной поляризацией, а затем переводится в импульсный режим, в котором излучает короткие импульсы (длительностью 20–30 мкс) с той же частотой и поляризацией. Частота повторения радиоимпульсов составляет несколько десятков герц. Рассеянные сигналы от каждого из зондирующих импульсов принимаются вспомогательной антенной решеткой. Из принятых сигналов выделяется требуемая волна с круговой поляризацией, которая усиливается приемником. Амплитуда этой волны регистрируется в цифровом виде с помощью аналого-цифрового преобразователя в интервале высот 50–400 км в виде синусной и косинусной составляющих. Схема эксперимента представлена на рис. 4, пример регистрации сигналов приведен на рис. 5.

Первичная обработка данных состоит в вычислении амплитуды и фазы сигнала на каждой высоте для каждого цикла нагрева и аппроксимации их временной зависимости линейными функциями вида $\ln A(t) = \ln A_0 - t/\tau$, где τ характеризует время жизни ИПН после выключения нагревного передатчика. Понимание процессов образования ИПН на разных высотах позволило разработать новые способы определения основных параметров атмосферы и ионосферной плазмы. Все эти способы основаны на создании ИПН, локации их пробными радиоволнами, приеме сигналов, рассеянных неоднородностями, определении высотно-временных характеристик рассеянных сигналов.

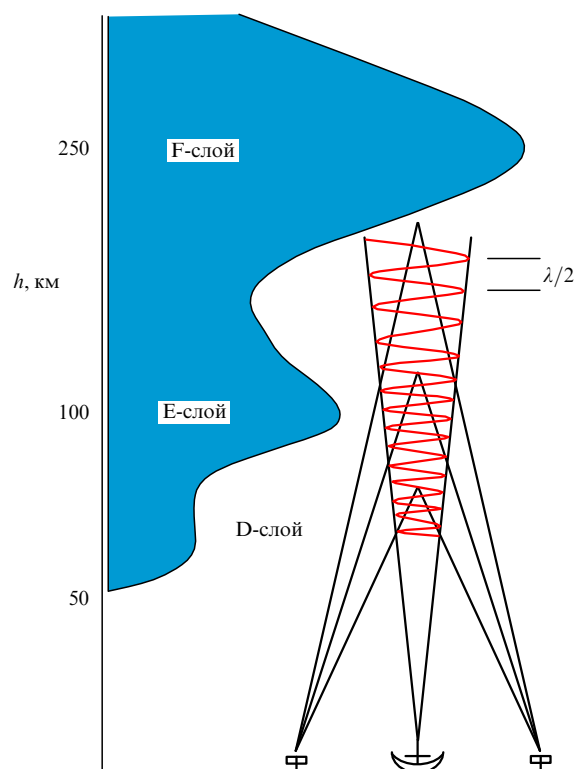


Рис. 4. Схема создания в ионосфере искусственных периодических неоднородностей ионосферной плазмы и локации их импульсными сигналами.

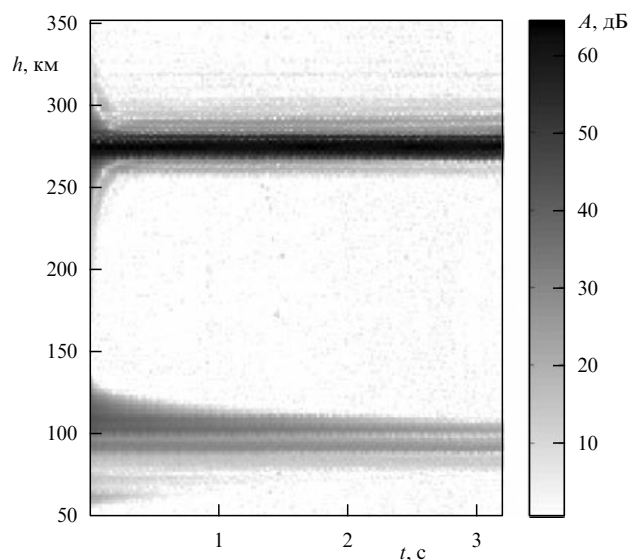


Рис. 5. Пример регистрации сигнала, рассеянного на ИПН. Максимальный сигнал в области E на высотах 100–130 км, слабый сигнал в D-области (60–80 км). На высоте 270 км зеркально отраженный сигнал от F-слоя и ниже быстро затухающий ионный звук.

Теория образования ИПН и основные результаты экспериментальных исследований ионосферы данным методом подробно изложены в монографии [58]. На основе применения ИПН можно определять:

- высотное распределение электронной концентрации, в том числе для межслоевой E-F-впадины (высоты 60–250 км);

- температуру и плотность атмосферы на высотах Е-области (100–130 км);
- скорость вертикального движения в D- и Е-областях (60–130 км);
- характерную турбулентную скорость на высотах турбопаузы и высоту турбопаузы (90–100 км);
- относительную концентрацию отрицательных ионов кислорода, концентрацию атомарного кислорода и возбужденного молекулярного кислорода в состоянии $^1\Delta_g$ в D-области (60–90 км);
- ионный состав спорадического слоя Е (85–130 км);
- электронную и ионную температуры в F-области (200–300 км).

Кроме перечисленного выше, метод резонансного рассеяния сигналов на ИПН позволяет также определять параметры внутренних гравитационных волн и их спектральные характеристики, исследовать неоднородную структуру нижней ионосферы, в том числе расслоение регулярного Е-слоя, обнаруживать слабые спорадические слои ионизации, недоступные для регистрации обычными ионозондами, дополнительные слои в профилях электронной концентрации, начиная с нижней части D-области и вплоть до высоты максимума F-слоя, исследовать особенности восходных и заходных явлений в области D.

Метод исследования ионосферы с помощью ИПН продолжает развиваться. Недавно предложен новый способ определения электронной концентрации по измерениям времени релаксации ИПН на двух достаточно разнесенных частотах [59]. При этом появляется возможность более точного измерения высотного профиля электронной концентрации в Е-области, температуры и плотности нейтральной атмосферы на высотах 90–115 км, а также определения независимо друг от друга коэффициента амбиполярной диффузии и скорости турбулентного движения.

Сравнивая метод ИПН с другими дистанционными методами зондирования ионосферы, можно заключить, что этот метод значительно превосходит их по информативности. Способы определения параметров плазмы с помощью ИПН имеют высокое временное разрешение, чем выгодно отличаются, например, от метода некогерентного рассеяния, и могут соперничать с ракетными исследованиями, значительно превосходя их по экономичности. Метод экологически чист, так как не вносит в атмосферу дополнительных примесей. Нагрев электронной компоненты плазмы при измерениях незначителен и не нарушает теплового баланса нейтральной атмосферы. Важно, что все способы диагностики плазмы с помощью ИПН легко объединяются в одну комплексную методику, которая позволяет проводить исследования и вести мониторинг ионосферы в широком интервале высот — от области D до области F [58].

5. Заключение

В настоящем сообщении кратко отражены основные результаты исследований по модификации ионосферы мощным КВ-радиоизлучением, которые были выполнены в 1973–2006 гг. сначала на нагревном стенде "Зименки", а с 1981 г. на стенде "Сура". Обнаруженные в этих экспериментах новые эффекты намного превосходили ожидаемые явления, определяемые омическим нагревом плазмы мощными радиоволнами. Проведенные экспери-

менты позволили исследовать свойства различного типа неустойчивостей, приводящих к генерации искусственной ионосферной турбулентности, изучить механизмы генерации сигналов комбинационных частот и указать области их практического использования, разработать новые радиофизические методы измерения параметров ионосферы и плазменной турбулентности с помощью искусственных периодических неоднородностей, искусственного радиоизлучения ионосферы и ракурсного рассеяния радиоволн КВ- и УКВ-диапазонов. Это открыло новые перспективы исследований, в которых ионосфера будет использоваться как природная плазменная лаборатория, где возможна постановка экспериментов по широкому кругу проблем физики плазмы, геофизики и физики космоса.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 04-02-17333, 04-02-16612, 05-02-16493, 04-05-64140, 05-05-64111, 05-05-64304 и 06-05-64995) и INTAS (грант 03-51-5583).

Список литературы

1. Genkin L G, Erukhimov L M *Phys. Rep.* **186** 97 (1990)
2. Bailey V A *Philos. Mag.* **23** 929 (1937)
3. Гинзбург В Л, Гуревич А В *УФН* **70** 201, 393 (1960)
4. *Radio Sci.* **9** (11) (1974)
5. Гетманцев Г Г и др. *Письма в ЖЭТФ* **18** 621 (1973)
6. Гетманцев Г Г и др. *Письма в ЖЭТФ* **20** 229 (1974)
7. Беликович В В и др. *Письма в ЖЭТФ* **22** 497 (1975)
8. *J. Atm. Terr. Phys.* **44** (12) (1982)
9. *J. Atm. Terr. Phys.* **47** (12) (1985)
10. *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* **59** (18) (1997)
11. *Изв. вузов Радиофизика* **37** (5) (1994)
12. *Изв. вузов Радиофизика* **42** (7, 8) (1999)
13. *Изв. вузов Радиофизика* **48** (9) (2005)
14. Frolov V L et al. *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* **59** 2317 (1997)
15. Васьков В В, Гуревич А В *Изв. вузов. Радиофизика* **16** 188 (1973)
16. Грач С М и др. "Тепловая параметрическая неустойчивость в ионосферной плазме", в сб. *Тепловые нелинейные явления в плазме* (Отв. ред. В Ю Трахтенгерц) (Горький: ИПФ АН СССР, 1979) с. 46
17. Васьков В В и др. "Самофокусирующая и резонансная неустойчивость в ионосфере", в сб. *Тепловые нелинейные явления в плазме* (Отв. ред. В Ю Трахтенгерц) (Горький: ИПФ АН СССР, 1979) с. 81
18. Литвак А Г *Изв. вузов. Радиофизика* **11** 1433 (1968)
19. Гуревич А В, Зыбин К П, Карлсон Х С *Изв. вузов. Радиофизика* **48** 772 (2005)
20. Ерухимов Л М и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **30** 208 (1987)
21. Насыров А М *Рассеяние радиоволн анизотропными ионосферными неоднородностями* (Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1991)
22. Frolov V L *Int. J. Geomagn. Aeronom.* **4** (2) 159 (2003)
23. Yampolski Y M et al. *J. Geophys. Res.* **102** (A4) 7461 (1997)
24. Blagoveshchenskaya N F et al. *Ann. Geophys.* **24** 2333 (2006)
25. Koloskov A V et al. *J. Geophys. Res.* **107** (A7); SIA1 (2002)
26. Урядов В П и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **47** 722 (2004)
27. Ponomarenko P V, Leyser T B, Thidé B *J. Geophys. Res.* **104** (A5) 10081 (1999)
28. Kagan L M et al. *Radio Phys. Radio Astron.* **11** 221 (2006)
29. Беликович В В и др., в сб. *XIII Всесоюз. конф. по распространению радиоволн, Горький, июнь 1981*: Тез. докл. Ч. 1 (М.: Наука, 1981) с. 107
30. Thidé B, Kopka H, Stubbe P *Phys. Rev. Lett.* **49** 1561 (1982)
31. Leyser T B *Space Sci. Rev.* **98** 223 (2001)
32. Frolov V L et al. *Geophys. Res. Lett.* **28** 3103 (2001)
33. Сергеев Е Н и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **41** 313 (1998)
34. Сергеев Е Н и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **42** 619 (1999)
35. Фролов В Л и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **48** 110 (2005)
36. Фролов В Л, Сергеев Е Н, Штуббе П *Изв. вузов. Радиофизика* **45** 121 (2002)
37. Фролов В Л и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **49** 643 (2006)

38. Бахметьева Н В и др. *Геомагнетизм и астрономия* **32** (3) 180 (1992)
39. Grach S M et al. *Ann. Geophys.* **20** 1687 (2002)
40. Tereshchenko E D et al. *Phys. Lett. A* **325** 381 (2004)
41. Nygrén T et al. *Radio Sci.* **32** 2359 (1997)
42. Frolov V L et al. *Ann. Geophys.* (2006) (submitted for publ.)
43. Uryadov V P et al. *J. Atm. Terr. Phys.* **57** 1263 (1995)
44. Frolov V L et al. "Artificial Ionospheric Turbulence and Radio Wave Propagation", in *RF Ionospheric Interactions Workshop*. 25–28 April 2006, Santa Fe, New Mexico, USA Summary of presentations on CD #7
45. Беликович В В и др. *УФН* **113** 732 (1974)
46. Котик Д С, Трахтенгерц В Ю *Письма в ЖЭТФ* **21** 114 (1975)
47. Капустин И Н и др. *Письма в ЖЭТФ* **25** 248 (1977)
48. Гетманцев Г Г и др. "Явление генерации электромагнитных волн ионосферными токами под воздействием на ионосферу модулированного коротковолнового радиоизлучения" *Бюлл. изобрет.* (8) 3 (1981)
49. Беллюстин Н С и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **18** 1323 (1975)
50. Котик Д С и др. "К теории сигналов комбинационных частот", в сб. *Нелинейные явления в ионосфере* (Мурманск: Изд-во ПГИ КФ АН СССР, 1979) с. 114
51. Беляев П П и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **30** 248 (1987)
52. Котик Д С и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **37** 783 (1994)
53. Kotik D S, Ermakova E N *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* **60** 1257 (1998)
54. Поляков С В, Рапопорт В О *Геомагнетизм и астрономия* **21** 816 (1981)
55. Belyaev P P et al. *J. Atm. Terr. Phys.* **52** 781 (1990)
56. Поляков С В и др. *Изв. вузов. Радиофизика* (2006) (в печати)
57. Виленский И М *Докл. АН СССР* **191** 1041 (1970)
58. Беликович В В и др. *Исследование ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей* (Н. Новгород: ИПФ РАН, 1999) с. 155
59. Беликович В В и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **49** 744 (2006)