

14. Кравцов Б.А., Тинин М.В., Черкашин Ю.Н. О возможных механизмах возбуждения ионосферных волновых каналов // Геомагнетизм и аэрономия. 1979. Т. 19. 35. С. 769-787.
15. Баранов В.А., Попов А.В., Черкашин Ю.Н. Влияние рассеяния на крупномасштабных неоднородностях на захват радиоволн в ионосферный волноводный канал // В кн. Дифракционные эффекты дециметровых радиоволн в ионосфере. М.: Наука. 1977. С.43-53.
16. Ерухимов Л.М., Матюгин С.Н., Урядов В.П. К вопросу о распространении радиоволн в ионосферном волновом канале // Изв. Вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18. №9. С. 1297-1304.
17. Гуревич А.В., Ерухимов Л.М., Урядов В.П. и др. Влияние рассеяния на захват радиоволн в ионосферные волновые каналы // Изв. Вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18. №9. С. 1305-1316.
18. Понятов А.А., Урядов В.П. Компьютерное моделирование ионосферного распространения коротких радиоволн // Препринт №428, НИРФИ, Н.Новгород. 1996, 20с.
19. Uryadov V.P., Ryabova N.V., Ivanov V.A., Shumaev V.V. The investigation of long-distance HF propagation on the basis of a chirp sounder // J.Atm.Terr.Phys. 1995, v.57, N11, p.1263-1271.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Научно-исследовательский радиофизический институт
федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский
государственный университет им. Н.И. Лобачевского»
(НИРФИ ННГУ им. Н.И.Лобачевского)

Препринт № 558

**ИСКУССТВЕННЫЕ МЕЛКОМАСШТАБНЫЕ
НЕОДНОРОДНОСТИ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ
И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНИМ
РАСПРОСТРАНЕНИЕМ КВ ЗА СЧЕТ МОДИФИКАЦИИ
ИОНОСФЕРЫ МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ**

В.П.Урядов

Нижний Новгород

2019

ИСКУССТВЕННЫЕ МЕЛКОМАСШТАБНЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНИМ РАСПРОСТРАНЕНИЕМ КВ ЗА СЧЕТ МОДИФИКАЦИИ ИОНОСФЕРЫ МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ // Препринт №558. – Нижний Новгород: НИРФИ ННГУ, 2019. – 28с.

УДК 533.951+621.371

Дан краткий обзор состояния исследований в области управления дальним распространением КВ за счет вывода радиоволн из ионосферного волнового канала путем рассеяния на мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностях. Рассмотрены основные механизмы возбуждения ионосферных волноводов. Приведены результаты первых экспериментов по выводу КВ-сигналов из ионосферного волновода на трассах различной протяженности.

3. Fenwick R.B. Round-the-world high frequency propagation // Techn. Rep. no. 71. Radioscience Laboratory. Stanford University. 1963.
4. Chang H.T. The waveguide mode theory of whispering gallery propagation in the F region of the ionosphere // Radio Sci. 1971. V. 6. no.4. p. 475-482.
5. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир. 1973. 503с.
6. Toman K., Miller D.C. Computational study of long-range high-frequency ionospheric ducting // Radio Sci. 1977. V. 12, no.3, pp.467-476.
7. Гуревич А.В., Цедилина Е.Е. Сверхдальнее распространение коротких радиоволн. М.: Наука. 1979. 248с.
8. Гетманцев Г.Г., Ерухимов Л.М., Урядов В.П. и др. Ракурсное рассеяние коротковолновых радиосигналов на искусственных ионосферных неоднородностях // Изв. Вузов. Радиофизика. 1976. Т. 19. №12. С. 1909-1912.
9. Ерухимов Л.М., Иванов В.А., Урядов В.П. и др. ЛЧМ-метод диагностики ионосферного канала КВ связи // Деп. в ВИНТИ. 1986. № 9027-В86. 94с.
10. Иванов В.А., Куркин В.И., Урядов В.В. и др. ЛЧМ ионозонд и его применение в ионосферных исследованиях // Изв. Вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46. №11. С. 919-952.
11. Гуревич А.В. Влияние нелинейности на генерацию кругосветных сигналов // Геомагнетизм и аэрномия. 1971. Т. 11. №6. С. 961-969.
12. Ionospheric modification by high power transmitters // Radio Sci. Special issue: 1974. V.9. no. 11.
13. Изв. Вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18. №9; 1977. Т.20. №12. Спец. выпуски.

решения прикладных задач ионосферного распространения радиоволн. К сожалению, развал СССР в 90-е годы не позволил реализовать эти возможности для решения прикладных задач дальней КВ радиосвязи.

Выводы

Экспериментальным путем реализована возможность управления распространением коротких радиоволн в ионосферном волноводе за счет модификации ионосферы мощным радиоизлучением. Показано, что вывод радиоволн из ИВК за счет ракурсного рассеяния на ИИТ является эффективным механизмом управления распространением радиоволн в приподнятом ионосферном волноводе, что создает предпосылки для создания дополнительного канала с малыми потерями на поглощение с целью его использования для повышения надежности дальней КВ радиосвязи. Для практического применения управления дальним распространением КВ при воздействии на ионосферу мощным радиоизлучением необходимо продолжение исследований особенностей распространения радиоволн на протяженных радиолиниях, оснащенных современными средствами широкополосного наклонного ЛЧМ-зондирования ионосферы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Комарович В.Ф., Романенко В.Г. КВ радиосвязь. Состояние и направления развития // Зарубежная радиоэлектроника. 1990, №12, с.3.
2. Краснушкин П.Е. О волноводных свойствах неоднородных сред // ЖТФ, 1948, Т.18, №4, С. 431-446.

Практическое использование модификации ионосферы мощным радиоизлучением применительно к проблеме дальней КВ радиосвязи связано с управлением распространением радиоволн в ионосферном волноводе. КВ радиосвязь имеет ряд преимуществ по сравнению с другими видами связи. К ним относятся: оперативность установления связи на большие расстояния, простота организации радиосвязи с подвижными объектами, возможность обеспечения связи через большие труднодоступные пространства, высокая мобильность средств КВ радиосвязи, довольно простая восстанавливаемость связи в случае нарушения, высокая живучесть и низкая стоимость связи. Особое значение КВ радиосвязь приобретает в чрезвычайных ситуациях при организации и проведении аварийно-спасательных работ, координации действий различных организаций и служб в районах стихийных бедствий (землетрясений, наводнений, крупных снежных и селевых лавин), а также во время военных действий. В зарубежной печати отмечается, что возрождение интереса к КВ связи в настоящее время объясняется еще и установленной в ходе исследований уязвимостью в военное время спутниковых систем связи [1].

Одновременно КВ связи присущи и такие недостатки, как замирания сигнала, ограниченная ёмкость используемого диапазона частот. Качество связи существенно зависит также от времени суток, года и состояния ионосферы. Кроме того, системы КВ радиосвязи характеризуются чувствительностью к случайным и преднамеренным помехам, малым отношением скорости передачи к занимаемой полосе частот.

Тем не менее, благодаря преимуществам КВ связи перед другими видами связи до настоящего времени не ослабевают усилия специалистов, направленные на создание перспективных систем КВ радиосвязи, не уступающих по надежности спутниковым связным системам. В значительной мере это связано с развитием микроэлектроники, новых технологий, цифровой обработки сигналов, средств вычислительной техники и программного обеспечения.

Для решения проблемы повышения надежности дальней КВ радиосвязи важную роль играют исследования ионосферного распространения КВ на трассах различной протяженности и ориентации в различных гелиогеофизических условиях с использованием современной техники зондирования ионосферного канала для адаптации радиоэлектронных систем к условиям распространения радиоволн.

Известно [2-7], что дальнейе распространение КВ характеризуется многообразием механизмов распространения радиоволн, включая скачковые, волноводные, антиволноводные (лучи Педерсена) моды и их комбинации. Волноводные моды, распространяясь в приподнятых над Землей каналах, расположенных выше основных поглощающих слоев *D* и *E* ионосферы, испытывают меньшее, чем при скачковом распространении, поглощение и могут распространяться на значительные расстояния на частотах, превышающих максимально применимую частоту (МПЧ) скачкового механизма [7].

Интерес к проблеме волноводного распространения КВ определяется ее научной и практической значимостью. Реализация управления волноводным распространением КВ открывает возможность создания дополнительного канала

2F2МНЧ, т.е. имел волноводное происхождение. Для этих условий на рис.6 показаны лучевые траектории на трассе Забайкальское – СУРА, рассчитанные для ионосферных условий марта 1991г. для 01:00мск, здесь же тонкими линиями приведены изолинии плазменных частот.

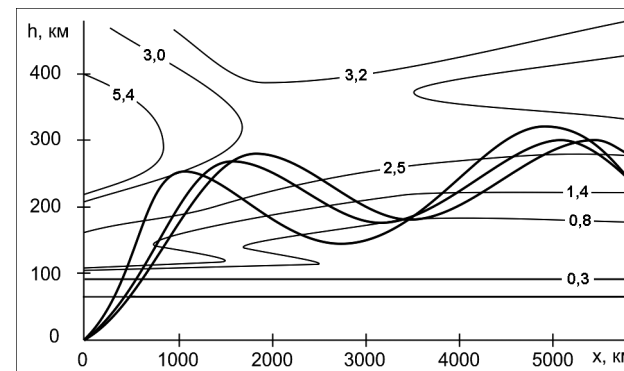


Рисунок 6 – Лучевые траектории на трассе с.Забайкальское (Хабаровский край) – СУРА для углов излучения 6-10°, март 1991г., 01:00 мск. Тонкими линиями приведены изолинии плазменных частот.

Из рис.6 видно, что на трассе имел место рефракционный захват радиоволн в ионосферный волновод, вывод которых из канала осуществлялся за счет ракурсного рассеяния на искусственных мелкомасштабных магнитно-ориентированных неоднородностях.

Так прямым экспериментальным путем при работе в широкой полосе частот наклонного ЛЧМ зондирования ионосферного канала были подтверждены полученные нами ранее в 1975г. результаты по реализации возможности управления дальним распространением коротких волн за счет модификации ионосферы мощным радиоизлучением, что открывало перспективу использования данного метода для

Рисунок 5а иллюстрирует случай, когда нагревный стенд СУРА не работал. Во время работы стенда СУРА дополнительный (рассеянный) сигнал (РС) наблюдался как на частотах ниже максимальной наблюдаемой частоты (МНЧ) моды $2F_2$ (см. рис.5б), так и на частотах выше $2F_2$ МНЧ (см. рис.5в), т.е. в данном случае рассеянный сигнал однозначно имел волноводное происхождение. Малые времена развития и релаксации рассеянного сигнала после включения (выключения) стенда (единицы – десятки секунд) указывали на его связь с рассеянием радиоволн на МИИН с поперечными размерами, определяемыми из брэгговского условия:

$$l_{\perp} = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\theta_s}{2}}, \quad (3.1)$$

где λ – длина волны, θ_s – угол рассеяния. Для условий эксперимента $\lambda = 15$ м, $\theta_s \approx 30^\circ$ поперечные размеры составляют $l_{\perp} \sim 30$ м.

Для сопоставления с результатами эксперимента было проведено моделирование распространения радиоволн на трассе Забайкальское – СУРА – Темрюк. Моделирование показало, что условия ракурсного рассеяния радиоволн могут выполняться как для скачковых, так и для волноводных мод. Если отрицательный градиент критической частоты f_0F_2 вдоль трассы зондирования Забайкальское – СУРА был небольшой, то в пункте приема регистрировался рассеянный сигнал на частотах меньших $2F_2$ МНЧ (двух скачковая мода через F -слой ионосферы). С ростом отрицательного градиента (его модуля) при значениях $\nabla f_0F_2 < -0,2$ МГц/100 км происходил рефракционный захват радиоволн в ионосферный волновод на высоких частотах, и рассеянный сигнал регистрировался на частотах на 2-3 МГц выше

распространения радиоволн с малым поглощением для повышения надежности дальней КВ радиосвязи, что особенно актуально в период сильных магнитно-ионосферных возмущений. Необходимо отметить, что при наземном расположении приемопередающих пунктов в сферически-симметричной ионосфере в приближении геометрической оптики захват в приподнятые ионосферные волноводы невозможен. В реальных условиях захват в такие каналы радиоволн, излученных с поверхности Земли, и их вывод могут осуществляться за счет рефракции радиоволн на горизонтальных градиентах электронной концентрации, рефракции и рассеяния на ионосферных неоднородностях (и их комбинации), а иногда и при «просачивании» за счет дифракционных эффектов.

В естественных условиях исследование волноводного распространения встречается со значительными трудностями, и это связано в первую очередь со сложностью идентификации волноводных мод и неконтролируемым характером механизмов возбуждения ионосферных волновых каналов (ИВК). Целенаправленное изменение под действием мощного радиоизлучения параметров ионосферной плазмы коренным образом меняет ситуацию и открывает перспективу управления дальним распространением КВ путем возбуждения ИВК за счет искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ). Хотя вывод радиоволн из ИВК за счет модификации ионосферы мощным радиоизлучением впервые был обнаружен автором в 1975г. [8], практическая реализация управления волноводным распространением КВ долгое время сдерживалась из-за отсутствия эффективных средств широкополосного зондирования ионосферы. И только с оснащением трасс большой протяженности ЛЧМ ионозондами, обладающими высокой

помехозащищенностью [9, 10], появилась возможность экспериментально исследовать особенности дальнего распространения и реализовать управление волноводным распространением КВ за счет модификации ионосферы мощным декаметровым радиоизлучением.

1. Распространение радиоволн в ионосферных волновых каналах

Интерес к волноводному распространению КВ заметно возрос после работы А.В.Гуревича [11], применившего теорию адиабатического инварианта к ионосферному распространению КВ, а также был стимулирован работами по созданию мощных нагревных стенов в США [12] и в СССР [13] и результатами экспериментов, проведенных на этих установках. Целенаправленное изменение параметров ионосферной плазмы под действием мощного декаметрового радиоизлучения позволяет создавать на высотах ионосферного канала контролируемые искусственные неоднородности электронной концентрации. Искусственная ионосферная турбулентность развивается в области верхнего гибридного резонанса (ВГР) при отражении от ионосферы мощной радиоволны обыкновенной поляризации. Волна обыкновенной поляризации отражается от уровня, где плазменная частота ионосферы ω_p и частота волны накачки ω_n совпадают, т.е. $\omega_p = \omega_n$. Уровень ВГР находится ниже этой точки на 3-8 км и определяется условием $\omega_{ВГР}^2 = \omega_n^2 - \omega_H^2$, где $\omega_{ВГР}$ – частота верхнего гибридного резонанса, ω_H – гирочастота электронов. Затравочные мелкомасштабные ионосферные неоднородности приводят к рассеянию обыкновенной волны накачки в медленные

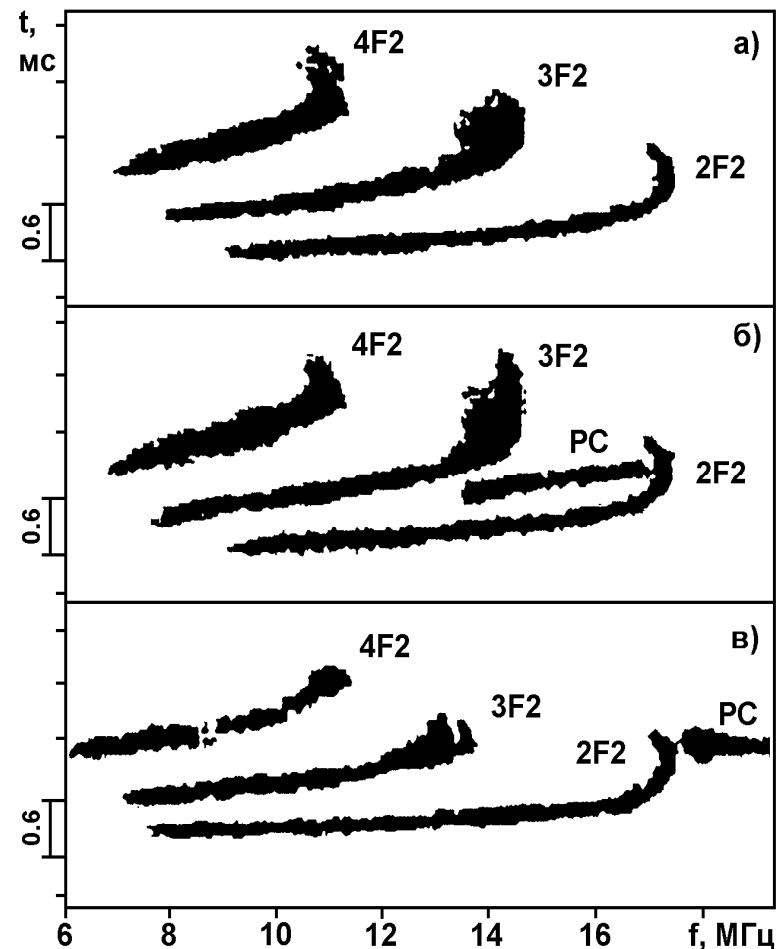


Рисунок 5 – Ионограммы наклонного ЛЧМ зондирования на трассе с.Забайкальское (Хабаровский край) – Темрюк (Краснодарский край); (а) – 18.03.1991г в паузе 22:20 мск, (б) – 18.03.1991г. во время работы стенов СУРА 23:25 мск, (в) – 19.03.1991г. в 00:34 мск, РС – рассеянный сигнал.

край) – стенд СУРА (Нижегородская обл.) – Темрюк (Краснодарский край) [19].

ЛЧМ зондирование осуществлялось из Забайкальского в диапазоне частот 6–28,4 МГц, скорость изменения частоты составляла 375 кГц/с. Для излучения использовалась горизонтальная ромбическая антенна $PG \frac{65}{4} 1$, рассчитанная на

среднюю длину волны $\lambda_0 = 19$ м, ориентированная на нагревный стенд СУРА. Наблюдения проводились с 18 по 23 марта 1991г. с 22:00 до 06:00 мск, когда на трассе Забайкальское – СУРА для данного сезона (равноденствие) был максимальный отрицательный градиент электронной концентрации, обеспечивающий захват радиоволн в ионосферный волновод. Вывод радиоволн из ИВК осуществлялся за счет ракурсного рассеяния на мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностях (МИИН), возбуждаемых на высотах ионосферного волновода мощным радиоизлучением нагревного стенда СУРА. Стенд работал с эффективной мощностью $PG \approx 100$ МВт, волна накачки обыкновенной поляризации излучалась вертикально вверх. Воздействие на ионосферу осуществлялось циклами: 5 минут – нагрев, 5 минут – пауза. Прием ЛЧМ сигналов осуществлялся в Темрюке на горизонтальную ромбическую антенну $PG \frac{65}{4} 1$ с $\lambda_0 = 19$ м ориентированную на нагревный стенд СУРА.

В приемном пункте Темрюк во время работы нагревного стенда СУРА наблюдались дополнительные (боковые) сигналы, задержанные относительно основной моды 2F2 прямой трассы Забайкальское – Темрюк. Характерные примеры ионограмм наклонного ЛЧМ зондирования показаны на рис.5.

плазменные волны, при этом поглощение волны накачки в области ВГР приводит к увеличению тепловой энергии среды. В результате нагрева электронов и вытеснения плазмы из-за термодиффузии из области локализации теплового источника происходит усиление низкочастотных возмущений концентрации электронов. Вследствие сильной анизотропии диффузии электронов вдоль и поперек магнитного поля, искусственные неоднородности электронной концентрации сильно вытянуты вдоль магнитного поля Земли, т.е. $l_{\perp} \ll l_{\parallel}$, где l_{\parallel} и l_{\perp} масштабы неоднородности вдоль и поперек магнитного поля соответственно. Формируется спектр неоднородностей электронной концентрации с поперечными масштабами l_{\perp} от долей метра до нескольких десятков метров. Наличие интенсивных мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) открывает перспективу управления волноводным распространением радиоволн за счет контролирования механизма ввода радиоволн в ИВК и их вывода из канала за счет рассеяния на таких неоднородностях. В разделе дается описание основных ионосферных каналов на основе представлений о модифицированном показателе преломления, и приведен краткий обзор наиболее эффективных механизмов возбуждения ИВК.

Известно [7], что для описания распространения радиоволн в ионосфере Земли можно использовать аналогию между геометрической оптикой и механикой материальных частиц. Согласно [7] радиальная часть поля волны в ионосфере описывается уравнением Шредингера

$$\frac{d^2 \Psi}{dz^2} + k_0^2 (E - U(z)) \Psi = 0, \quad (1.1)$$

где $k_0 = \omega/c$, постоянная E играет роль уровня энергии, она связана с углом α_0 между волновой нормалью и горизонталью к поверхности Земли (углом излучения) соотношением $E = -\cos^2 \alpha_0$

Поскольку функция $U(z)$ играет роль потенциала в уравнении Шредингера, то при наличии минимумов $U(z)$ в ионосфере возникают каналы, в которых может распространяться волна. В первом приближении ($z \ll R_0$, R_0 – радиус Земли), пренебрегая влиянием магнитного поля Земли на диэлектрическую проницаемость для частот $\omega \gg \omega_H$, выражение для потенциала $U(z)$ можно представить в виде модифицированного показателя преломления [7]

$$U(z) = -\varepsilon_{\text{mod}}(z) = -1 + \frac{4\pi e^2 N(z)}{m\omega^2} - \frac{2z}{R_0}. \quad (1.2)$$

Типичный вид функции $U(z)$ для дневной и ночной ионосферы периода высокой солнечной активности показан на рис.1.

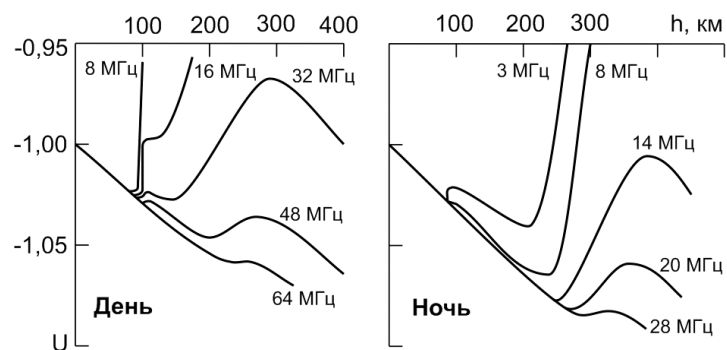


Рисунок 1 – Зависимость $U(h)$ от высоты h для различных частот для условий дневной и ночной ионосферы.

исследованиях очень важна роль ионозондов широкополосного наклонного зондирования ионосферы.

Для исследования возможности управления дальним распространением радиоволн посредством вывода радиосигналов из ИВК за счет рассеяния на искусственной ионосферной турбулентности в 1986г. было принято решение об организации передающего пункта ЛЧМ-зондирования на Дальнем Востоке на базе лаборатории Института космических исследований и распространения радиоволн (ИКИР) ДВО РАН, располагавшейся в с. Забайкальском Вяземского района Хабаровского края. Выбор этого пункта определялся теми же факторами, что и в экспериментах 1975-1980гг. при работе на фиксированных частотах. В первую очередь это касалось наибольшей удаленности пункта от нагревного стенда СУРА в пределах территории СССР и широтной ориентации трассы зондирования, на которой в определенные часы суток существуют благоприятные условия для рефракционного захвата радиоволн в ИВК при пересечении трассы сумеречной зоны.

В сентябре 1987г. оборудование (ЛЧМ передатчик,

горизонтальная ромбическая антенна РГ $\frac{65}{4}$ 1, фидерная линия)

было доставлено из г.Горького в с. Забайкальское и смонтировано в октябре 1987г. Первые успешные измерения на протяженной трассе ЛЧМ зондирования с. Забайкальское (Хабаровский край) – Зименки (Горьковская обл.) были нами проведены в марте–апреле 1988г.

Основной эксперимент на базе ЛЧМ ионозонда по управлению дальним распространением радиоволн путем модификации ионосферы мощным радиоизлучением был проведен в марте 1991г. на трассе с. Забайкальское (Хабаровский



Рисунок 4 – Трасса Шанхай – ст. Качалинская Волгоградской обл.
03 сентября 1975г. $f = 18774$ кГц.

Прием сигнала, рассеянного на магнитно-ориентированных мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностях, индуцированных воздействием на F -область ионосферы мощным радиоизлучением нагревного стенда «Ястреб» (п. Зименки, Горьковская обл.) на частоте 4,6 МГц волной накачки обыкновенной поляризации с эффективной мощностью излучения $P_G \approx 20$ МВт.

Из рисунка видно, что сигнал принимается только в период воздействия на ионосферу мощным радиоизлучением. В дальнейшем эти результаты были нами неоднократно повторены, причем измерения проводились в течение нескольких лет в различных геофизических условиях.

Развитие этого направления для решения прикладных задач дальней КВ радиосвязи продолжалось в 80-90-е годы с созданием и внедрением в практику ионосферных исследований ионозонда с непрерывным излучением линейно-частотно-модулированного (ЛЧМ) сигнала [9, 10]. Дело в том, что вследствие нестационарности ионосферного канала, работа на ограниченной сетке фиксированных частот не позволяет получать полную картину особенностей распространения коротких волн во всем диапазоне частот прохождения радиосигналов. Поэтому в таких

Как видно из рисунка на различных частотах в окрестности минимумов $U(z)$ существуют приподнятые ионосферные каналы, поведение лучей в которых аналогично явлению шепчущей галереи: лучи рикошетируют, не касаясь поверхности Земли. С ростом частоты объем канала уменьшается, он смещается на большие высоты и затем вырождается.

При плавном изменении свойств ионосферного волновода распространение радиоволн в нем происходит с сохранением адиабатического инварианта

$$I = 4R_0^{-1} \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} [E - U(z)]^{1/2} dz, \quad (1.3)$$

где z_{\min} и z_{\max} – уровни отражения волны, E – значение $U(z)$ на уровне отражения волны [7]. Нарушение инварианта приводит к изменению траектории в пределах осцилляции (к переходу на другой уровень). Нарушение полного инварианта I_m , равного I при $E = U_m$, где U_m – значение одного из максимумов $U(z)$, приводит к выходу волны из ионосферного волновода данного типа. Поэтому захват или вывод волны из ионосферного волновода связан с нарушением I_m . Для дальнего распространения радиоволн с малыми потерями важное значение имеют подслоный F и межслоевой FE каналы, для которых z_{\min} превышает высоту поглощающего радиоволны слоя D ионосферы ($z_{\min} \sim 50 - 90$ км). Траектории радиоволн, распространяющиеся в этих каналах, не опускаются в сильно поглощающие слои ионосферы. Поэтому поглощение радиоволн в приподнятых волноводах, как правило, мало по сравнению с поглощением в приземном канале.

Особенности волноводного механизма (слабое затухание, возможность распространения радиоволн на частотах, превышающих наземные МПЧ) привлекли к нему внимание и с

этим связаны поиски факторов, способствующих возбуждению ионосферных волноводов [14].

2. Основные механизмы возбуждения ионосферных волновых каналов

2.1. Возбуждение ИВК за счет рефракции радиоволн на горизонтальных градиентах ионосферной плазмы

В ионосфере одним из наиболее эффективных механизмов возбуждения ионосферных волновых каналов является рефракционный захват и выход радиоволн из канала, например, на трассах, пересекающих сумеречную зону или область экваториальной аномалии, где существуют сильные горизонтальные градиенты ионизации.

Для возбуждения подслоного F канала существенны горизонтальные градиенты электронной концентрации вблизи максимума F слоя ($\frac{\partial f_0 F2}{\partial x} < 0$, $\frac{\partial h_m}{\partial x} > 0$, x – координата вдоль трассы распространения), когда луч, отразившийся от наклонной переходной области, не возвращается на Землю, а распространяется по рикошетирующей траектории (см. рис. 2а). Для захвата радиоволн в межслоевой канал FE важны горизонтальные градиенты электронной концентрации вблизи максимума слоя E ($\frac{\partial f_0 E}{\partial x} > 0$). Так, при наличии E слоя на трассе волна после отражения от F области оказывается «запертой» в межслоевом канале FE (см. рис. 2б, где кривая 1 изображает луч в горизонтально-однородной ионосфере, кривая 2 – луч, захваченный в межслоевой канал FE , штриховые линии 3 – изолинии электронной концентрации). Другими словами, если потенциальная яма эффективно «углубляется» в направлении

горизонтальную ромбическую антенну РГ $\frac{65}{4}1$ ориентированную на нагревный стенд «Ястреб».

Первые данные о влиянии МИИН на принимаемые КВ сигналы были получены в первые же дни наблюдений в августе 1975г. и заключались в появлении во время нагрева ионосферы амплитудной квазипериодической модуляции принимаемого сигнала в результате интерференции прямого сигнала и сигнала, рассеянного на движущихся МИИН. При этом период модуляции соответствовал доплеровскому сдвигу частоты рассеянного сигнала.

В начале сентября 1975г. в вечернее время наблюдений во время приема сигналов станции Шанхай на частоте 18774 кГц были получены первые данные по выводу радиоволн из ИВК за счет рассеяния на МИИН. Было установлено, что при уменьшении критической частоты $f_0 F2$ ионосферы, когда частота принимаемого сигнала становилась близкой к МПЧ, существенно возрастала доля рассеянной компоненты по сравнению с прямым сигналом. В дальнейшем, с течением времени сигнал от дальней КВ радиостанции Шанхай на частоте 18774 кГц принимался только во время работы нагревного стенда «Ястреб», т.е. имел место вывод радиоволн из приподнятого ионосферного канала за счет ракурсного рассеяния на ИИТ. После выключения нагревного стенда сигнал пропадал, время релаксации рассеянного сигнала составляло несколько секунд. Рисунок 4 иллюстрирует пример регистрации в ст. Качалинской рассеянного сигнала радиовещательной станции Шанхай на частоте $f = 18774$ кГц во время работы нагревного стенда «Ястреб».

комитетом по радиосвязи (МККР). В этом списке тысячи станций и мы потратили немало времени, чтобы опытным путем проверить их работоспособность и подобрать нужные нам станции. К сожалению, на этом пути мы мало чего достигли, поскольку станции работали нерегулярно, не выдерживали расписание и режим работы, и в этой связи идентифицировать их было практически невозможно. Благодаря поддержке Г.В.Букина и Н.П.Беньковой из ИЗМИРАНа и Е.Е.Добровольского из Минсвязи СССР удалось подобрать станции, которые устраивали нас как по месту расположения, так и по частотно-временному режиму работы. Это 2 станции из Центральной Америки, 2 станции из Китая (Пекин и Шанхай) и станция из Ханоя. В дальнейшем, в процессе проведения эксперимента, этот выбор вещательных станций оказался весьма удачным и себя полностью оправдал.

Экспериментальные исследования влияния искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ) на дальней распространение КВ были начаты в СССР в 1975г. с использованием радиосигналов указанных выше вещательных станций [8]. Приемный пункт был организован в ст. Качалинской Волгоградской области. Возмущение ионосферы осуществлялось с помощью мощного радиоизлучения нагревного стенда «Ястреб», располагавшегося в п. Зименки Горьковской области. Нагревный стенд работал на частотах 4,6 и 5,75 МГц с эффективной мощностью излучения $P_G \sim 20$ МВт. Мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности (МИИН) возбуждались на высотах $F2$ слоя ионосферы в окрестности отражения мощной волны накачки обыкновенной поляризации. В ст. Качалинской прием прямых и рассеянных сигналов вещательных станций осуществлялся на

распространения, то лучи, излученные с Земли и близкие к критическому лучу, могут быть захвачены в канал FE .

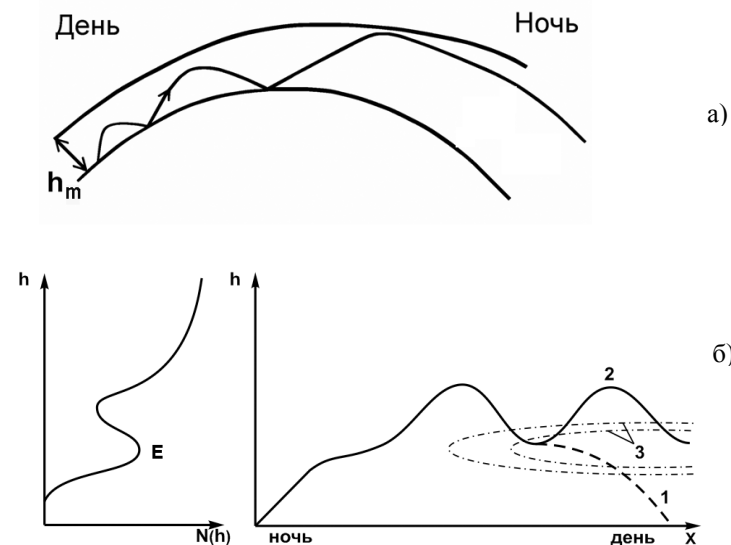


Рисунок 2 – Схематический вид траекторий лучей в горизонтально-неоднородной ионосфере. (а) – распространение поперек границы день-ночь, h_m – высота максимума электронной концентрации, (б) – распространение при наличии вдоль трассы E слоя.

Согласно [7] захваченная энергия и ширина угла захвата $\Delta\alpha$ пропорциональны изменению инварианта I_m на осцилляции волны

$$\Delta\alpha = \left(\frac{dI_m}{d\theta} \right)^{1/2}, \quad (2.1)$$

где

$$\frac{dI_m}{d\theta} = \frac{2}{R_0} \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} \frac{\partial E / \partial \theta - \partial U / \partial \theta}{\sqrt{E - U(z)}} dz. \quad (2.2)$$

Оценки показывают, что для типичных ионосферных условий при реализации рефракционного механизма возбуждения ионосферных волновых каналов величина $\Delta\alpha \sim 0.1-5^\circ$. При этом коэффициент захвата, равный отношению интервала углов захвата в канал к ширине диаграммы направленности антенны

$\Delta\alpha_0$ в вертикальной плоскости, $\eta = \frac{\Delta\alpha}{\Delta\alpha_0}$ для значений

$\Delta\alpha_0 \approx 10^\circ$ составляет величину $\eta \sim 0.01-0.5$.

2.2. Возбуждение ИВК за счет рефракции радиоволн на крупномасштабных и локализованных неоднородностях

Сильные горизонтальные градиенты ионосферной плазмы могут отклонять лучи на несколько градусов. Однако такие градиенты регистрируются далеко не всегда. Вместе с тем, известно, что в ионосфере существуют крупномасштабные неоднородности с горизонтальными размерами $\sim 100 - 500$ км. К таким неоднородностям относятся перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ), спорадические образования типа E_s , а также пэтчи с повышенной электронной концентрацией в области высыпания заряженных частиц. Неоднородности указанных размеров характеризуются меньшими горизонтальными градиентами, чем существующие в сумеречной зоне. Поэтому весьма вероятным представляется возбуждение ИВК за счет рефракции радиоволн на крупномасштабных неоднородностях на фоне регулярных горизонтальных градиентов.

Возбуждение ионосферного канала может быть осуществлено также путем рефракции луча на крупномасштабной неоднородности, когда происходит переход луча с наземной на волноводную траекторию. При этом изменение угла поворота

сосредоточена в узком угловом интервале вблизи конуса зеркального отражения $\Delta \approx \frac{\lambda}{l_{\parallel}}$, где λ – длина волны, l_{\parallel} –

продольный масштаб неоднородностей. Важно отметить, что в расчетах геометрии ракурсного рассеяния радиоволн, особенно в КВ диапазоне и нижней части УКВ диапазона, необходимо учитывать ионосферную рефракцию, которая в значительной мере определяет конфигурацию ракурсных контуров на поверхности Земли [18].

3. Экспериментальные результаты

Для экспериментальной проверки возможности вывода радиоволн из ИВК за счет рассеяния на МИИН возник практический вопрос об организации трассы зондирования. При этом основной проблемой был выбор места расположения зондирующего передатчика. Это должен быть удаленный передатчик, поскольку трасса между передатчиком и искусственной областью возмущения должна быть достаточно протяженной (для «разгона» радиоволн), чтобы на ней мог реализоваться механизм захвата радиоволн в ИВК. При этом мы учитывали, что энергетически наиболее эффективным механизмом захвата радиоволн является рефракция на отрицательном градиенте электронной концентрации. Поэтому трасса должна быть примерно широтной ориентации, чтобы в определенные часы суток она пересекала сумеречную зону с максимальным отрицательным градиентом концентрации N_e вдоль трассы распространения.

Сначала мы хотели воспользоваться списком вещательных станций, публикуемых Международным консультативным

при этом в расчетах геометрии захвата (вывода) радиоволн необходимо учитывать особенность рассеяния радиоволн на сильно вытянутых неоднородностях. При рассеянии на сильно вытянутых магнитно-ориентированных неоднородностях волновые векторы рассеянных волн \mathbf{k}_s образуют коническую поверхность с осью, направленной вдоль магнитного поля \mathbf{H}_0 , и углом между осью и образующей, равным углу между волновым вектором падающей волны \mathbf{k}_0 и \mathbf{H}_0 . Пересечение конуса с поверхностью Земли образует ракурсный контур. Геометрия ракурсного (зеркального) рассеяния радиоволн на сильно вытянутых магнитно-ориентированных неоднородностях показана на рис. 3.

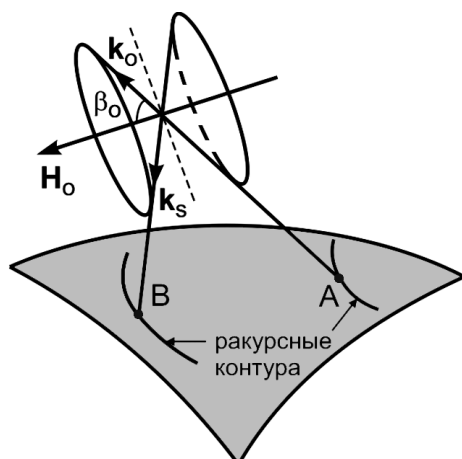


Рисунок 3 – Геометрия ракурсного (зеркального) рассеяния радиоволн на анизотропных магнитно-ориентированных неоднородностях.

Рассеяние на таких неоднородностях характеризуется ракурсной чувствительностью: энергия рассеянного излучения

траектории луча может быть рассчитано методом возмущений. Согласно расчетам дополнительный поворот луча в ионосфере, вызванный наличием неоднородности $\Delta N(x,z)$, можно представить в виде [15]

$$\Delta\alpha = -\frac{2\pi e^2}{m\omega^2} \int \left(\frac{\partial \Delta N}{\partial z} \right) \frac{\partial z}{\sqrt{E - U(z)}}. \quad (2.3)$$

Расчеты, проведенные для неоднородности электронной концентрации вида $\frac{\Delta N}{N} = \left(\frac{\Delta N}{N} \right)_0 \exp \left[-\left(\frac{l}{l_0} \right)^2 \right]$ с параметром $l_0 = 10$ км и с относительным значением электронной концентрации $\left(\frac{\Delta N}{N} \right)_0 = 10^{-2}$, показали, что угловая ширина пучка лучей, захваченных в ионосферный волновод за счет рефракции на такой неоднородности, составляет величину $\Delta\alpha \sim 0.25^\circ$. При этом коэффициент захвата радиоволн в канал, определяемый как отношение $\Delta\alpha / \Delta\alpha_0$ ($\Delta\alpha_0$ – угловая ширина диаграммы направленности антенны излучателя в вертикальной плоскости), для $\Delta\alpha_0 \sim 20^\circ$ составляет величину $\eta \sim 2 \cdot 10^{-2}$.

2.3. Возбуждение ИВК за счет рассеяния радиоволн на мелкомасштабных ионосферных неоднородностях

Важную роль в возбуждении ионосферных волновых каналов играет рассеяние радиоволн на мелкомасштабных неоднородностях с размерами, сравнимыми с длиной волны ($\lambda \sim 10-100$ м), когда возможно изменение траектории – «дворот» луча на большие углы. Преимущество возбуждения ионосферных волновых каналов за счет рассеяния на

мелкомасштабных неоднородностях заключается в возможности захвата и вывода из канала любых мод, в том числе, высокочастотных мод с малым поглощением, распространяющихся вблизи оси ионосферного волновода, расположенного выше основных поглощающих слоев D и E ионосферы. Другим преимуществом высокочастотных мод является возможность распространения на частотах заметно более высоких, чем МПЧ наземного (скачкового) распространения.

Детальное исследование роли рассеяния применительно к возбуждению ИВК проводилось в работах [7, 16, 17]. В наиболее общем виде в борновском приближении однократного рассеяния выражение для коэффициента захвата радиоволн в ИВК за счет рассеяния на мелкомасштабных неоднородностях с корреляционной функцией $\rho(\xi)$ имеет вид [17]:

$$\eta = \frac{k^2 \langle (\Delta \varepsilon)^2 \rangle_{z_c} \omega}{\sqrt{2} \omega_{0c} \sqrt{v_c \alpha_c}} \int_{-\beta_{c0}}^{\beta_{c0}} \frac{\sqrt{|\beta_c|}}{\alpha_c - \beta_c} d\beta_c \int_0^{\infty} \rho(\xi) \cos[k(\alpha_c - \beta_c)\xi] d\xi, \quad (2.4)$$

где $\omega_{0c}^2 = \frac{4\pi e^2 N(z_c)}{m}$, $v_c = \left(\frac{1}{N(z)} \frac{d^2 N}{dz^2} \right)_{z_c}$, $k = \omega/c$

$\beta_{c0} = \sqrt{\frac{2}{R_0}(z_c - z_1) + \frac{\omega_0^2(z_1) - \omega_0^2(z_c)}{\omega^2}}$ – предельный угол захвата

волны в ИВК на высоте z_c , совпадающей с осью ионосферного волновода, z_1 – высота нижней границы канала, α_c – угол, составляемый волновым вектором луча, излученного с поверхности Земли, с горизонталью на высоте z_c , β_c – угол, составляемый волновым вектором волноводной моды с горизонталью на высоте z_c .

Согласно расчетам [17], оптимальный захват в ИВК однократно рассеянных радиоволн в диапазоне частот $\sim 10 - 20$ МГц происходит, когда вблизи оси ионосферного волновода существуют неоднородности с масштабами $l \sim 50 - 100$ м.

В естественных условиях неоднородности такого масштаба существуют в ночные часы вблизи геомагнитного экватора и практически в любое время суток на полярных широтах. На средних широтах мелкомасштабная структура ионосферной плазмы выражена значительно слабее. В условиях сильных ионосферных возмущений, когда набеги фазы волны в слое больше радиана, необходим учет многократного рассеяния радиоволн [16].

Как уже отмечалось, в естественных условиях исследование механизмов дальнего распространения коротких волн сталкивается со значительными трудностями из-за неконтролируемого воздействия многих факторов на характеристики сигнала, интегральный эффект которых может приводить к весьма сложной картине формирования поля КВ радиосигналов. Создание исследовательских стендов для воздействия (его также называют «нагревом») на ионосферную плазму мощным декаметровым радиоизлучением позволило проводить исследование механизмов дальнего распространения коротких волн в контролируемых условиях, что существенно облегчило задачу выделения и идентификации различных мод распространения.

Выше рассматривалось рассеяние радиоволн на изотропных неоднородностях. В реальных условиях мелкомасштабные ионосферные неоднородности естественного и искусственного происхождения вытянуты вдоль силовых линий магнитного поля,