
**ОТКЛИК ИОНОСФЕРЫ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ НА НЕЕ
НЕОБЫКНОВЕННОЙ РАДИОВОЛНОЙ
ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ ВОЗМУЩЕННОЙ ОБЛАСТИ НА ЧАСТОТЕ,
БЛИЗКОЙ К НАГРЕВНОЙ****IONOSPHERE RESPONSE TO THE IMPACT OF AN EXTRAORDINARY RADIO
WAVE WHEN LOCATED AT A FREQUENCY
CLOSE TO THE HEATING FREQUENCY**

Н.В. Бахметьева*Научно-исследовательский радиофизический институт
Нижегородского государственного университета
им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия, nv_bakhm@nirfi.unn.ru***Г.И. Григорьев***Научно-исследовательский радиофизический институт
Нижегородского государственного университета
им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия, grig19@list.ru***И.Н. Жемаков***Научно-исследовательский радиофизический институт
Нижегородского государственного университета
им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия, ilia.zhem@yandex.ru***Е.Е. Калинина***Научно-исследовательский радиофизический институт
Нижегородского государственного университета
им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия, kalinina@nirfi.unn.ru***А.А. Лисов***Научно-исследовательский радиофизический институт
Нижегородского государственного университета
им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия, lisov@nirfi.unn.ru***N.V. Bakhmetieva***Radiophysical Research Institute,
Lobachevsky State University,
Nizhniy Novgorod, Russia, nv_bakhm@nirfi.unn.ru***G.I. Grigoriev***Radiophysical Research Institute,
Lobachevsky State University,
Nizhniy Novgorod, Russia, grig19@list.ru***I.N. Zhemyakov***Radiophysical Research Institute,
Lobachevsky State University,
Nizhniy Novgorod, Russia, ilia.zhem@yandex.ru***E.E. Kalinina***Radiophysical Research Institute,
Lobachevsky State University,
Nizhniy Novgorod, Russia, kalinina@nirfi.unn.ru***A.A. Lisov***Radiophysical Research Institute,
Lobachevsky State University,
Nizhniy Novgorod, Russia, lisov@nirfi.unn.ru*

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментов по воздействию на ионосферу Земли мощным высокочастотным радиоизлучением среднеширотного нагревного стенда СУРА (56.1° N, 46.1° E). Возмущение в ионосфере создавалось радиоволной необыкновенной поляризации в условиях, когда обыкновенная компонента мощной волны не отражалась ионосферой. Зондирование возмущенной области осуществлялось пробной радиоволной той же поляризации на частоте выше частоты нагрева на 228–400 кГц. Во время воздействия на ионосферу с высоты отражения мощной радиоволны принимался слабый рассеянный сигнал с амплитудой на 40–60 дБ ниже амплитуды сигнала зеркального отражения от F-области. Это означает, что искусственное возмущение плотности плазмы происходило в области отражения мощной радиоволны необыкновенной поляризации. Обсуждаются возможные причины возникновения возмущения.

Ключевые слова: ионосфера, плазма, высокочастотный нагрев, зондирование пробными радиоволнами, рассеяние, искусственные периодические неоднородности, нагревный стенд СУРА.

Abstract. The paper presents the results of experiments on the impact of powerful high-frequency radio emission from the SURA mid-latitude heating facility (56.1° N, 46.1° E) on Earth's ionosphere. The disturbance in the ionosphere was created by a radio wave of extraordinary polarization under conditions when the ordinary component of the powerful wave was not reflected by the ionosphere. The sounding of the disturbed region was carried out with a probe radio wave of the same polarization at a frequency higher than the heating frequency by 228–400 kHz. During the impact on the ionosphere, a weak scattered signal with an amplitude 40–60 dB lower than the amplitude of the specular reflection signal from the F-region was received from the height of reflection of the powerful radio wave. This means that the artificial disturbance of the plasma density occurred in the region of reflection of the powerful radio wave of extraordinary polarization. Possible causes of the disturbance are discussed.

Keywords: ionosphere, plasma, high-frequency heating, sounding with a probe radio wave, artificial periodic irregularities, SURA heating facility.

ВВЕДЕНИЕ

Начатые в 60-х гг. прошлого столетия исследования ионосферы при воздействии на нее мощным КВ-радиоизлучением нагревных стенов обнаружили множество явлений как предсказанных и обоснованных в теоретических работах, так и в какой-то степени неожиданных. Результатам этих исследований посвящена обширная литература, включающая монографии и десятки сотен статей в научной периодике. Среди них монографии [Гуревич, Шварцбург, 1973; Митяков и др., 1989; Благовещенская, 2001; Фролов, 2017; Kelley, 2009], обзоры [Гинзбург, Гуревич, 1960; Utlaut, Cohen, 1971; Stubbe, Hagfors, 1997; Leyser, 2001; Гуревич, 2007; Gurevich, 1999; Грач и др., 2016; Streltsov et al., 2018; Беликович и др., 2007; Фролов и др., 2007; Благовещенская, 2010, 2020; Blagoveshchenskaya et al., 2020, 2022; Kuo, 2021], в которых приведена обширная библиография теоретических и экспериментальных исследований искусственного возмущения ионосферы мощным радиоизлучением. В выполненных на нагревных стендах Agescibo, HAARP, EISCAT, «Зименки», СУРА экспериментах по воздействию на ионосферу мощной радиоволной обыкновенной поляризации был исследован широкий круг возникающих при этом явлений. Одним из них было возникновение искусственной турбулентности ионосферной плазмы как следствие развития плазменных неустойчивостей разного типа вблизи уровня верхнего гибридного резонанса, т. е. высоты резонансного взаимодействия поля мощной волны с электронами ионосферы [Гуревич, 2007; Васильков, Гуревич, 1973, 1975a, б, 1979]. Подробный обзор результатов многочисленных экспериментов по воздействию на ионосферу мощным радиоизлучением дан в монографии [Фролов, 2017], в работах [Streltsov et al., 2018; Rietveld et al., 1993, 2016; Blagoveshchenskaya, 2020; Kuo, 2021]. Важным условием усиления нагревных эффектов оказалось излучение передатчиками стенда мощной радиоволны в направлении магнитного зенита [Gurevich et al., 2002; Pedersen et al., 2003].

Долгое время возмущения ионосферы при радионагреве связывали с комплексом нелинейных процессов, развивающихся в поле мощной обыкновенной волны и вызывающих образование развитой структуры неоднородностей плазмы, сильно вытянутых вдоль геомагнитного поля. Излучение радиоволн необыкновенной поляризации использовалось для исследования ионосферы и нейтральной атмосферы методом создания искусственных периодических неоднородностей ионосферной плазмы (ИПН), впервые реализованном на нагревном стенде «Зименки» и впоследствии развитом на стенде СУРА [Беликович и др., 1975, 1999; Belikovich et al., 2002; Bakhmetieva, Grigoriev, 2022]. В монографии [Фролов, 2017] подробно описываются и обсуждаются результаты экспериментов по возмущению ионосферы необыкновенной радиоволной, в которых было установлено, что мелкомасштабные неоднородности с поперечным относительно геомагнитного поля масштабом $l_{\perp} \approx 10\text{--}20$ м не возбуждались; декаметровые мелкомасштабные неоднородности с по-

перечным масштабом 50–200 м и среднемасштабные с $l_{\perp} \approx 3$ км возбуждались только в вечерние и ночные часы, а крупномасштабные неоднородности с $l_{\perp} \approx 10\text{--}20$ км и более возбуждались в эти же часы при условии близости частоты нагрева к критической частоте F-слоя для необыкновенной волны [Фролов и др., 2014; Фролов, 2015]. Лучший результат достигался при излучении мощной радиоволны в направлении магнитного зенита.

Большой объем исследований нелинейных явлений в плазме при возмущении ее мощной радиоволной необыкновенной поляризации был выполнен международным коллективом на высокоширотном нагревном стенде EISCAT [Благовещенская и др., 2018; Blagoveshchenskaya, 2020; Blagoveshchenskaya et al., 2019, 2020, 2022; Kalishin et al., 2021; Борисова и др., 2023]. Эти эксперименты показали, что в условиях спокойной высокоширотной ионосферы мощная радиоволна необыкновенной поляризации, излученная в направлении магнитного зенита, может воздействовать на F-область ионосферы эффективнее и вызывать более сильное возмущение ионосферной плазмы, чем радиоволна обыкновенной поляризации.

На основе опыта, приобретенного нами в результате многолетних исследований ионосферы методом резонансного рассеяния радиоволн на ИПН, в 2006 г. на среднеширотном стенде СУРА был начат новый цикл экспериментов по исследованию возмущенной области ионосферы, создаваемой при воздействии на ионосферу мощными радиоволнами необыкновенной поляризации. Зондирование возмущенной области пробными радиоволнами той же поляризации на частоте, близкой к нагревной, проводилось на базе установки частичных отражений. Рассеяние пробных радиоволн из области, возмущенной радиоволной необыкновенной поляризации, наблюдалось нерегулярно, при определенных условиях. Целью данной работы является обсуждение результатов этих экспериментов.

1. СОЗДАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ВОЗМУЩЕНИЯ В ИОНОСФЕРЕ И ЕГО ЛОКАЦИЯ ПРОБНЫМИ РАДИОВОЛНАМИ

Измерения проводились 10–11 октября 2006 г., 1–2 сентября и 8 октября 2014 г., 18 мая 2016 г. и 24–25 сентября 2024 г. в вечерние часы, иногда в условиях сильной диффузности F-слоя ионосферы. В тексте приведено московское время (МСК), по которому работают нагревный стенд СУРА и диагностический комплекс, с указанием в скобках всемирного универсального времени (UTC).

10–11 октября 2006 г.

Эксперимент проходил с 19:00 до 22:00 МСК (UTC+4). Воздействие на ионосферу производилось синфазно тремя передатчиками с излучаемой мощностью $P_1=210$ кВт, $P_2=220$ кВт и $P_3=190$ кВт на частоте 4.3 МГц. Мощная радиоволна необыкновенной поляризации излучалась в зенит.

Локация возмущенной области осуществлялась также необыкновенной радиоволной на частоте $f_{\text{проб}}=4.7$ МГц (т. е. выше нагревной частоты на 400 кГц) передатчиком «Поиск» установки частичных отражений. В режиме нагрева ионосферы стенд СУРА 30 с непрерывно излучал мощные радиоволны, затем следовала 60-секундная пауза. Эксперимент проводился в условиях, когда критическая частота F2-слоя f_oF2 была ниже нагревной частоты и волны обыкновенной поляризации не отражались ионосферой. Состояние ионосферы контролировалось ионозондом «Базис». Во время эксперимента наблюдалось явление естественного F-рассеяния, при котором зеркальное отражение волны от F-слоя становится размытым [Брюнелли, Намгаладзе, 1988]. Во время нагрева и паузы в работе стенда проводилось импульсное зондирование возмущенной области ионосферы. Для регистрации характеристик амплитуд и фаз сигналов, отраженных и рассеянных ионосферой, использовалась специализированная аппаратура, разработанная для исследования ионосферы методом частичных отражений, применяемая также при исследовании ионосферы и нейтральной атмосферы методом ИПН [Беликович и др., 2003]. Передатчик установки частичных отражений излучал в зенит линейно-поляризованные радиоволны в импульсном режиме с длительностью импульса 25 (50) мкс и частотой повторения 25 (50) Гц. Приемопередающая антенная система установки имеет 12 вибраторов для каждой из двух взаимно ортогональных поляризаций. На приеме, как правило, выделялась волна, соответствующая необыкновенной компоненте. Принятые сигналы усиливались приемником с полосой 40 (80) кГц, их квадратурные компоненты регистрировались в цифровом виде с шагом по действующей высоте 0.7–1.4 км в диапазоне действующих высот от 0 до 700 км. Эксперимент показал, что в период воздействия на ионосферу радиоволной необыкновенной поляризации в интервале действующих высот на 30–40 км ниже зеркально отраженного сигнала появлялся слабый рассеянный сигнал, пропадавший после окончания нагрева.

1–2 сентября 2014 г.

Эксперимент проходил с 21:25 до 07:10 МСК (UTC+4). Нагрев ионосферы производился двумя передатчиками с излучаемой мощностью $P_1=150$ кВт и $P_2=160$ кВт на частоте $f_{\text{нагр}}=4.3$ МГц. Пробные волны излучались, как и в 2006 г., на частоте $f_{\text{проб}}=4.7$ МГц. После 00:16 МСК обыкновенная компонента пробной волна перестала отражаться от ионосферы. В целом были выполнены условия эксперимента 2006 г., но F-рассеяния не наблюдалось. Рассеянные сигналы во время воздействия на ионосферу не были зарегистрированы. После 02:45 МСК нагревная волна перестала отражаться от ионосферы.

8 октября 2014 г.

Эксперимент проходил с 22:30 до 24:00 МСК (UTC+4). На нагрев работали три передатчика с излучаемой мощностью $P_1=170$ кВт, $P_2=150$ кВт и $P_3=150$ кВт на частоте $f_{\text{нагр}}=4.3$ МГц. Использовались диагностический передатчик пробных волн и частота пробных радиоволн такие же, как в сен-

тябре 2014 г. Рассеянные сигналы во время воздействия на ионосферу не были зарегистрированы.

18 мая 2016 г.

Эксперимент проходил с 18:25 до 20:00 МСК (UTC+3). Нагрев производился на частоте 5.750 МГц двумя передатчиками с $P_1=200$ кВт и $P_2=120$ кВт, частоту пробных волн изменяли с 5.600 до 5.900 МГц. К концу работы критическая частота F-слоя (х-компонента) снизилась до 5.5 МГц, т. е. в этом эксперименте зондирование ионосферы с помощью установки частичных отражений проводилось временами на частоте ниже частоты нагрева. Рассеянные сигналы во время воздействия на ионосферу не были зарегистрированы.

24–25 сентября 2024 г.

Эксперимент проходил с 21:30 до 23:15 МСК (UTC+3) 24 сентября и 05:30 до 07:15 МСК (UTC+3) 25 сентября. Нагрев ионосферы непрерывно проводился двумя передатчиками стенда СУРА на частоте 5.227 МГц с излучаемой мощностью $P_1=220$ кВт и $P_2=200$ кВт. Пробные радиоволны на частоте 5.455 МГц, т. е. выше нагревной частоты на 228 кГц, излучались третьим передатчиком мощностью $P_3=170$ кВт с длительностью импульса 50 мкс и частотой повторения 50 Гц.

Для приема и регистрации всех отраженных и рассеянных ионосферой сигналов использовалась антенная система установки частичных отражений и приемный комплекс на основе 14-разрядной платы National Instruments. Полоса приема составляла 850 кГц.

2. ОТКЛИК ИОНОСФЕРЫ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ МОЩНОЙ РАДИОВОЛНЫ

Приведем основные результаты каждого цикла измерений.

2.1. Характеристики рассеянного сигнала 10–11 октября 2006 г.

Как упоминалось выше, во время воздействия на ионосферу необыкновенной волной появлялся слабый рассеянный сигнал на действующих высотах, в основном на 30–40 км ниже высоты зеркального отражения сигнала от F-области. Рассеянный сигнал наблюдался с 19:40 до 21:00 МСК 10 октября 2006 г. и с 20:45 до 21:57 МСК 11 октября 2006 г. Эффект был настолько выраженным, что появление и развитие рассеянного сигнала при нагреве ионосферы наблюдались в реальном времени без дополнительной обработки. На рис. 1 в координатах действующая высота — время показан фрагмент регистрации в реальном времени амплитуды сигнала, появившегося при воздействии на ионосферу. Амплитуда рассеянного сигнала была на 40–50 дБ ниже амплитуды зеркального отражения пробной радиоволны от F-слоя ионосферы и быстро изменялась с высотой и во времени. Время развития сигнала составляло около 1 с, а время релаксации приблизительно доли секунды. Сигнал имел шумоподобный характер: временной интервал корреляции не превышал 0.2 с.

Выше 340–350 км видны диффузные зеркальные отражения пробной волны от F-области. На высоте

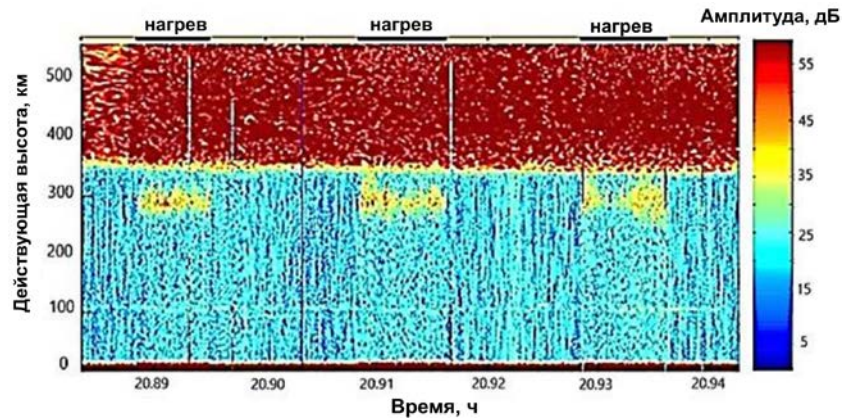


Рис. 1. Фрагмент регистрации в реальном времени амплитуды сигнала, появившегося при воздействии на ионосферу в трех сеансах нагрева. Отдельные белые или черные вертикальные линии означают неправильные сканы из-за сбоев в приемной аппаратуре. Интервалы нагрева показаны сверху темными полосами. Время дано в долях часа

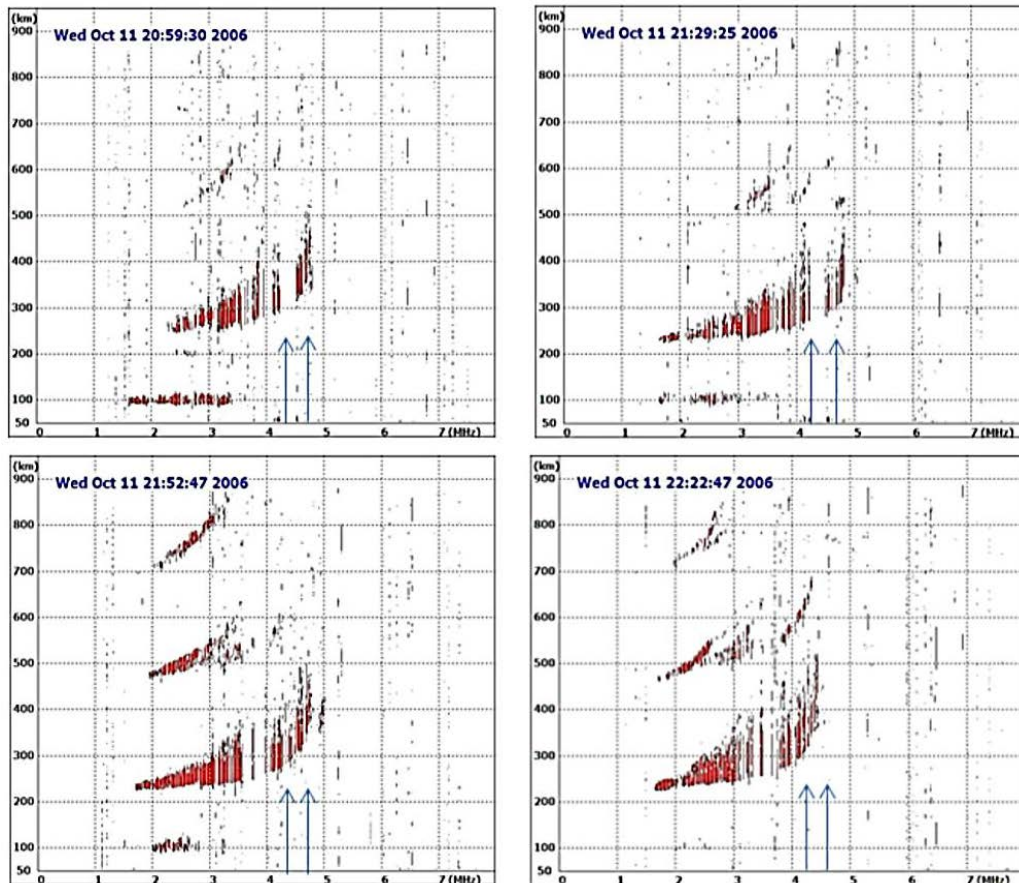


Рис. 2. Ионограммы, полученные с помощью ионозонда «Базис» 11.10.2006 в часы эксперимента. Время на ионограммах указано МСК (UTC+4). Стрелками обозначены частоты нагревной и пробной радиоволн. Видно, что в часы проведения эксперимента наблюдалось интенсивное F-рассеяние

~105 км наблюдается спорадический слой E (E_s) с критической частотой $f_oE_s = 2.5\text{--}3.1$ МГц. Соответствующие ионограммы, полученные ионозондом «Базис», приведены на рис. 2. В этих условиях радиоволна обыкновенной поляризации частотой 4.3 МГц не отражалась от ионосферы.

На рис. 3 в тех же координатах приведены амплитуды рассеянного и зеркально отраженного сигналов для серии нагревов после 21:30 МСК. Выше 310 км отмечается диффузный зеркальный сигнал

на частоте пробной волны. На рис. 3 выше 270 км под высотой зеркального отражения пробной волны (~310–320 км) виден рассеянный сигнал частотой 4.7 МГц, развитие которого коррелирует с моментами включения нагрева. В середине пятого сеанса нагрева после 21.71 МСК (время дано в долях часа) падала мощность, излучаемая передатчиками нагревного стенда. Видно, что амплитуда рассеянного сигнала также заметно упала, что означает ее прямую зависимость от мощности нагрева. К концу седьмого сеанса

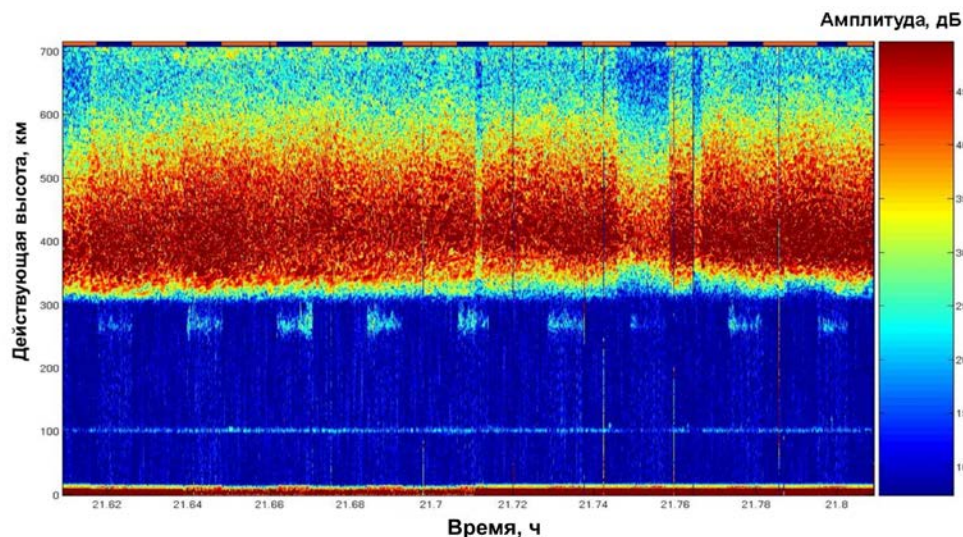


Рис. 3. Фрагмент регистрации в реальном времени амплитуды сигнала, появившегося при воздействии на ионосферу, для девяти сеансов нагрева после 21:30 МСК. Интервалы нагрева показаны сверху темными полосами

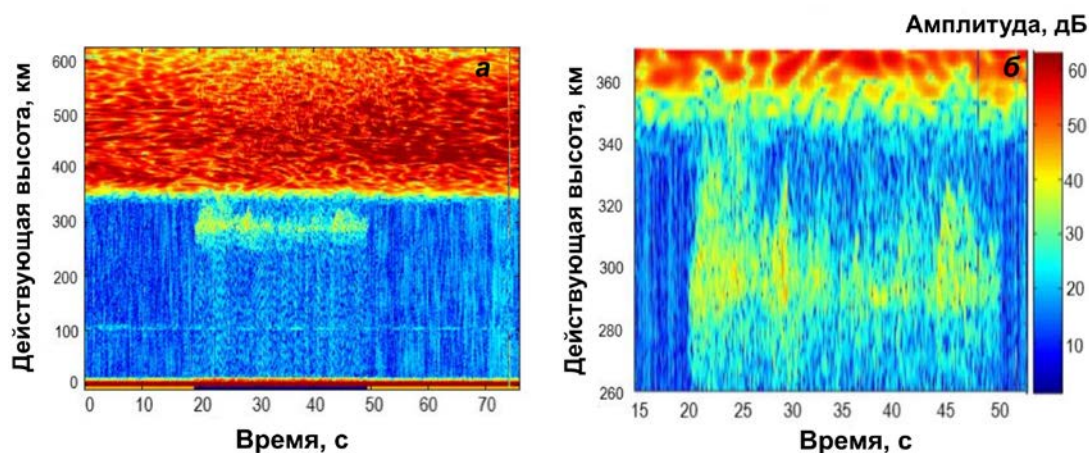


Рис. 4. Развитие рассеянного сигнала в сеансе нагрева с началом в 20:55:03 МСК: *a* — в интервале действующих высот 0–700 км; *б* — в более узком интервале высот 260–360 км

нагрева после 21.75 МСК было уменьшено напряжение на приеме (вручную включено ослабление на 20 дБ на приемной установке), что привело к уменьшению амплитуды принимаемого сигнала. Спорадический слой E наблюдался на высоте 100–105 км все время измерений.

Из анализа высотных профилей электронной концентрации, восстановленных из ионограмм вертикального зондирования, следует, что пробная радиоволна частотой 4.7 МГц отражалась на высотах, близких к высоте отражения нагревной волны частотой 4.3 МГц. Напомним, что речь идет о необыкновенных компонентах нагревной и пробной радиоволн.

Во время нагрева изменялся характер диффузности F-слоя и, как следствие, отраженный от F-слоя ионосферы зеркальный сигнал приобретал более мелкую структуру по высоте и во времени. Это хорошо видно на рис. 4, на котором показано развитие рассеянного сигнала в сеансе с началом в 20:55:03 МСК (ч:мин:с). Из рис. 3 и 4 следует, что амплитуда рассеянного сигнала нерегулярно изменялась с высотой и во времени. В пределах каждого отдельного сеанса нагрева рас-

сеянные сигналы занимали интервал действующих высот от 20 до 100 км. Видны квазипериодические изменения амплитуды с периодами 5–10 с.

Приемная часть установки частичных отражений была спроектирована таким образом, что обыкновенная и необыкновенные моды пробной волны могли приниматься переменным (через такт). Заметим, что рассеянный сигнал в обыкновенной компоненте не наблюдался. Иллюстрацией этому служит рис. 5, на котором показан результат попеременного (через такт) приема обеих компонент пробной волны в сеансе в 21:21:54 МСК.

Хорошо видно, что рассеянный сигнал появился во время нагрева только в необыкновенной компоненте пробной волны (рис. 5, *a*) и отсутствовал в обыкновенной (рис. 5, *б*). Поскольку в это время обыкновенная волна частотой 4.7 МГц не отражалась ионосферой (критическая частота F-слоя была ниже частоты пробной волны), то сигнал выше 320 км на рис. 5, *б* представляет собой сигнал пробной волны необыкновенной поляризации, ослабленный из-за недостаточной развязки магнитоионных компонент в приемном тракте установки частичных отражений.

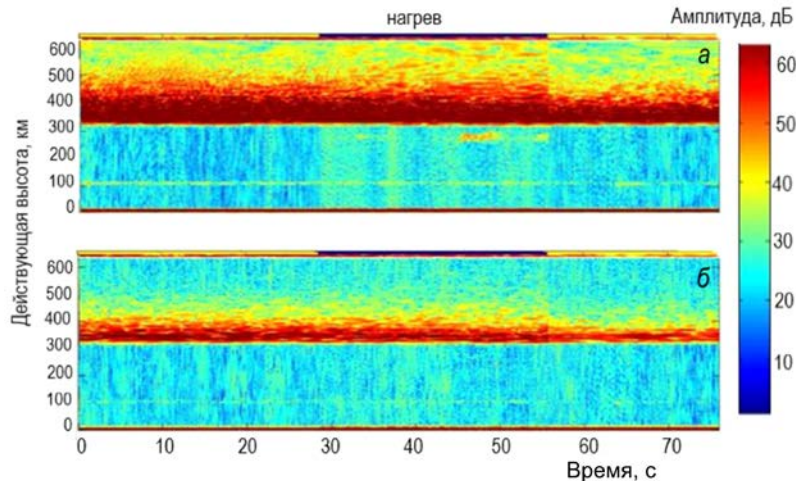


Рис. 5. Пример регистрации рассеянного сигнала необыкновенной (а) и обыкновенной (б) поляризации пробной волны в сеансе в 21:21:54 МСК (ч:мин:с)

Заметим, что результаты эксперимента 10–11 октября 2006 г. в свое время не публиковались и не докладывались на конференциях. Перед авторами стояла задача повторить эксперимент, вновь получить наблюдавшийся эффект и выяснить причину появления рассеянного сигнала при нагреве ионосферы радиоволной необыкновенной поляризации и зондировании возмущенной области пробной радиоволной той же поляризации, но на частоте на несколько сотен килогерц выше частоты нагрева. Несколько таких экспериментов были проведены позднее, ниже приводятся их результаты. Насколько нам известно, подобные эксперименты до этого не проводились.

2.2. Результаты экспериментов 2014 г. и 2016 г.

1–2 сентября 2014 г. (вечер, ночь, утро)

После 0:16 МСК обыкновенная компонента пробной волны перестала отражаться от ионосферы и были выполнены условия эксперимента 2006 г., но F-рассеяния не наблюдалось. Рассеянные сигналы, подобные зарегистрированным в 2006 г., также не наблюдались. Вероятно, мощность излучения (работали два передатчика 150 и 160 кВт) оказалась недостаточной. После 02:45 МСК нагревная волна перестала отражаться от ионосферы.

8 октября 2014 г.

При казалось бы подходящих условиях эксперимента рассеянные сигналы при нагреве также не наблюдались. Нагрев производился тремя передатчиками с излучаемой мощностью 170, 150 и 150 кВт, наблюдалась естественная диффузность F-слоя без интенсивного F-рассеяния. На рис. 6 показана амплитуда зеркального отражения необыкновенной компоненты пробной волны на частоте 4.7 МГц. Волна обыкновенной поляризации не отражалась ионосферой.

18 мая 2016 г.

На нагрев работали два передатчика с излучаемой мощностью $P_1=200$ кВт и $P_2=120$ кВт на частоте 5.750 МГц, пробные волны излучались в диапазоне

5.6–5.9 МГц. В начале наблюдений частота пробной волны была ниже частоты нагревной волны, затем была увеличена, и разность между ними составила 150 кГц. Был получен результат, подобный приведенному на рис. 6 для 8 октября 2014 г., т. е. рассеянные сигналы во время нагрева не наблюдались.

2.3. Характеристики рассеянного сигнала 24–25 сентября 2024 г.

Как отмечалось выше, в следующем эксперименте в сентябре 2024 г. прием ионосферных сигналов осуществлялся антенной системой установки частичных отражений, а пробный сигнал излучался одним из трех передатчиков нагревного стенда СУРА. Регистрация сигналов в цифровом виде проводилась с помощью 14-разрядной платы NI с шагом съема данных по высоте 150 м. Разность частот нагревной $f_{\text{нагр}}=5.227$ МГц и пробной $f_{\text{проб}}=5.455$ МГц радиоволн составила 228 кГц. Ввиду того, что полоса приемного устройства была шире, при последующей обработке проводилась фильтрация принимаемых сигналов фильтром Бесселя шестого порядка с полосой 40 кГц, что позволило практически полностью удалить из данных регистрации сигнал на частоте нагрева. Расписание работы было составлено таким образом, чтобы включить вечерние (ночные) часы в условиях диффузности F-слоя ионосферы и ранние утренние часы в условиях более регулярной ионосферы. На рис. 7 показаны фрагменты регистрации ионосферных сигналов при нагреве продолжительностью 30 с и паузе в работе нагревных передатчиков 60 с.

Пробные волны необыкновенной поляризации частотой 5.455 МГц отражались выше 350 км, наблюдалась диффузность F-слоя. Во время нагрева ниже высоты отражения пробной радиоволны появлялись рассеянные сигналы. Рассеянный сигнал был на 60–70 дБ слабее зеркального сигнала и занимал область 20–25 км по действующей высоте, непосредственно примыкая к высотам зеркального отражения сигнала (в отличие от эксперимента 2006 г.). Сигнал раз-

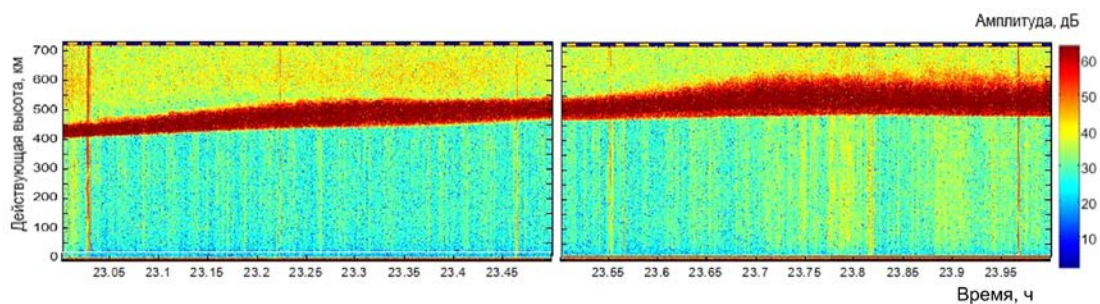


Рис. 6. Зеркальное отражение пробной волны от F-слоя 8 октября 2014 г., интервалы нагрева показаны на верхней оси светлыми полосами

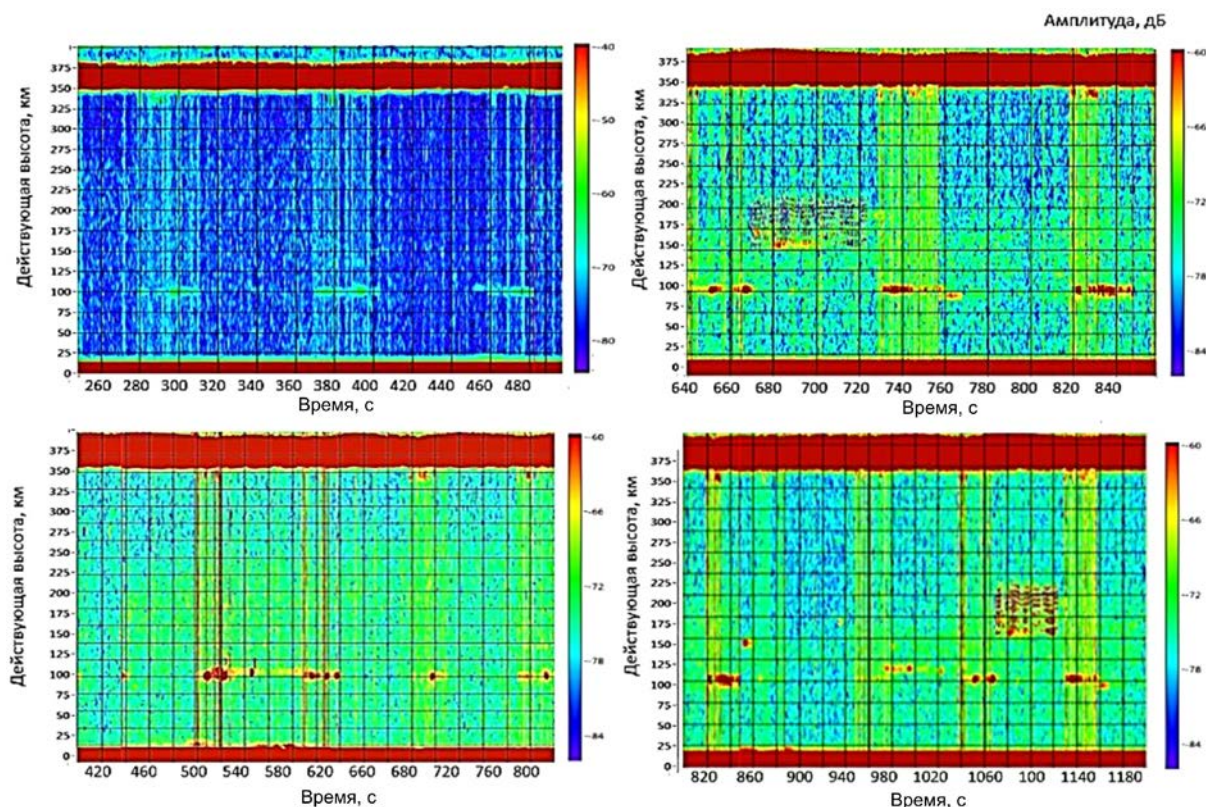


Рис. 7. Появление рассеянных сигналов ниже действующей высоты 350 км под высотой зеркального отражения пробной волны и сигналов E-области на высоте 100 км во время воздействия на ионосферу: вверху — в сеансе с началом в 21:45:50, внизу — в сеансе с началом в 21:15:50. Периоды нагрева хорошо идентифицируются по вертикальным полосам, которые означают не до конца отфильтрованный мощный сигнал на частоте нагрева

вивался за время около 1 с и пропадал за более короткое время, как и в 2006 г. Кроме того, во время нагрева появлялись (усиливались) сигналы с высот E-области. На ионограммах в это время на высоте 100–105 км эпизодически наблюдался полупрозрачный спорадический слой E с критической частотой 2.5–3.1 МГц. Одновременно с этим наблюдалось ослабление рассеянного сигнала в F-слое при росте амплитуды отраженного сигнала от E_s-слоя в сеансах нагрева ионосферы.

В утренние часы на восходе и после восхода Солнца в условиях быстрого роста критических частот, снижения высоты F-слоя, выраженной динамики ионосферы рассеянный сигнал на частоте пробной волны 5.455 МГц при воздействии на ионосферу необыкновенной волной частоты 5.227 МГц не наблюдался. На рис. 8 приведен фрагмент регистрации ионосферных сигналов в течение 12 мин

в сеансе с началом в 06:30:50. Показаны обе компоненты пробной волны. Видны множественные боковые отражения ниже действующей высоты 200 км, наклонные отражения около высоты 150 км и радиоотражения от следов метеоров вблизи высоты 100 км.

Таким образом, рассеянный сигнал на частоте, отличной от частоты нагрева на 228–400 кГц, наблюдался только в двух из пяти проведенных нами в разные годы экспериментов по воздействию на ионосферу мощной радиоволной необыкновенной поляризации и зондированию возмущенной области пробными радиоволнами той же поляризации.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ высотных профилей электронной концентрации, полученных из ионограмм вертикального

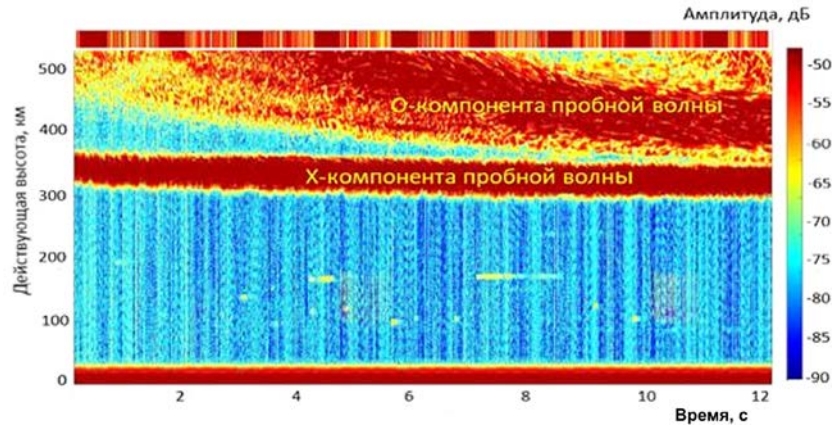


Рис. 8. Фрагмент регистрации ионосферных сигналов в течение 12 мин в сеансе с началом в 06:30:50. Интервалы нагрева длительностью 30 с показаны на верхней оси темно-красными полосами

зондирования 10–11 октября 2006 г., показал, что область появления рассеянных сигналов практически совпадала с уровнем отражения мощной волны на истинной высоте 223.4 км. Это означает, что искусственное возмущение плотности плазмы происходило в области отражения мощной радиоволны необыкновенной поляризации. Возможны два объяснения наблюдавшегося эффекта.

3.1. Гипотеза 1 — возбуждение плазменных волн и индуцированное рассеяние на ионах

Эксперимент 10–11 октября 2006 г. показал, что мощная радиоволна необыкновенной поляризации вызывает возмущение плотности плазмы в области ее отражения от ионосферы. Вопрос о природе возмущения в ионосфере при ее нагреве мощной радиоволной необыкновенной поляризации подробно рассмотрен в работе [Васьков, Рябова, 1997]. Это возмущение может создаваться как непосредственно электрическим полем радиоволны, так и полем возбуждаемых плазменных колебаний. В случае больших волновых векторов такие колебания могут распространяться ниже уровня отражения необыкновенной радиоволны близкой частоты и возбуждаться мощной радиоволной за счет развития различных неустойчивостей стрикционного типа. Причиной этого является возбуждение высокочастотных колебаний плазмы в результате индуцированного рассеяния необыкновенной радиоволны на ионах, для которого, как показано в работе [Васьков, Рябова, 1997], величина порогового поля оказывается сравнительно малой. Расчеты, сделанные на основе этой работы, показали, что в условиях экспериментов 10–11 октября 2006 г. при частоте нагревной волны необыкновенной поляризации $f_{\text{нагр}} = 4.3$ МГц и эффективной мощности ее излучения $\sim 100\text{--}120$ МВт можно было бы ожидать достаточно сильного возбуждения плазменных волн за время порядка 10^{-4} с. Однако эксперимент показал, что возбуждение плазменных волн полем необыкновенной радиоволны, если оно и происходило, то сильно подавлялось. Об этом свидетельствуют малая интенсивность рассеянного сигнала и его локализация вблизи уровня отражения

мощной волны от ионосферы, где ее электрическое поле возрастает вследствие фокусировки. В отсутствие (или при сильном подавлении) плазменных волн искусственные неоднородности должны создаваться непосредственно полем мощной радиоволны. Как следствие, амплитуда рассеянного сигнала должна возрастать прямо пропорционально интенсивности мощной волны. Эксперимент с поэтапным возрастанием мощности нагрева планировался, но не был осуществлен по техническим причинам.

3.2. Гипотеза 2 — рассеяние пробных радиоволн на искусственных периодических неоднородностях ионосферной плазмы

Как известно, ИПН в поле мощной волны наиболее эффективно создаются необыкновенной радиоволной (Х-модой) [Беликович и др., 1999; Belikovich et al., 2002; Bakhmetieva, Grigoriev, 2022]. Они существуют во всей толще ионосферы — в D-, E-, F-областях и межслоевой E–F-впадине. Вблизи точки зеркального отражения в F-области усиление ИПН происходит за счет «разбухания» поля мощной волны и увеличения ее длины [Гинзбург, 1967]. В спокойных условиях ИПН повторяют структуру поля стоячей волны, описываемой функцией Эйри [Гинзбург, 1967], и рассеивают только пробные радиоволны той же поляризации, что и нагревная волна, если частоты нагревной и пробной радиоволн совпадают, т. е. выполняется условие пространственного синхронизма [Беликович и др., 1999; Belikovich et al., 2002]. Полоса синхронизма по частоте определена нами в эксперименте 16 июля 2006 г. [Бахметьева, Беликович, 2007, 2008], задачей которого было исследование влияния на ИПН E_s-слоя. Для определения частотной полосы синхронизма при локации ИПН для приема рассеянных сигналов последовательно выбирались частоты, отстоящие от нагревной частоты 4.785 МГц на 30, 35 и 20 кГц, до частоты 4.700 МГц. Оказалось, что при последовательной отстройке от частоты создания ИПН амплитуды сигналов, рассеянных периодическими неоднородностями, уменьшались, а при отстройке на 85 кГц (частота сигнала на приеме 4.700 МГц) сигналы

от ИПН пропадали совсем, регистрировались только зеркальные отражения от F-слоя, E-области и E_s-слоя. Экспериментально определенная нами частотная полоса синхронизма [Бахметьева, Беликович, 2007, 2008] в этих условиях не превышала 85 кГц (полное пропадание рассеянного сигнала от ИПН) при длительности зондирующего импульса 30 мкс и полосе приемника 40 кГц.

В соответствии с найденной частотной полосой синхронизма в спокойных условиях при разнице частот нагревной и пробной радиоволн 228–400 кГц рассеянный ИПН сигнал не должен был наблюдаться. Однако во время эксперимента 10–11 октября 2006 г. наблюдалось сильное F-рассеяние, очевидно вызванное естественной возмущенностью ионосферы (естественными неоднородностями плазмы). Эта возмущенность должна была искажать упорядоченную структуру квазипериодических неоднородностей и приводить к уширению углового и частотного спектра сигнала, рассеянного ИПН. Вероятно, это и явилось причиной появления рассеянного сигнала во время нагрева в некоторой области высот вблизи высоты отражения мощной волны более низкой частоты. Авторы полагали, что проверкой этой гипотезы могло быть проведение подобного эксперимента в спокойных условиях и при наличии F-рассеяния, что в определенной степени являлось задачей эксперимента 24–25 октября 2024 г. Эксперимент подтвердил, что рассеянный сигнал во время нагрева наблюдался в вечерние часы в условиях диффузности F-слоя и не наблюдался в ранние утренние часы в условиях быстрого роста критических частот, снижения высоты F-слоя и ярко выраженной динамики ионосферы.

Чем могла быть вызвана естественная возмущенность F-слоя? Известно, что в F-слое существуют потоки плазмы, направленные днем вверх, ночью вниз из магнитосферы или сопряженного полушария [Брюнелли, Намгаладзе, 1988]. Если считать, что F-рассеяние создается подобными потоками со скоростями 20 м/с и более, то периодическая структура (ИПН), которая образуется в такой движущейся среде, будет искажена и сдвинута вечером по высоте вниз. Тогда появится градиент скорости по высоте и периодическая структура будет сжиматься, а условие синхронизма будет выполняться на более высокой частоте в результате уменьшения периода ИПН по высоте [Беликович и др., 1999; Belikovich et al., 2002]. Можно предположить, что в таком случае в условиях сильной естественной возмущенности частотная полоса синхронизма может превышать найденные ранее 85 кГц и ИПН будут рассеивать пробные сигналы в более широкой полосе частот.

На ионограммах E-область в это время отсутствовала, эпизодически наблюдался полупрозрачный E_s-слой с критической частотой $f_oE_s = 2.5\text{--}3.1$ МГц на высоте 100–105 км. Как отмечалось выше, в сеансах нагрева ионосферы при росте амплитуды сигнала, отраженного на высоте 100 км, как правило, рассеянный сигнал в F-слое ослабевал, что хорошо видно на рис. 7. Это можно объяснить ростом коэффициента отражения пробной волны от E-слоя вследствие роста в нем электронной концентрации при нагреве. В работах [Гершман, Игнатъев, 1997; Иг-

натъев, 1975] подробно рассмотрен вопрос о возмущении E-области ионосферы, включая E_s-слой, при воздействии на нее мощным радиоизлучением. При нагреве ионосферы в E-области с ростом температуры электронов уменьшается эффективный коэффициент рекомбинации [Гуревич, Шварцбург, 1973], вследствие чего электронная концентрация под действием мощного радиоизлучения возрастает. В результате возрастает коэффициент отражения мощной волны в нижней ионосфере, что приводит к уменьшению мощности воздействия на F-слой и, соответственно, к уменьшению интенсивности рассеяния пробной волны в F-слое. Такое же влияние оказывает полупрозрачный E_s-слой в случае, если он образован перераспределением атмосферных ионов NO⁺ и O₂⁺, а не ионов металлов, вероятность чего не исключена в вечерние и ночные часы [Гершман, Игнатъев, 1997; Игнатъев, 1975]. Заметим также, что в ночные часы электронная концентрация в E-области заметно уменьшается, но не пропадает полностью [Данилов, Власов, 1973; Брюнелли, Намгаладзе, 1988]. Исследования ионосферы в заходно-восходные часы, проведенные нами методом резонансного рассеяния радиоволн на ИПН в разные годы, показали, что достаточная ионизация в E-области может существовать всю ночь [Belikovich et al., 2002; Бахметьева и др., 2005, 2024]. В том числе измерения, выполненные методом ИПН 23–24 сентября 2024 г., показали, что по крайней мере до 23 ч МСК, т. е. уже после захода Солнца в ионосфере, сигналы, рассеянные ИПН, надежно регистрировались в интервале высот 90–130 км. Отметим, что метод, основанный на резонансном рассеянии радиоволн на ИПН, позволяет обнаруживать ионосферные регулярные и спорадические слои с низкой ионизацией, недоступные для обнаружения с помощью ионозондов [Беликович и др., 1999; Belikovich et al., 2002; Бахметьева, Беликович, 2007, 2008].

4. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПЛАНИРОВАНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТА

Проанализировав условия проведения и результаты экспериментов в разные годы, мы сделали следующие выводы по оптимальной организации подобного эксперимента по воздействию на ионосферу излучением в зенит мощной радиоволны необыкновенной поляризации на нагревном стенде СУРА.

Эксперименты показали, что требуется стабильная, желательно максимальная мощность нагрева. К сожалению, возможности стенда СУРА в этом отношении ограничены. Мощность диагностического передатчика не так важна, об этом можно судить по результатам экспериментов 2006 и 2024 гг., когда при использовании в качестве источника пробных волн маломощного передатчика установкой частичных отражений отчетливый рассеянный сигнал регистрировался в реальном времени. Таким образом, выраженность эффекта рассеяния в значительной степени зависит от мощности нагрева и в гораздо меньшей степени от мощности диагностического передатчика.

Оптимальной является ситуация, когда частота нагрева выше критической частоты F2-слоя для обыкновенной компоненты и ниже критической частоты F2-слоя для необыкновенной, в этом случае только мощная волна необыкновенной поляризации отражается ионосферой. Разность частот нагревной и пробной волн 228–400 кГц, на наш взгляд, была велика, вероятно, она должна быть меньше. В то же время желательна узкая полоса приема пробного сигнала, чтобы отстроиться от частоты нагрева. И, наконец, следует принимать во внимание сильную зависимость результата от состояния ионосферы: в наших условиях более выраженный эффект наблюдался при сильном F-рассеянии или диффузности ионосферы и не наблюдался в их отсутствие.

В отличие от экспериментов по воздействию на ионосферу, выполненных на нагревном стенде EISCAT [Благовещенская, 2010; Blagoveshchenskaya, 2020; Борисова и др., 2023], в экспериментах с 2006 по 2024 г. на стенде СУРА эффекты возмущения ионосферы мощной радиоволной необыкновенной поляризации при ее локации пробными радиоволной той же поляризации, но другой частоты, наблюдались нерегулярно и были довольно слабыми. Очевидно, решающее значение имела мощность нагревной волны. На стенде СУРА недостижима мощность излучения, сопоставимая с мощностью излучения высокоширотного стенда EISCAT. Кроме того, мощная радиоволна излучалась в зенит, а не в направлении магнитного зенита, что, вероятно, могло бы усилить наблюдавшийся эффект.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При воздействии на ионосферу мощной радиоволной необыкновенной поляризации и зондировании возмущенной ионосферы пробными радиоволнами той же поляризации на частоте, близкой к нагревной, но с разницей 228–400 кГц, на действующих высотах ниже высоты зеркального отражения пробной волны появлялся рассеянный сигнал. В октябре 2006 г. амплитуда рассеянного сигнала была на 40–50 дБ ниже амплитуды зеркально отраженного сигнала, он занимал диапазон действующих высот на 30–40 км ниже высоты сигнала, зеркально отраженного от F-слоя. Время развития рассеянного сигнала составляло около 1 с, а время релаксации — на порядок меньше. Сигнал имел шумоподобный характер, его амплитуда быстро изменялась с высотой и во времени. Эффект наблюдался в вечерние часы в условиях сильной диффузности F-слоя (явление F-рассеяния). В сентябре 2024 г. в поздние вечерние часы рассеянный сигнал с амплитудой на 50–60 дБ ниже амплитуды сигнала, зеркально отраженного от F-слоя, появлялся непосредственно под ним и занимал диапазон действующих высот 15–25 км. Во время сеансов нагрева длительностью 30 с в течение 1 с и менее появлялся (усиливался) сигнал от E-области или спорадического слоя E. При появлении рассеянного сигнала в E-области рассеянный сигнал в F-слое, как правило, ослабевал.

Анализ высотных профилей электронной концентрации показал, что пробная волна необыкновен-

ной поляризации с частотой выше частоты нагревной волны на 228–400 кГц той же поляризации отражалась практически на высоте отражения последней и рассеянный сигнал появлялся вблизи этой высоты. Это означает, что мощная радиоволна необыкновенной поляризации вызывала возмущение плотности плазмы в области ее отражения от ионосферы. В утренние часы после восхода Солнца в условиях быстрого роста критических частот ионосферы подобный рассеянный сигнал при воздействии на ионосферу не наблюдался.

Предложены два объяснения наблюдавшегося явления. На данный момент предпочтительным кажется предположение о рассеянии пробных радиоволн на искусственных периодических неоднородностях ионосферной плазмы, возникающих в поле мощной радиоволны. Рассеяние радиоволн на ИПН в случае, когда поляризация нагревной и пробной радиоволн совпадают, а рассеянный сигнал появляется на частоте, отличной от нагревной, может быть обусловлено изменением условий синхронизма и расширением полосы наблюдаемых частот при рассеянии на ИПН в условиях интенсивного F-рассеяния. Подтверждением этому служит отсутствие рассеянного сигнала утром после восхода Солнца в условиях более регулярной ионосферы. Тем не менее приходится констатировать, а проведенные эксперименты убедительно это показали, что вопрос о механизмах образования неоднородностей плазмы в поле мощной радиоволны необыкновенной поляризации в теоретическом плане остается открытым.

Авторы работы с благодарностью вспоминают безвременно ушедших в 2009 г. Беликовича Витольда Витальевича и Васькова Виктора Викторовича, совместно с которыми в 2006 г. были начаты эксперименты, результаты которых представлены в данной работе.

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках гранта № 25-27-00031.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бахметьева Н.В., Беликович В.В. Воздействие на ионосферу Земли мощным коротковолновым радиоизлучением: искусственные периодические неоднородности и спорадический слой E. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2007, т. 50, № 8, с. 695–708.
- Бахметьева Н.В., Беликович В.В. Результаты исследований спорадического слоя E методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях ионосферной плазмы. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2008, т. 51, № 11, с. 956–969.
- Бахметьева Н.В., Беликович В.В., Каган Л.М., Понятов А.А. Заходно-восходные характеристики спорадических слоев ионизации в нижней ионосфере, наблюдаемые методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях ионосферной плазмы. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2005, т. 48, № 1, с. 16–32.
- Бахметьева Н.В., Григорьев Г.И., Жемаков И.Н. и др. Особенности нижней ионосферы Земли во время затмений Солнца и в заходно-восходные часы по измерениям методом ИПН вблизи Нижнего Новгорода. *Солнечно-земная физика*. 2024, т. 10, № 3, с. 129–145. DOI: [10.12737/szf-103202414](https://doi.org/10.12737/szf-103202414) / Bakhmetieva N.V., Grigoriev G.I., Zhemyakov I.N., et al. Features of Earth's lower ionosphere during

- solar eclipse and sunset and sunrise hours according to measurements by the API method near Nizhny Novgorod. *Sol.-Terr. Phys.* 2024, vol. 10, iss. 3, pp. 121–136. DOI: [10.12737/stp-103202414](https://doi.org/10.12737/stp-103202414).
- Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Гетманцев Г.Г. и др. О рассеянии радиоволн от искусственно возмущенной F-области ионосферы. *Письма в ЖЭТФ*, 1975, т. 22, вып. 10, с. 497–499.
- Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Толмачева А.В., Бахметьева Н.В. *Исследование ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей*. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1999, 155 с.
- Беликович В.В., Выхирев В.Д., Калинина Е.Е. и др. Исследование D-области ионосферы методом частичных отражений на средних широтах и в авроральной зоне. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2003, т. 46, № 3, с. 181–191.
- Беликович В.В., Грач С.М., Караштин А.Н. и др. Стенд «Сура»: исследования атмосферы и космического пространства. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2007, т. 50, № 7, с. 545–576.
- Благовещенская Н.Ф. *Геофизические эффекты активных воздействий в околоземном космическом пространстве*. СПб.: Гидрометеиздат, 2001, 287 с.
- Благовещенская Н.Ф. Комплексные исследования эффектов воздействия мощных КВ-радиоволна высокоширотную ионосферу: итоги и перспективы. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2010, т. 84, № 1, с. 81–98.
- Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Калишин А.С. и др. Сравнение эффектов воздействия мощных КВ-радиоволн обыкновенной (О-мода) и необыкновенной (Х-мода) поляризации на высокоширотную F-область ионосферы. *Космические исследования*. 2018, т. 56, № 1, с. 14–29. DOI: [10.7868/S002342061801003X](https://doi.org/10.7868/S002342061801003X).
- Борисова Т.Д., Благовещенская Н.Ф., Калишин А.С. Особенности искусственной ионосферной турбулентности, вызванной высокочастотным нагревом О- и Х-мод вблизи критической частоты слоя F2. *Солнечно-земная физика*. 2023, т. 9, № 1, с. 22–32. DOI: [10.12737/szf-91202303](https://doi.org/10.12737/szf-91202303) / Borisova T.D., Blagoveshchenskaya N.F., Kalishin A.S. Features of artificial ionosphere turbulence induced by the O- and X-mode HF heating near the F2-layer critical frequency. *Sol.-Terr. Phys.* 2023, vol. 9, iss. 1, pp. 21–30. DOI: [10.12737/stp-91202303](https://doi.org/10.12737/stp-91202303).
- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. *Физика ионосферы*. М.: Наука, 1988, 527 с.
- Васьков В.В., Гуревич А.В. Параметрическое возбуждение ленгмюровских колебаний в ионосфере в поле сильных радиоволн. *Изв. вузов. Радиофизика*. 1973, т. 16, № 2, с. 188–198.
- Васьков В.В., Гуревич А.В. Нелинейная резонансная неустойчивость в поле обыкновенной электромагнитной волны. *ЖЭТФ*. 1975а, т. 69, № 1, с. 176–178.
- Васьков В.В., Гуревич А.В. Расслоение плазмы в области отражения мощных радиоволн в ионосфере. *Изв. вузов. Радиофизика*. 1975б, т. 18, № 9, с. 1261–1272.
- Васьков В.В., Гуревич А.В. Самофокусировочная и резонансная неустойчивости в F-области ионосферы. *Тепловые нелинейные явления в плазме*. Горький: ИПФ АН СССР, 1979, с. 81–138.
- Васьков В.В., Рябова Н.А. Возбуждение коротковолновых колебаний ионосферной плазмы полем мощной радиоволны необыкновенной поляризации в результате индуцированного рассеяния на ионах. *Изв. вузов. Радиофизика*. 1997, т. 40, № 5, с. 541–559.
- Гершман Б.Н., Игнатьев Ю.А. Теория образования спорадического слоя E и возникновения в нем неоднородностей. *Ионосферные исследования*. 1997, № 50, с. 7–28.
- Гинзбург В.Л. *Распространение электромагнитных волн в плазме*. М.: Наука, 1967, 683 с.
- Гинзбург В.Л., Гуревич А.В. Нелинейные явления в плазме, находящейся в переменном электромагнитном поле. *УФН*. 1960, т. 70, с. 201–246. DOI: [10.3367/UFNr.0070.196002a.0201](https://doi.org/10.3367/UFNr.0070.196002a.0201).
- Грач С.М., Сергеев Е.Н., Мишин Е.В., Шиндин А.В. Динамические характеристики плазменной турбулентности ионосферы, инициированные воздействием мощного коротковолнового радиоизлучения. *УФН*. 2016, т. 186, № 11, с. 1189–1228. DOI: [10.3367/UFNr.2016/07/037868](https://doi.org/10.3367/UFNr.2016/07/037868).
- Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере. *УФН*. 2007, т. 177, № 11, с. 1145–1177. DOI: [10.3367/UFNr.0177.200711a.1145](https://doi.org/10.3367/UFNr.0177.200711a.1145).
- Гуревич А.В., Шварцбург А.Б. *Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере*. М.: Наука, 1973, 272 с.
- Данилов А.Д., Власов М.Н. *Фотохимия ионизованных и возбужденных частиц в нижней ионосфере*. Л.: Гидрометеиздат, 1973, 190 с.
- Игнатьев Ю.А. Влияние на спорадический слой E нагрева ионосферы мощным радиоизлучением. *Изв. вузов. Радиофизика*. 1975, т. 18, № 9, с. 1365–1369.
- Митяков Н.А., Грач С.М., Митяков С.Н. Возмущение ионосферы мощными радиоволнами. *Итоги науки и техники. Серия “Геомагнетизм и высокие слои атмосферы”*. М.: ВИНТИ, 1989, т. 9, 138 с.
- Фролов В.Л. Пространственная структура возмущений плотности плазмы, индуцируемых в ионосфере при ее модификации мощными КВ-радиоволнами: обзор результатов экспериментальных исследований. *Солнечно-земная физика*. 2015, т. 1, № 2, с. 22–48. DOI: [10.12737/10383](https://doi.org/10.12737/10383) / Frolov V.L. Spatial structure of plasma density perturbations, induced in the ionosphere modified by powerful HF radio waves: review of experimental results. *Sol.-Terr. Phys.* 2015, vol. 1, iss. 2, pp. 22–48. DOI: [10.12737/10383](https://doi.org/10.12737/10383).
- Фролов В.Л. *Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы*. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского университета, 2017, 468 с.
- Фролов В.Л., Бахметьева Н.В., Беликович В.В. и др. Модификация ионосферы Земли мощным КВ-радиоизлучением. *УФН*. 2007, т. 177, № 3, с. 330–340. DOI: [10.3367/UFNr.0177.200703j.0330](https://doi.org/10.3367/UFNr.0177.200703j.0330).
- Фролов В.Л., Болотин И.А., Комраков Г.П. и др. Генерация искусственных ионосферных неоднородностей при воздействии на среднеширотную ионосферу Земли мощными КВ-радиоволнами с необыкновенной поляризацией. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2014, т. 57, № 6, с. 437–463.
- Bakhmetieva N.V., Grigoriev G.I. Study of the mesosphere and lower thermosphere by the method of creating artificial periodic irregularities of the ionospheric plasma. *Atmosphere*. 2022, vol. 1, iss. 9, p. 1346. DOI: [10.3390/atmos13091346](https://doi.org/10.3390/atmos13091346).
- Belikovich V.V., Benediktov E.A., Tolmacheva A.V. Bakhmet'eva N.V. *Ionospheric Research by Means of Artificial Periodic Irregularities*. Katlenburg-Lindau: Copernicus GmbH, 2002, 160 p.
- Blagoveshchenskaya N.F. Perturbing the high-latitude upper ionosphere (F region) with powerful HF radio waves: A 25-year collaboration with EISCAT. *URSI Radio Science Bulletin*. 2020, vol. 373, pp. 40–55. DOI: [10.23919/URSIRSB.2020.9318436](https://doi.org/10.23919/URSIRSB.2020.9318436).
- Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Kalishin A.S., et al. Characterization of artificial, small-scale, ionospheric irregularities in the high-latitude F region induced by high-power, high-frequency radio waves of extraordinary polarization. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2019, vol. 59, no. 6, pp. 759–773. DOI: [10.1134/s0016793219060045](https://doi.org/10.1134/s0016793219060045).
- Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Kalishin A.S., et al. Distinctive features of Langmuir and ion-acoustic turbulences induced by O- and X-mode HF pumping at EISCAT. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2020, vol. 125, no. 7, e2020JA028203. DOI: [10.1029/2020JA028203](https://doi.org/10.1029/2020JA028203).

- Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Kalishin A.S., et al. Disturbances of electron density in the high latitude upper (F-region) ionosphere induced by X-mode HF pump waves from EISCAT UHF radar observations. *Arctic and Antarctic Research*. 2022, vol. 68, no. 3, pp. 248–257. DOI: [10.30758/0555-2648-2022-68-3-248-257](https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-3-248-257).
- Gurevich A.V. Modern problems of ionospheric modification. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 1999, vol. 42, no. 7, pp. 599–606. DOI: [10.1007/BF02677558](https://doi.org/10.1007/BF02677558).
- Gurevich A.V., Zybin K.P., Carlson H.C., Pedersen T. Magnetic zenith effect in ionospheric modifications. *Phys. Lett. A*. 2002, vol. 305, no. 5, pp. 264–274. DOI: [10.1016/S0375-9601\(02\)01450-0](https://doi.org/10.1016/S0375-9601(02)01450-0).
- Kalishin A.S., Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Yeoman T.K. Ion gyro-harmonic structures in stimulated emission excited by X-mode high power HF radio waves at EISCAT. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2021, vol. 126, no. 8, e2020JA028989. DOI: [10.1029/2020JA028989](https://doi.org/10.1029/2020JA028989).
- Kelley M. C. *The Earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamics*. Academic Press is an imprint of Elsevier, 2009, 556 p.
- Kuo S. Linear and Nonlinear Plasma Processes in Ionospheric HF Heating. *Plasma*. 2021, vol. 4, no. 1, pp. 108–144. DOI: [10.3390/plasma4010008](https://doi.org/10.3390/plasma4010008).
- Leyser T.B. Stimulated electromagnetic emissions by high-frequency electromagnetic pumping of the ionospheric plasma. *Space Sci. Rev.* 2001, vol. 98, no. 3–4, pp. 223–328. DOI: [10.1023/A:1013875603938](https://doi.org/10.1023/A:1013875603938).
- Pedersen T.R., McCarrick M., Selcher E., et al. Magnetic zenith enhancement of HF radio-induced airglow production at HAARP. *Geophys. Res. Lett.* 2003, vol. 30, no. 4, 1169. DOI: [10.1029/2002GL016096](https://doi.org/10.1029/2002GL016096).
- Rietveld M.T., Kohl H., Kopka H., Stubbe P. Introduction to ionospheric heating at Tromsø. I. Experimental overview. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1993, vol. 55, no. 4/5, pp. 577–599. DOI: [10.1016/0021-9169\(93\)90007-L](https://doi.org/10.1016/0021-9169(93)90007-L).
- Rietveld M.T., Senior A., Markkanen J., Westman A. New capabilities of the upgraded EISCAT high-power HF facility. *Radio Sci.* 2016, vol. 51, no. 9, pp. 1533–1546. DOI: [10.1002/2016RS006093](https://doi.org/10.1002/2016RS006093).
- Streltsov A.V., Berthelier J.-J., Chernyshov A.A., et al. Past, present and future of active radio frequency experiments in space. *Space Sci. Rev.* 2018, vol. 214, article number 118. DOI: [10.1007/s11214-018-0549-7](https://doi.org/10.1007/s11214-018-0549-7).
- Stubbe P., Hagfors T. The Earth's ionosphere: A wall-less plasma laboratory. *Surveys in Geophysics*. 1997, vol. 18, no. 1, pp. 57–127. DOI: [10.1023/A:1006583101811](https://doi.org/10.1023/A:1006583101811).
- Utlaut W.F., Cohen R. Modifying the Ionosphere with Intense Radio Waves. *Science*. 1971, vol. 245, pp. 245–254. DOI: [10.1126/science.174.4006.245](https://doi.org/10.1126/science.174.4006.245).

Статья подготовлена по материалам Двадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 10–14 февраля 2025 г., Институт космических исследований РАН, Москва, Russia.

Как цитировать эту статью:

Бахметьева Н.В., Григорьев Г.И., Жемяков И.Н., Калинина Е.Е., Лисов А.А. Отклик ионосферы на воздействие на нее необыкновенной радиоволной при зондировании возмущенной области на частоте, близкой к нагревной. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 3, с. 88–99. DOI: [10.12737/szf-113202510](https://doi.org/10.12737/szf-113202510).