

ОБЗОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

Нелинейные явления в F-области ионосферы при воздействии мощными радиоволнами КВ-диапазона необыкновенной поляризации

Н.Ф. Благовещенская, А.С. Калишин, Т.Д. Борисова, Р.В. Васильев, Г.А. Жеребцов

Дан обзор современного состояния экспериментальных исследований нелинейных явлений в F-области высокоширотной ионосферы, вызванных воздействием мощных КВ радиоволн необыкновенной (X-мода) поляризации. К их числу относятся: (1) мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности (МИИН); (2) каналы (дакты) повышенной электронной плотности; (3) узкополосное (в полосе ± 1 кГц относительно частоты нагрева) искусственное радиоизлучение ионосферы (УИРИ); (4) продольные плазменные волны (ленгмюровские и ионно-акустические); (5) искусственное оптическое излучение в красной (630 нм) и зелёной (557,7 нм) линиях атомарного кислорода. Выполнено сравнение характеристик нелинейных явлений при излучении мощных КВ радиоволн обыкновенной (O-мода) и необыкновенной (X-мода) поляризации, в том числе нерезонансных явлений, возбуждаемых при высоких эффективных мощностях излучения ($P_{\text{эфф}} > 300$ МВт) в условиях, когда волна накачки не отражается от F-области ионосферы. Кратко рассмотрены перспективы развития исследований по модификации ионосферы мощными КВ радиоволнами в России.

Ключевые слова: мощная КВ радиоволна, необыкновенная поляризация, обыкновенная поляризация, высокоширотная ионосфера, нелинейные явления, искусственные ионосферные неоднородности, плазменные волны, ускорение электронов, канал, узкополосное искусственное радиоизлучение ионосферы, искусственное оптическое излучение, нерезонансные явления

PACS numbers: 41.20.Jb, 52.35. – g, 94.20. – y

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2026.03.040115>

Содержание

1. Введение (843).
2. Постановка экспериментов (844).
 - 2.1. КВ нагревный стенд и средства диагностики эффектов воздействия мощных КВ радиоволн.
 - 2.2. Режимы воздействия на F-область ионосферы.
3. Мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности (847).
 - 3.1. Характеристики мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей при воздействии на F-область ионосферы мощными КВ радиоволнами обыкновенной (O-мода) и необыкновенной (X-мода) поляризации и их сравнение с поведе-

нием параметров ионосферной плазмы. 3.2. Характеристики мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей при X-нагреве по данным ракурсного рассеяния радиоволн. 3.3. Сводка характеристик мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей при X-нагреве.

4. Дакты повышенной электронной плотности (850).
 - 4.1. Характеристики дактов при X-нагреве и их сравнение с эффектами при O-нагреве.
 - 4.2. Результаты исследования возрастания электронной плотности в дактах.
5. Узкополосное искусственное радиоизлучение ионосферы (853).
 - 5.1. Искусственное радиоизлучение ионосферы при O-нагреве.
 - 5.2. Характеристики узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы при X-нагреве.
6. Продольные плазменные волны (ленгмюровские и ионно-акустические) (857).
 - 6.1. Ленгмюровская и ионно-акустическая турбулентность при O-нагреве.
 - 6.2. Ленгмюровская и ионно-акустическая турбулентность при X-нагреве и сравнение с эффектами при O-нагреве.
 - 6.3. Пороговые мощности возбуждения ленгмюровских и ионно-акустических волн при X- и O-нагреве.
7. Искусственное оптическое излучение (861).
8. Сравнение характеристик нерезонансных явлений при O- и X-нагреве при высоких эффективных мощностях излучения (862).
9. Заключение и перспективы дальнейших исследований в России (863).

Список литературы (864).

Н.Ф. Благовещенская^(1,a), А.С. Калишин^(1,b), Т.Д. Борисова^(1,c), Р.В. Васильев^(2,d), Г.А. Жеребцов^(2,e)

⁽¹⁾ ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, ул. Беринга 38А, 199397 Санкт-Петербург, Российская Федерация

⁽²⁾ Институт солнечно-земной физики СО РАН, ул. Лермонтова 126А, 664033 Иркутск, Российская Федерация
E-mail: ^(a) nataly@aari.ru, ^(b) askalishin@aari.ru, ^(c) borisova@aari.ru, ^(d) roman_vasilyev@iszf.irk.ru, ^(e) gaz@iszf.irk.ru

Статья поступила 29 декабря 2025 г.,
после доработки 19 марта 2026 г.

1. Введение

Впервые физические представления о возможности воздействия мощного радиоизлучения на F-область ионосферы (высоты 200–300 км) были представлены в обзоре В.Л. Гинзбурга и А.В. Гуревича [1] и в дальнейшем разработаны более детально в работе А.В. Гуревича [2] и монографии А.В. Гуревича и А.Б. Шварцбурга [3]. Результаты теоретических исследований в СССР вызвали значительный интерес у зарубежных учёных и уже в декабре 1969 г. в Платтевиле вблизи Боулдера, (Колорадо) заработал КВ нагревный стенд. Сразу же было обнаружено явление ракурсного рассеяния, когда при излучении нагревного стенда сигналы маломощных передатчиков распространялись на расстояния в несколько тысяч км. Наблюдались и другие нелинейные явления, протекающие при воздействии мощной КВ радиоволны. Было показано, что нелинейные явления в F-области ионосферы создаются только мощными КВ радиоволнами обыкновенной (О-мода) поляризации, излучаемыми в вертикальном или близком к нему направлении [4]. Исследования в Платтевиле вызвали значительный интерес, и для продолжения исследований были специально построены КВ нагревные стеды "Ястреб" (1975 г., НИРФИ, Нижегородская область, СССР), "Аресибо" (1980 г., Пуэрто-Рико), "Сура" (1980 г., Нижегородская область), EISCAT/Heating (1980 г., Тромсё, Норвегия), SPEAR (2003 г., арх. Шпицберген, Норвегия), HAARP (1995 г., модернизирован в 2007 г., Аляска, США).

Изучение особенностей взаимодействия мощных радиоволн КВ диапазона (волн накачки) с ионосферной плазмой на высотах F-области ионосферы (200–300 км) позволило обнаружить ряд новых нелинейных явлений, существенных для понимания взаимодействия волн накачки с ионосферой и их влияния на распространение радиоволн, физики ионосферы и ионосферно-магнитосферных связей, создания новых методов диагностики ионосферы, а также для различных практических приложений. Такие явления имеют название модификация ионосферы мощными КВ радиоволнами.

В настоящее время широкомасштабные исследования взаимодействия мощных КВ радиоволн с ионосферой выполняются на специальных наземных КВ нагревных стендах HAARP (Гакона, Аляска, США), EISCAT/Heating (Тромсё, Норвегия), расположенных в высоких широтах, и Сура (Васильсурск, Нижегородская обл., Россия) в средних широтах. Частоты излучения мощной КВ радиоволны на различных стендах могут изменяться в диапазоне от 2,65 до 10 МГц. Интенсивность волны накачки имеет критическое значение для модификации F-области ионосферы мощными КВ радиоволнами. Максимальная эффективная мощность излучения ($P_{\text{эфф}} = PG$, где P — излучаемая мощность передатчиков, G — коэффициент усиления антенны нагревного стенда) на стенде HAARP составляет 3600 МВт, на стенде EISCAT/Heating — 1200 МВт и на стенде Сура достигает 270 МВт. Следует отметить, что существующие высокоширотные КВ нагревные стенды (HAARP и EISCAT/Heating) позволяют проводить исследования при очень высоких эффективных мощностях излучения ($P_{\text{эфф}} > 300$ МВт), когда реализуется возможность возбуждения явлений, принципиально недостижимых при $P_{\text{эфф}} < 300$ МВт. Так, на стенде HAARP было обнаружено образование искусственных слоёв в F-области [5]. На стенде EISCAT/

Heating при высоких мощностях $P_{\text{эфф}} > 300$ МВт после развития стрикционной неустойчивости (параметрической распадной неустойчивости, parametric decay instability, PDI), развивающейся в первые несколько миллисекунд после его включения, возможно возобновление генерации продольных плазменных волн (ленгмюровских и ионно-акустических) в течение всей длительности нагревного цикла [6, 7].

В современных условиях актуальность научной проблемы физики ионосферы, связанной с изучением искусственных возмущений и нелинейных явлений в верхней ионосфере (F-область) не только сохранилась, но и возросла. С одной стороны, это обусловлено модернизацией нагревного стенда HAARP и созданием субавроральной геофизической обсерватории (Subauroral Geophysical Observatory, SAGO), оснащённой самой современной диагностической аппаратурой для изучения эффектов воздействия мощных КВ радиоволн на околоземное космическое пространство. С другой стороны, в России на базе Института солнечно-земной физики СО РАН началось создание Национального гелио-геофизического комплекса Российской академии наук (НГК РАН) [8] в составе которого запланировано строительство принципиально нового КВ нагревного стенда ИКАР-АИ (52,42° N; 103,65° E), с широким спектром возможностей управления излучением [9]. В рамках НГК РАН создаётся кластер передовых диагностических инструментов исследования верхней атмосферы Земли и околоземного космического пространства, включая новый радар некогерентного рассеяния радиоволн, что позволит достигнуть максимальной "исследовательской эффективности" при проведении экспериментов на нагревном стенде нового поколения ИКАР-АИ. Несмотря на непростые обстоятельства, существующий в России нагревный стенд Сура (пос. Васильсурск, Нижегородская обл.) активно работает, но он не обеспечивает высоких эффективных мощностей излучения ($P_{\text{эфф}} > 300$ МВт), как зарубежные аналоги (EISCAT/Heating и HAARP). Следует также отметить, что стенд Сура не располагает диагностическими возможностями, которыми обладают зарубежные аналоги. В связи с изложенным, результаты исследований на КВ нагревном стенде EISCAT/Heating (г. Тромсё, Норвегия), оснащённом современной высокоинформативной диагностической аппаратурой, приобретают особую значимость для развития новых и совершенствования существующих технологий наблюдения эффектов воздействия мощных КВ радиоволн на российском нагревном стенде нового поколения ИКАР-АИ.

Эксперименты по модификации F-области ионосферы мощными радиоволнами КВ диапазона, излучаемыми с поверхности Земли, позволяют изучать широкий спектр нелинейных явлений, механизмы возбуждения турбулентностей и плазменных волн, плазменные и гиромангнитные резонансы, механизмы ускорения электронов. Эффективность воздействия максимальна при близости частоты волны накачки с частотами собственных колебаний плазмы. В ионосферной плазме в магнитном поле существуют разнообразные волны, такие как плазменные и ионно-акустические, верхнегибридные, бернштейновские и другие волны, что приводит при резонансном взаимодействии мощных радиоволн с ионосферой к возбуждению разнообразных нелинейных явлений. Область высот, где происходит резонансное взаимодействие мощных радиоволн с ионосферной плазмой,

достигается мощными КВ радиоволнами обыкновенной поляризации при вертикальном или близком к нему излучении с поверхности Земли. Вследствие этого для модификации F-области ионосферы, как правило, используются мощные КВ радиоволны обыкновенной (О-мода) поляризации. Если мощная КВ радиоволна превышает пороговые мощности, то в плазме развиваются различные параметрические неустойчивости, приводящие к возбуждению низкочастотных (ионно-акустические и нижегибридные) плазменных волн и мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей электронной концентрации (МИИН). На высотах F-области ионосферы параметрические неустойчивости вызываются как стрикционной [3], так и тепловой [10, 11] нелинейностями. Обыкновенно поляризованная мощная КВ радиоволна (волна накачки) взаимодействует с ионосферной плазмой наиболее эффективно на высотах отражения, где $f_{po}^2 = f_H^2$ (f_{po} — локальная плазменная частота на высоте отражения, f_H — частота волны накачки), и верхнего гибридного резонанса, где $f_H^2 = f_{UH}^2 = f_{po}^2 + f_{ce}^2$ (f_{UH} — верхняя гибридная частота, f_{ce} — гирочастота электронов, f_{po} — локальная плазменная частота на высоте верхнего гибридного резонанса) [10, 11]. Нелинейное резонансное взаимодействие мощной О-волны с ионосферной плазмой в F-области вызывает разнообразные нелинейные резонансные явления, которые успешно исследовались как теоретически, так и экспериментально на всех КВ нагревных стендах мира, начиная с 1970-х гг. (см. обзоры [12–18] и монографию [19] и ссылки там).

Мощная КВ радиоволна необыкновенной поляризации (Х-мода) отражается на высоте с локальной плазменной частотой $f_{px}^2 = f_H^2$ ($f_H - f_{ce}$), что ниже как высоты отражения КВ радиоволны О-поляризации, так и высоты верхнего гибридного резонанса. Следовательно, КВ радиоволна необыкновенной поляризации (Х-мода) отражается на высотах ниже области существования квазиэлектростатических плазменных волн (ленгмюровских и верхнегибридных). Однако результаты многолетних экспериментов на КВ нагревном стенде EISCAT/Heating (г. Тромсё, Норвегия), выполненные специалистами ААНИИ, убедительно продемонстрировали, что воздействие мощной КВ радиоволны Х-поляризации на F-область высокоширотной ионосферы вдоль магнитной силовой трубки приводит к генерации разнообразных нелинейных нерезонансных явлений, которые по интенсивности могут превосходить возмущения, создаваемые при О-нагреве [20].

В обзоре собраны воедино и обсуждены полученные за 15-летний период результаты экспериментальных исследований разнообразных нелинейных нерезонансных явлений в F-области ионосферы при воздействии на неё мощными КВ радиоволнами необыкновенной (Х-мода) поляризации на КВ нагревном стенде EISCAT/Heating. Диагностика характеристик искусственных ионосферных возмущений осуществлялась как непосредственно в месте расположения нагревного стенда с помощью самых современных зарубежных высокоинформативных средств и методов, так и с использованием средств дистанционной диагностики, разработанных в ААНИИ и установленных на обсерватории "Горьковская" под г. С.-Петербург. Нелинейные явления, возникающие при Х-нагреве F-области, явились совершенно неожиданными для научного сообщества. Использование мощных КВ радиоволн Х-поляризации при воздействии на F-об-

ласть ионосферы, в том числе и при высоких эффективных мощностях излучения ($P_{эфф} > 300$ МВт), открывает новые возможности для дальнейших исследований в области нелинейного взаимодействия мощных КВ радиоволн с ионосферной плазмой и понимания физических процессов, происходящих в ионосфере в поле мощной КВ радиоволны.

Основной акцент в обзоре делается на результаты экспериментальных исследований и обобщение типичных характеристик, поведения и условий генерации, пороговых мощностей возбуждения и возможных механизмов генерации (1) мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей; (2) каналов (дактов) повышенной электронной плотности; (3) узкополосного (в полосе ± 1 кГц относительно частоты нагрева) искусственного радиоизлучения ионосферы; (4) продольных плазменных волн (ленгмюровских и ионно-акустических); (5) оптического излучения в красной (630 нм) и зелёной (557,7 нм) линиях атомарного кислорода. Уделяется также внимание сравнению характеристик нелинейных явлений при О- и Х-нагреве, в том числе нерезонансных явлений, возбуждаемых при высоких эффективных мощностях излучения в условиях, когда волна накачки не отражается от F-области ионосферы. В заключение кратко рассмотрены перспективы развития исследований по модификации ионосферы мощными КВ радиоволнами в России.

2. Постановка экспериментов

2.1. КВ нагревный стенд и средства диагностики эффектов воздействия мощных КВ радиоволн

Эксперименты по модификации F-области ионосферы мощными КВ радиоволнами проводились на КВ нагревном стенде EISCAT/Heating вблизи г. Тромсё, Норвегия (69,6° N, 19,2° E; $I = 78^\circ$), технические характеристики которого приведены в работе [21]. Стенд EISCAT/Heating работает в диапазоне частот от 3,85 до 8 МГц. Излучение может осуществляться одной из трёх фазированных антенных решёток (ФАР 1, ФАР 2 и ФАР 3). В диапазоне частот 3,85–5,65 МГц используется ФАР 2, имеющая ширину диаграммы направленности 12–14° (на уровне — 3 дБ) и обеспечивающая максимальную эффективную мощность излучения от 150 до 280 МВт в зависимости от частоты нагрева. В диапазоне частот 5,5–8,0 МГц излучение может осуществляться как антенной ФАР 1, так и ФАР 3. ФАР 1 имеет ширину диаграммы 5–7° (на уровне — 3 дБ) и обеспечивает максимальную $P_{эфф} = 600–1200$ МВт, а ФАР 3 с шириной диаграммы 10–14° (на уровне — 3 дБ) обеспечивает $P_{эфф} = 160–300$ МВт в зависимости от частоты нагрева. В 2012 г. была выполнена модернизация системы управления работой КВ нагревного стенда. Это обеспечило автоматическое задание режимов излучения, практически мгновенное изменение частоты и поляризации мощной КВ радиоволны, быстрое ступенчатое изменение частоты в заданной полосе частот, изменение угла излучения волны накачки в диапазоне $\pm 20^\circ$ от вертикали в северо-южном (географическом) плане, переключение типа антенной системы, а также автоматический контроль за излучением и оценкой доли излучения волны О-поляризации при Х-нагреве и Х-волны при

излучении волны накачки обыкновенной (О-мода) поляризации [21].

Для экспериментальных исследований и идентификации нелинейных явлений при воздействии на F-область мощными КВ радиоволнами необыкновенной (Х-мода) и обыкновенной (О-мода) поляризации использовались современные диагностические средства, установленные как непосредственно в месте расположения нагревного стенда, так и дистанционные, расположенные на обсерватории ААНИИ "Горьковская" вблизи С. Петербурга, удалённой на расстояние примерно 1200 км от нагревного стенда EISCAT/Heating.

Принципиально важным преимуществом КВ нагревного стенда EISCAT/Heating является его пространственное совмещение с радаром некогерентного рассеяния радиоволн (НР) на частоте 931 МГц. [22]. Отметим, что до недавнего времени работал эффективный радар некогерентного рассеяния в Аресибо (Пуэрто-Рико), пространственно совмещённый с КВ нагревным стендом. Однако вследствие стихийного бедствия как радар НР, так и нагревный стенд, были полностью разрушены и восстановлению не подлежат.

В период экспериментов радар некогерентного рассеяния EISCAT обеспечивал проведение измерений с разрешением по времени 5 с и разрешением по высоте 1,3 км (в диапазоне высот от 80 до 278 км) и 3 км (в диапазоне высот от 278 до 700 км). Ширина диаграммы луча EISCAT радара (931 МГц) составляет 0,6°. Для обработки данных измерений радара использовался пакет GUIDAP version 8.7 (Grand Unified Incoherent Scatter Design and Analysis Package) [23]. Важно отметить, что радары НР являются единственным диагностическим инструментом, обеспечивающим прямые измерения продольных плазменных волн (ленгмюровских, LW, и ионно-акустических, IAW), указывающих на возбуждение стрикционной (параметрической распадной неустойчивости, parametric decay instability, PDI). LW и IAW регистрируются в спектрах радара НР как усиленные нагревом плазменные и ионные линии (HF-enhanced plasma and ion lines, HFPL and HFIL).

Для диагностики и определения характеристик мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) при О- и Х-нагреве высокоширотной F-области ионосферы использовался когерентный радар CUTLASS (SuperDARN), расположенный примерно на 850 км к югу от нагревного стенда в Hankasalmi (Ханкасальми), Финляндия (62,3° N, 26,6° E) [24]. CUTLASS работал практически одновременно на трёх или 6 частотах в диапазоне от 10 до 20 МГц, обеспечивая диагностику МИИН с поперечными к магнитному полю размерами $l_{\perp} = 7,5 - 15$ м ($l_{\perp} = c/2f$, где f — частота радара). Излучение проводилось антенной с шириной диаграммы направленности 3,3°, направленной на искусственно возмущённую область ионосферы над Тромсё. Регистрация рассеянных на МИИН сигналов осуществлялась в диапазоне дальностей от 700 до 1200 км с разрешением по дальности 15 км.

Дополнительно диагностика МИИН и исследование их влияния на распространение радиоволн осуществлялась методом ракурсного рассеяния с использованием многоканального приёмного доплеровского комплекса, установленного на научно-исследовательской станции (НИС) ААНИИ "Горьковская" (60,27° N, 29,38° E), удалённой на расстояние примерно 1200 км от нагревного

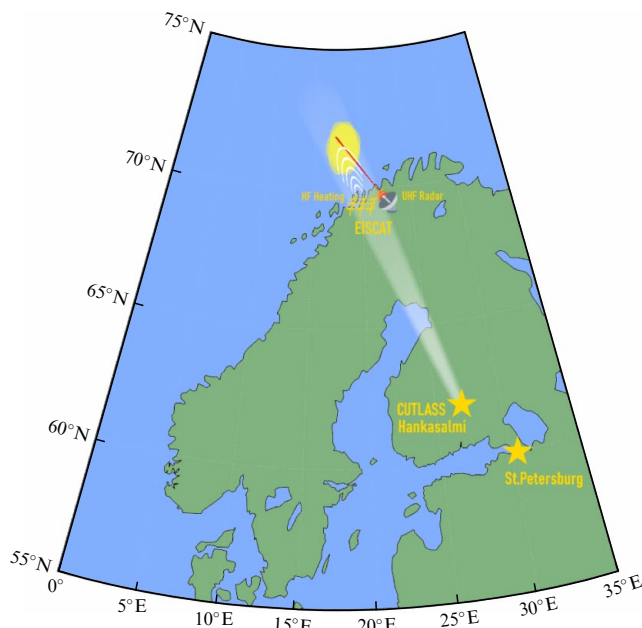


Рис. 1. Карта-схема, иллюстрирующая геометрию экспериментов.

стенда EISCAT/Heating [25] и сети трасс наклонного зондирования ионосферы [26]. Приём радиосигналов проводился на двойную горизонтальную ромбическую антенну, направленную на нагревный стенд.

Отметим принципиальное единство методов диагностики МИИН с использованием обратного рассеяния (радар CUTLASS) и ракурсного рассеяния сигналов. Если на область, содержащую вытянутые вдоль магнитного поля неоднородности, падает радиоволна, то рассеянная на этих неоднородностях волна может быть принята в пунктах, расположенных на пересечении поверхности Земли с поверхностями конусов, на которых выполняется условие равенства проекций волновых векторов падающей и рассеянной волн на направление магнитного поля. Обратное рассеяние, используемое в радаре, является частным случаем ракурсного рассеяния при совмещении точки излучения и приёма сигналов, когда угол между волновыми векторами падающей и рассеянной волн на направление магнитного поля составляет 180°.

На НИС "Горьковская" также осуществлялась регистрация узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ) в полосе частот ± 1 кГц относительно частоты волны накачки с использованием анализатора спектра декаметрового диапазона, разработанного на базе радиоприёмного устройства IC-R75 [25].

В период экспериментов выбор частоты нагрева и контроль за состоянием ионосферы проводился с помощью ионозонда в Тромсё [27], который обеспечивал получение ионограмм вертикального зондирования ионосферы каждые 2 минуты.

Рисунок 1 иллюстрирует карту-схему геометрии проведения экспериментов.

2.2. Режимы воздействия на F-область ионосферы

В период экспериментов использовались следующие режимы воздействия мощных КВ радиоволн на F-область ионосферы:

1. Чередование О- и Х-поляризации при воздействии на F-область ионосферы (высоты 200–300 км) волны накачки, излучаемой на фиксированных частотах f_H в диапазоне от 3,85 до 8 МГц в направлении магнитного зенита (12° к югу от вертикали), вертикальном (0°) и промежуточном между ними направлении (6° к югу от вертикали) с одновременными измерениями радара некогерентного рассеяния радиоволн в том же направлении, что и излучение волны накачки. Этот режим применялся для исследования влияния направления излучения мощной волны на характеристики нелинейных явлений при О- и Х-нагреве F-области ионосферы. В ходе экспериментов использовался весь набор диагностических средств. По результатам экспериментов было установлено, что наиболее интенсивные возмущения создаются при излучении волны накачки в магнитный зенит (эффект магнитного зенита). Теоретическое обоснование эффекта магнитного зенита при О-нагреве предложено в [28]. Кроме того, при вертикальном излучении мощной КВ радиоволны Х-поляризации возмущения в F-области не были обнаружены [20]. Поэтому для сравнения возмущений параметров ионосферной плазмы (электронной концентрации N_e и температуры T_e), характеристик МИИН, ленгмюровских и ионно-акустических плазменных волн и искусственного радиоизлучения при О- и Х-нагреве в основном использовался режим излучения волны накачки в магнитный зенит циклами 10 мин нагрев, 5 мин пауза, 20 мин нагрев, 10 мин пауза, 5 мин нагрев, 2,5 мин пауза.

2. Воздействие на F-область ионосферы (высоты 200–300 км) волны накачки необыкновенной (Х-мода) поляризации, излучаемой в магнитный зенит (12° к югу от вертикали) на фиксированных частотах f_H в диапазоне от 3,85 до 8 МГц циклами 10 мин нагрев, 5 мин пауза и 5 мин нагрев, 2,5 мин пауза. При этом f_H лежит как ниже критической частоты слоя F2 ($f_H < f_oF2$), так и до 2 МГц выше ($f_H > f_oF2$). Радар некогерентного рассеяния радиоволн проводит измерения в направлении излучения волны накачки, т.е. в магнитный зенит. Такой режим с использованием разнообразных диагностических средств, перечисленных выше, позволяет детально исследовать характеристики, условия возбуждения и взаимосвязь в развитии различных нелинейных явлений, включая МИИН, возмущения параметров ионосферной плазмы (N_e и T_e), искусственную ионосферную турбулентность (ленгмюровскую и ионно-акустическую), узкополосное искусственное радиоизлучение ионосферы в зависимости от соотношения частоты нагрева к критической частоте слоя F2.

3. Воздействие мощной КВ радиоволны Х-поляризации на ионосферу в режиме ступенчатого изменения мощности в стационарных условиях осуществлялось 40 мин сеансами. Волна накачки излучалась в направлении магнитного зенита на частотах $f_H \leq f_xF2$ ($f_xF2 \approx f_oF2 + f_{ce}/2$, где f_{ce} — гирочастота электронов), т.е. в условиях отражения волны накачки Х-поляризации от ионосферы. Радар некогерентного рассеяния радиоволн также измерял в направлении магнитного зенита. В течение сеанса волна накачки излучалась циклами 2 мин нагрев, 2 мин пауза. При этом от цикла к циклу нагрева мощность излучения изменялась в последовательности: 10 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 %, 100 %, 75 %, 50 %, 25 %, 10 % от максимальной мощности излучения. Этот режим использовался для экспериментального определения

порогов возбуждения различных нелинейных явлений (МИИН, УИРИ, дактов повышенной электронной плотности, а также инициированных воздействием волны накачки ленгмюровских и ионно-акустических плазменных волн).

4. Воздействие мощной КВ радиоволны Х-поляризации на ионосферу в направлении магнитного зенита на частотах $f_H \leq f_xF2$ (условия отражения Х-волны от ионосферы) в стационарных условиях при ступенчатом изменении частоты волны накачки в полосе 200 кГц в окрестности частот гирогармоник электронов циклами 20 мин нагрев, 10 мин пауза. Радар некогерентного рассеяния радиоволн измерял в направлении излучения волны накачки, т.е. в магнитный зенит. В течение 20 мин цикла нагрева частота волны накачки увеличивалась на 5 кГц каждые 30 с. Такой режим воздействия использовался для исследования гирогармонических эффектов в поведении МИИН, УИРИ, электронной концентрации и температуры, а также инициированных воздействием волны накачки ленгмюровских и ионно-акустических плазменных волн.

5. Чередование О- и Х-поляризации при воздействии на F-область ионосферы (высоты 200–300 км) волны накачки, излучаемой на фиксированных частотах f_H в направлении магнитного зенита циклами 10 мин нагрев, 5 мин пауза, 20 мин нагрев, 10 мин пауза. При этом f_H лежит как ниже критической частоты слоя F2 ($f_H < f_oF2$), так и до 2 МГц выше ($f_H > f_oF2$). Радар некогерентного рассеяния радиоволн работает в режиме ступенчатого изменения углов возвышения радара в северо-южном направлении от 74° до 90° с шагом 1 или 2° . При каждом угле возвышения радара НР регистрация осуществлялась в течение 1 или 2 мин. Направлению измерений радара НР в магнитный зенит соответствует угол возвышения 78° (12° на юг от вертикали). Ширина диаграммы луча EISCAT радара (931 МГц) составляет $0,6^\circ$. Такой режим использовался для изучения пространственной структуры искусственных возмущений при О- и Х-воздействии волны накачки в горизонтальной плоскости и оценки размеров дактов повышенной электронной плотности, областей возмущения температуры электронов, инициированных воздействием мощной КВ радиоволны ленгмюровских и ионно-акустических плазменных волн в северо-южном направлении. Также режим использовался для сравнения характеристик и поведения МИИН и УИРИ при О- и Х-воздействии волны накачки на частотах как ниже критической частоты слоя F2 ($f_H < f_oF2$), так и до 2 МГц выше ($f_H > f_oF2$) при высоких эффективных мощностях излучения ($P_{эфф} > 300$ МВт).

Во всех режимах мощная КВ радиоволна в циклах нагрева излучалась на несущей частоте.

В обзоре приведены результаты экспериментальных исследований, выполненных в 2008–2021 гг. при спокойных магнитных условиях в регулярном F2 слое ионосферы в утренние, дневные и вечерние часы. Анализ фоновой геофизической обстановки показал, что в период проведения экспериментов отсутствовали высыпания частиц, продольные токи и электроджет, являющиеся характерными особенностями авроральной ионосферы. Следовательно, в рассматриваемых условиях ионизация в регулярном F2 слое определялась только ультрафиолетовым излучением Солнца и имела характеристики, типичные для среднеширотной ионосферы.

3. Мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности

3.1. Характеристики мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей при воздействии на F-область ионосферы мощными КВ радиоволнами обыкновенной (О-мода) и необыкновенной (Х-мода) поляризации и их сравнение с поведением параметров ионосферной плазмы

Одним из основных явлений, обнаруженных уже в первых экспериментах по воздействию мощных КВ радиоволн на ионосферу в Боулдере, является генерация мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) [29]. Возбуждение МИИН происходило при воздействии на F-область мощными КВ радиоволнами обыкновенной (О-мода) поляризации на частотах нагрева ниже критической частоты слоя F2 ($f_H \leq f_oF2$) [29]. Пространственные масштабы МИИН поперек магнитного поля составляют от единиц до нескольких десятков метров ($l_{\perp} < c/f_H$), а вдоль магнитного поля они вытянуты на 10–20 км. Установлено, что механизмом генерации МИИН является тепловая параметрическая (резонансная) неустойчивость [10, 11]. Характеристики и поведение МИИН при О-нагреве интенсивно исследовались в течение 50 лет на всех КВ нагревательных стендах мира в средних и высоких широтах (см., например, [13–16, 30–32] и цитируемую там литературу). Полагалось, что поскольку мощные КВ радиоволны необыкновенной (Х-мода) поляризации отражаются ниже высоты отражения О-волны и ниже высоты верхнего гибридного резонанса, они не должны вызывать генерацию МИИН.

Впервые МИИН при Х-нагреве были обнаружены на нагревном стенде EISCAT/Heating по данным наблюдений когерентного КВ радара CUTLASS [33, 34] в условиях, когда частота нагрева превысила критическую частоту слоя F2, и генерация МИИН при О-нагреве стала невозможной (рис. 2).

Дальнейшие исследования показали, что МИИН при Х-нагреве возбуждались в регулярной F-области ионосферы в магнитоспокойных условиях при нагреве на всех частотах излучения стенда EISCAT/Heating от 3,9 до 8,0 МГц в условиях, когда частота нагрева была как ниже, так и выше критической частоты ($f_H \leq f_xF2$ и $f_H > f_xF2$, где f_xF2 — критическая частота необыкновенной компоненты слоя F2) [35–38]. Размер МИИН в поперечном к магнитному полю направлении при обратном рассеянии сигналов радара CUTLASS (SuperDARN) определяется из условия Брэгга (равенство волновых векторов падающей и рассеянной волн) как $l_{\perp} = c/2f_{\text{radar}}$, где c — скорость света, f_{radar} — частота радара. Когерентный радар CUTLASS (SuperDARN) в период экспериментов работал на частотах в диапазоне от 10 до 20 МГц, что обеспечивало диагностику МИИН с размерами $l_{\perp} = 7,5–15$ м.

Сравним эффекты воздействия мощных КВ радиоволн О- и Х-поляризации на частотах нагрева $f_H \leq f_xF2$ и эффектов Х-нагрева на частотах $f_H \leq f_xF2$ и $f_H > f_xF2$. На рисунке 3 приведены высотно-временное распределение электронной концентрации (N_e) и температуры (T_e) по данным измерений радара некогерентного рассеяния радиоволн (НР) в Тромсё, интенсивностей рассеянных на МИИН сигналов радара CUTLASS на частотах ~ 13 и

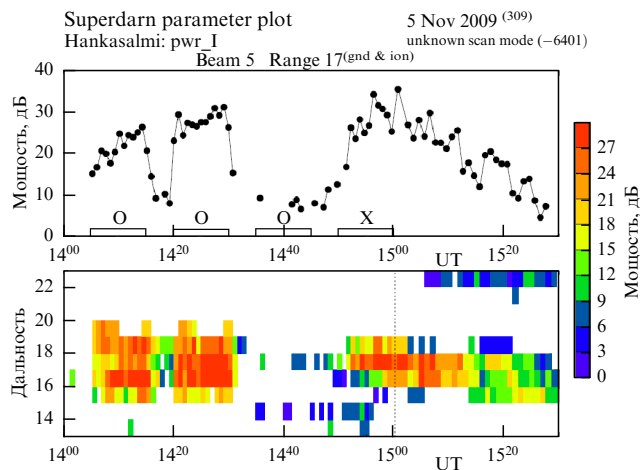


Рис. 2. Мощность рассеянных на МИИН сигналов на частоте примерно 10 МГц по данным наблюдений с помощью радара CUTLASS (SuperDARN) в Ханкасальми (Финляндия) 5 ноября 2009 г. На верхней панели приведены усредненные в искусственно возмущенной области ионосферы мощности рассеянных сигналов. На нижней панели показано поведение мощностей в координатах дальность (Range gate) — мировое время (UT). Мощная КВ-радиоволна О- или Х-поляризации излучалась циклами 10 мин нагрев, 5 мин пауза в магнитный зенит на частоте $f_H = 3,95$ МГц антенной ФАР 2, обеспечивающей $P_{\text{эфф}} = 126$ МВт. Циклы нагрева и используемая поляризация мощной КВ-радиоволны отмечены на оси времени [34].

16 МГц, а также вариации критических частот слоя F2 (f_oF2) по данным ионозонда в Тромсё в период эксперимента 3 ноября 2013 г. с 15:30 до 18 UT.

В ходе эксперимента 3 ноября 2013 г. отношение частоты нагрева к критической частоте слоя F2 изменялось от $f_H/f_oF2 = 0,92$ до 1,2, что позволило рассмотреть эффекты воздействия мощных КВ радиоволн на частотах нагрева как ниже, так и выше f_oF2 . Как следует из рис. 3, эффекты воздействия мощных КВ радиоволн О- и Х-поляризации на ионосферную плазму принципиально различаются. При альтернативном О- и Х-нагреве на частотах ниже критической частоты слоя F2 ($f_H \leq f_oF2$) с 15:30 до 17 UT, возмущения параметров плазмы и генерация МИИН происходили как при О-, так и Х-нагреве. При О-нагреве наблюдалось сильное возрастание температуры электронов T_e до 3000 К (~ 200 % относительно фоновых значений), что является типичной характеристикой О-нагрева в высоких и средних широтах [39]. При этом возмущения N_e были незначительными. В противоположность этому, характерной особенностью Х-нагрева в магнитный зенит является возрастание электронной концентрации N_e в широком диапазоне высот, достигающие значений $(N_e - N_{eo})/N_{eo} = 50–80$ % относительно фоновых значений N_{eo} , при незначительном возрастании T_e за счёт омического нагрева электронов на 20–30 %. В этих условиях генерация МИИН происходила как при О-, так и Х-нагреве. При Х-нагреве с 17 до 18 UT на частотах выше критической частоты слоя F2 ($f_H > f_oF2$), которые к концу эксперимента превысили f_oF2 на ~ 1 МГц, интенсивность МИИН увеличивалась по сравнению с условиями $f_H \leq f_oF2$, возрастания T_e достигали 50 %, а повышения N_e относительно фоновых значений имели такую же величину, как и при $f_H \leq f_oF2$.

Поведение МИИН по данным измерений радара CUTLASS при Х-нагреве на частоте 5,423 МГц, превы-

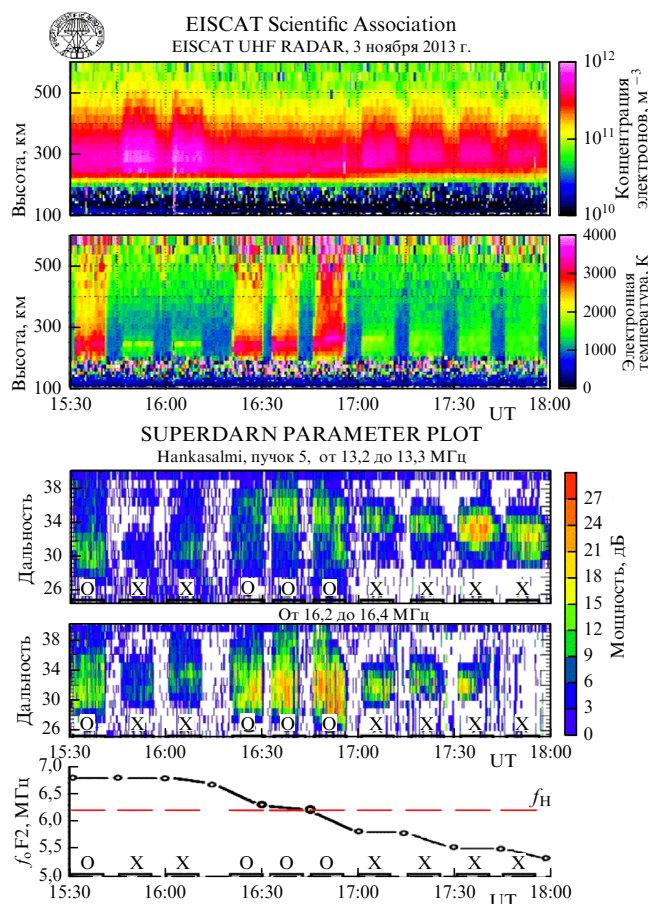


Рис. 3. Высотно-временное распределение электронной концентрации (N_e) и температуры (T_e), по данным измерений радара HP с 30 с временем интегрирования, мощности рассеянных на МИИН сигналов по данным наблюдений радара CUTLASS в Ханкасалми (Финляндия) на частотах ~ 13 и 16 МГц, а также вариации критических частот слоя F2 (f_oF2) по данным ионозонда в Тромсё в период альтернативного О-/Х-нагрева 3 ноября 2013 г. с 15:30 до 18:00 UT. Мощная КВ радиоволна О- или Х-поляризации излучалась в направлении магнитного зенита на частоте $6,2$ МГц антенной ФАР 1, обеспечивающей $P_{\text{эфф}} = 450$ МВт. Циклы нагрева и поляризация мощной КВ радиоволны показаны на оси времени [36].

шающей f_oF2 (отношение $f_H/f_oF2 = 1,13 - 1,45$), 15 октября 2012 г. показано на рис. 4. Здесь также приведено высотно-временное распределение N_e и T_e по данным радара HP и поведение f_oF2 по данным ионозонда в Тромсё.

В принципе, поведение МИИН, N_e и T_e при Х-нагреве на частотах $6,2$ и $5,423$ МГц аналогично.

3.2. Характеристики мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей при Х-нагреве по данным ракурсного рассеяния радиоволн

Для изучения неоднородностей в F-области ионосферы применялся также метод ракурсного рассеяния диагностических КВ сигналов на МИИН (известный в зарубежной литературе как bi-static scatter method) с использованием многоканального доплеровского комплекса на обсерватории ААНИИ "Горьковская" ($60,27^\circ \text{ N}$, $29,38^\circ \text{ E}$) [25] и сети трасс наклонного зондирования ионосферы [26]. Результаты исследования МИИН методом ракурсного рассеяния на радиотрассах различной протяжённости по данным наблюдений в экспериментах на нагрев-

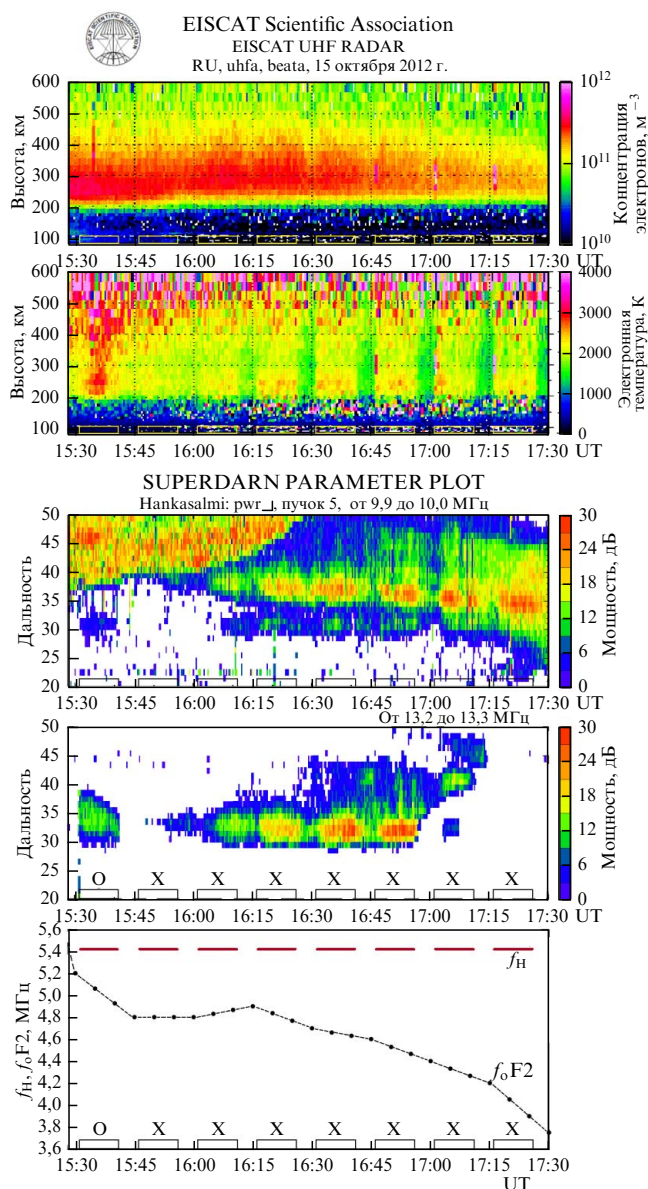


Рис. 4. Высотно-временное распределение электронной концентрации (N_e) и температуры (T_e), по данным измерений радара HP с 30 с временем интегрирования, мощности рассеянных на МИИН сигналов по данным наблюдений радара CUTLASS в Ханкасалми (Финляндия) на частотах ~ 10 и 13 МГц, а также вариации критических частот слоя F2 (f_oF2) по данным ионозонда в Тромсё в период альтернативного О-/Х-нагрева 15 октября 2012 г. с 15:30 до 17:30 UT. В первом цикле нагрева в 15:31–15:41 UT, в котором происходило исчезновение МИИН, излучалась волна накачки О-поляризации, во всех остальных циклах использовалась Х-поляризация. Мощная КВ радиоволна излучалась в направлении магнитного зенита на частоте $5,423$ МГц антенной ФАР 1, обеспечивающей $P_{\text{эфф}} = 380$ МВт. Циклы нагрева и поляризация мощной КВ радиоволны показаны на оси времени.

ном стенде EISCAT/Heating в Тромсё приведены в работах [40–42].

На рисунке 5 приведены результаты одновременных наблюдений МИИН радаром CUTLASS и многоканальным приёмным доплеровским комплексом на протяжённой (~ 9000 км) радиотрассе Хайалиа Гарденс (Флорида, США)–Тромсё–С. Петербург 20 октября 2016 г. с 14:15 до 16:00 UT. На динамических доплеровских спектрах ракурсно-рассеянные на МИИН сигналы регистрируют-

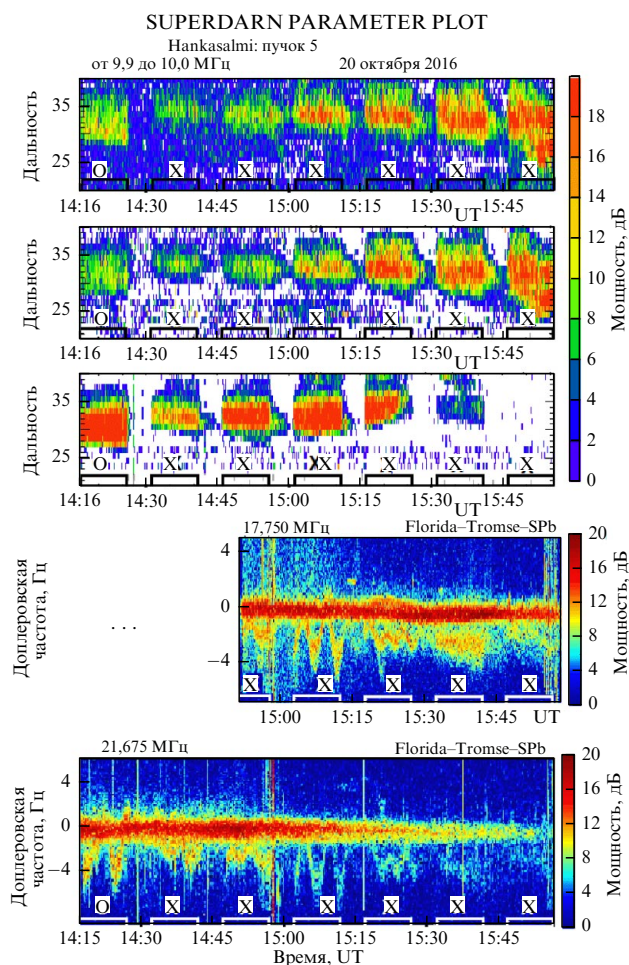


Рис. 5. Данные наблюдений с помощью КВ радара CUTLASS в Ханкасалми (Финляндия) на частотах $\sim 12, 13$ и 16 МГц и динамические доплеровские спектры (спектрограммы) на радиотрассе Хайялиа Гарденс (Флорида, США) – Тромсё – Горьковская (вблизи г. С. Петербург) на частотах $17,750$ и $21,675$ МГц 20 октября 2016 г. с $14:15$ до 16 UT. Мощная КВ радиоволна О- или Х-поляризации излучалась в магнитный зенит на частоте $4,445$ МГц антенной ФАР 2, обеспечивающей эффективную мощность излучения $P_{\text{эфф}} = 150$ МВт. Циклы нагрева и поляризация мощной КВ-радиоволны отмечены на осях времени.

ся в виде дополнительных треков, сдвинутых по частоте относительно "прямого" сигнала, распространяющегося по дуге большого круга и соответствующего нулевой доплеровской частоте. Результаты доплеровских измерений позволяют детально исследовать тонкую структуру рассеянных сигналов, оценить влияние МИИН на распространение радиоволн, в том числе и на протяжённых радиотрассах, и свидетельствуют, что ракурсное рассеяние диагностических сигналов на МИИН происходило как при О-, так и Х-нагреве F-области ионосферы (см. рис. 5).

Сравнение характеристик МИИН, возбуждаемых мощной КВ радиоволной Х-поляризации, по данным регистрации радара CUTLASS и методом ракурсного рассеяния с использованием многоканального доплеровского комплекса показало соответствие времён нарастания и релаксации МИИН, поведение мощности рассеянных на МИИН сигналов в зависимости от отношения частоты нагрева к критической частоте слоя F2 [40].

Регистрация ракурсно-рассеянных на МИИН сигналов с использованием аппаратуры наклонного зондирования ионосферы проиллюстрирована на рис. 6, где приведены ионограммы наклонного зондирования ионосферы на трассе Швеция (координаты ЛЧМ передатчика — $65,82^\circ \text{N}$, $21,70^\circ \text{E}$) — Горьковская (вблизи г. С.-Петербурга), полученные во время эксперимента на стенде EISCAT/Heating 19 октября 2012 г. Мощная КВ радиоволна излучалась на частоте $7,953$ МГц в магнитный зенит с $14:05$ до $14:35$ UT. Эффективная мощность излучения составляла $P_{\text{эфф}} = 840$ МВт.

Как следует из рис. 6, ракурсно-рассеянные на МИИН сигналы регистрировались в виде дополнительного трека в диапазоне частот 16 – 26 МГц, превышающих максимально наблюдаемую частоту слоя F2 (МНЧF2) с временной задержкой, соответствующей времени распространения на направлении Швеция – Тромсё – Горьковская.

Безусловно, представляет интерес рассмотреть возможность генерации МИИН при Х-нагреве на единственном в настоящее время в России КВ нагревном стенде

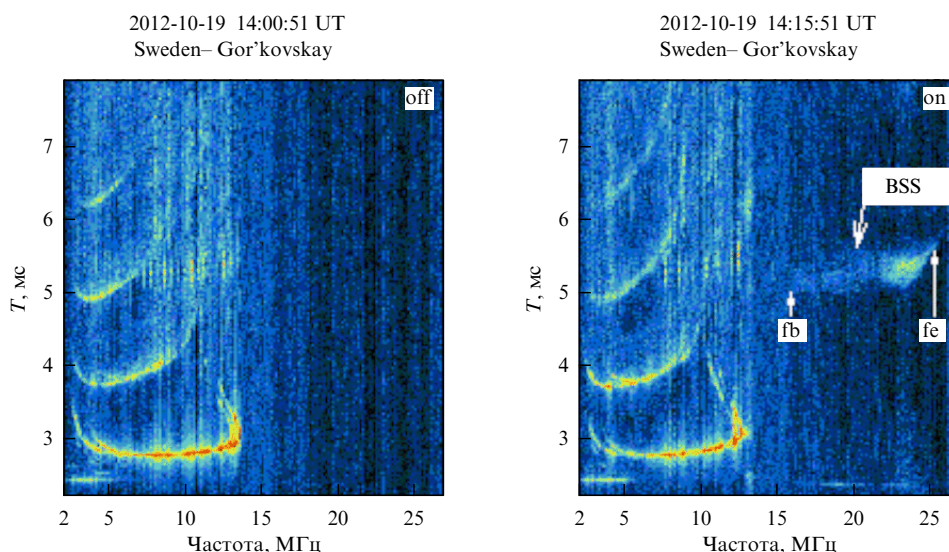


Рис. 6. Ионограммы наклонного зондирования ионосферы на трассе Швеция – Горьковская (вблизи г. С. Петербург) 19 октября 2012 г., зарегистрированные в $14:00:51$ UT (off) в паузе между циклами нагрева и в $14:15:51$ UT (on) в цикле нагрева. Мощная КВ радиоволна излучалась в магнитный зенит на частоте $7,953$ МГц антенной ФАР 1, обеспечивающей эффективную мощность излучения $P_{\text{эфф}} = 840$ МВт [41].

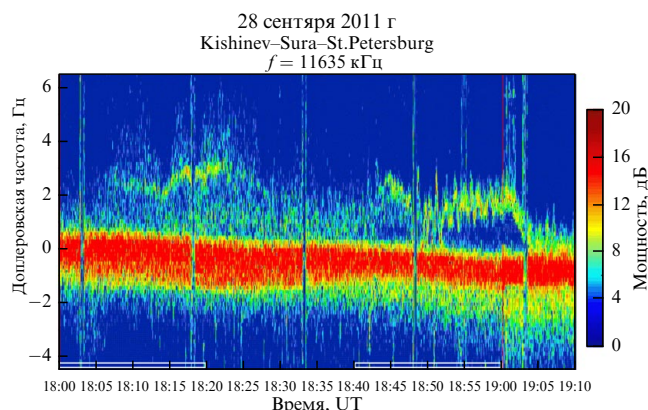


Рис. 7. Динамические доплеровские спектры (спектрограммы) на радиотрассе Кишинёв – Сура – Горьковская (вблизи г. С. Петербург) на частоте 11,635 МГц 28 сентября 2011 г. с 18 до 19:10 UT. Мощная КВ радиоволна Х-поляризации излучалась на частоте 4,785 МГц циклами 20 мин нагрев, 20 мин пауза при эффективной мощности излучения $P_{\text{эфф}} = 150$ МВт. Циклы нагрева отмечены на оси времени.

Сура (пос. Васильсурск, Нижегородская обл.). Были выполнены пробные эксперименты на стенде Сура при Х-нагреве на частоте вблизи критической частоты слоя F2. Для диагностики МИИН методом ракурсного рассеяния использовался тот же самый многоканальный приёмный КВ доплеровский комплекс на обсерватории ААНИИ Горьковская, что и в экспериментах на стенде EISCAT/Heating. На рисунке 7 приведены динамические доплеровские спектры (спектрограмма) на радиотрассе Кишинёв – Сура – Горьковская, зарегистрированные 28 сентября 2011 г.

Ракурсно-рассеянные на МИИН сигналы (RPC) на спектрограмме отображаются в виде дополнительных треков, сдвинутых по частоте в положительную область на 2–3 Гц относительно нулевой частоты, соответствующей распространению сигналов на трассе Кишинёв – С.-Петербург по дуге большого круга. Из рисунка 7 следует, что RPC появились через ~ 5 мин после начала Х-нагрева и достигли максимальной интенсивности только к концу цикла нагрева. Времена релаксации (пропадание RPC после выключения нагрева в 18:20 UT) составляли порядка 10 мин. Таким образом характеристики МИИН при Х-нагреве на стенде Сура находятся в соответствии с характеристиками МИИН, зарегистрированных на стенде EISCAT/Heating и принципиально отличаются от эффектов О-нагрева.

3.3. Сводка характеристик мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей при Х-нагреве

Обобщая результаты экспериментальных исследований МИИН, вызванных воздействием на F-область ионосферы мощными КВ радиоволнами Х-поляризации, отметим следующее. Горизонтальный размер искусственно возмущённой области ионосферы (ИВО), занятой МИИН с размерами $l_{\perp} = 7,5–15$ м (исследовались в наших экспериментах) зависел от ширины диаграммы используемой антенны (ФАР 1 или ФАР 2) КВ нагревного стенда и составлял 30–90 км [38]. Времена нарастания МИИН существенно больше в первом цикле Х-нагрева (с "холодного старта"), достигая значений 60–120 с, и уменьшались в последующих циклах Х-нагрева. Вре-

мена релаксации напротив увеличивались от первого цикла нагрева $\sim (60–120)$ с к последующим, когда они достигали значений более 300 с. Как показали результаты многочисленных экспериментов, характеристики МИИН зависят от частоты нагрева f_H (низкие $f_H = 4,0–5,4$ МГц или высокие $f_H = 6,0–8,0$ МГц), соотношения между частотой нагрева и критической частотой слоя F2 ($f_H \leq f_{x}F2$ или $f_H > f_{x}F2$), предыстории нагрева ("холодный" старт в первом цикле Х-нагрева или последующие циклы Х-нагрева) [38]. Неожиданно большие времена релаксации МИИН при Х-нагреве дают основание предположить наличие механизма их поддержания. Анализ фоновой геофизической обстановки по данным EISCAT радара некогерентного рассеяния радиоволн (на частоте 931 МГц), пространственно совмещённого с нагревным стендом, вертикального зондирования ионосферы в Тромсё, IMAGE сети магнитометров в Скандинавии показал, что генерация неоднородностей при Х-нагреве наблюдалась при спокойных магнитных условиях в регулярном F2 слое при отсутствии высыпаний частиц, продольных токов и электроджета, т.е. в условиях, аналогичных среднеширотной ионосфере. Учитывая изложенное, можно полагать, что в рассматриваемых спокойных геофизических условиях возбуждение и поддержание МИИН связано с генерацией крупномасштабных неоднородностей, что возможно при нагреве мощными КВ радиоволнами на частотах как ниже, так и выше f_oF2 , вследствие самофокусирующей неустойчивости мощного КВ пучка [43–47].

По экспериментальным данным, полученным в период экспериментов на стенде EISCAT/Heating при ступенчатом изменении эффективной мощности излучения были выполнены оценки порогов возбуждения МИИН. Пороги возбуждения МИИН при Х-нагреве на низких частотах $f_H = (4–5,5)$ МГц составляют $P_{\text{эфф}} = 40–60$ МВт. Используя выражение [13]

$$E [\text{В м}^{-1}] = 0,25 \frac{\sqrt{P_{\text{эфф}} [\text{кВт}]}}{h [\text{км}]},$$

получаем электрическое поле в ионосфере $E = 0,2–0,25$ В м^{–1} (в свободном пространстве). На высоких частотах нагрева $f_H = (6–8,0)$ МГц пороги возбуждения МИИН существенно выше и имеют значения $P_{\text{эфф}} = 120–150$ МВт, что соответствует электрическим полям в ионосфере $0,35–0,39$ В м^{–1} (в свободном пространстве) [38]. Следует отметить, что при О-нагреве на частотах $f_H \leq f_oF2$ пороги возбуждения МИИН ниже и составляют $P_{\text{эфф}} = 8–10$ МВт (для низких частот нагрева $f_H = (4–5,5)$ МГц), что соответствует электрическим полям в ионосфере $0,1–0,12$ В м^{–1} (в свободном пространстве). На высоких частотах О-нагрева ($f_H = (6–8,0)$ МГц) пороги возбуждения МИИН имеют значения ERP = 20–26 МВт [48].

4. Дакты повышенной электронной плотности

4.1. Характеристики дактов при Х-нагреве и их сравнение с эффектами при О-нагреве

Дакты повышенной электронной плотности, представляющие собой вытянутые вдоль магнитной силовой трубки области повышенной электронной концентрации, являются типичным явлением при воздействии

мощной КВ радиоволны необыкновенной (Х-мода) поляризации на F-область ионосферы в направлении магнитного зенита (см. рис. 3). Возрастания электронной концентрации N_e были обнаружены по данным радара некогерентного рассеяния EISCAT (931 МГц), пространственно совмещённого с КВ нагревным стендом EISCAT/Heating, и детально исследовались в работах [7, 34, 36, 49–53]. Дакты электронной концентрации регистрировались в широком диапазоне высот от ~ 280 –300 км, что примерно на 30–50 км выше высоты отражения мощной Х-волны, вплоть до верхней высотной границы измерений EISCAT радара некогерентного рассеяния радиоволн (550–600 км). Дакты повышенной электронной плотности, в которых возрастания N_e могут достигать $(N_e - N_{eo})/N_{eo} = 50$ –80 % относительно фоновых значений N_{eo} , создаются при спокойных магнитных условиях на частотах нагрева как ниже, так и выше критической частоты ($f_H \leq f_oF2$ и $f_H > f_oF2$). Создание дактов электронной концентрации сопровождалось повышением температуры электронов вследствие омического нагрева. При этом возрастания T_e составляли 20–30 % при Х-нагреве на частотах $f_H \leq f_oF2$ и достигали 50 % при $f_H > f_oF2$. Время развития дакта повышенной электронной концентрации составляло 30–60 с, а время релаксации после выключения нагревного стенда — 2–5 мин [7, 49, 50].

Важной характеристикой дактов электронной концентрации является их ширина, которую можно оценить по данным измерений радара НР в режиме ступенчатого изменения угла возвышения. Такие оценки были получены в эксперименте 28 октября 2013 г. при альтернативном Х-/О-нагреве. Мощная КВ радиоволна излучалась в магнитный зенит на частоте $f_H = 7,953$ МГц ($f_H < f_oF2$) антенной ФАР 1 с шириной диаграммы направленности 6° (на уровне — 3 дБ), обеспечивающей эффективную мощность излучения $P_{эфф} = 840$ МВт, циклами 20 мин нагрев, 10 мин пауза. В течение 20 мин цикла нагрева углы возвышения радара НР (931 МГц), имеющего ширину диаграммы луча $0,6^\circ$, изменялись в последовательности 74–76–77–78–79–80–82–84–86–90° (2 мин при каждом угле). Направлению вдоль магнитной силовой трубки (магнитный зенит) соответствует угол возвышения 78° . При этом радар работал при фиксированном азимуте 186° (на юг).

Результаты наблюдений с помощью радара НР 28 октября 2013 г. с 13 до 14 UT при альтернативном Х-/О-нагреве приведены на рис. 8. Из рисунка 8 следует, что при Х-нагреве максимальные возрастания N_e наблюдались в узком диапазоне углов возвышения радара НР около направления магнитного зенита (77 – 79°), что соответствует ширине дактов в северо-южном направлении 3° [49, 50]. При О-нагреве с 13:31 до 13:51 UT дакты электронной концентрации не создавались, но наблюдались сильные возрастания температуры электронов T_e в диапазоне углов возвышения радара НР 76 – 82° , соответствующих ширине диаграммы направленности антенны ФАР 1 (6° на уровне — 3 дБ).

На основе многочисленных экспериментов при ступенчатом изменении эффективной мощности излучения нагревного стенда EISCAT/Heating установлено, что пороговые мощности возбуждения дактов электронной концентрации при Х-нагреве составляли $P_{эфф} = 57$ – 73 МВт [50], что соответствует электрическим полям в ионосфере на высотах F-области ионосферы $E = 0,24$ – $0,27$ В м $^{-1}$.

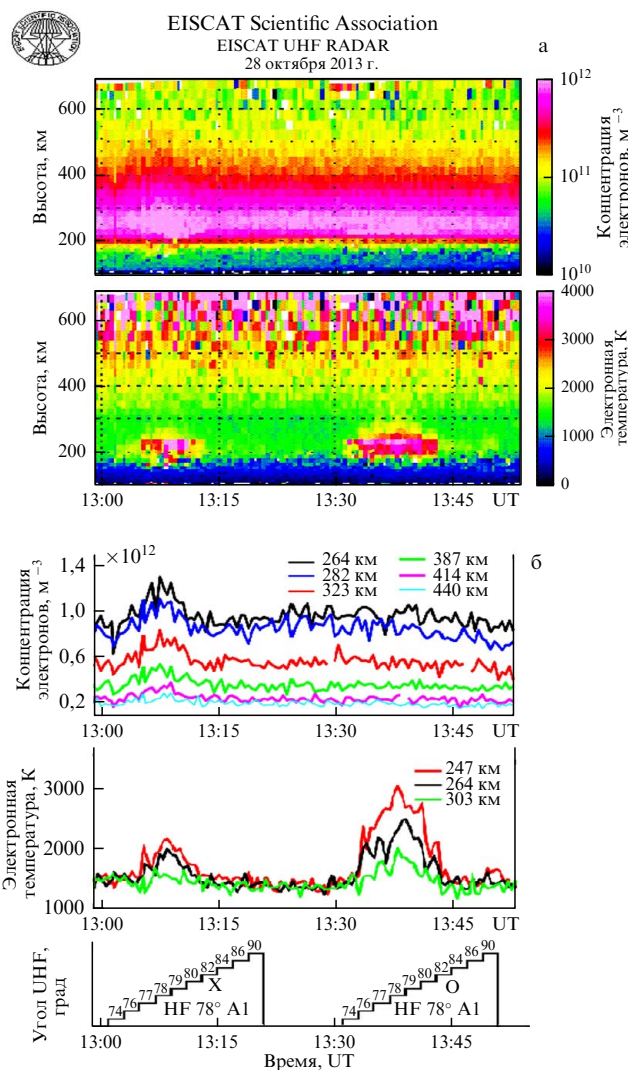


Рис. 8. Высотно-временное распределение электронной концентрации (N_e) и температуры (T_e), поведение N_e и T_e на фиксированных высотах по данным измерений радара НР с 20 с временем интегрирования 28 октября 2013 г. с 13 до 14 UT в период альтернативного Х-/О-нагрева в магнитный зенит на частоте 7,953 МГц. Схема изменения углов возвышения радара НР, которые в течение цикла нагрева изменялись каждые 2 мин в последовательности 74–76–77–78–79–80–82–84–86–90°, а также поляризация мощной КВ радиоволны и тип используемой антенны КВ нагревного стенда EISCAT/Heating, приведены на нижней панели. Эффективная мощность излучения составляла $P_{эфф} = 840$ МВт [50].

При О-нагреве дакты повышенной электронной плотности, как правило, не создавались. Однако в особых условиях, а именно, когда частота нагрева была вблизи гирагармоник электронов nf_{ce} и/или вблизи критической частоты слоя F2, происходили возрастания N_e на 20–40 %, что существенно меньше, чем при Х-нагреве [54–56]. Пороги их создания существенно выше, чем при Х-нагреве, и составляли $P_{эфф} = 180$ – 250 МВт, что соответствует электрическим полям $0,42$ – $0,5$ В м $^{-1}$ (в свободном пространстве) [54, 55]. Дакты повышенной электронной плотности при О-нагреве наблюдались также на стендах Сура по измерениям на спутнике DEMETER [57] и HAARP по данным измерений на спутниках DMSP и DEMETER [58, 59]. Было установлено, что О-нагрев приводил к созданию дактов вследствие возрастания давле-

ния плазмы, и наиболее интенсивные дакты с повышением N_e на 15–40 % происходили при О-нагреве на частотах вблизи критической частоты слоя F2 и второй гирогармоники электронов $2f_{ce}$ [59, 60].

4.2. Результаты исследования возрастания электронной плотности в дактах

Первоначально было высказано предположение, что неожиданно сильные возрастания N_e при Х-нагреве высокоширотной F-области ионосферы обусловлены интенсивным обратным рассеянием сигналов радара НР вблизи высоты отражения мощной КВ радиоволны, проявляющимся в появлении усиленных нагревом ионных линий (HF-enhanced ion lines, HFIL) в спектре сигнала радара НР [51]. В этих условиях на высотах HFIL стандартный анализ спектров радара НР не позволяет получить корректные оценки электронной плотности и температуры [23]. Однако возрастания N_e наблюдались в широком диапазоне высот, включая высоты, на которых HFIL не возбуждались. Более того, дакты N_e создавались в условиях, когда HFIL не наблюдались совсем. Следовательно, создание дактов не связано с возбуждением интенсивных HFIL.

В работе [53] возрастания N_e объяснялись гидированием луча радара НР искусственными ионосферными неоднородностями. В этом механизме ширина дакта определяется шириной диаграммы направленности антенны радара НР, которая для EISCAT радара, работающего на частоте 931 МГц, составляет всего 0,6°. Это находится в явном противоречии с полученными экспериментальными данными (см., например, рис. 8), свидетельствующими о ширине дактов 3–4°. Следует также отметить, что искусственные ионосферные неоднородности различных масштабов создаются и при О-нагреве F-области ионосферы [18, 20, 29, 31, 39]. Тем не менее дакты N_e создавались только при Х-нагреве (см. рис. 8). Более того, результаты эксперимента 27 октября 2013 г., выполненные при излучении мощной Х-волны антеннами с различной шириной диаграммы направленности (ФАР 1 и ФАР 3 с шириной диаграммы направленности на уровне — 3 дБ 5–7° и 10–12° соответственно), убедительно свидетельствуют о зависимости горизонтальной протяженности дакта N_e от ширины диаграммы антенны КВ нагревного стенда, а не от ширины диаграммы антенны радара НР (рис. 9) [61]. Таким образом в рамках механизма гидирования луча радара НР искусственными ионосферными неоднородностями объяснить генерацию дактов N_e при Х-нагреве F-области ионосферы невозможно.

Анализ последовательности процессов при Х-нагреве F-области ионосферы показал, что создание дактов повышенной электронной плотности начинается с самофокусировочной неустойчивости и ускорения электронов вдоль магнитной силовой трубки в условиях электрического поля волны накачки $\mathbf{E} \perp \mathbf{B}$, а также наличия градиентов давления плазмы [50]. Ускорению электронов способствует совпадение направления вращения электрического поля мощной волны с круговой Х-поляризацией с гировращением электронов. Отметим, что ускорение электронов при Х-нагреве подтверждается высоким отношением (0,35–0,5) интенсивности зелёной линии искусственного оптического излучения к красной [62]. Согласно результатам, полученным в работах [63, 64], поток ускоренных электронов приводит к повышению электронной концентрации.

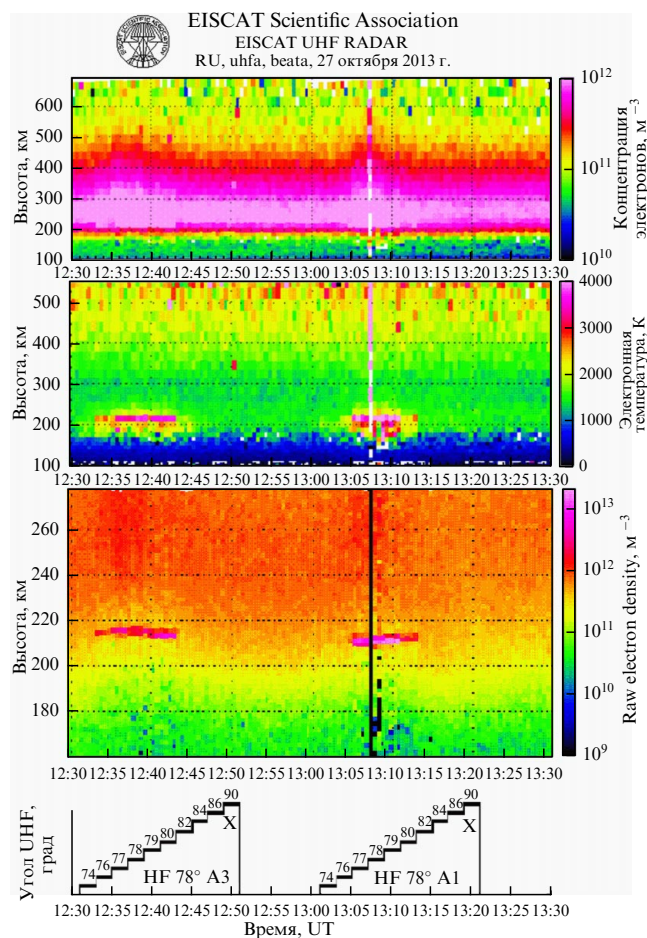


Рис. 9. Высотно-временное распределение N_e , T_e и мощности рассеянного сигнала, обозначенной N_{raw} , по данным измерений радара НР в период нагревного эксперимента 27 октября 2013 г. с 12:30 до 13:00 UT. Мощная КВ радиоволна Х-поляризации излучалась в магнитный зенит на частоте 7,953 МГц антеннами ФАР 3 или ФАР 1 циклами 20 мин нагрев, 10 мин пауза. Схема изменения углов возвышения радара НР, которые в течение цикла нагрева изменялись каждые 2 мин в последовательности 74–76–77–78–79–80–82–84–86–90°, а также поляризация мощной КВ радиоволны и тип используемой антенны КВ нагревного стенда EISCAT/Heating приведены на нижней панели [61].

С созданием дактов повышенной электронной плотности связана генерация МИИН при Х-нагреве на частотах как ниже, так и существенно выше f_{ce} . Однако механизм их генерации остается не до конца понятным. Можно предполагать, что внутри дакта сначала за счёт неустойчивости Релея–Тэйлора [47], развивающейся на горизонтальных градиентах дактов N_e при наличии электрического поля мощной КВ радиоволны, перпендикулярного магнитному, происходит генерация крупномасштабных неоднородностей, а затем вследствие градиентно-дрейфовой неустойчивости [45] создаются мелкомасштабные неоднородности (порядка 10 м). Существование крупномасштабных и среднемасштабных неоднородностей подтверждается большим (до 5 мин и больше) временем релаксации МИИН при Х-нагреве [38].

Выполним оценки относительного давления плазмы P/P_0 (где P — давление плазмы в цикле нагрева, а P_0 — непосредственно перед началом нагрева) при альтерна-

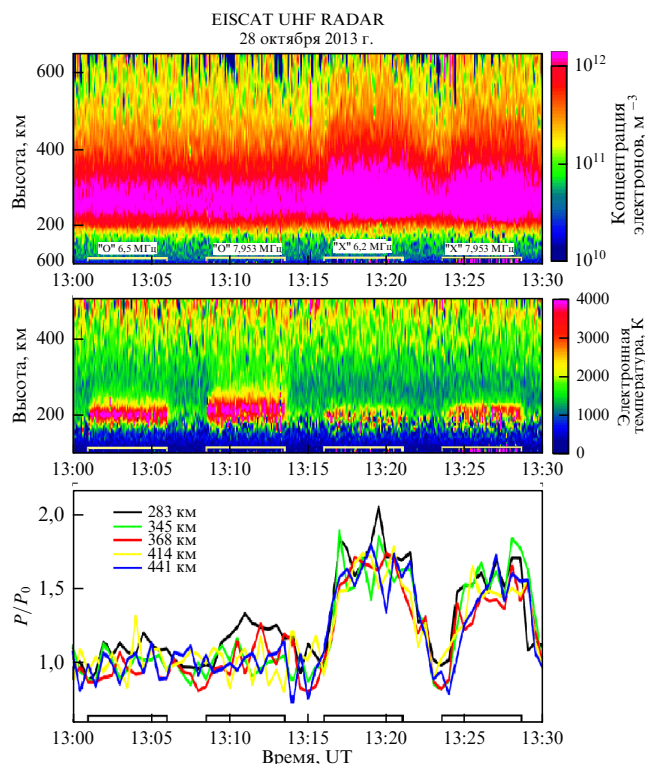


Рис. 10. Высотно-временное распределение N_e и T_e по данным измерений радара НР с 30 с временем интегрирования и рассчитанные значения P/P_0 на фиксированных высотах 283, 345, 368, 414, 441 км в период нагревного эксперимента 20 октября 2013 г. с 13:00 до 13:30 UT. Мощная КВ радиоволна О- или Х-поляризации излучалась в магнитный зенит на частотах 6,2 или 7,953 МГц антенной ФАР 1 циклами 5 мин нагрев, 2,5 мин пауза. Циклы нагрева, поляризация и частота волны накачки указаны на оси времени верхней панели.

тивном О-/Х-нагреве, используя выражение [65]

$$\frac{P}{P_0} = \frac{N_e(T_e + T_i)}{N_{e0}(T_{e0} + T_{i0})},$$

где T_{e0} , T_{i0} , и N_{e0} — температуры электронов и ионов и электронной концентрации перед началом нагрева; T_e , T_i , и N_e те же параметры в периоды нагрева.

На рисунке 10 показано поведение электронной концентрации и температуры по данным наблюдений EISCAT радара НР и рассчитанные значения P/P_0 на фиксированных высотах в период эксперимента 20 октября 2013 г. при альтернативном О-/Х-нагреве на частотах 6,2 и 7,953 МГц в условиях, когда частота нагрева была ниже критической частоты слоя F2 ($f_H < f_oF2$).

Как следует из рис. 10, в циклах Х-нагрева происходило возрастание P/P_0 в 1,6–1,9 раза в широком диапазоне высот от 283 до 441 км. В циклах О-нагрева небольшие возрастания P/P_0 до значений 1,2–1,3 наблюдались только на высоте 283 км.

5. Узкополосное искусственное радиоизлучение ионосферы

5.1. Искусственное радиоизлучение ионосферы при О-нагреве

Искусственное радиоизлучение ионосферы (ИРИ) впервые было обнаружено на нагревном стенде EISCAT/

Heating [66] и в дальнейшем исследовалось на всех КВ нагревных стендах. ИРИ генерируется при воздействии мощными КВ радиоволнами обыкновенной (О-мода) поляризации в полосе частот ± 100 кГц относительно частоты волны накачки в непосредственной близости от нагревного стенда. ИРИ представляет собой широкополосную (± 100 кГц) шумовую составляющую в спектре отраженной от ионосферы волны накачки с отдельными ярко выраженными дискретными спектральными компонентами [67]. ИРИ активно изучалось как экспериментально на всех нагревных стендах мира в средних и высоких широтах, так и теоретически (см., например, [14, 17, 18, 67, 68]). Анализ спектров ИРИ предоставляет важную диагностическую информацию о состоянии искусственно возмущенной области ионосферы.

В настоящее время на высокоширотных КВ нагревных стендах HAARP и EISCAT/Heating активно изучается явление узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ). Это относительно новый тип искусственного радиоизлучения в полосе ± 1 кГц относительно частоты волны накачки был обнаружен на стенде HAARP [69]. Интенсивные дискретные компоненты в спектре УИРИ регистрировались вблизи нагревного стенда (~ 20 км от стенда HAARP) при воздействии на F-область ионосферы мощными КВ радиоволнами обыкновенной (О-мода) поляризации. Появление этих спектральных компонент было объяснено вынужденным бриллюэновским рассеянием в замагниченной плазме (MSBS — Magnetized Stimulated Brillouin Scatter) при параметрическом распаде мощной электромагнитной волны О-поляризации на электростатическую волну и рассеянную электромагнитную волну [69–72]. Тип возбуждаемой электростатической волны зависит от угла между волновым вектором мощной КВ радиоволны и вектором магнитного поля Земли. Ионно-акустические (IA — ion acoustic) волны возбуждаются вдоль магнитного поля $\mathbf{B}$, а ионно-циклотронные (EIC — electrostatic ion cyclotron) почти перпендикулярно $\mathbf{B}$, что согласуется с теоретическими результатами [73]. Дискретные компоненты IA волн в спектре УИРИ появляются с отрицательным смещением частоты на 10–30 Гц, а линии излучения EIC с отстройкой по частоте примерно 50 Гц от частоты волны накачки. Частотный сдвиг спектральных линий зависит от вида ионов и температуры электронов в искусственно возмущенной области. Ни в одном из экспериментов, выполненных на стенде HAARP при Х-нагреве, попытки обнаружить дискретные компоненты в спектре УИРИ в непосредственной близости от стенда не увенчались успехом [72]. В экспериментах на стенде EISCAT/Heating при О-нагреве при ступенчатом изменении частоты нагрева около третьей и четвертой гирогармоник электронов в непосредственной близости от нагревного стенда также регистрировались IA компоненты в спектре УИРИ. Они возбуждались на частотах нагрева как ниже, так и выше частоты гирогармоник электронов ($f_H < 3f_{ce}$, $4f_{ce}$ и $f_H > 3f_{ce}$, $4f_{ce}$) и исчезали в электронных гирорезонансах, когда $f_H \approx 3f_{ce}$, $4f_{ce}$ [54, 74, 75].

В эксперименте, выполненном на стенде HAARP, в условиях, когда частота мощной волны О-поляризации была близка второй гирогармонике электронов ($f_H \sim 2f_{ce}$) и критической частоте слоя F2 ($f_H \sim f_oF2$), в спектре УИРИ регистрировались многократные ионно-гирогармонические структуры сдвинутые вниз по частоте относительно нагревного сигнала на локальную ги-

рочастоту ионов (ионов O^+) [76–78]. Эти дискретные структуры, вызваны индуцированным рассеянием волн Бернштейна на ионах (Stimulated Ion Bernstein Scatter, SIBS) [78]. Ионно-гирогармонические структуры могут играть важную роль в создании дополнительных слоёв в ионосфере [79, 80].

5.2. Характеристики узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы при X-нагреве

Впервые явление УИРИ при воздействии на F-область ионосферы мощными KB радиоволнами X-поляризации на удалении ~ 1200 км от нагревного стенда EISCAT/Heating было зарегистрировано на обсерватории ААНИИ "Горьковская" под г. С.-Петербург [36]. В дальнейшем выполнялись исследования условий генерации, характеристик, пороговых мощностей возбуждения и механизмов генерации УИРИ [81–84].

5.2.1. Характеристики и особенности поведения узкополосного искусственного радиоизлучения ионосфер вблизи многократных электронных гирорезонансов. На рисунке 11 приведена спектрограмма сигнала волны накачки на частоте 5,423 МГц в полосе частот ± 700 Гц относительно частоты нагрева, зарегистрированная на обсерватории "Горьковская", 25 февраля 2013 г. В период эксперимента значения критической частоты обыкновенной компоненты по данным ионозонда в Тромсё изменялись в диапазоне $f_oF2 = 5,9–5,4$ МГц ($f_xF2 \approx f_oF2 + f_{ce}/2$, где f_{ce} — гирочастота электронов). Высота отражения X-волны, определяемая из профилей электронной концентрации по данным радара HP, составляла 225 км. По модели IGRF (International Geomagnetic Reference Field) величина четвёртой гирогармоники электронов на высоте 225 км имела значение $4f_{ce} = 5,444$ МГц. Следовательно, частота волны накачки $f_H = 5,423$ МГц была ниже $4f_{ce}$ на 21 кГц.

Как следует из рис. 11, только в циклах X-нагрева (16:16–16:26 UT и 16:31–16:41 UT) спектр нагревного сигнала содержит ярко выраженные дискретные линии на частотах $\pm n(51–54)$ Гц, где n — номер гармоники. Дискретные спектральные линии УИРИ упорядочены, приблизительно по гирочастоте ионов атомарного кислорода O^+ . Эксперимент 25 февраля 2023 г. выполнялся в условиях отражения мощной X-волны от ионосферы, когда частота нагрева была ниже критической частоты необыкновенной компоненты слоя F2 ($f_H < f_xF2$) и примерно на 20 кГц ниже четвёртой гирогармоники электронов. Ионные гирогармонические структуры возбуждались как при отрицательных отстройках от частоты волны накачки f_H (компоненты Стокса), так и при положительных (компоненты анти-Стокса) [82].

Рассмотрим эволюцию развития во времени спектров УИРИ в первом цикле X-нагрева 16:16–16:26 UT (с "холодного" старта) и в следующем за ним цикле 16:31–16:41 UT для того же эксперимента 25 февраля 2013 г. Рисунок 12 демонстрирует последовательность спектров УИРИ в полосе ± 500 Гц, полученных каждые 3 с в течение первых 40 с после начала нагрева для цикла нагрева с "холодного" старта (16:16–16:26 UT) (рис. 12а) и следующего за ним цикла 16:31–16:41 UT (рис. 12б).

Из рисунка 12 следует, что предыстория X-нагрева оказывает существенное влияние на эволюцию развития спектральных компонент в спектре УИРИ. Так в цикле нагрева с "холодного" старта (рис. 12а) дискретные ион-

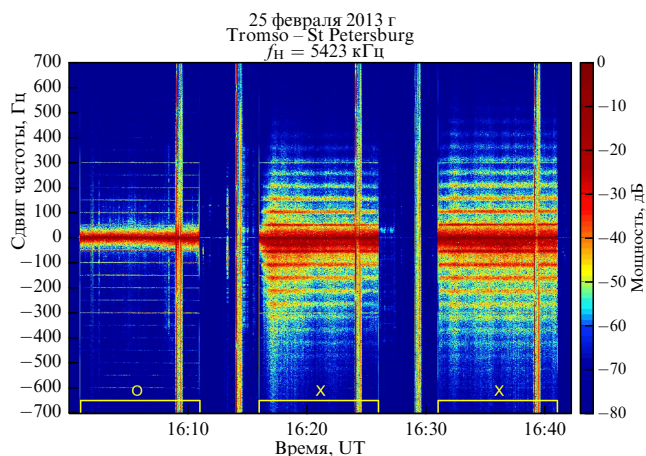


Рис. 11. Спектрограмма сигнала волны накачки на частоте 5,423 МГц в полосе частот ± 700 Гц относительно частоты нагрева, зарегистрированная на обсерватории "Горьковская", удалённой от нагревного стенда EISCAT/Heating на расстояние ~ 1200 км, 25 февраля 2013 г. с 16:00 до 16:42 UT. Мощная KB радиоволна O- или X-поляризации излучалась в магнитный зенит антенной ФАР 1, обеспечивающей эффективную мощность излучения $P_{эфф} = 416$ МВт, циклами 10 мин нагрев, 5 мин пауза. Слабые и узкие гармоники, кратные частоте 50 Гц, наблюдаемые в периоды излучения O-волны, являются помехами питающей сети. Интенсивная спектральная линия на нулевой частоте соответствует частоте нагревного сигнала. Циклы нагрева и поляризация мощной волны показаны на оси времени [82].

ные гирогармонические компоненты начинают формироваться через 15 с после начала нагрева (в трёхсекундном интервале 16:16:14–16:16:17 UT), в то время как в следующем цикле X-нагрева (рис. 12б) они развиваются быстрее, примерно через 6 с после начала нагрева (в трёхсекундном интервале 16:31:05–16:31:08 UT).

Следует отметить, что подобные ионные гирогармонические структуры возбуждались при X-нагреве в условиях отражения X-волны накачки от ионосферы ($f_H < f_xF2$), когда она была ниже не только четвёртой гирогармоники электронов ($f_H < 4f_{ce}$), но также и $f_H < 5f_{ce}$ и $f_H < 6f_{ce}$ [81, 82].

Рассмотрим более детально поведение спектров УИРИ в зависимости от близости частоты нагрева к гирогармонике электронов в условиях, когда мощная X-волна отражается от ионосферы ($f_H \leq f_xF2$). На рисунке 13 приведены спектрограммы сигнала волны накачки в полосе ± 250 Гц, зарегистрированные на обсерватории "Горьковская", при альтернативном O-/X-нагреве F-области ионосферы 25 и 26 октября 2013 г. В период экспериментов в течение 20 мин цикла частота нагрева ступенчато изменялась на 5 кГц каждые 20 с в окрестности пятой гирогармоники электронов от 6,7 до 6,995 МГц. Высота отражения X-волны, определяемая из профилей электронной концентрации по данным радара HP, за 30 с до начала измерений на частоте $f_H = 6,7$ МГц составляла 223 и 218 км 25 и 26 октября соответственно. По модели IGRF величина пятой гирогармоники электронов на высотах 223 и 218 км имела значения $5f_{ce} = 6,806$ и 6820 МГц соответственно. Следовательно, частота волны накачки $f_H = 6,7$ МГц была ниже $5f_{ce}$ на 106 и 120 кГц в период экспериментов 25 и 26 октября 2013 г. соответственно.

Результаты экспериментов 25 и 26 октября 2013 г. убедительно демонстрируют возбуждение многократ-

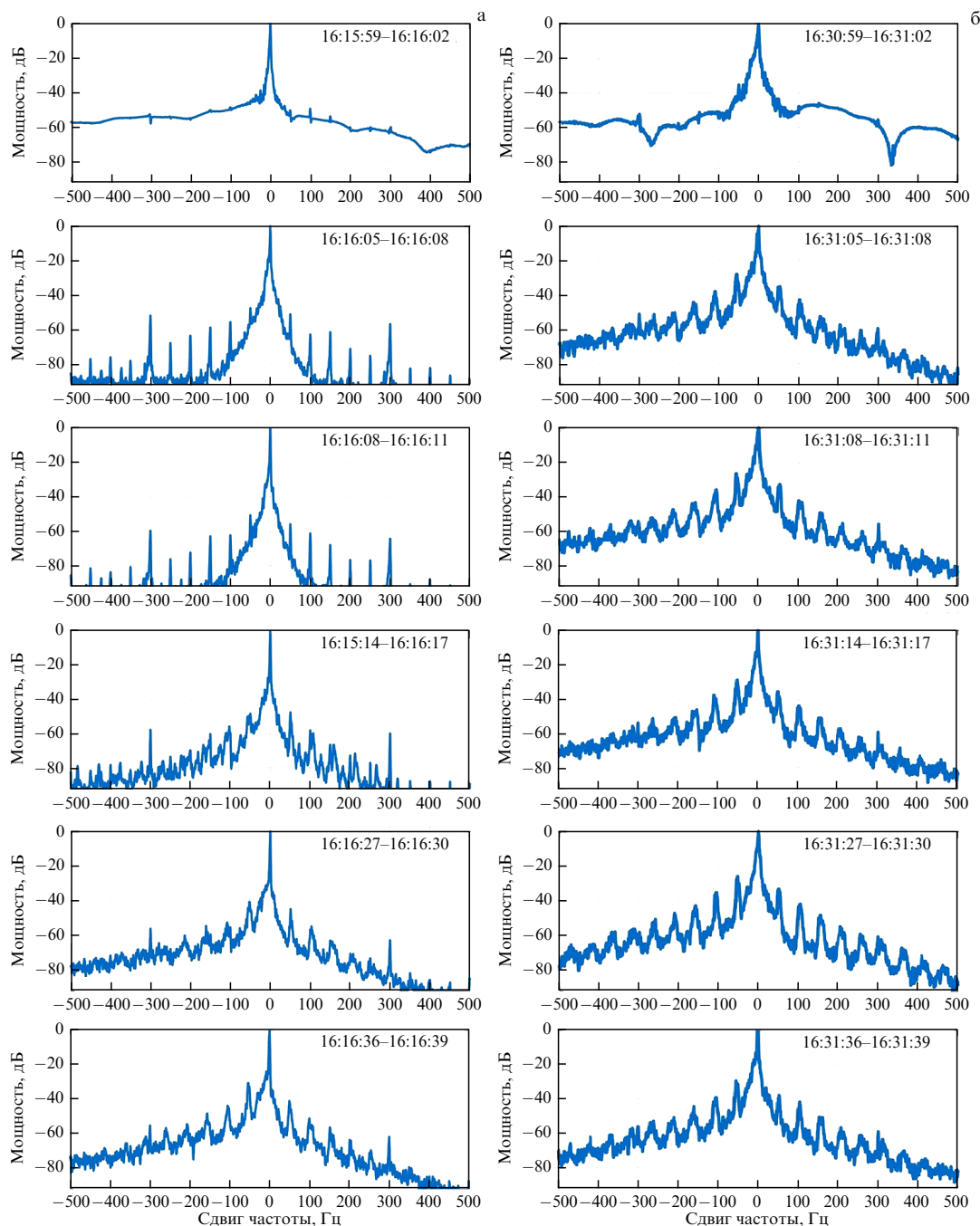


Рис. 12. Спектры мощности УИРИ в полосе ± 500 Гц, полученные каждые 3 с в течение первых 40 с после начала нагрева 25 февраля 2013 г., при X-нагреве в магнитный зенит на частоте 5,423 МГц при $P_{\text{эфф}} = 416$ МВт: (а) спектры, полученные в цикле нагрева с "холодного" старта 16:16–16:26 UT; (б) спектры, полученные в следующем цикле нагрева с 16:31–16:41 UT. Слабые и узкие гармоники, кратные частоте 50 Гц, наблюдаемые в спектрах 16:16:05–16:16:08 и 16:16:08–16:16:11 UT, являются помехами питающей сети. Детали нагрева те же, что и на рис. 11 [82].

ных дискретных компонент в спектре УИРИ, упорядоченных по гирочастоте ионов O^+ ($\pm n f_{ci}$, где f_{ci} — гирочастота ионов, n — номер гармоники) при X-нагреве на частотах ниже пятой гирогармоники электронов ($f_H < 5f_{ce}$). Исчезновение этих спектральных структур происходит, когда частота нагрева становится равной пятой гирогармонике электронов ($f_H = 5f_{ce}$). На основе обобщения результатов экспериментов вблизи пятой гирогармоники электронов было установлено: (1) многократные дискретные компоненты в спектре УИРИ, упорядоченные по гирочастоте ионов O^+ , возбуждались

ниже частоты гирогармоник электронов; (2) при достижении частоты нагрева частот гирогармоник электронов ($f_H = 5f_{ce}$) многократные дискретные компоненты исчезали; (3) наиболее интенсивные дискретные компоненты в спектре УИРИ наблюдались при нагреве на частотах вблизи критической частоты слоя F2.

Возможным механизмом генерации ионных гирогармонических структур в спектре УИРИ, возбуждаемых при X-нагреве на частотах ниже критической частоты необыкновенной компоненты слоя F2 ($f_H \leq f_x F2$), является параметрический распад мощной электромагнит-

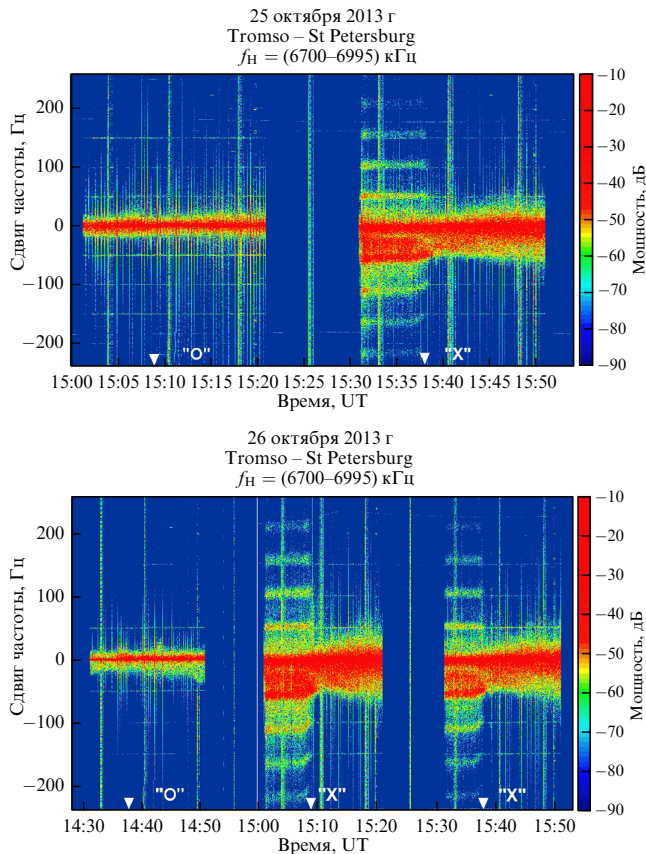


Рис. 13. Спектрограммы сигнала волны накачки в полосе частот ± 250 Гц относительно частоты нагрева при ступенчатом изменении частоты нагрева в окрестности пятой гирогармоники электронов от 6,7 до 6,995 МГц, зарегистрированные на обсерватории "Горьковская", 25 и 26 октября 2013 г. Мощная КВ радиоволна О- или Х-поляризации излучалась в магнитный зенит антенной ФАР 1, обеспечивающей эффективную мощность излучения $P_{\text{эфф}} \approx 650$ МВт 25 октября и $P_{\text{эфф}} \approx 550$ МВт 26 октября 2013 г., циклами 20 мин нагрев, 10 мин пауза. Спектрограммы представлены таким образом, что максимум в спектре соответствует нулевой отстройке для каждой частоты нагрева в течение нагревного цикла. Стрелки на спектрограммах на оси времени соответствуют времени, когда $f_H = 5f_{ce}$ [81].

ной волны Х-поляризации в высокочастотную электронную и низкочастотную ионную волны Бернштейна [85] с последующим распадом "материнской" электронной волны Бернштейна в "дочерние" волны. Таким образом развивается нелинейный каскадный процесс, приводящий к генерации дискретных спектральных компонент, разнесенных по частоте на гирочастоту ионов атомарного кислорода O^+ вследствие индуцированного рассеяния волн Бернштейна на ионах (Stimulated Ion Bernstein Scatter, SIBS):

$$\begin{aligned} EM &\rightarrow EB + IB, \quad EB \rightarrow EB_1 + IB_1, \\ EB_1 &\rightarrow EB_2 + IB_2 \text{ и т.д.} \end{aligned}$$

МИИН играют ключевую роль в регистрации УИРИ на больших удалениях от нагревного стенда. Возбуждаемые электростатические волны Бернштейна в ионосфере с волновым вектором, перпендикулярном магнитному полю $\mathbf{B}$, вследствие рассеяния на МИИН в направлении, перпендикулярном $\mathbf{B}$, конвертируются в электромагнитную волну, которая может быть принята на Земле [82].

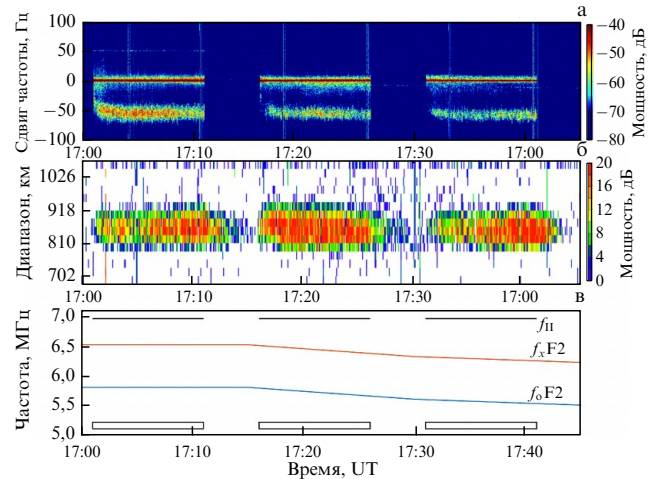


Рис. 14. Спектрограмма сигнала волны накачки на частоте 6,96 МГц в полосе частот ± 100 Гц относительно частоты нагрева, зарегистрированная на обсерватории "Горьковская" (а), мощности рассеянных на МИИН сигналов по данным радара CUTLASS на частоте 18 МГц (б), а также вариации критических частот слоя F2 (в) в период эксперимента 28 октября 2013 г. с 17 до 17:45 UT. Мощная КВ радиоволна Х-поляризации излучалась в направлении магнитного зенита антенной ФАР 1, обеспечивающей $P_{\text{эфф}} = 550$ МВт, циклами 10 мин нагрев, 5 мин пауза. Циклы нагрева показаны на оси времени.

5.2.2. Характеристики узкополосного искусственного радиоизлучения ионосфер при Х-нагреве на частотах выше критической частоты необыкновенной компоненты слоя F2. При Х-нагреве на частотах $f_H > f_x F2$, т.е. в условиях, когда мощная волна не отражается от ионосферы ("высвечивается"), в спектрах УИРИ регистрировалась одна спектральная компонента, сдвинутая вниз по частоте относительно нагревного сигнала на (56–59) Гц, что близко гирочастоте ионов атомарного кислорода O^+ [83]. На рисунке 14 приведена спектрограмма нагревного сигнала (в полосе частот ± 100 Гц относительно частоты нагрева) при Х-нагреве на частоте 6,96 МГц ($f_H > f_x F2$), зарегистрированная на обсерватории "Горьковская", мощности рассеянных на МИИН сигналов по данным радара CUTLASS в Ханкасалми (Финляндия) на частоте 18,0 МГц ($l_{\perp} = 8,3$ м), а также вариации критических частот слоя F2 в Тромсё в период эксперимента 28 октября 2013 г. с 17 до 17:45 UT.

При Х-нагреве на частотах выше критической частоты слоя F2 ($f_H > f_x F2$) мощная электромагнитная волна EM_o непосредственно распадается на рассеянную высокочастотную электромагнитную волну EM_s и низкочастотную электростатическую ионную циклотронную волну EIC вследствие стимулированного рассеяния Бриллюэна (Magnetized Stimulated Brillouin Scatter, MSBS), $EM_o \rightarrow EM_s + EIC$ [70, 71]. Тогда условия частотного и волнового синхронизма представляются в виде

$$\omega_H = \omega_S \pm \omega_{EIC}; \quad k_H = k_S \pm k_{EIC},$$

где ω_H , ω_S , ω_{EIC} — частоты волны накачки, рассеянной и электростатической ионно-циклотронной волны соответственно; k_H , k_S , k_{EIC} — волновые вектора волны накачки, рассеянной и электростатической ионно-циклотронной волны соответственно.

В этих условиях регистрировалась одна спектральная компонента в области отрицательных отстроек от час-

тоты нагрева на ~ 60 Гц, что близко гирочастоте ионов O^+ . Такая же дискретная спектральная структура может наблюдаться, когда частота нагрева была ниже критической частоты слоя F2 ($f_H < f_{cF2}$), но при этом находилась вдали от гирогармоник электронов. В области, где развивается механизм MSBS, волновые векторы EIC и рассеянных электромагнитных волн перпендикулярны вектору магнитного поля $\mathbf{B}$, поэтому вторичные электромагнитные волны также рассеиваются на МИИН в направлении, перпендикулярном $\mathbf{B}$ и могут распространяться на большое расстояние от искусственно возмущенной области.

5.2.3. Пороговые мощности возбуждения узкополосного искусственного радиоизлучения ионосфер. Эксперименты при ступенчатом изменении эффективной мощности излучения нагревного стенда EISCAT/Heating позволили определить пороговые мощности возбуждения УИРИ при X-нагреве. На рисунке 15 приведены спектрограмма сигнала волны накачки в полосе ± 400 Гц при ступенчатом изменении $P_{эфф}$, а также спектры мощности УИРИ в полосе ± 350 Гц, полученные 26 октября 2021 г. на трёхсекундных интервалах, при X-нагреве на частоте 5,423 МГц при изменении $P_{эфф}$ от 55 до 350 МВт.

Пороги возбуждения УИРИ при X-нагреве в магнитный зенит составляют $P_{эфф} = 80-90$ МВт (что соот-

ветствует электрическим полям в ионосфере $E = 0,31-0,35$ В м $^{-1}$). По мере возрастания эффективной мощности излучения наблюдалось расширение полосы и рост интенсивностей дискретных спектральных линий. Окончательное формирование спектра УИРИ происходило при $P_{эфф} = 284-291$ МВт ($E = 0,63$ В м $^{-1}$) [84].

6. Продольные плазменные волны (ленгмюровские и ионно-акустические)

6.1. Ленгмюровская

и ионно-акустическая турбулентность при О-нагреве

Применение радара некогерентного рассеяния радиоволн (НР) в сочетании с КВ нагревным стендом позволяет проводить детальные исследования продольных плазменных волн (ленгмюровских и ионно-акустических). Ленгмюровские (Langmuir waves, LW) и ионно-акустические (Ion-acoustic waves, IAW) волны проявляются в спектрах рассеянного сигнала радара НР как инициированные нагревом плазменные линии (HF-induced plasma lines, HFPL) и усиленные нагревом ионные линии (HF-enhanced ion lines, HFIL) [63, 86, 87]. Появление ленгмюровских и ионно-акустических плазменных волн в экспериментах по модификации ионосферы мощными КВ радиоволнами О-поляризации, излучаемыми в направлении, близком к вертикальному, свидетельствует о возбуждении параметрической распадной (стрикционной) неустойчивости (parametric decay instability, PDI), когда мощная электромагнитная волна EM трансформируется в плазменные волны, $EM \rightarrow LW + IAW$. PDI развивается в первые 100 мс нагрева вблизи высоты отражения волны накачки [12, 19, 86–92]. Появление выраженного спектрального пика на нулевой частоте HFIL $_0$ (соответствующей частоте радара НР) указывает на возбуждение модуляционной неустойчивости (modulation instability, MI) [93]. Пороги возбуждения "классической" PDI при О-нагреве, развивающейся как мгновенных отклик на включение нагревного стенда, составляют 26–40 МВт [87].

Как было показано в работах [13, 87], возбуждаемые при включении нагревного стенда HFPL и HFIL, являющиеся сигнатурами LW и IAW по данным измерений на радаре НР EISCAT (931 МГц), идентифицируются в спектрах рассеянных сигналов на первом 5 с шаге измерений. Спектры ионных линий демонстрируют появление двух пиков (HFIL $_{DOWN}$ и HFIL $_{UP}$), сдвинутых относительно нулевой частоты вниз и вверх на ионно-акустическую частоту (f_{IA}), которая пропорциональна волновому числу радара. Типичное значение ионно-акустической частоты для EISCAT радара НР на частоте 931 МГц составляет $f_{IA} = \omega_{IA}/2\pi = 10$ кГц. В высокочастотном канале измерений радара НР EISCAT (931 МГц) регистрирует только сдвинутую вниз по частоте плазменную линию HFPL.

При О-нагреве после возбуждения PDI начинают развиваться МИИН, которые подавляют LW и IAW и блокируют дальнейшее возбуждение PDI и MI [14]. Тем не менее, при высоких эффективных мощностях излучения ($P_{эфф} > 300$ МВт) после "классической" PDI, развивающейся как мгновенный отклик на включение нагревного стенда, возможно возобновление генерации LW и IAW, которые существуют одновременно с МИИН в течение всей длительности нагревного цикла [6, 7, 54, 55,

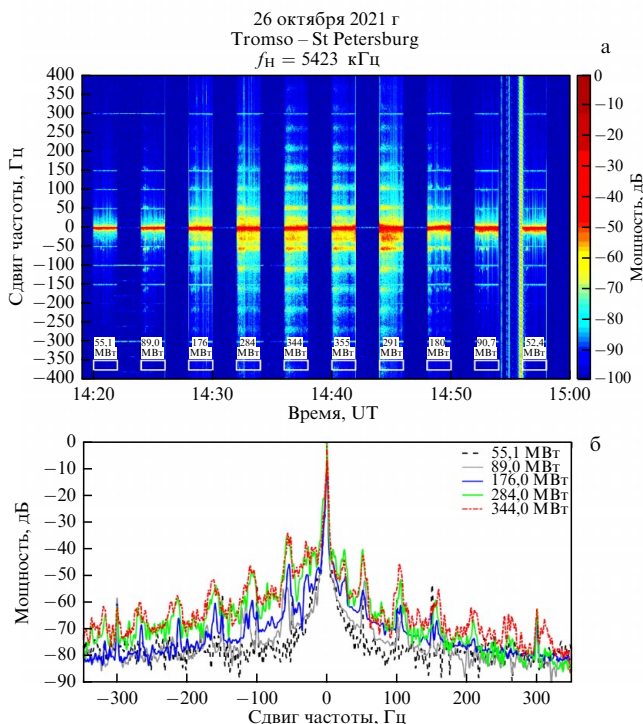


Рис. 15. Результаты измерения спектральных характеристик УИРИ на обсерватории "Горьковская", удалённой от нагревного стенда EISCAT/Heating на расстояние ~ 1200 км, 26 октября 2021 г. с 14:20 до 15 UT. Мощная КВ радиоволна X-поляризации излучалась в направлении магнитного зенита на частоте 5,423 МГц циклами 2 мин нагрев, 2 мин пауза. От цикла к циклу эффективная мощность излучения $P_{эфф}$ изменялась в последовательности: 55,1; 89; 176; 284; 344; 355; 291; 180; 90,7; 52,4 МВт. (а) Спектрограмма нагревного сигнала в полосе частот ± 400 Гц относительно частоты нагрева; (б) спектры мощности УИРИ в полосе ± 350 Гц при различных $P_{эфф}$ [84].

79, 94]. Стрикционная PDI возбуждается вблизи высоты, на которой частота волны накачки совпадает с локальной плазменной частотой $f_H^2 = f_{po}^2$. Это реализуется в области отражения мощной КВ радиоволны с круговой обыкновенной (О-мода) поляризацией.

6.2. Ленгмюровская и ионно-акустическая турбулентность при X-нагреве и сравнение с эффектами при О-нагреве

Мощная КВ радиоволна необыкновенной (Х-мода) поляризации отражается на высоте ниже, чем О-волна. Более того, электрическое поле мощной Х-волны в области отражения перпендикулярно магнитному полю. Вследствие этого она не должна вызывать возбуждение LW и IAW. Однако результаты многочисленных экспериментов, выполненных на нагревном стенде EISCAT/Heating, убедительно продемонстрировали, что мощная Х-волна способна возбуждать PDI и MI при её излучении вдоль магнитного поля (в магнитный зенит) [7, 36, 62, 81, 95]. В отличие от дактов повышенной электронной плотности, МИИН и УИРИ, генерация которых возможна на частотах нагрева как ниже, так и выше критической частоты необыкновенной компоненты слоя F2 ($f_H \leq f_x F2$ и $f_H > f_x F2$), возбуждение ленгмюровских и ионно-акустических волн происходило только в условиях отражения мощной Х-волны от ионосферы, т.е. $f_H \leq f_x F2$. При этом характеристики, эволюция развития во времени и пороги возбуждения LW и IAW принципиально отличаются при О- и Х-нагреве F-области ионосферы.

При Х-нагреве HFPL и HFIL появляются через 15–30 с после начала нагрева, достигают насыщения через ~ 1 мин и существуют одновременно с МИИН в течение всего нагревного цикла. На рисунке 16 показано высотное-временное поведение интенсивностей HFPL и HFIL по данным радара HP EISCAT, а также изменения во времени мощностей сигналов, рассеянных на МИИН, по данным измерений на радаре CUTLASS на трёх частотах при альтернативном О-/Х-нагреве в магнитный зенит 3 ноября 2013 г. на частоте 6,2 МГц и 26 октября 2013 г. на частоте 6,96 МГц. Данные радара HP в период экспериментов были получены с 5 с разрешением по времени и с разрешением по высоте 3 км. Мощности рассеянных на МИИН сигналов получены для дальностей, соответствующих расстоянию до искусственно возмущённой области ионосферы над Тромсё.

Из рисунка 16 следует, что при О-нагреве на частоте 6,2 МГц 3 ноября 2013 г. HFPL, HFIL_{DOWN} и HFIL_{UP} регистрировались только в момент включения нагревного стенда, когда МИИН ещё не образовались, в то время как при Х-нагреве интенсивные HFPL, HFIL_{DOWN} и HFIL_{UP} появлялись после возбуждения МИИН и наблюдались в течение всего нагревного цикла одновременно с МИИН. 26 октября 2013 г. при О-нагреве на частоте 6,96 МГц имело место возобновление возбуждения HFPL, HFIL_{DOWN} и HFIL_{UP} в спектрах радара HP после первоначального отклика на включение нагревного стенда, которые сосуществовали затем вместе с генерацией МИИН в течение всего нагревного цикла. При Х-нагреве HFPL, HFIL_{DOWN} и HFIL_{UP} появлялись одновременно с МИИН спустя ~ 15 с после начала нагрева и сосуществовали вместе до конца нагревного цикла. При этом их интенсивность была существенно больше, чем при О-нагреве.

6.3. Пороговые мощности возбуждения ленгмюровских и ионно-акустических волн при Х- и О-нагреве

Важной характеристикой усиленных нагревом плазменных и ионных линий при О- и Х-нагреве являются пороги возбуждения. Рассмотрим результаты эксперимента 20 октября 2012 г. при альтернативном О-/Х-нагреве на частоте 7,953 МГц при ступенчатом изменении эффективной мощности излучения в течение 10 мин циклов нагрева. В течение цикла нагрева мощность излучения сначала возрастала от 56 до 560 МВт, а затем ступенчато уменьшалась до 56 МВт. Длительность излучения при каждой ступени мощности составляла 1 мин с 1 с паузой перед каждым изменением мощности. На рисунке 17 приведено поведение максимальных интенсивностей HFPL, HFIL_{DOWN} и HFIL_{UP}, а также HFIL₀ (соответствующей частоте радара HP) 20 октября 2012 г. с 14:00 до 14:30 UT при альтернативном О-/Х-нагреве на частоте 7,953 МГц при ступенчатом изменении эффективной мощности излучения.

Как следует из рис. 17, в цикле О-нагрева (14:01–14:11 UT) наблюдалось возрастание интенсивностей HFPL, HFIL_{DOWN}, HFIL_{UP} и HFIL₀ при включении нагревного стенда в 14:01 UT при $P_{эфф} = 56$ МВт, что является проявлением развития "классической" PDI и MI. Пороги возбуждения "классической" PDI при О-нагреве, развивающейся как мгновенный отклик на включение нагревного стенда, составляют 26–40 МВт [87], а MI — 52,5 МВт [47]. Поэтому при О-нагреве уже на первой ступени мощности пороги возбуждения "классических" PDI и MI были превышены. При высоких эффективных мощностях излучения наблюдалось возобновление генерации ленгмюровских и ионно-акустических плазменных волн, сосуществующих с МИИН. Возобновление генерации LW и IAW при О-нагреве происходило при пороговых мощностях $P_{эфф} \approx 325$ и 445 МВт соответственно, что соответствует электрическим полям в ионосфере $E = 0,62$ и $0,73$ В м⁻¹. Возобновление генерации HFPL, HFIL_{DOWN}, HFIL_{UP} при О-нагреве может быть объяснено в рамках нерезонансного механизма возбуждения с учётом затухания Ландау на ионах, предложенного в [92]. Выполненные по модели [92] оценки пороговых электрических полей для условий эксперимента 20 октября 2012 г., необходимых для возобновления генерации ленгмюровских и ионно-акустических плазменных волн при О-нагреве, дают значения $0,7$ В м⁻¹ [96], что хорошо согласуется с экспериментом.

В цикле Х-нагрева (14:16–14:26 UT) HFPL, HFIL_{DOWN}, HFIL_{UP} и HFIL₀ возбуждались на высотах на 6 км ниже, чем при О-нагреве и соответствовали высотам отражения Х-волны от ионосферы. Из рисунка 17 следует, что максимальные интенсивности ленгмюровских и ионно-акустических плазменных волн более, чем на порядок выше, а пороговые мощности возбуждения меньше по сравнению с О-нагревом. Пороговые мощности возбуждения ленгмюровских волн составляют $P_{эфф} \approx 180$ МВт, что соответствует электрическим полям в ионосфере $E_{LW} = 0,46$ В м⁻¹ (в свободном пространстве). Появление ионно-акустических волн, сигнатурами которых являются сдвинутые вниз и вверх по частоте усиленные нагревом ионные линии HFIL_{DOWN} и HFIL_{UP} и нулевая компонента в спектре радара HP (HFIL₀, указывающая на возбуждение модуляционной неустойчивости, MI) происходило при $P_{эфф} \approx 315$ МВт, что соответствует электрическим полям в ионосфере $E_{MI} = 0,61$ В м⁻¹.

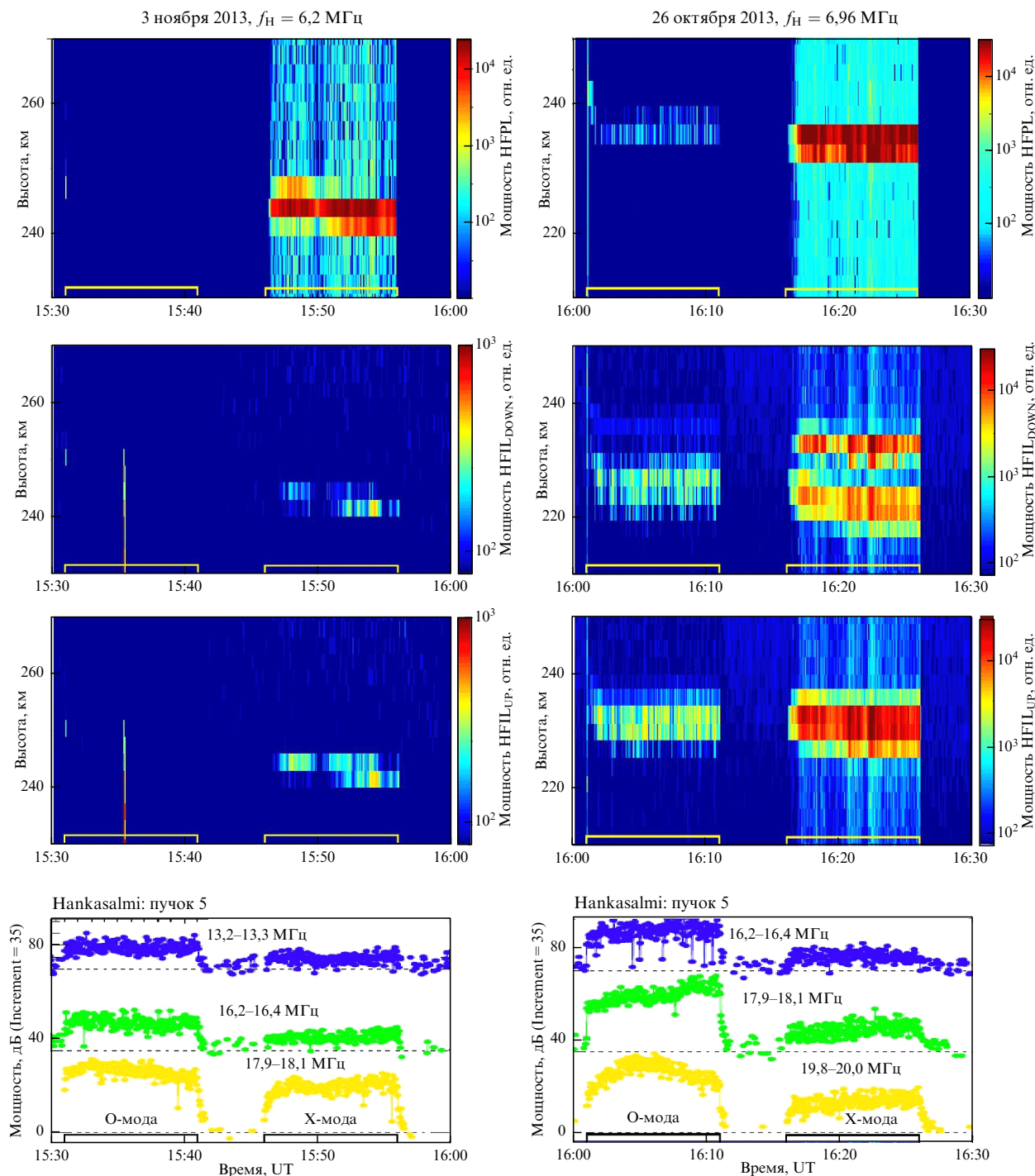


Рис. 16. Высотно-временное распределение интенсивностей вызванных нагревом плазменных линий (HFPL) и сдвинутых вниз и вверх по частоте усиленных ионных линий (HFIL_{DOWN} и HFIL_{UP}) по данным радара HP EISCAT (931 МГц), а также поведение во времени мощности рассеянных на МИИН сигналов по данным измерений радара CUTLASS в Ханкасалми во время альтернативного О-/Х-нагрева 3 ноября 2013 г. на частоте 6,2 МГц и 26 октября 2013 г. на частоте 6,96 МГц. Циклы нагрева и поляризации мощной волны указаны на оси времени [7].

Каков же механизм генерации ленгмюровских (LW) и ионно-акустических (IAW) плазменных волн при Х-нагреве F-области ионосферы? Появление LW и IAW в экспериментах по модификации ионосферы мощными КВ радиоволнами свидетельствует о возбуждении параметрической (стрикционной) неустойчивости (PDI), когда мощная электромагнитная волна вблизи высоты отражения распадается на ленгмюровскую и ионно-акустиче-

скую плазменные волны, $EM \rightarrow LW + IAW$. PDI возбуждается вблизи высоты, на которой частота волны накачки совпадает с локальной плазменной частотой $f_H^2 = f_{po}^2$. Это реализуется в области отражения мощной КВ радиоволны с круговой обыкновенной (О-мода) поляризацией. Область отражения Х-волны накачки располагается ниже этой высоты, поэтому LW и IAW не должны возбуждаться. Тем не менее, результаты много-

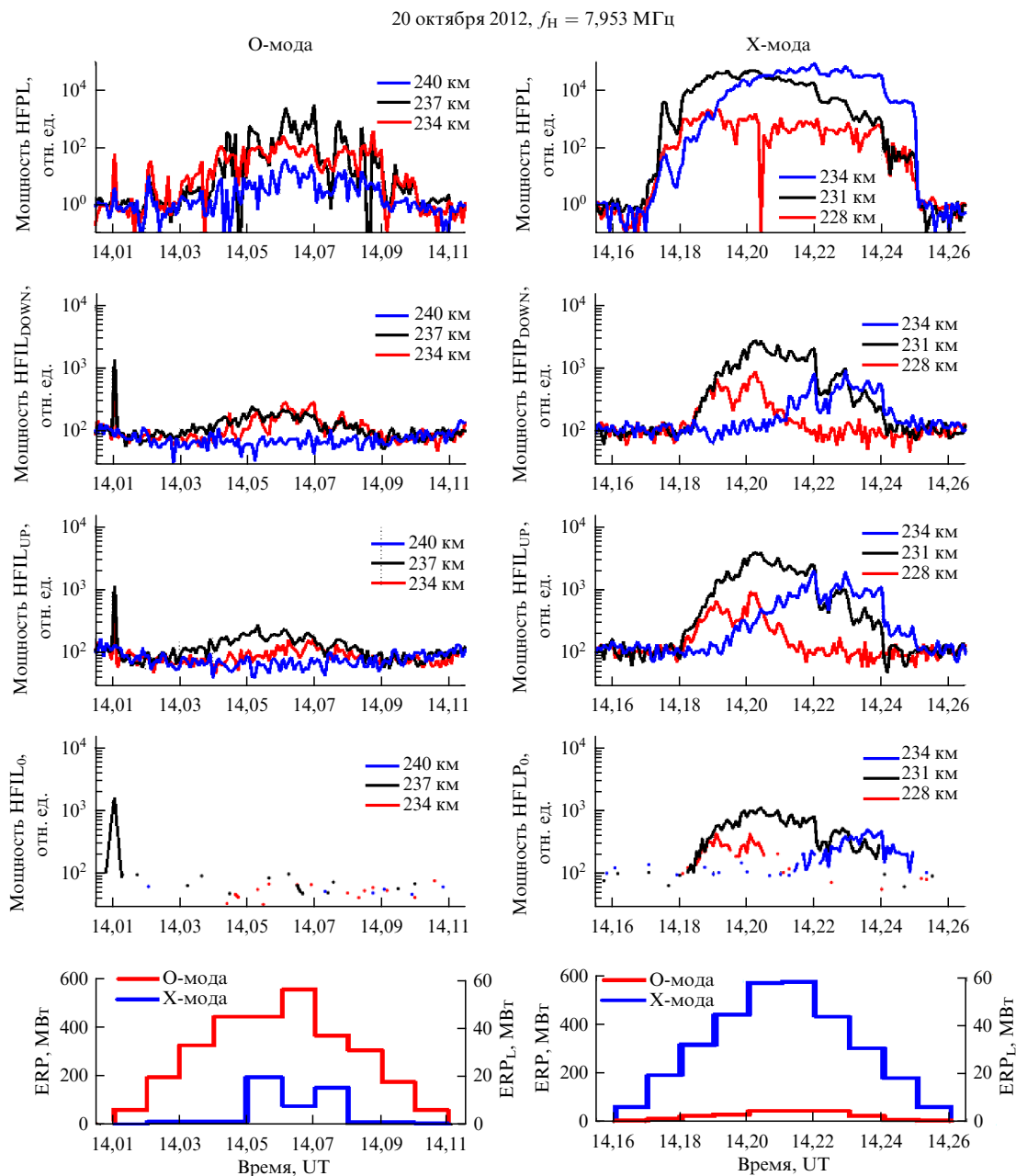


Рис. 17. Поведение максимальных интенсивностей HFPL, HFIL_{DOWN}, HFIL_{UP} и HFIL₀ на трёх фиксированных высотах по данным измерений радара HP EISCAT с 5 с разрешением по времени в течение эксперимента 20 октября 2012 г. на частоте 7,953 МГц при ступенчатом изменении эффективной мощности излучения для цикла О-нагрева в 14:01 – 14:11 UT и X-нагрева в 14:16:1426 UT. На нижних панелях показано изменение во времени эффективной мощности излучения (effective radiated power, ERP) в циклах О- и X-нагрева, а также мощности излучения X-волны при О-нагреве и О-волны при X-нагреве (ERP_L) [7].

численных экспериментов на стенде EISCAT/Heating, убедительно свидетельствуют, что возбуждение LW и IAW плазменных волн является типичной характеристикой X-нагрева. Сам факт возбуждения LW и IAW в области отражения X-волны явился столь неожиданным, что сначала его пытались объяснить просачиванием О-волны при X-нагреве [97]. В этой связи необходимо отметить, что в периоды экспериментов доля излучения О-волны при X-нагреве контролировалась и не превышала 5 МВт, достигая в единичных экспериментах на коротких временных интервалах 10 МВт, что существенно ниже порогов возбуждения PDI. Были также предприняты попытки теоретических оценок порогов возбуж-

дения PDI и MI, которые показали, что для частоты волны накачки 7,953 МГц пороговые значения электрических полей, необходимых для возбуждения LW, составляли $E_{LW} \approx 0,14$ В м⁻¹, а для MI — $E_{MI} \approx 0,41$ В м⁻¹ [98 – 100]. Полученные теоретические оценки E_{LW} и E_{MI} существенно ниже реально наблюдаемых значений, полученных в экспериментах при ступенчатом изменении $P_{эфф}$ (см. рис. 17). Мы предполагаем, что отраженная X-волна, которая становится по сути квазиэлектростатической, после рассеяния на искусственных неоднородностях (при X-нагреве возбуждаются неоднородности различных масштабов от мелких до средних и крупных) распадается на LW и IAW, $ES + \delta N_{FAI} \rightarrow LW + IAW$.

7. Искусственное оптическое излучение

Возбуждение оптических эмиссий является одним из впечатляющих явлений, обнаруженных в экспериментах по модификации ионосферы мощными КВ радиоволнами обыкновенной (О-мода) поляризации. Наиболее общие оптические эмиссии, такие как в красной (630 нм) и зелёной (577,7 нм) линиях атомарного кислорода, регистрировались при О-нагреве F-области ионосферы на всех КВ нагревных стендах мира в высоких и средних широтах (см., например, [101–108]). Наиболее интенсивные искусственные эмиссии возбуждались при излучении мощной КВ радиоволны О-поляризации в магнитный зенит [28, 39, 109, 110]. Полагают, что основными процессами, ответственными за возбуждение искусственных оптических эмиссий, является омический нагрев электронов и ускорение электронов.

Впервые искусственные оптические эмиссии (Radio-induced optical emission, RIOE) в красной (630 нм) и зелёной (577,7 нм) линиях атомарного кислорода при воздействии на высокоширотную F-область ионосферы мощными КВ радиоволнами необыкновенной (Х-мода) поляризации были обнаружены на нагревном стенде EISCAT/Heating [62]. На других КВ нагревных стендах искусственные оптические эмиссии не наблюдались.

Искусственные оптические эмиссии регистрировались как непосредственно вблизи нагревного стенда EISCAT/Heating с помощью цифровой оптической камеры DASI-2 (Digital All-Sky Imager 2), так и дистанционно камерами системы ALIS (Auroral Large Imaging System) в Швеции, установленными к югу от нагревного стенда EISCAT/Heating на удалении от 140 до 260 км [111]. На рисунке 18 показаны интенсивности искусственных оптических эмиссий в красной и зелёной линиях атомарного кислорода при Х-нагреве в магнитный зенит на частоте 7,1 МГц при эффективной мощности излучения стенда EISCAT/Heating $P_{\text{эфф}} = 550$ МВт 22 октября 2013 г. по данным измерений DASI-2 и камеры в Абиско (68,35° N, 18,81° E) системы ALIS.

Результаты оптических измерений при Х-нагреве свидетельствуют, что в отличие от дактов N_e , МИИН и

УИРИ возбуждение искусственных оптических эмиссий, аналогично генерации инициированных Х-нагревом плазменных волн (ленгмюровских и ионно-акустических), происходит только в условиях, когда волна накачки отражается от ионосферы ($f_H \leq f_x F2$). Интенсивности красной (630 нм) и зелёной (577,7 нм) линий атомарного кислорода в различных экспериментах изменялись в пределах 110–950 Рл и 50–350 Рл соответственно. Отношение интенсивностей зелёной линии к красной составляло $I_{577,7}/I_{630,0} = 0,35–0,5$. Такие высокие значения $I_{577,7}/I_{630,0}$ свидетельствуют об ускорении электронов. Характерной особенностью оптических излучений являлось их сосуществование с интенсивным усиленным нагревом плазменными и ионными линиями (HFPL и HFIL) и МИИН. Высота максимальной интенсивности оптических излучений совпадала с высотой максимальной мощности HFPL и HFIL [62].

Использование фотометров позволило наблюдать ранее недоступные слабые световые потоки, возникающие вследствие модификации ионосферы нагревным стендом Сура. В одном из экспериментов удалось наблюдать свечение зелёной (577,7 нм) линии атомарного кислорода возникшее в результате поглощения мощной радиоволны спорадическим Е слоем. При этом, наблюдавшееся в предыдущих и последующих циклах свечение красной (630,0 нм) линии атомарного кислорода, отсутствовало. В этих условиях наблюдалась практически полная экранировка верхней ионосферы и мощная радиоволна частично поглощалась на высотах около 100 км. Времена установки и релаксации зелёного искусственного свечения значительно превышали эти параметры для красного. Пространственная динамика светящейся области, определяемая по данным камер с полосовым светофильтром, указывала на то, что возбуждённый атомарный кислород переносится нейтральным ветром [108]. Также, эти чувствительные датчики позволили впервые зарегистрировать на стенде СУРА синее искусственное свечение (391,4 нм) модифицированной ионосферы [112].

Использование такого рода регистрирующей оптической аппаратуры имеет довольно хорошие перспективы

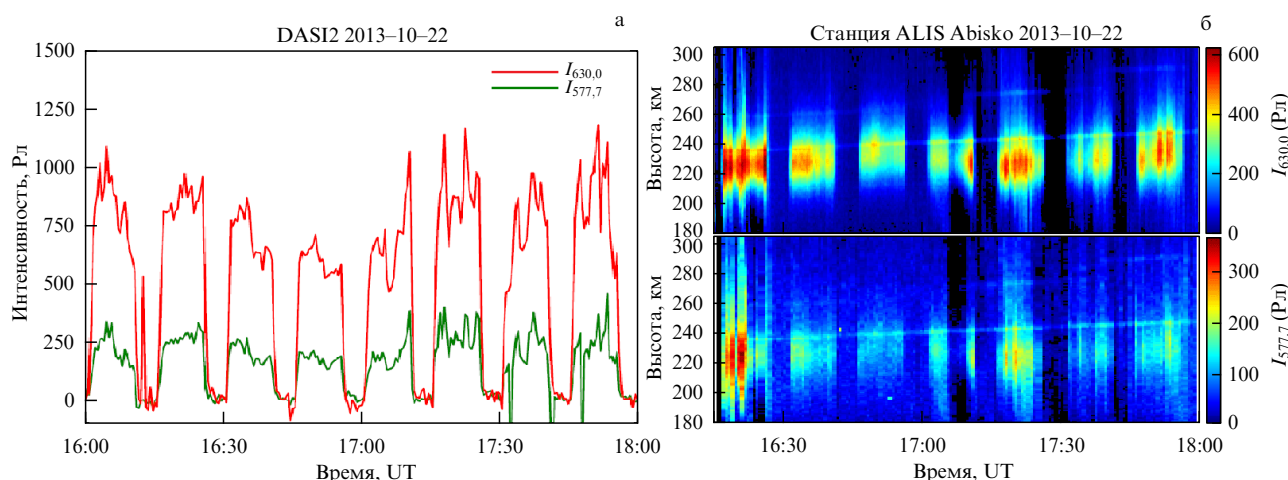


Рис. 18. Поведение интенсивностей искусственных оптических эмиссий в период эксперимента 22 октября 2013 г. с 16 до 18 UT. Мощная КВ радиоволна Х-поляризации излучалась на частоте 7,1 МГц в направлении магнитного зенита с 16:01 UT циклами 10 мин нагрев, 5 мин пауза. Эффективная мощность излучения $P_{\text{эфф}} = 550$ МВт. (а) Интенсивность красной (630 нм) и зелёной (577,7 нм) линий по данным измерений камеры DASI-2 вблизи нагревного стенда; (б) высотное распределение интенсивностей красной (630 нм) и зелёной (577,7 нм) линий в зависимости от времени (кеограмма), полученная на ALIS станции в Абиско (68,35° N, 18,81° E) [62].

для исследования при X-нагреве. Временное разрешение этих устройств составляет около 10 мс, что открывает широкие возможности исследования быстрой временной динамики свечения верхней атмосферы.

8. Сравнение характеристик нерезонансных явлений при О- и X-нагреве при высоких эффективных мощностях излучения

Результаты экспериментов позволили впервые обнаружить, что при высоких эффективных мощностях излучения нагревного стенда ($P_{\text{эфф}} > 300$ МВт) при О-нагреве в магнитный зенит на частотах, существенно превышающих критическую частоту слоя ($f_H > f_{\text{ср}}F_2$), т.е. в условиях, когда волна накачки не отражается от ионосферы, происходит генерация МИИН и других сопутствующих явлений (создание дактов, генерация узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы), типичных для X-нагрева [113]. Отметим, что при обычно используемых мощностях излучения $P_{\text{эфф}} < 250$ МВт генерация МИИН при О-нагреве на частотах выше критической частоты слоя F2 не происходит (см. рис. 2).

На рисунке 19 приведено для сравнения поведение МИИН и УИРИ при О- и X-нагреве на частоте 6,77 МГц при эффективной мощности излучения $P_{\text{эфф}} = 350$ МВт в условиях $f_H < f_{\text{ср}}F_2$ и $f_H > f_{\text{ср}}F_2$.

Из рисунка 19 следует, что в цикле О-нагрева в 14:31–14:41 UT на частоте $f_H < f_{\text{ср}}F_2$ ($f_{\text{ср}}F_2 = f_oF_2 + f_{\text{ср}}/2$, где $f_{\text{ср}}$ — гирочастота электронов) в условиях, когда возможно отражение волны накачки от ионосферы, возбуждались интенсивные МИИН, а УИРИ не регистрировалось. Такое поведение МИИН и УИРИ типично для всех экспериментов при О-нагреве на частотах $f_H < f_{\text{ср}}F_2$. В цикле О-нагрева на частотах $f_H > f_{\text{ср}}F_2$ в 15:01–15:11 UT (волна накачки не отражается от ионосферы) характеристики МИИН принципиально отличались от случая $f_H < f_{\text{ср}}F_2$, но хорошо согласовывались с характеристиками МИИН при X-нагреве в цикле 15:16–15:26 UT (см. рис. 19). Характерными особенностями в поведении МИИН при О-нагреве на частотах выше критической частоты являлись большие времена нарастания (2–4 мин в зависимости от масштаба неоднородностей) и релаксации, которые достигали длительности всей 5 мин паузы, что типично для X-нагрева. Времена нарастания МИИН существенно зависели от предыстории нагрева. В циклах X-нагрева с предысторией сказывалось влияние эффектов последствия от предшествующих циклов, что вызывало уменьшение времени нарастания МИИН, что и наблюдалось в следующем цикле X-нагрева (см. рис. 19). Размер области, в которой возбуждались наиболее интенсивные МИИН, в условиях, когда мощная волна не отражалась от ионосферы, составлял ~15–30 км как при О-, так и X-нагреве. Эти оценки хорошо согласуются с шириной дактов N_c по данным измерений радара некогерентного рассеяния радиоволн в Тромсё, пространственно совмещённого с нагревным стендом EISCAT/Heating [50].

В спектре УИРИ как при О-, так и X-нагреве на частотах $f_H > f_{\text{ср}}F_2$, регистрировалась одна спектральная компонента в области отрицательных отстроек от частоты нагрева на ~60 Гц, что близко гирочастоте ионов O^+ . Возможным механизмом генерации этой дискретной компоненты в спектре УИРИ при воздействии мощной КВ радиоволны как обыкновенной (О-

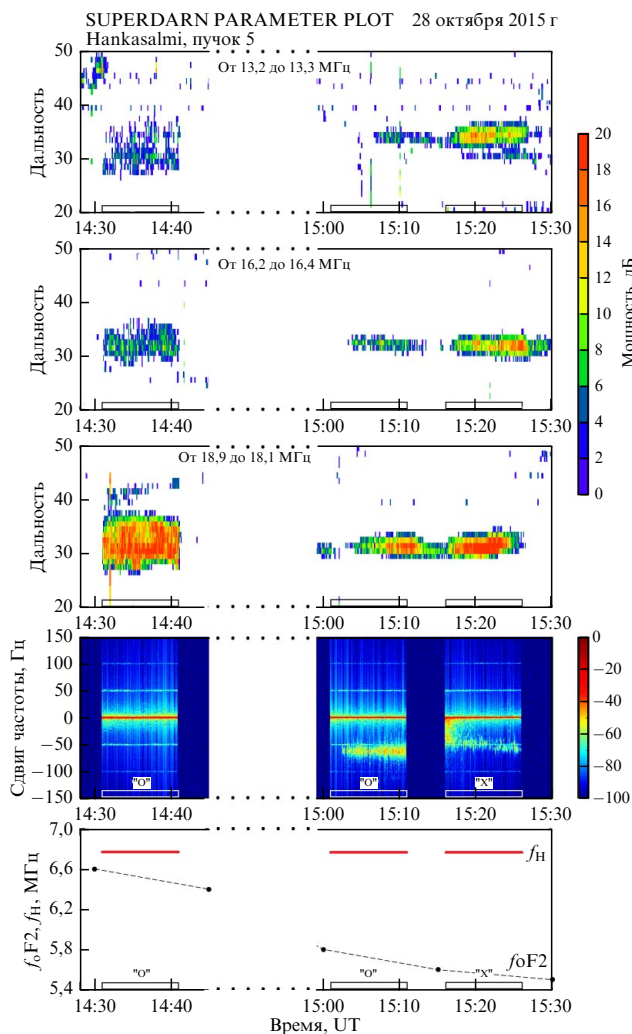


Рис. 19. Мощности рассеянных от МИИН сигналов в координатах дальность (Range gate) — мировое время, UT по данным наблюдений с помощью радара CUTLASS на частотах ~13, 16 и 18 МГц, спектрограммы УИРИ в полосе ± 150 Гц относительно частоты волны накачки и поведение критической частоты слоя F2, $f_{\text{ср}}F_2$, в период эксперимента 28 октября 2015 г. с 14:28–15:30 UT. Мощная КВ радиоволна излучалась в направлении магнитного зенита на частоте $f_H = 6,77$ МГц при $P_{\text{эфф}} = 350$ МВт. Циклы нагрева и используемая поляризация мощной КВ-радиоволны отмечены на оси времени.

мода), так и необыкновенной (X-мода) поляризации, на частотах, существенно превышающих критическую частоту слоя F2, может быть стимулированное рассеяние Бриллюэна (MSBS). В этих условиях мощная электромагнитная волна EM_o непосредственно распадается на рассеянную электромагнитную волну EM_s и электростатическую ионную циклотронную волну EIC, $EM_o \rightarrow EM_s + EIC$ [70, 71].

Поведение и характеристики МИИН и спектральной структуры УИРИ при О-нагреве при высоких эффективных мощностях излучения ($P_{\text{эфф}} > 300$ МВт) в условиях, когда волна накачки не отражается от ионосферы, являются типичными для X-нагрева F-области ионосферы. Это даёт основания полагать, что в рассматриваемых условиях происходила трансформация обыкновенной волны в необыкновенную. Сравнение характеристик МИИН и УИРИ при альтернативном О-/X-нагреве в магнитный зенит при высоких $P_{\text{эфф}}$ на частотах,

Таблица. Характеристики, условия и возможные механизмы генерации нелинейных явлений при X-нагреве высокоширотной F-области ионосферы в направлении магнитного зенита

Явление	Условия генерации	Характеристики	Механизм генерации
Создание дактов повышенной электронной плотности, $(N_e - N_{eo})/N_{eo}$	$f_H \leq f_x F2$ и $f_H > f_x F2$	— Возрастание N_e относительно фона, $N_e - N_{eo}/N_{eo} = 50 - 80 \%$; — высоты создания вдоль магнитной силовой трубки, от 280–300 до 550–600 км; — поперечный размер в северо-южном направлении, $3 - 4^\circ$; — время развития дакта, 30–60 с; — время релаксации, 120–300 с; — пороги возбуждения, $P_{эфф} = 57 - 73$ МВт ($E = 0,24 - 0,27$ В м ⁻¹).	Самофокусирующая неустойчивость, ускорение электронов, градиент давления
Возрастание температуры электронов, T_e/T_{eo}	$f_H \leq f_x F2$ $f_H > f_x F2$	$T_e/T_{eo} = 20 - 30 \%$ $T_e/T_{eo} \approx 50 \%$	Омический нагрев
Генерация МИИН	$f_H \leq f_x F2$ и $f_H > f_x F2$	— Масштаб, $l_\perp = 7,5 - 20$ м; — время развития — 30–120 с; — время релаксации — 120–300 с; — размер области, занятой МИИН — 30–75 км; — пороги возбуждения: при $f_H = 3,9 - 5,5$ МГц — $P_{эфф} \approx 40 - 60$ МВт ($E = 0,1 - 0,12$ В м ⁻¹); при $f_H = 6 - 8$ МГц — $P_{эфф} \approx 90 - 120$ МВт ($E = 0,33 - 0,38$ В м ⁻¹)	Градиентно-дрейфовая неустойчивость в дакте электронной концентрации
Генерация УИРИ	$f_H \leq f_x F2$ и $f_H = nf_{ce} \pm (50 - 150$ кГц) $f_H > f_x F2$ и $f_H \leq f_x F2$, если $f_H = nf_{ce} \pm (400 - 800$ кГц)	Спектральная структура: многократные ионные гирогармонические дискретные структуры на частотах $\pm n$ (51–54) Гц; — пороги возбуждения, $P_{эфф} \approx 90 - 95$ МВт ($E = 0,33 - 0,35$ В м ⁻¹). Спектральная структура: единственная спектральная компонента, сдвинутая вниз по частоте на (56–59) Гц.	Стимулированное рассеяние Бернштейна на ионах (SIBS). Вынужденное бриллюэновское рассеяние в замагниченной плазме (MSBS)
Возбуждение ленгмюровских и ионно-акустических плазменных волн (LW и IAW)	$f_H \leq f_x F2$	— Время появления через 15–30 с после начала нагрева; — время насыщения, ~ 60 с; — существуют одновременно с МИИН в течение всего цикла нагрева; — пороги возбуждения LW и IAW, $P_{эфф} \approx 180$ МВт ($E = 0,46$ В м ⁻¹)	Параметрический распад отражённой X-волны на LW и IAW вследствие рассеяния на искусственных неоднородностях
Возбуждение оптических эмиссий в красной (630,0 нм) и зелёной (557,7 нм) линиях атомарного кислорода	$f_H \leq f_x F2$	— Интенсивность линии 630 нм — 110–950 Рл; — интенсивность линии 557,7 нм — 50–350 Рл; — отношение $I_{557,7}/I_{630,0} = 0,35 - 0,5$; — максимальная интенсивность на высотах, где LW и IAW имеют максимальную мощность	Ускорение электронов

существенно превышающих критическую частоту слоя F2, показало, что в целом их поведение имеет одинаковый характер, однако эволюция развития и интенсивности рассмотренных явлений отличаются.

9. Заключение и перспективы дальнейших исследований в России

Начиная с 1970-х годов эксперименты по воздействию мощных КВ радиоволн на F-область ионосферы на всех КВ нагревных стендах мира выполнялись с использованием обыкновенно поляризованных (О-мода) волн накачки. Тем не менее результаты многочисленных экспериментов, выполненных на КВ нагревном стенде EISCAT/Heating, убедительно продемонстрировали, что мощная КВ радиоволна необыкновенной (X-мода) поляризации также способна вызывать разнообразные нелинейные явления в F-области ионосферы. В обзоре обобщены результаты многолетних экспериментальных исследований на КВ нагревном стенде EISCAT/Heating при воздействии на F-область ионосферы мощными КВ

радиоволнами X-поляризации. Было показано, что мощная КВ радиоволна X-поляризации, инжектируемая в регулярный высокоширотный слой F2 в направлении магнитного зенита, при спокойных магнитных условиях способна возбуждать разнообразные нелинейные явления, которые по интенсивности могут превосходить искусственные возмущения при О-нагреве. Более того, искусственные возмущения в верхней ионосфере при высоких эффективных мощностях излучения ($P_{эфф} > 300$ МВт) создаются не только при нагреве на частотах ниже критической частоты слоя F2 ($f_H \leq f_o F2$), как происходит при О-нагреве при более низких эффективных мощностях излучения ($P_{эфф} < 200$ МВт), но и на частотах нагрева, превышающих критическую частоту необыкновенной компоненты слоя F2 ($f_H > f_x F2$), т.е. в условиях, когда волна накачки не отражается от ионосферы.

В таблицу сведены характеристики, условия и возможные механизмы генерации разнообразных нелинейных явлений при X-нагреве, включая рост температуры электронов, генерацию МИИН и УИРИ, образование

дактов повышенной электронной концентрации, возбуждение ленгмюровских и ионно-акустических плазменных волн и оптического излучения в красной и зелёной линиях атомарного кислорода.

Изучение нелинейных явлений в F-области ионосферы при X-нагреве, которые ранее полагались невозможными, необходимо продолжить как в экспериментальном, так и теоретическом плане. Несмотря на большой объём экспериментальных данных, демонстрирующих повторяемость появления разнообразных нелинейных явлений в F-области ионосферы при X-нагреве, до сих пор отсутствует адекватная теория, объясняющая генерацию этих явлений. Остаётся невыясненным, почему возникают такие интенсивные нелинейные явления при X-нагреве, какова природа эффекта магнитного зенита, как влияет предыстория нагрева на характеристики различных искусственных ионосферных возмущений, как изменяются характеристики нелинейных явлений в зависимости от близости частоты нагрева к частотам гирогармоник электронов. Представляет также интерес продолжить исследования нерезонансных нелинейных явлений (мощная радиоволна не отражается от ионосферы) как при O-, так и X-нагреве, при высоких эффективных мощностях излучения нагревного стенда ($P_{\text{эфф}} > 300$ МВт).

Важно отметить, что генерация нелинейных явлений F-области ионосферы при воздействии мощными КВ радиоволнами X-поляризации возможна только в регулярной F-области ионосферы при спокойных магнитных условиях в отсутствии поглощения и высыпания частиц. Такие условия в экспериментах на высокоширотном КВ нагревном стенде EISCAT/Heating могут реализовываться только в дневные и ранние вечерние часы при спокойных магнитных условиях. Вследствие этого использование современного КВ нагревного стенда в средних широтах, оснащённого передовой диагностической аппаратурой (включая радар некогерентного рассеяния), обеспечит возможность проведения исследований в условиях поздней вечерней и ночной спокойной ионосферы, что должно существенно повысить эффективность подобного рода исследований.

Существующий в России среднеширотный КВ нагревный стенд Сура не обладает энергетическим потенциалом, которым обладают зарубежные аналоги. Тем не менее результаты пробных экспериментов на стенде Сура при X-нагреве продемонстрировали возможность генерации и диагностики МИИН методом ракурсного рассеяния в вечерние часы на частотах волны накачки вблизи критической частоты слоя F2. В связи с изложенным представляется целесообразным выполнить исследования на стенде Сура при X-нагреве среднеширотной F-области ионосферы, которые могут обеспечить возможность исследования не только МИИН, но и УИРИ в среднеширотной ионосфере. Для диагностики МИИН и УИРИ может быть использовано то же самое диагностическое оборудование, установленное на обсерватории ААНИИ Горьковская, что и в экспериментах на стенде EISCAT/Heating. Тем не менее ряд принципиально новых нелинейных явлений, возникающих как при O-, так и X-нагреве, при высоких эффективных мощностях излучения ($P_{\text{эфф}} > 300$ МВт) недоступны для изучения на стенде Сура. Следует также отметить, что стенд Сура не располагает в составе диагностического оборудования радаром некогерентного рассеяния радиоволн, обеспечиваю-

щим получение детальной информации о параметрах ионосферной плазмы.

В России в составе Национального гелио-геофизического комплекса Российской академии наук (НГК РАН) на базе Института солнечно-земной физики СО РАН началось создание КВ нагревного стенда нового поколения ИКАР-АИ (52,42° N; 103,65° E) с широким спектром возможностей управления [9]. В рамках НГК РАН создаётся кластер передовых диагностических инструментов исследования верхней атмосферы Земли и околоземного космического пространства, включая новый радар некогерентного рассеяния радиоволн, высокопотенциальный перспективный лидар для диагностики мезосферы и нижней термосферы, сеть оптических инструментов для исследования пространственно-временной динамики свечения нейтральной компоненты верхней атмосферы, а также для получения скорости ветра и температуры в верхней атмосфере, сеть магнитометрических и радиофизических инструментов [8].

При совместном использовании стенда ИКАР-АИ и этих передовых диагностических инструментов реализуется возможность достигнуть максимальной исследовательской эффективности при проведении экспериментов на нагревном стенде ИКАР-АИ. Научные исследования с использованием нагревного стенда ИКАР-АИ охватывают широкий круг задач, включая разнообразные нелинейные явления в ионосферной плазме при различных режимах воздействия мощных КВ радиоволн, ионосферно-магнитосферное взаимодействие, генерацию низкочастотных волн в диапазоне КНЧ/СНЧ/УНЧ/ОНЧ, стимулированное высыпание электронов и локальные суббуревые активации, взаимодействие ионосферы и нейтральной компоненты верхней атмосферы. Представляют интерес исследования нелинейных явлений, возникающих в поле двухчастотного УКВ радиоизлучения с использованием радара НР. Это обусловлено тем, что при определенном соотношении между частотами сигналов возможно их эффективное взаимодействие с собственными колебаниями плазмы. При совпадении разности частот УКВ радиоволн с плазменной частотой ионосферы возможно возбуждение параметрических неустойчивостей, что позволяет исследовать эффекты воздействия на ионосферную плазму разностной волны [114, 115]. Контролируемые исследования разнообразных нелинейных явлений в ионосфере и околоземном космическом пространстве позволят глубже понять фундаментальные основы взаимного влияния ионизированной и нейтральной компонент верхней атмосферы. Это важная задача, решение которой поможет проводить более точные оценки влияния явлений космической погоды, солнечных вспышек, активации токовой системы и высыпаний частиц во время геомагнитных бурь на атмосферу Земли и околоземное космическое пространство.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (субсидия № 075-ГЗ/Ц3569/278).

Список литературы

1. Гинзбург В.Л., Гуревич А.В. *УФН* **70** 201 (1960); Ginzburg V. L., Gurevich A. V. *Sov. Phys. Usp.* **3** 115 (1960)
2. Гуревич А.В. *Геомагнетизм и аэрономия* **5** (1) 70 (1965); *Геомагнетизм и аэрономия* **7** (2) 291 (1967)

3. Гуревич А В, Шварцбург А Б *Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере* (М.: Наука, 1973)
4. *Radio Sci.* **9** (11) (1974) Collection of papers
5. Pedersen T et al. *Geophys. Res. Lett.* **37** L02106 (2010)
6. Dhillon R S, Robinson T R *Ann. Geophys.* **23** 75 (2005)
7. Blagoveshchenskaya N F et al. *J. Geophys. Res. Space Phys.* **125** (7) e2020JA028203 (2020)
8. Жеребцов Г А *Солнечно-земная физика* **6** (2) 6 (2020); Zharebtsov G A *Solar-Terr. Phys.* **6** (2) 3 (2020)
9. Васильев Р В и др. *Солнечно-земная физика* **6** (2) 61 (2020); Vasilyev R V et al. *Solar-Terr. Phys.* **6** (2) 49 (2020)
10. Васьков В В, Гуревич А В *ЖЭТФ* **69** 176 (1975); Vas'kov V V, Gurevich A V *Sov. Phys. JETP* **42** 91 (1976)
11. Грач С М, Трахтенгерц В Ю *Изв. вузов. Радиофизика* **18** 1288 (1975); Grach S M, Trakhtengerts V Yu *Radiophys. Quantum Electron.* **18** 951 (1975)
12. Fejer J A *Rev. Geophys. Space Phys.* **17** (1) 135 (1979)
13. Robinson T R *Phys. Rep.* **179** 79 (1989)
14. Stubbe P J. *Atmos. Solar-Terr. Phys.* **58** 349 (1996)
15. Гуревич А В *УФН* **177** 1145 (2007); Gurevich A V *Phys. Usp.* **50** 1091 (2007)
16. Streltsov A V et al. *Space Sci. Rev.* **214** 118 (2018)
17. Грач С М и др. *УФН* **186** 1189 (2016); Grach S M et al. *Phys. Usp.* **59** 1091 (2016)
18. Kuo S *Phys. Plasmas* **22** 012901 (2015)
19. Фролов В Л *Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы* (Н. Новгород: Изд-во Нижегородского ун-та, 2017)
20. Blagoveshchenskaya N F *Radio Sci. Bull.* **373** 40 (2020)
21. Rietveld M T et al. *Radio Sci.* **51** 1533 (2016)
22. Rishbeth H, van Eyken T J. *Atmos. Solar-Terr. Phys.* **55** 525 (1993)
23. Lehtinen M S, Huuskonen A J. *Atmos. Solar-Terr. Phys.* **58** 435 (1996)
24. Lester M et al. *Ann. Geophys.* **22** 459 (2004)
25. Калишин А С и др. *Метеорология и гидрология* (4) 22 (2021); Kalishin A S et al. *Russ. Meteorol. Hydrol.* **46** (4) 231 (2021)
26. Рогов Д Д и др. *Метеорология и гидрология* (4) 5 (2021); Rogov D D et al. *Russ. Meteorol. Hydrol.* **46** (4) 217 (2021)
27. Rietveld M T et al. *Polar Sci.* **2** (3) 55 (2008)
28. Gurevich A V et al. *Phys. Lett. A* **305** 264 (2002)
29. Thome G D, Blood D W *Radio Sci.* **9** 917 (1974)
30. Hedberg Å et al. *Radio Sci.* **18** 840 (1983)
31. Благовещенская Н Ф *Геофизические эффекты активных воздействий в околоземном космическом пространстве* (СПб.: Гидрометеоиздат, 2001)
32. Yeoman T K et al. *Adv. Space Res.* **40** 384 (2007)
33. Благовещенская Н Ф и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **53** 571 (2010); Blagoveshchenskaya N F et al. *Radiophys. Quantum Electron.* **53** 512 (2011)
34. Blagoveshchenskaya N F et al. *Geophys. Res. Lett.* **38** L08802 (2011)
35. Blagoveshchenskaya N F et al. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **105** 231 (2013)
36. Blagoveshchenskaya N F et al. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **135** 50 (2015)
37. Благовещенская Н Ф и др. *Космические исследования* **56** 14 (2018); Blagoveshchenskaya N F et al. *Cosmic Res.* **56** 11 (2018)
38. Благовещенская Н Ф и др. *Геомагнетизм и астрономия* **59** 759 (2019); Blagoveshchenskaya N F et al. *Geomagn. Aeronomy* **59** 713 (2019)
39. Rietveld M T et al. *J. Geophys. Res.* **108** (A4) 1141 (2003)
40. Борисова Т Д и др. *Солнечно-земная физика* **10** 79 (2024); Borisova T D et al. *Solar-Terr. Phys.* **10** 74 (2024)
41. Rogov D D et al., in *2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW, 2019, Divnomorskoe, Russia, 24–28 June 2019* (Piscataway, NJ: IEEE, 2019) pp. 80–83
42. Egorov I M et al. *Проблемы Арктики и Антарктики* **71** (1) 6 (2025)
43. Литвак А Г *Изв. вузов. Радиофизика* **11** 1433 (1968); Litvak A G *Radiophys. Quantum Electron.* **11** 814 (1968)
44. Gurevich A V, Karashtin A N *Phys. Lett. A* **195** 362 (1994)
45. Guzdov P et al. *J. Geophys. Res.* **103** 2231 (1998)
46. Borisov N, Honary F, Li H J. *Geophys. Res. Space Phys.* **123** 5246 (2018)
47. Kelley M C *The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics* (San Diego, CA: Academic Press, 1989) DOI:10.1016/B978-0-12-404013-7.X5001-1
48. Bryers C et al. *J. Geophys. Res. Space Phys.* **118** 7472 (2013)
49. Blagoveshchenskaya N F et al. *Проблемы Арктики и Антарктики* **68** (3) 248 (2022)
50. Blagoveshchenskaya N F et al. *Remote Sens.* **15** 2300 (2023)
51. Senior A et al. *Geophys. Res. Lett.* **40** 1669 (2013)
52. Wu J et al. *Earth Planet. Phys.* **8** 408 (2024)
53. Rietveld M T, Senior A *Ann. Geophys.* **38** 1101 (2020)
54. Борисова Т Д и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **57** 1 (2014); Borisova T D et al. *Radiophys. Quantum Electron.* **57** 1 (2014)
55. Борисова Т Д и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **58** 623 (2015); Borisova T D et al. *Radiophys. Quantum Electron.* **59** 561 (2016)
56. Wu J, Wu J, Xu Z *Plasma Sci. Technol.* **18** 890 (2016)
57. Фролов В Л и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **59** 198 (2016); Frolov V L et al. *Radiophys. Quantum Electron.* **59** 177 (2016)
58. Milikh G M et al. *Geophys. Res. Lett.* **35** L17104 (2008)
59. Vartanyan A et al. *J. Geophys. Res.* **117** A10307 (2012)
60. Fallen C T et al. *Geophys. Res. Lett.* **38** L08101 (2011)
61. Благовещенская Н Ф и др. *Проблемы Арктики и Антарктики* **69** 435 (2023)
62. Blagoveshchenskaya N F et al. *J. Geophys. Res. Space Phys.* **119** 10483 (2014)
63. Carlson H C, Wickwar V B, Mantas G P J. *Atmos. Terr. Phys.* **44** 1089 (1982)
64. Carlson H C, Djuth F T, Zhang L D J. *Geophys. Res. Space Phys.* **122** 978 (2016)
65. Gurevich A V *Nonlinear Phenomena in the Ionosphere* (New York: Springer-Verlag, 1978)
66. Thidé B, Kopka H, Stubbe P *Phys. Rev. Lett.* **49** 1561 (1982)
67. Leyser T B *Space Sci. Rev.* **98** 223 (2001)
68. Frolov V L et al. *Geophys. Res. Lett.* **28** 3103 (2001)
69. Norin L et al. *Phys. Rev. Lett.* **102** 065003 (2009)
70. Bernhardt P A et al. *Ann. Geophys.* **27** 4409 (2009)
71. Bernhardt P A et al. *Phys. Rev. Lett.* **104** 165004 (2010)
72. Mahmoudian A et al. *Radio Sci.* **48** 685 (2013)
73. Shukla P K, Stenflo L J. *Plasma Phys.* **76** 853 (2010)
74. Fu H Y et al. *Geophys. Res. Lett.* **47** e2020GL089747 (2020)
75. Fu, H Y et al. *Geophys. Res. Lett.* **49** e2022GL099390 (2022)
76. Samimi A et al. *Ann. Geophys.* **30** 1587 (2012)
77. Samimi A et al. *J. Geophys. Res. Space Phys.* **118** 502 (2013)
78. Bernhardt P A, Selcher C A, Kowtha S *Geophys. Res. Lett.* **38** L19107 (2011)
79. Mishin E et al. *J. Geophys. Res. Space Phys.* **121** 3497 (2016)
80. Pedersen T et al. *Ann. Geophys.* **29** 47 (2011)
81. Blagoveshchenskaya N F et al. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **155** 36 (2017)
82. Kalishin A S et al. *J. Geophys. Res. Space Phys.* **126** e2020JA028989 (2021)
83. Калишин А С и др. *Метеорология и гидрология* (12) 21 (2022); Kalishin A S et al. *Russ. Meteorol. Hydrolog.* **47** 921 (2022)
84. Калишин А С и др. *Космические исследования* **61** 476 (2023); Kalishin A S et al. *Cosmic Res.* **61** 501 (2023)
85. Sharma R P et al. *Physics Plasmas* **1** 522 (1994)
86. Hagfors T et al. *Radio Sci.* **18** 861 (1983)
87. Stubbe P, Kohl H, Rietveld M J. *Geophys. Res.* **97** 6285 (1992)
88. Perkins F W, Oberman C, Valco E J J. *Geophys. Res.* **79** 1478 (1974)
89. Dysthe K B et al. *Phys. Fluids* **26** 146 (1983)
90. DuBois D F, Rose H A, Russell D J. *Geophys. Res.* **95** 21221 (1990)
91. DuBois D F, Rose H A, Russell D J. *Geophys. Res.* **98** 17543 (1993)
92. Kuo S P, Lee M C J. *Geophys. Res.* **110** A01309 (2005)
93. Kuo S, Lee M, Kossey P *Geophys. Res. Lett.* **24** 2969 (1997)
94. Ashrafi M et al. *J. Geophys. Res.* **112** A05314 (2007)
95. Борисова Т Д, Благовещенская Н Ф, Калишин А С *Солнечно-земная физика* **9** 22 (2023); Borisova T D, Blagoveshchenskaya N F, Kalishin A S *Solar-Terr. Phys.* **9** 21 (2023)
96. Борисова Т Д и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **60** 305 (2017); Borisova T D et al. *Radiophys. Quantum Electron.* **60** 273 (2017)
97. Bryers C J et al. *J. Geophys. Res. Space Phys.* **118** 6766 (2013)
98. Wang X et al. *J. Geophys. Res. Space Phys.* **121** 510 (2016)

99. Wang X et al. *J. Geophys. Res. Space Phys.* **121** 3578 (2016)
100. Wang X, Zhou C *Geophys. Res. Lett.* **44** 9124 (2017)
101. Bernhardt P A, Tepley C A, Duncan L M *J. Geophys. Res.* **94** 9071 (1989)
102. Brändström B U E et al. *Geophys. Res. Lett.* **26** 3561 (1999)
103. Gustavsson B et al. *Geophys. Res. Lett.* **29** 2220 (2002)
104. Gustavsson B, Eliasson B J. *Geophys. Res.* **113** A08319 (2008)
105. Pedersen T, Carlson H *Radio Sci.* **36** 1013 (2001)
106. Kosch M J et al. *Adv. Space Res.* **40** 365 (2007)
107. Шиндин А В др. *Изв. вузов. Радиофизика* **57** 849 (2014); Shindin A V et al. *Radiophys. Quantum Electron.* **57** 759 (2015)
108. Beletsky A B et al. *Atmosphere* **13** 1794 (2022)
109. Pedersen T R et al. *Geophys. Res. Lett.* **30** (A4) 1169 (2003)
110. Mishin E V et al. *Geophys. Res. Lett.* **32** L23106 (2005)
111. Brändström B U "The Auroral Large Imaging System — Design, operation and scientific results", PhD Thesis (Kiruna, Sweden: Swedish Institute of Space Physics, 2003)
112. Ткачев И Д и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **67** 811 (2024); Tkachev I D et al. *Radiophys. Quantum Electron.* **67** 732 (2025)
113. Благовещенская Н Ф и др. *Геомагнетизм и аэронавтика* **63** 775 (2023); Blagoveshchenskaya N F et al. *Geomagn. Aeronomy* **63** 757 (2023)
114. Ткачев Г Н и др., в сб. *Радиотехнические вопросы исследования ионосферы* (Гл. ред. В К Слока) (М.: Радиотехнический институт АН СССР, 1985) с. 79
115. Шелешнев В Л и др., в сб. *Радиотехнические вопросы исследования ионосферы* (Гл. ред. В К Слока) (М.: Радиотехнический институт АН СССР, 1985) с. 94

Non-linear phenomena in the ionospheric F-region induced by extraordinary polarized powerful HF radio waves

N.F. Blagoveshchenskaya^(1,a), A.S. Kalishin^(1,b), T.D. Borisova^(1,c), R.V. Vasilyev^(2,d), G.A. Zherebtsov^(2,e)

⁽¹⁾ Arctic and Antarctic Research Institute, ul. Beringa 38A, 199397 St. Petersburg, Russian Federation

⁽²⁾ Institute of Solar-Terrestrial Physics, ul. Lermontova 125a, 664033 Irkutsk, Russian Federation

E-mail: ^(a) nataly@aari.ru, ^(b) askalishin@aari.ru, ^(c) borisova@aari.ru,

^(d) roman_vasilyev@iszf.irk.ru, ^(e) gaz@iszf.irk.ru

The review is based on the investigation results of features and generation conditions of various non-linear phenomena in the high-latitude ionospheric F-region induced by the extraordinary polarized powerful HF radio waves. It examines the following: (1) artificial field-aligned irregularities (AFAI); (2) ducts of enhanced electron density; (3) narrowband (± 1 kHz of the heater frequency) stimulated electromagnetic emission (NSEE); (4) HF-induced Langmuir radio-induced and ion-acoustic plasma waves; (5) radio-induced optical emissions (RIOE) in the red and green lines of atomic oxygen. Features of non-linear phenomena induced by the ordinary (O-mode) and extraordinary (X-mode) HF pumping were compared, including nonresonance phenomena excited at high effective radiated power (ERP > 300 MW), when the pump wave is not reflected from the ionosphere. Prospects for development of research on ionospheric modification by powerful HF radio waves in Russia are briefly considered.

Keywords: powerful HF radio wave, extraordinary polarization, ordinary polarization, high latitude ionosphere, nonlinear phenomena, artificial ionospheric irregularities, plasma waves, electron acceleration, duct, narrowband stimulated electromagnetic emission, radio-induced optical emission, nonresonance phenomena

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

Bibliography — 115 references

Received 29 December 2025, revised 19 March 2026

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **196** (8) 842–866 (2026)

Physics – Uspekhi **69** (8) (2026)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2026.03.040115>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2026.03.040115>