

УДК 550.3 + 530.182 + 533.951

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ВОЗМУЩЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЛАЗМЫ НА ВЫСОТАХ ВЕРХНЕЙ И ВНЕШНЕЙ ИОНОСФЕРЫ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ПРИ НАГРЕВЕ F_2 -СЛОЯ МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ КВ-ДИАПАЗОНА

© 2024 г. В. Л. Фролов^{1, 2, *}, Е. С. Андреева^{3, **}, А. М. Падохин^{3, 4, ***}

¹Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Н.И. Лобачевского (НИРФИ ННГУ),
Нижний Новгород, Россия

²Казанский (Приволжский) федеральный университет (КазФУ), Казань, Россия

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ),
Москва, Россия

⁴Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН (ИЗМИРАН),
Москва, Троицк, Россия

*e-mail: frolov@nirfi.unn.ru

**e-mail: es_andreeva@mail.ru

***e-mail: padokhin@physics.msu.ru

Поступила в редакцию 13.11.2023 г.

После доработки 09.01.2024 г.

Принята к публикации 25.01.2024 г.

Проанализированы полученные методом низкоорбитальной спутниковой радиотомографии результаты измерений пространственной структуры искусственно созданных вариаций концентрации электронов на высотах верхней и внешней ионосферы Земли, возбуждаемых при модификации F_2 -слоя среднеширотной ионосферы мощными радиоволнами КВ-диапазона O -поляризации, излучаемыми нагревным стендом СУРА. Рассматриваются характеристики полости с уменьшенной концентрацией плазмы, образующейся на высотах вблизи высоты отражения мощной радиоволны, даков с увеличенной концентрацией плазмы, формирующихся на высотах внешней ионосферы за счет вытеснения плазмы из области сильного ее разогрева вдоль геомагнитного поля, различных волновых возмущений, индуцируемых на ионосферных высотах. Кроме того, исследованы свойства обнаруженных возмущений плотности плазмы особой природы, регистрируемых в вертикальном столбе над центральной частью возмущенной области ионосферы. Размеры исследуемых неоднородностей составляют от нескольких десятков до нескольких сотен километров, при этом область их регистрации выходит далеко за пределы области резонансного взаимодействия мощной радиоволны O -поляризации с ионосферной плазмой вблизи высоты ее отражения, где возбуждается наиболее интенсивная искусственная ионосферная турбулентность.

DOI: 10.31857/S0016794024030043, EDN: SMYMQK

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования особенностей взаимодействия мощного радиоизлучения с ионосферой Земли относятся к числу наиболее активно разрабатываемых сегодня направлений физики плазмы. Интерес к этой проблеме диктуется разнообразными возможными приложениями, связанными с нагревом плазмы высокочастотным электромагнитным излучением и с использованием генери-

руемой при этом искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ) для диагностики плазменных процессов. Принципиальным моментом здесь является то, что взаимодействие интенсивного излучения с плазмой сопровождается развитием целого ряда фундаментальных нелинейных процессов, к которым относятся: параметрические неустойчивости плазмы и возбуждение интенсивной плазменной турбулентности, сильный

разогрев плазмы мощными электромагнитными волнами, модификация профиля плотности плазмы под действием сил светового и теплового давления, ускорение электронов до сверхтепловых энергий и генерация ими оптических излучений, генерация искусственного радиоизлучения (ИРИ), возбуждение электрических полей и токов в плазме, стимуляция искусственной инжекции (ИИ) энергичных электронов из радиационного пояса Земли и др. Изучение их природы и свойств в настоящее время выполняется с помощью хорошо развитых радиофизических методов исследования ионосферы с размещением измерительных приборов на земле и на борту космических аппаратов. Важно, что в таких экспериментах используются управляемые источники возмущений, которые индуцируются в ионосфере под воздействием мощной радиоволны (волны накачки, ВН), излучаемой с заданными характеристиками в течение выбранного интервала времени в известных геофизических условиях.

В настоящей работе представлен анализ результатов измерений пространственных структур ионизированной компоненты атмосферы с размерами $L \geq 30$ км, возбуждаемых на высотах верхней и внешней ионосферы при модификации ее F -области мощным КВ-радиоизлучением O -поляризации, излучаемыми среднеширотным нагревным стендом СУРА. Эти измерения были выполнены методом низкоорбитальной спутниковой радиотомографии. Они проводились в различных геофизических условиях и касались изучения характеристик полости с уменьшенной концентрацией плазмы, образующейся в области сильного ее разогрева на высотах вблизи высоты отражения мощной радиоволны, дактов с увеличенной концентрацией плазмы, регистрируемых на высотах внешней ионосферы, характеристик различного типа волновых возмущений (ВВ), а также других крупномасштабных вариаций плотности плазмы, индуцируемых на ионосферных высотах. При этом в работе основное внимание уделяется изучению особенностей развития индуцированных нагревом ионосферы возмущений за пределами центральной части возмущенной области ионосферы ($VO_{\text{ц}}$), где происходит наиболее интенсивное взаимодействие мощной радиоволны O -поляризации с ионосферной плазмой, поглощается большая часть энергии ВН и происходит быстрая генерация различных компонент ИИТ (см., например, [Гуревич, 2007; Ерухимов и др., 1987; Фролов и др., 2007; Фролов, 2015, 2017; Черногор, 2014; Gurevich, 1978; Streltsov et al., 2018] и приведенные в них многочисленные ссылки на другие

публикации). Эта область расположена вблизи высоты отражения ВН и имеет размер по высоте от нескольких сот метров до ~ 50 км в зависимости от типа турбулентности; ее размер в горизонтальной плоскости определяется диаграммой направленности излучения ВН и пороговой мощностью генерации той или иной компоненты ИИТ. Индуцируемые в $VO_{\text{ц}}$ различные компоненты плазменных возмущений определяются генерацией первичной ИИТ, индуцируемой в результате прямого взаимодействия мощной радиоволны с плазмой.

Выполненные в последние годы исследования особенностей генерации ИИТ убедительно продемонстрировали, что вызванные нагревом F -области сильные возмущения ионосферной плазмы наблюдаются и далеко вне $VO_{\text{ц}}$: по высоте их генерация обнаруживается от $h \approx 60\text{--}120$ км (нижняя ионосфера) до высот $h \geq 1000$ км (внешняя ионосфера), в горизонтальной плоскости эти возмущения могут регистрироваться на расстояниях до 1000 км и больше от нагревного стенда. К ним относятся разного рода ВВ, возбуждаемые при периодическом и моноимпульсном режимах излучения ВН [Черногор, 2014], выпадения энергичных электронов из радиационного пояса Земли [Frolov and Troitsky, 2023], генерация дактов плотности плазмы [Фролов и др., 2016], генерация электрических токов на ионосферных высотах при развитии ИИТ [Фролов и др., 2021; Lukianova et al., 2019], генерация микроволновых излучений на ионосферных высотах [Троицкий и др., 2019] и др. Выполненные на стенде СУРА исследования позволили выделить новые механизмы генерации ИИТ, являющиеся следствием развития первичной турбулентности при модификации плазмы F -области ионосферы мощным КВ-радиоизлучением. Эти возмущения можно рассматривать как результат развития вторичной турбулентности, которая, в частности, отвечает за свойства плазменных возмущений, обнаруживаемых в атмосфере Земли на больших расстояниях от нагревного стенда [Frolov and Troitsky, 2023].

В разделе 2 работы приводится описание используемых в измерениях технических средств, методов проведения исследований и особенностей обработки полученных в них экспериментальных данных, анализ которых представлен в разделе 3. Обсуждение выполненных исследований и сделанные заключительные замечания составляют содержание ее 4-го раздела. В нем также сформулированы вопросы, еще требующие своего решения.

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ИЗМЕРЕНИЯХ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА, МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ И СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

2.1. Нагревный стенд СУРА

Рассматриваемые в работе эксперименты с использованием низкоорбитальной радиотомографии выполнялись в 2010–2017 гг. на среднеширотном нагревном стенде СУРА, который расположен около р/п Васильсурск в 120 км восточнее г. Н. Новгород (Россия); его географические координаты: 56.15° N, 46.1° E, параметр Мак-Илвейна $L \approx 2.7$. В них все три (в отдельных измерениях только два) модуля стенда излучали синфазно в диапазоне частот ВН $f_{\text{ВН}} = 4300\text{--}6720$ кГц. Эффективная мощность излучения стенда в режиме когерентного излучения всех трех его модулей составляла $P_{\text{эфф}} = PG = 80\text{--}160$ МВт, возрастая с увеличением частоты ВН (здесь P — генерируемая передатчиками стенда ВЧ-мощность, G — коэффициент усиления передающей антенны стенда). Во всех представленных в работе экспериментах использовались мощные радиоволны O -поляризации. Диаграмма направленности антенны стенда была в большинстве случаев наклонена к югу на 12°, чтобы обеспечить более эффективную генерацию ИИТ при излучении ВН в направлении “магнитного зенита”, когда радиоволна с учетом ее рефракции в ионосфере распространяется на уровне верхнего гибридного резонанса вдоль силовых линий геомагнитного поля [Гуревич и др., 2005; Гуревич, 2007; Фролов, 2017; Streltsov et al., 2018]. Более полное описание стенда СУРА и его возможностей можно найти в статье [Беликович и др., 2007].

Во время проведения измерений модификация ионосферной плазмы над стендом начиналась, как правило, не меньше чем за 10–15 мин до пролета спутника через возмущенную магнитную силовую трубку, чтобы обеспечить возбуждение ИИТ достаточно высокого уровня. До этого стенд часто излучал мощные радиоволны в течение 1.5–3 часов в режиме периодического излучения ВН [10 ÷ 15 мин — излучение, 10 ÷ 15 мин — пауза] с целью генерации ВВ на ионосферных высотах. Ниже аналогичные режимы излучения ВН для краткости будут записываться в форме [+ (10 ÷ 15) мин, – (10 ÷ 15) мин] (или как [$\pm$ (10 ÷ 15) мин] для режимов типа “меандр”). Конкретные режимы излучения ВН, ее частота и мощность приведены при анализе каждого рассматриваемого в работе сеанса измерений; там же приведены характеристики геофизических условий, в которых они проводились.

Проведение измерений на стенде СУРА всегда сопровождалось работой станции вертикального зондирования ионосферы CADY (Канада). Это позволяет отслеживать изменения критической частоты $F2$ -слоя ионосферы, вычислять высоту отражения ВН, определять наличие F -рассеяния (F_{spread}) и спорадического слоя E ($E_{\text{спор}}$) на ионограммах. По ионограммам, снятым во время работы стенда СУРА, можно также делать некоторые выводы о развитии различных компонент ИИТ [Фролов, 2017]: по уровню поглощения пробных радиоволн O -поляризации, зондирующих ВО ионосферы на частотах, близких к частоте ВН, — об уровне развития мелкомасштабных неоднородностей плотности плазмы с поперечными к геомагнитному полю размерами $l_{\perp} \sim 1\text{--}50$ м; по уровню F_{spread} — об уровне развития неоднородностей плотности плазмы с поперечными к геомагнитному полю размерами $l_{\perp} \sim 0.2\text{--}5$ км; по уровню рассеяния пробных радиоволн O - и X -поляризаций — об уровне развития неоднородностей плотности плазмы с поперечными к геомагнитному полю размерами $l_{\perp} \sim 0.1\text{--}1$ км; по пропаданию концов ионограмм на частотах ≤ 2 МГц и кратных отражений — о появлении дополнительных ионизации и поглощения радиоволн в нижней (в D -области) ионосфере, которые определяются ИИ энергичных электронов из радиационного пояса Земли, стимулированной воздействием на ионосферу мощными радиоволнами; по появлению дополнительных следов на ионограммах — о появлении крупномасштабных искажений профиля концентрации плазмы в ВО ионосферы.

2.2. Метод низкоорбитальной радиотомографии

Исследования свойств искусственных ионосферных неоднородностей, которые анализируются в настоящей работе, были выполнены методом низкоорбитальной радиотомографии [Куницын и др., 2007] с использованием спутников “Парус” и CASSIOPE. Из-за существующих принципиальных ограничений (необходимости пересечения зондирующих лучей) этот метод не позволяет восстанавливать вариации плотности плазмы на высотах $h \leq 200$ км и $h \geq 800$ км (≥ 1200 км для спутника CASSIOPE с высотой орбиты до 1400 км). Для его реализации в окрестностях стенда СУРА была развернута цепочка из трех приемных пунктов (п. СУРА — (56.15° N, 46.1° E), п. Галибиха — (56.75° N, 45.6° E) и п. Сеченово — (55.21° N, 45.88° E)), в которых проводилась регистрация амплитуды и фазы сигналов ИСЗ на двух когерентных частотах ~ 150 и ~ 400 МГц. Это позволяет проводить измерения вариаций полного

электронного содержания на луче ИСЗ—приемник, по которым в свою очередь восстанавливается пространственное распределение плотности плазмы в ионосфере в плоскости цепочки приемных пунктов и орбиты спутника. Типичное пространственное разрешение подобных реконструкций составляло 15–20 км, что позволило исследовать неоднородности интересующих нас масштабов. Геометрия экспериментов подбиралась таким образом, чтобы можно было получать такие реконструкции над стендом СУРА.

В статье на рис. 1–5 полученные радиотомограммы (нижние панели) дополнены четырьмя их разрезами по высотам около 300, 400, 600 и 800 км (четыре верхние панели), чтобы дать более ясное представление о высотной зависимости характеристик вариаций концентрации плазмы.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

3.1. Общая характеристика выполненных экспериментов

Рассматриваемые в работе радиотомографические измерения были выполнены в 2010–2017 гг. в течение 24-го цикла солнечной активности: один сеанс измерений в 2010 г. во время минимума солнечной активности, 4 сеанса в 2011–2013 гг. в годы ее максимума, 6 сеансов в 2014–2015 гг. в годы ее уменьшения после максимума и 1 сеанс в 2017 г. близко к ее минимуму. Чаще всего измерения выполнялись в поздние вечерние и ночные часы (10 сеансов из 13), остальные 3 сеанса были выполнены в ранние вечерние часы в условиях сильной освещенности ионосферы Солнцем, когда имеет место большое линейное поглощение радиоволн в нижней ионосфере и, следовательно, более слабое развитие ИИТ по сравнению с измерениями в поздние вечерние и ночные часы. В измерениях в поздние утренние и полуденные часы не были обнаружены какие-либо значимые вариации плотности плазмы, поэтому в работе результаты этих сеансов не рассматриваются. Выполнение экспериментов большей частью вблизи максимума солнечной активности определялось тем, что в этих условиях критические частоты F_2 -слоя ионосферы были достаточно высокие и имелась возможность проводить измерения в вечерние и ночные часы, используя для модификации ионосферы мощные радиоволны O -поляризации на минимально возможной для стенда СУРА частоте $f_{\text{ВН}} = 4300$ кГц. Следует также отметить, что измерения в большинстве случаев были выполнены в спокойных геомагнитных условиях; только в трех случаях они выполнялись на стадии релаксации возмущений уже

при умеренных значениях индекса $K_p \sim 3$, но при еще повышенном уровне индекса авроральной электроструи AE до 300–500 нТл.

Среди тринадцати анализируемых в работе сеансов в трех случаях заведомо не было зарегистрировано на высотах выше максимума F_2 -слоя ионосферы появление дактов с увеличенной относительно фоновой плотностью плазмы, искусственных ионосферных неоднородностей концентрации плазмы и генерации ВВ. Это имело место, когда модификация ионосферы проводилась: а) на высоких частотах $\text{ВН } f_{\text{ВН}} = 6720$ кГц в сильно освещенной ионосфере; б) при частотах ВН , равных или превышающих критическую частоту f_{oF_2} ; в) когда время нагрева ионосферы перед пролетом спутника не превышало 3–5 мин. Все эти причины практически полностью отвечают найденным ранее в работе [Фролов, 2017] условиям отсутствия генерации интенсивной ИИТ, включая и генерацию дактов плотности плазмы [Фролов и др., 2016].

3.2. Характеристики полости с уменьшенной концентрацией плазмы

При выполнении условий оптимального нагрева ионосферы мощным КВ-радиоизлучением в ее F -области вблизи высоты отражения ВН регистрировалось, как правило, формирование полости с уменьшенной концентрацией плазмы за счет термодиффузионного ее перераспределения, сопровождающегося выносом плазмы вдоль силовых линий геомагнитного поля. Горизонтальные размеры этой полости определяются шириной пучка мощных радиоволн, составляя 50–100 км; ее размеры вдоль силовых линий геомагнитного поля могут достигать 150–250 км, завися от геофизических условий проведения измерений и уровня развития ИИТ в $\text{В}O_{\text{ц}}$. Время ее развития составляет несколько минут, завися от мощности ВН и геофизических условий, время ее релаксации при этом может составлять 10–15 мин, достигая в некоторых случаях 30 мин [Фролов, 2015, 2017]. В поздние вечерние и ночные часы уменьшение концентрации плазмы в этой области при $P_{\text{эфф}} \approx 100$ МВт в благоприятных геофизических условиях может составлять до 30%. Эта полость обладает свойствами фокусирующей линзы [Фролов, 2015; Gurevich, 1978]. Характеристики этой полости раньше подробно рассматривались в публикациях [Ерухимов и др., 1987; Фролов, 2015, 2017; Gurevich, 1978]. В работах [Milikh et al., 2010; Streltsov et al., 2018] было показано, что вынос плазмы из этой области является причиной формирования дакта с повышенной концентрацией плазмы на высотах внешней ионосферы.

В центральной части ВО ионосферы ($ВО_{\text{Ц}}$), где наблюдается уменьшение концентрации плазмы и развитие интенсивной ИИТ, имеет место генерация искусственных ионосферных неоднородностей с $l_{\perp} \sim 0.2\text{--}5$ км, которые отвечают за появление F_{spread} на ионограммах, мелкомасштабных неоднородностей с $l_{\perp} \sim 1\text{--}50$ м, отвечающих за аномальное ослабление (АО) пробных радиоволн в ВО ионосферы, и неоднородностей с $l_{\perp} \sim 50\text{--}200$ м, отвечающих за рассеяние электромагнитных волн с сохранением их поляризации [Ерухимов и др., 1987; Фролов, 2017].

Выполненные исследования позволили установить, что вследствие эффекта “магнитного зенита” [Гуревич и др., 2005; Гуревич, 2007; Фролов, 2017; Streltsov et al., 2018] внутри $ВО_{\text{Ц}}$ может выделяться особая область с более сильным разогревом плазмы и с более сильным уменьшением ее концентрации, а также с более интенсивными неоднородностями концентрации плазмы различных масштабов. Положение этой области (области “магнитного зенита”) определяется условием, что в ней мощная радиоволна O -поляризации распространяется вдоль силовых линий геомагнитного поля. Размер этой области по горизонтали составляет 30–50 км. В наших экспериментах транспорт энергии мощной радиоволны в эту область достигается наклоном диаграммы направленности антенны стенда на $12\text{--}16^\circ$ от вертикали на геомагнитный юг.

При нагреве плазмы мощной КВ-радиоволной как O -, так и X -поляризации с $P_{\text{эфф}} \geq 30$ МВт на высотах 130–180 км с увеличением температуры электронов и, как следствие этого, нарушением ионизационно-рекомбинационного баланса наблюдается рост концентрации N_e [Gurevich, 1978]. Это приводит к формированию на этих высотах области с повышенной концентрацией плазмы, которая играет роль дефокусирующей линзы [Гуревич и Шварцбург, 1973; Бойко и др., 1985; Gurevich, 1978]. При мощностях ВН ~ 100 МВт величина δN_e может составить 10–20%. При этом ослабление потока энергии мощной радиоволны на уровне ее отражения в $F2$ -слое может достигать до 10–20 дБ и больше, что существенно влияет на характер развития стрикционной и тепловой параметрических неустойчивостей и изменяет характер модификации ионосферной плазмы. Характерные времена развития и релаксации дефокусирующей линзы составляют 15–20 с.

Важным результатом наших недавних экспериментов явилось обнаружение генерации электрических токов в ионосфере при развитии крупномасштабных с $l_{\perp} \sim 10\text{--}100$ км [Фролов и др., 2021; Lukianova et al., 2019], которые могут оказы-

вать свое влияние на развитие и эволюцию ИИТ. Заметим также, что, когда перед пролетом спутника стенд длительное время работал в периодическом режиме излучения ВН (в режиме “менандр”), наблюдалась генерация ВВ, которые могут распространяться на 1000 км и более и вызывать турбулизацию ионосферной плазмы [Черногор, 2014] (см. раздел 3.4 работы).

В следующем разделе работы при анализе результатов радиотомографических измерений мы еще будем дополнительно останавливаться на анализе характеристик крупномасштабных изменений концентрации плазмы, вызванных нагревом F -области ионосферы мощными КВ-радиоволнами.

3.3. Высотная характеристика дактов плотности плазмы

Условия формирования во внешней ионосфере дактов с увеличенной плотностью плазмы и их характеристики подробно исследовались в работе [Фролов и др., 2016] на основе измерения свойств плазменных возмущений бортовой аппаратурой низкоорбитального спутника DEMETER. Важными характеристиками дактов, которые позволяют верифицировать предложенные модели их образования, являются зависимости от высоты величины увеличения в них плотности плазмы и роста их размера L в поперечном к геомагнитному полю направлении. Спутниковые бортовые измерения этих характеристик имеют ограниченный характер, поскольку пересечение спутником возмущенной магнитной силовой трубки (или дакта плотности плазмы) происходит достаточно редко из-за малого (80–100 км) их поперечного размера и часто в неоптимальных для формирования дактов условиях. Кроме того, используемые для измерений немногочисленные низкоорбитальные спутники пересекают возмущенную трубку (дакт) только на высотах 400–1500 км и в разное время суток. Все это сильно ограничивает возможности получения достаточно полного объема экспериментальных данных относительно их высотных характеристик.

В настоящей работе представлены результаты выполненных в 2010–2017 гг. исследований характеристик дактов концентрации плазмы, индуцированных нагревом ионосферы мощными радиоволнами. Измерения проводились с использованием метода низкоорбитальной радиотомографии, позволяющего для спутников с высотой орбиты ~ 1000 км провести практически одновременные измерения величины вариаций концентрации плазмы в области высот 200–800 км. Всего за период проведения рассматриваемых в работе экс-

периментов было 4 сеанса, в которых безусловно регистрировалось формирование дактов с увеличенной концентрацией плазмы N_e , и один сеанс, когда обнаруживался дакт с уменьшенной концентрацией. В остальных сеансах условия были не совсем оптимальными для формирования дакта и его обнаружения.

На рис. 1 на примере одного из наиболее удачных сеансов измерений демонстрируются возможности предлагаемого метода [Kunitsyn et al.,

2012]. На нем (внизу) приведена радиотомограмма, полученная 18 августа 2011 г. в предполуденные часы в 18:48 UT (в 22:48 мск за 3 мин до окончания импульса излучения ВН) с использованием радиосигналов спутника COSMOS-2407, которая построена с помощью изолиний плотности плазмы, нормированных на 10^{12} эл/м³. На четырех панелях в верхней части рисунка сверху вниз приведены значения концентрации плазмы на высотах 300, 400, 600 и 800 км, что дает необ-

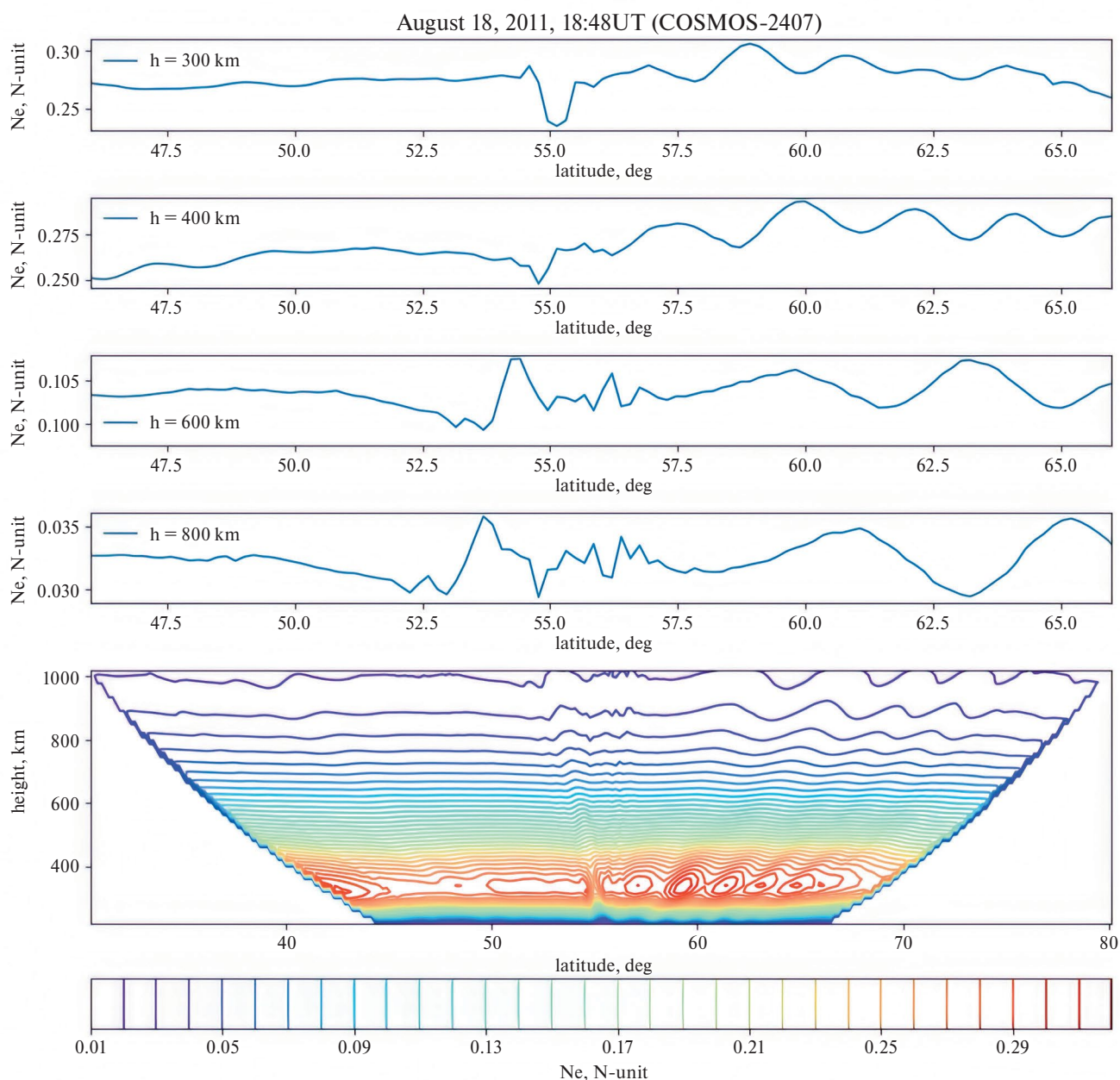


Рис. 1. Радиотомограмма, полученная 18.08.2011 г. в 22:48 мск (внизу). На четырех верхних панелях приведены профили концентрации электронов на высотах 300, 400, 600 и 800 км (сверху вниз).

ходимую информацию о характере ее изменения с высотой. Модификация ионосферы в этом сеансе измерений проводилась с 21:01 до 22:51 мск с использованием периодического излучения мощной радиоволны в режиме $[\pm 10 \text{ мин}]$; воздействие осуществлялось на частоте ВН 4785 кГц с эффективной мощностью излучения $P_{\text{эфф}} \approx 50 \text{ МВт}$ при критической частоте $F2\text{-слоя } f_{\text{эфф}} \approx 5.2 \text{ МГц}$. Измерения выполнялись в спокойных геомагнитных условиях: суммарное суточное значение K_p -индекса $\Sigma K_p = 11^+$ при индексе $AE \approx 50 - 100 \text{ нТл}$. Ионозонд, расположенный на стенде СУРА, зарегистрировал возбуждение F_{spread} среднего уровня (с уширением ветвей ионограмм по частоте до $\sim 0.5 \text{ МГц}$), что указывает на достаточно большую эффективность взаимодействия мощной радиоволны с плазмой верхней ионосферы Земли и генерацию в $\text{ВО}_{\text{ц}}$ неоднородностей с поперечными к геомагнитному полю размерами $l_{\perp}$ от нескольких сотен метров до нескольких километров. Максимальный угол возвышения спутника для всех трех используемых в этих измерениях приемных пунктов составлял около 85° , при этом лучи от приемников на спутник проходили через край диаграммы направленности излучения ВН по близким подионосферным траекториям. Предварительный анализ экспериментальных данных, полученных в этом сеансе измерений, был представлен в работах [Фролов и др., 2023; Kunitsyn et al., 2012].

Томограмма, представленная на рисунке 1, охватывает интервал широт $35^\circ - 75^\circ \text{ N}$ в плоскости орбиты спутника, что соответствует расстоянию его перемещения $\sim 4500 \text{ км}$ в приблизительно северо-южном направлении. Обработка экспериментальных данных, полученных в этом сеансе, показала, что на высотах вблизи высоты отражения мощной радиоволны $h_{\text{отр}} \approx 260 \text{ км}$ на широтах $\sim 55.1^\circ \text{ N}$ имеет место сильное уменьшение концентрации плазмы на величину до 20 %. Область с уменьшенной плотностью плазмы имеет протяженность $\sim 55 \text{ км}$ вдоль орбиты спутника и захватывает высотный интервал 250–400 км. На высоте отражения ВН центр этой области сдвинут к югу на $\sim 25 \text{ км}$ от положения центра диаграммы направленности излучения ВН, что определяется влиянием эффекта “магнитного зенита” [Гуревич, 2007; Гуревич и др., 2005; Streltsov et al., 2018].

В интервале высот 400–500 км имеет место переход от области генерации сильной первичной ИИТ, сильного разогрева плазмы в поле мощных радиоволн и формирования полости с уменьшенной плотностью плазмы, к области выше максимума $F2\text{-слоя}$, где наблюдается перенос плазмы вдоль силовых линий геомагнитного поля на высоты внешней ионосферы и формирование дакта

с повышенной плотностью плазмы. Это подтверждается тем, что полость с уменьшенной плотностью плазмы и дакт находятся на одних и тех же силовых линиях поля. По результатам измерений помощью спутников SWARM [Фролов и др., 2018] на высотах 450–500 км регистрируются большие вариации температуры электронов плазмы, величина которых уменьшается с ростом высоты и небольшие вариации ее плотности с характерным масштабом $l_{\perp} \sim 15 \text{ км}$. Важно, что на этих высотах не обнаруживаются дакты с увеличенной плотностью плазмы. Это может быть следствием двух причин. Во-первых, выносимая из области разогрева вдоль геомагнитного поля плазма (при сохранении постоянной величины абсолютного приращения ее плотности на высотах вблизи максимума $F2\text{-слоя}$) здесь не должна превышать величины относительного ее изменения $\sim 3 \%$, что лишь немного превышает уровень ее естественных флуктуаций и соответствует величине индуцированных нагревом искусственных вариаций плотности. Во-вторых, с учетом продолжающего влияния полости с дефицитом плотности плазмы, которое все еще обнаруживается до высот $\sim 450 \text{ км}$, увеличение N_c за счет выноса плазмы может оказаться скомпенсированным здесь ее уменьшением и оставаться за пределами разрешения в радиотомографических измерениях.

Как хорошо видно из рис. 1, выше $h \sim 500 \text{ км}$ начинает регистрироваться дакт с увеличенной плотностью плазмы. Из-за наклона геомагнитного поля широта оси дакта уменьшается до 54° N для $h \sim 800 \text{ км}$. Анализ представленной на рис. 1 томограммы показал, на высотах выше максимума $F2\text{-слоя}$ до высоты $h \sim 700 \text{ км}$ величина относительного приращения плотности плазмы в центре дакта слабо изменяется с высотой h , составляя $\sim 8 \%$; на больших высотах эта величина начинает даже несколько нарастать. С ростом высоты h наблюдается увеличение размера дакта вдоль орбиты ИСЗ (приблизительно поперек линий геомагнитного поля) от $L_{\perp} \sim 110 \text{ км}$ на высоте $h \approx 600 \text{ км}$ до $\sim 170 \text{ км}$ для $h \approx 800 \text{ км}$. Как это будет показано ниже, такое увеличение размера дакта не определяется увеличением с высотой поперечных размеров возмущенной магнитной силовой трубки за счет пространственного расхождения силовых линий геомагнитного поля.

На представленной на рис. 1 томограмме хорошо различимы волновые структуры (волновые возмущения, ВВ), возбужденные в ионосфере в условиях, когда до пролета ИСЗ через возмущенную магнитную силовую трубку в течение почти двух часов осуществлялось воздействие на

ионосферу мощными радиоволнами в режиме периодического $[\pm 10 \text{ мин}]$ излучения ВН. Анализ характеристик ВВ для рассматриваемого сеанса измерений приведен в работе [Kunitsyn et al., 2012]. Результаты выполненных на стенде СУРА других исследований свойств ВВ представлены в работах [Черногор, 2014; Черногор и Фролов, 2012, 2014, 2021; Черногор и др., 2015, 2019]. В разделе 3.4 мы дополнительно остановимся на анализе их характеристик.

Из рис. 1 также видно, что на высотах 500–800 км к северу от дакта в интервале широт $55\text{--}57^\circ \text{ N}$ регистрируется выделенная область с сильными флуктуациями плотности плазмы с масштабами $l_\perp \sim 50 \text{ км}$. Их характерной особенностью является то, что область их регистрации располагается в вертикальном столбе. Существование таких возмущений ранее не отмечалось в каких-либо известных нам публикациях. В разделе 3.5 мы специально рассмотрим свойств такого рода возмущений на основе всех полученных нами экспериментальных данных.

Представленный пример демонстрирует, что с помощью метода низкоорбитальной радиотомографии можно проводить изучение пространственной структуры вариаций плотности плазмы с масштабами $l_\perp \geq 15\text{--}20 \text{ км}$ в широкой области высот 200–800 км, которая включает в себя: а) область формирования на высотах 200–400 км полости с дефицитом плотности плазмы (фокусирующей линзы), из которой плазма выталкивается вверх и вниз вдоль силовых линий геомагнитного поля, б) область на высотах 400–500 км — переходная область от $\text{ВО}_\text{ц}$ к области переноса плазменных возмущений вдоль силовых линий геомагнитного поля во внешнюю ионосферу, в которой величина относительных вариаций температуры электронов T_e заметно превышает величину вариаций ее плотности, в) область внешней ионосферы, в которой на высотах $h \geq 500 \text{ км}$ регистрируется дакт с повышенной концентрацией плазмы внутри возмущенной магнитной силовой трубки, опирающейся на $\text{ВО}_\text{ц}$. Установлено также, что внутри дактов обнаруживаются сильные флуктуации концентрации плазмы в диапазоне масштабов $l_\perp$ от десятка метров до километров и только слабые вариации T_e [Фролов и др., 2016; Фролов, 2017]. Особый интерес представляют возмущения плотности плазмы, которые обнаруживаются в вертикальном столбе на широтах $55\text{--}57^\circ \text{ N}$, практически прямо над стендом СУРА. К анализу их характеристик мы вернемся ниже в разделе 3.5. Все эти результаты имеют принципиальное значение для развития модели генерации в широкой области

пространства вокруг стенда СУРА различного рода крупномасштабных плазменных возмущений, возбуждаемых в ионосфере при ее модификации мощными радиоволнами.

Рассмотренные выше результаты сеанса измерений, который проводился в ночной ионосфере в спокойных геофизических условиях при оптимальном режиме генерации ИИТ, можно отнести к случаю, когда на радиотомограмме хорошо обнаруживается полость с уменьшенной плотностью плазмы на высотах 200–400 км и дакт с увеличенной плотностью плазмы на высотах выше 500 км. Важно, что центральные оси этих двух плазменных структур лежат на одной магнитной силовой линии. Это соответствует модели генерации дактов с увеличенной концентрацией плазмы за счет вытеснения плазмы вдоль силовых линий геомагнитного поля из области ее сильного разогрева [Демехов, 2022; Milikh et al., 2012; Streltsov et al., 2018; Vartanyan et al., 2012].

Представленная на рисунке 1 ситуация имеет место далеко не всегда. Это иллюстрирует рис. 2, на котором показаны результаты измерений в ночь с 8 на 9 сентября 2014 г. ($T^* = 00:45 \text{ мск}$ 9.09.2014 или $T^* = 20:45 \text{ UT}$ 8.09.2014) с использованием радиомаяков, установленных на канадском спутнике CASSIOPE, имеющим эллиптическую орбиту с апогеем 1410 км и перигеем 330 км. В рассматриваемом сеансе спутник находился от Земли на расстоянии, близком к максимальному. Эти измерения проводились в спокойных геомагнитных условиях ($\Sigma K_p = 10^-$, $AE \approx 100 \text{ нТл}$) при критической частоте $f_{oF2} \approx 4.6 \text{ МГц}$. Стенд СУРА излучал на частоте $f_{\text{ВН}} = 4300 \text{ кГц}$ радиоволны с эффективной мощностью $P_{\text{эфф}} = 55 \text{ МВт}$ в режиме $[\pm 15 \text{ мин}]$ с 23:04 мск (8 сентября) до 00:19 мск (9 сентября), а с 00:34 до 00:54 мск (9 сентября) — в режиме $[+ 9 \text{ с}, - 1 \text{ с}]$. В последнем случае режим квазинепрерывного излучения ВН использовался для идентификации сигнала СУРЫ установленным на спутнике КВ-приемником. ВН отражалась на высоте $h_{\text{отр}} \approx 255 \text{ км}$. Максимальный угол наклона лучей на спутник из радиотомографических приемных пунктов был $\sim 85^\circ$, т.е. подионосферная траектория на высоте отражения ВН проходила близко к краю центральной части $\text{ВО}_\text{ц}$.

На высотах выше максимума $F2$ -слоя ионосферы (выше $h \sim 300 \text{ км}$) на рис. 2 четко видны две вытянутые вдоль линий геомагнитного поля возмущенные магнитные силовые трубки, в которых на высотах, близких к высоте отражения ВН, наблюдается формирование полостей с уменьшенной концентрацией плазмы с их координатами по широте $\sim 55.7^\circ \text{ N}$ (это отвечает положению

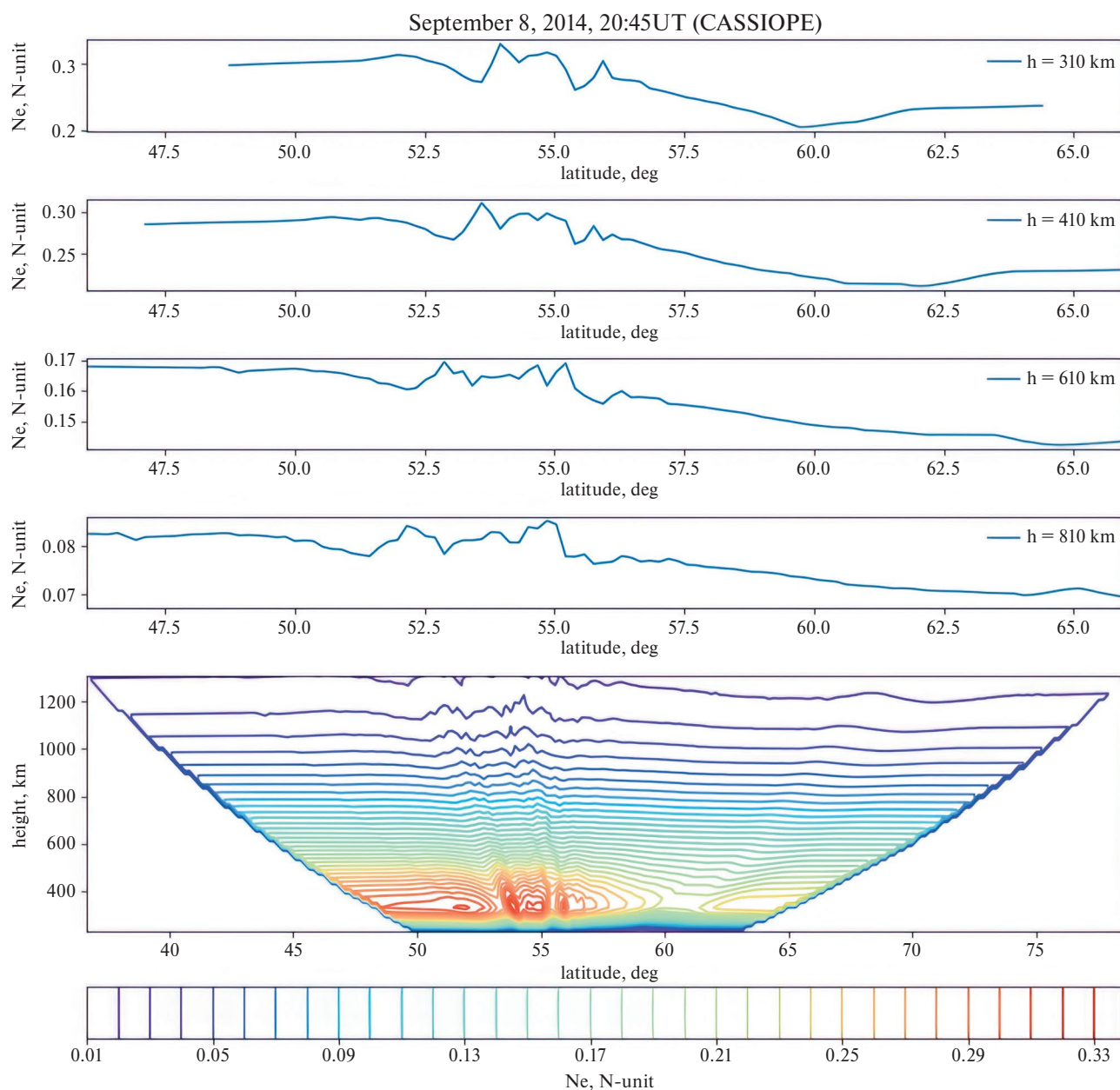


Рис. 2. Радиотомограмма, полученная 09.09.2014 г. в 00:45 мск. На четырех верхних панелях приведены профили концентрации электронов на высотах 310, 410, 610 и 810 км (сверху вниз).

центра диаграммы направленности излучения ВН) и $\sim 54.6^\circ$ N, которая соответствует области, расположенной приблизительно на 120 км южнее первой, заведомо уже далеко вне главного лепестка диаграммы направленности пучка мощных радиоволн. На высоте $h_{\text{отр}} \approx 255$ км обе эти области имеют характерный размер поперек линий геомагнитного поля ~ 80 км. Образование такой двойной структуры возмущения плазмы, скорее всего, связано с появлением второй обла-

сти интенсивного ее разогрева, например, за счет локальной фокусировки мощной радиоволны на развитых во время нагрева искусственных неоднородностях концентрации плазмы, как это отмечалось в работах [Вертоградов и др., 2012; Урядов и др., 2008]. Из результатов этих измерений можно определить величину расхождения силовых линий геомагнитного поля над стендом СУРА, которая в интервале высот 600–800 км составляет ~ 8 км. Ясно, что такое слабое расхож-

дение силовых линий не может объяснить наблюдаемое увеличение на ~ 60 км ширины дакта $L_{\perp}$ в этом же интервале высот. Следовательно, основной вклад в расширение дакта с ростом высоты должно быть связано с его расплыванием поперек силовых линий геомагнитного поля (см. раздел 4.2).

На рис. 2 вдоль обеих возмущенных магнитных силовых трубок выше областей с уменьшенной концентрацией плазмы наблюдается формирование дактов с повышенной плотностью плазмы, в которых с ростом высоты регистрируется увеличение величины относительного приращения плотности: около 4 % и 5.5 % для высоты 600 км и 11 % и 21 % для высоты 800 км соответственно для трубок с минимумами на широтах 54.6° N и 55.7° N. Более сильное увеличение концентрации плазмы имело место в дакте, опирающемся на центр диаграммы направленности пучка мощных радиоволн. Важно отметить, что на высотах выше 800 км наблюдается постепенное увеличение концентрации плазмы в пространстве между этими дактами вместе с появлением здесь неоднородностей концентрации с $l_{\perp} \approx 30\text{--}50$ км, интенсивность которых увеличивается с ростом высоты. При этом на высоте $h \approx 1300$ км первоначальные дакты уже не выделяются на фоне этих флуктуаций. Поэтому можно говорить об их слиянии в единую область с высоким уровнем флуктуаций концентрации плазмы, размер которой вдоль орбиты спутника здесь составляет ~ 770 км.

Представленная на рис. 2 радиотомограмма является единственной в наших измерениях, поэтому образование второй области с сильным разогревом плазмы и развитием дакта следует относить к редкому событию.

Завершая этот раздел работы, представим результаты эксперимента, в котором нами единственный раз на высотах внешней ионосферы был зарегистрирован дакт с уменьшенной плотностью плазмы. Измерения проводились 21 августа 2010 г. в поздние вечерние часы (но в еще освещенной Солнцем ионосфере) в спокойных геомагнитных условиях ($\Sigma K_p = 4^-$, $AE < 50$ нТл), когда луч на спутник COSMOS-2414 пересекал возмущенную магнитную силовую трубку близко к ее центру в $T^* = 20:24$ мск ($T^* = 16:24$ UT). Их результаты представлены на рисунке 3. В этом сеансе критическая частота f_{oF_2} была ~ 5.2 МГц. Стенд СУРА излучал с 20:00 мск в режиме [+ 3 мин, – 7 мин] на частоте $f_{\text{ВН}} = 4785$ кГц с эффективной мощностью $P_{\text{эфф}} = 80$ МВт; во время 7-минутных пауз каждую минуту дополнительно излучались 15-секундные импульсы ВН. Такой режим излучения ВН был связан проведением

одновременно с нашим другого эксперимента, в котором требовалось излучение дополнительных 15-секундных диагностических импульсов. Минимальный угол наклона лучей на спутник из приемных пунктов был $\sim 85^\circ$ N. ВН отражалась на высоте $h_{\text{отр}} \approx 230$ км. Во время модификации ионосферы на ионограммах вертикального зондирования наблюдалось пропадание O-моды на частотах $f \geq f_{\text{ВН}}$, что отвечало развитию АО и генерации искусственных мелкомасштабных неоднородностей концентрации плазмы в $\text{VO}_{\perp}$ ионосферы, но не наблюдалось развития искусственного F_{spread} , что отвечает отсутствию генерации среднемасштабных и крупномасштабных неоднородностей с $l_{\perp}$ от сотен метров до нескольких километров. Это могло быть связано с коротким (3 мин) временем нагрева ионосферы в условиях ее освещенности Солнцем. В целом, условия проведения измерений для формирования дакта и генерации искусственных неоднородностей концентрации плазмы на высотах внешней ионосферы были благоприятными за исключением, возможно, режима излучения ВН с коротким временем ее излучения при достаточно длительной паузе.

Из представленных на рис. 3 результатов измерений видно, что выше высоты отражения ВН (на высотах внешней ионосферы) имеет место уменьшение концентрации плазмы во всей возмущенной магнитной силовой трубке, идущей с широты $\sim 55.6^\circ$ N; на высоте 300 км уменьшение концентрации плазмы составляет около 20 %. Образование областей с повышенной концентрацией плазмы здесь не обнаруживается. Из полученной радиотомограммы можно заключить, что, по крайней мере, до высот ~ 900 км регистрируется уменьшение приблизительно на 10 % концентрации плазмы в возмущенной магнитной силовой трубке относительно концентрации фоновой плазмы. Отмечается также рост размера области уменьшения концентрации в поперечном к геомагнитному полю направлении с 65 до 100 км с ростом h от 400 до 800 км, несколько более слабое по сравнению с представленными на рисунке 2 результатами. Последнее может быть связано с обычно наблюдаемой более быстрой релаксацией искусственных плазменных возмущений в дневных условиях по сравнению с ночными [Ерухимов и др., 1987; Фролов, 2017; Streltsov et al., 2018].

Радиотомограмма на рисунке 3 также ясно демонстрирует существование отмеченной ранее вертикальной структуры с вариациями концентрации плазмы на широтах $\sim 57^\circ$ N, что на 0.85° больше широты стенда СУРА и на 1.3° больше

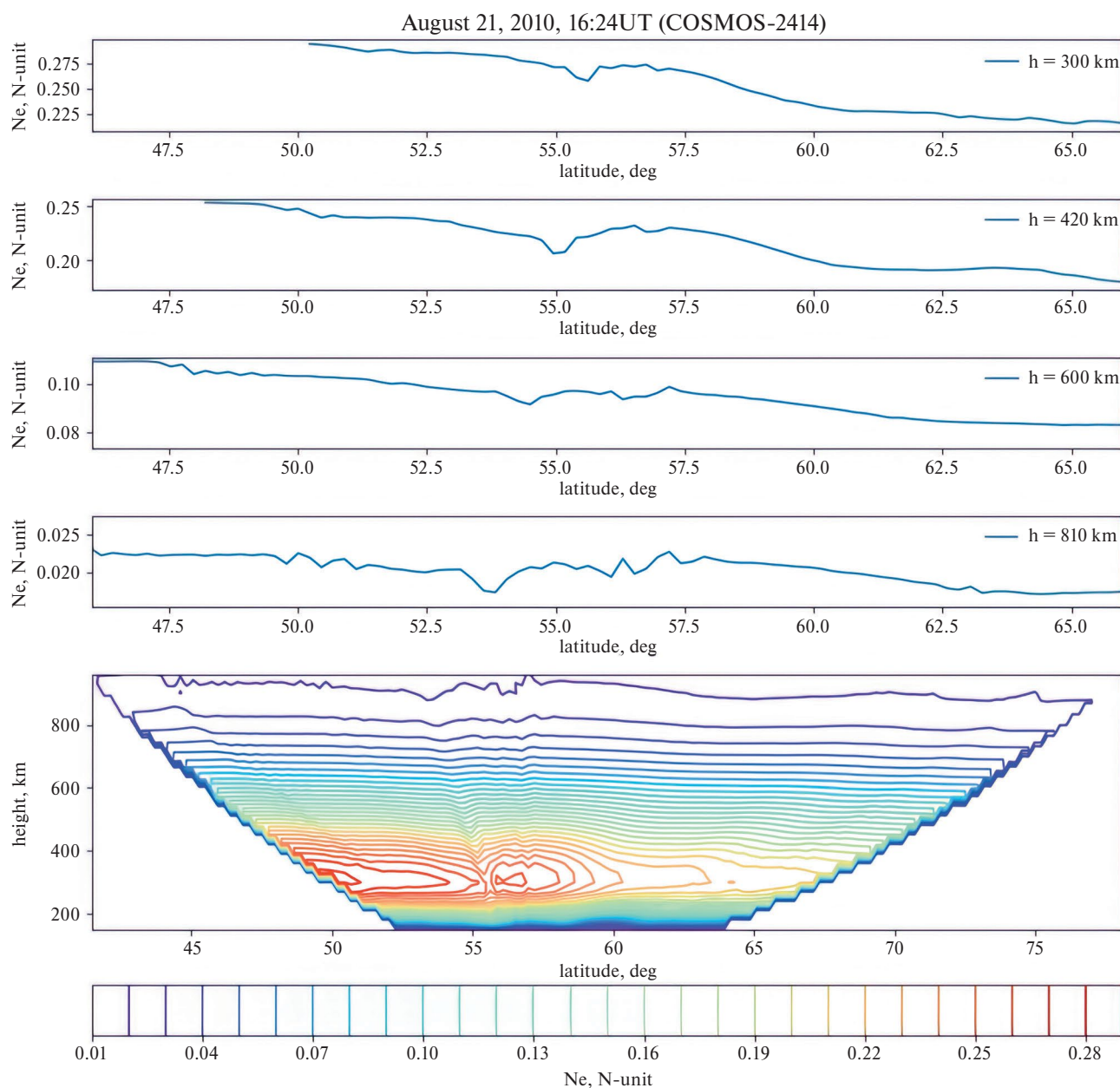


Рис. 3. Радиотомограмма, полученная 21.08.2010 г. в 20:24 мск. На четырех верхних панелях приведены профили концентрации электронов на высотах 300, 420, 600 и 810 км (сверху вниз).

широты центра $VO_{\text{ц}}$ на уровне высоты отражения ВН при наклоне диаграммы направленности ее излучения на 12° на юг.

3.4. Вариации концентрации плазмы, вызванные распространением искусственных ВВ в ионосфере

Как было показано в разделе 3.2 (см. рис. 1), большие возмущения концентрации плазмы на высотах внешней ионосферы могут вызываться

распространяющими здесь волновыми возмущениями (ВВ), которые наиболее эффективно возбуждаются при модификации ионосферы мощными радиоволнами в режиме их излучения с периодически изменяющейся мощностью. В наших измерениях использовалась амплитудная модуляция ВН в режиме “меандр”. В ряде случаев они могут генерироваться как отклик ионосферы на включение и выключение мощной радиоволны даже при моноимпульсном ее излучении.

Регулярные исследования характера генерации ВВ и их свойств проводятся на стенде СУРА с 2011 г., их результаты можно найти в работах [Черногор, 2014; Черногор и Фролов, 2012, 2021; Черногор и др., 2015, 2019]. Диагностика ВВ выполнялась с помощью когерентного радара, цифрового ионозонда, радара некогерентного рассеяния, а также при измерении полного электронного содержания (ПЭС) при зондировании ионосферы сигналами навигационных спутников GPS и GLONASS. Параллельно с нашими исследованиями аналогичные работы проводились на стенде HAARP (США) [Mishin et al., 2012; Pradipta et al., 2015]. На основе выполненного к настоящему времени большого объема экспериментальных исследований можно заключить, что ВВ, генерируемые при периодическом нагреве ионосферной плазмы, имеют следующие основные характеристики.

1) Генерация ВВ регистрировалась, если частота воздействия была меньше частоты Брента–Вайсяля, что соответствует периоду воздействия ≥ 10 мин в условиях проведения измерений на стенде СУРА. Эти ВВ уверенно регистрировались на высотах 100–500 км на расстоянии ~ 1000 км от стенда практически во все сезоны и в любое время суток. Ясно, что они могут распространяться и на большие расстояния. На более высоких частотах модуляции было зарегистрировано генерация инфразвуковых колебаний [Черногор, 2014].

2) Наиболее эффективным режимом излучения ВВ для генерации ВВ был режим, в котором для модификации ионосферы использовались радиоволны O -поляризации с эффективной мощностью излучения $P_{\text{эфф}} \geq 40$ МВт в режиме $[\pm (15 \div 30)$ мин], которые излучались в направлении “магнитного зенита” для ВВ. Воздействие волнами O - или X -поляризации на нижнюю ионосферу не приводило к эффективной генерации ВВ. Все это указывает на то, что генерация ВВ происходит, главным образом, на высотах F -области ионосферы.

3) Сделанные оценки показали, что увеличение температуры нейтралов в таких ВВ может достигать 10–50° К.

4) Скорость распространения ВВ с периодами 20 – 60 мин на ионосферных высотах обычно составляла 300–500 м/с, увеличиваясь с ростом высоты.

5) Относительная амплитуда возмущений концентрации электронов в поле ВВ на высотах 120–300 км достигала 1–10%, увеличиваясь с ростом высоты.

6) По своим характеристикам такие ВВ отвечают ВГВ с длиной волны около 200–250 км.

7) Наличие во время измерений умеренной геомагнитной бури не сильно влияло на характеристики генерируемых ВВ, если их уровень был выше уровня естественных волновых возмущений.

8) Отмечается (см. рис. 1), что часто пространственный период распространяющихся на север ВВ оказывается заметно меньше, чем для ВВ, распространяющихся на юг, составляя в этом сеансе 300 и 1100 км соответственно. Считается, что это связано с влиянием на генерацию ВВ направления нейтрального ветра на ионосферных высотах [Medvedev et al., 2017].

9) На основании выполненных экспериментальных исследований был предложен механизм генерации ВВ за счет изменяющегося во времени теплового давления нагретого нейтрального газа через их столкновение с разогретыми мощной радиоволной ионами [Григорьев, 1999; Mishin et al., 2012; Pradipta et al., 2015]. Однако, как это теперь стало ясно, разогрев нейтрального газа на ионосферных высотах возможен также за счет искусственной инъекции энергичных электронов на ионосферные высоты [Frolov and Troitsky, 2023]. Исследования по разработке модели на основе ИИ еще только предстоит выполнить.

10) Важно принимать во внимание, что ВВ, изменяя величину градиента концентрации плазмы на ионосферных высотах, могут стимулировать развитие неоднородностей концентрации на значительных расстояниях от стенда СУРА [Афраймович и др., 2006; Гершман, 1989; Pradipta et al., 2015]. С этим, в частности, может быть связана турбулизация ионосферной плазмы на больших расстояниях от нагревного стенда, работающего в режиме периодического нагрева ионосферы.

Завершая краткий обзор основных свойств ВВ, индуцируемых при периодическом нагреве ионосферной плазмы мощными КВ-радиоволнами, отметим, что при проведении измерений эти возмущения часто могли проявляться как усиление практически постоянно присутствующих на ионосферных высотах ВВ естественной природы [Шерстюков и др., 2016].

Выполненные эксперименты с импульсным излучением ВВ показали, что при ее включении и выключении обнаруживается генерация специфических уединенных квазипериодических возмущений, отличающихся по своим свойствам от ВГВ как по форме распространяющегося цуга колебаний, так и по скорости его распространения, которая составляет ~ 1600 м/с. Такая ско-

рость соответствует скорости распространения медленных МГД-волн [Черногор, 2014]. Заметим, что старты мощных ракет сопровождались усилением волновой активности в ионосфере со скоростью распространения одного из ее типов $V = 1.2\text{--}1.7$ км/с, отвечающей скорости медленных МГД-волн [Chernogor and Blaunstein, 2013]. Такие ВВ регистрировались на расстоянии $\sim 10\,000$ км от космодрома.

К настоящему времени по искусственной генерации различных типов ВВ собран обширный материал, который нуждается в своем отдельном рассмотрении и дополнительном обобщении полученных здесь результатов. Это, однако, выходит за рамки настоящей работы и будет выполнено в отдельной публикации.

3.5. Вертикальная структура плазменных возмущений

При рассмотрении представленных на рисунках 1–3 результатов экспериментов отмечалось, что над стандом СУРА на томограммах была обнаружена выделяющаяся вертикальная структура возмущений со значительными вариациями плотности плазмы. Анализ всех имеющихся данных привел к выводу, что широта, на которой она регистрируется, составляет около 56.6° N, что на 0.45° больше, чем широта расположения станда СУРА. Следуя результатам [Zhang et al., 2020], эта вертикальная структура находится практически посередине между главным лепестком диаграммы направленности антенны станда и первым северным ее боковым лепестком при используемом в измерениях наклоне диаграммы направленности антенны станда на 12° на юг. При этом эффективная мощность излучения ВН в направлении этой вертикальной структуры не должна превышать нескольких мегаватт и, следовательно, не должны возбуждаться сильные плазменные возмущения.

Рассмотрим еще несколько примеров регистрации таких распространяющихся вертикально вверх возмущений, зарегистрированных в наших радиотомографических измерениях, чтобы дать более полное описание их характеристик.

На рис. 4 приведена радиотомограмма, полученная 25 сентября 2017 г., когда спутник CASSIOPE в $T^* = 15:37$ UT ($T^* = 18:37$ мск) пролетал над стандом СУРА; в этом сеансе луч на спутник пересекал область “магнитного зенита” близко к его центру. Измерения проводились в спокойных геомагнитных условиях ($\Sigma K_p = 8^-$, $AE \sim 50$ нТл) в освещенной Солнцем ионосфере; последняя перед измерениями суббуря с индек-

сом $K_p \sim 6$ была 14 – 15 сентября за 10 дней до их проведения. Мощная радиоволна с 18:06 до 18:33 мск излучалась на частоте $f_{\text{ВН}} = 4300$ кГц при ($f_{\text{OF2}} \approx 4.4$ МГц) с $P_{\text{эфф}} = 45$ МВт в режиме “несущая”, а с 18:36 до 18:41 мск — в квазинепрерывном режиме [+ 9 с, – 1 с] для идентификации приемной аппаратурой спутника излучаемого стандом сигнала. Высота отражения ВН составляла ~ 235 км. Наблюдалось развитие сильного F_{spread} , свидетельствующее об эффективном взаимодействии мощной радиоволны с плазмой $F2$ -слоя ионосферы. Следуя экспериментальным результатам и теоретическим оценкам, представленным в работах [Демехов, 2022; Фролов и др., 2016; Milikh et al., 2012; Vartanyan et al., 2012], 3-минутная пауза после длительного нагрева ионосферной плазмы и использование квазинепрерывного режима излучения ВН во второй части сеанса не должны были оказать какого-либо заметного влияния на характеристики дакта с повышенной концентрацией плазмы, если бы его генерация имела место во время излучения мощной радиоволны в режиме “несущая”. Однако, как следует из рис. 4, в этом эксперименте он не был обнаружен. Можно отметить следующие факторы, которые могли препятствовать его образованию [Фролов и др., 2016]. Это: проведение измерений в условиях освещенной ионосферы при недостаточно высокой эффективной мощности излучения ВН, когда, кроме того, нагрев ионосферы осуществлялся при частоте ВН $f_{\text{ВН}}$, на 0.3 МГц превышающей f_{OF2} .

На томограмме (см. рис. 4) на высотах $h \approx 240\text{--}600$ км видны две области с уменьшенной плотностью плазмы с более сильным уменьшением (на $\sim 2\%$) на широте $\sim 55.5^\circ$ N и с более слабым ее уменьшением (на $\sim 1\%$) на широте $\sim 55^\circ$ N, которые хорошо различимы на высоте 310 км (см. верхнюю панель). В первом случае широта области с уменьшенной концентрацией плазмы на высоте максимума $F2$ -слоя ионосферы практически соответствует широте центра пучка мощных радиоволн на высоте отражения ВН. Второй минимум располагается приблизительно в 55 км южнее первого и находится уже за краем диаграммы направленности излучения мощных радиоволн, отвечая более низкой мощности излучения ВН с $P_{\text{эфф}} \approx 20$ МВт. Эти минимумы хорошо прослеживаются, по крайней мере, до высот ~ 610 км лишь с небольшим изменением широты с ростом высоты их регистрации за счет увеличения горизонтальных размеров области с этими возмущениями. Второе, что следует здесь отметить, это формирование области с увеличенной концентрацией плазмы между этими двумя минимума-

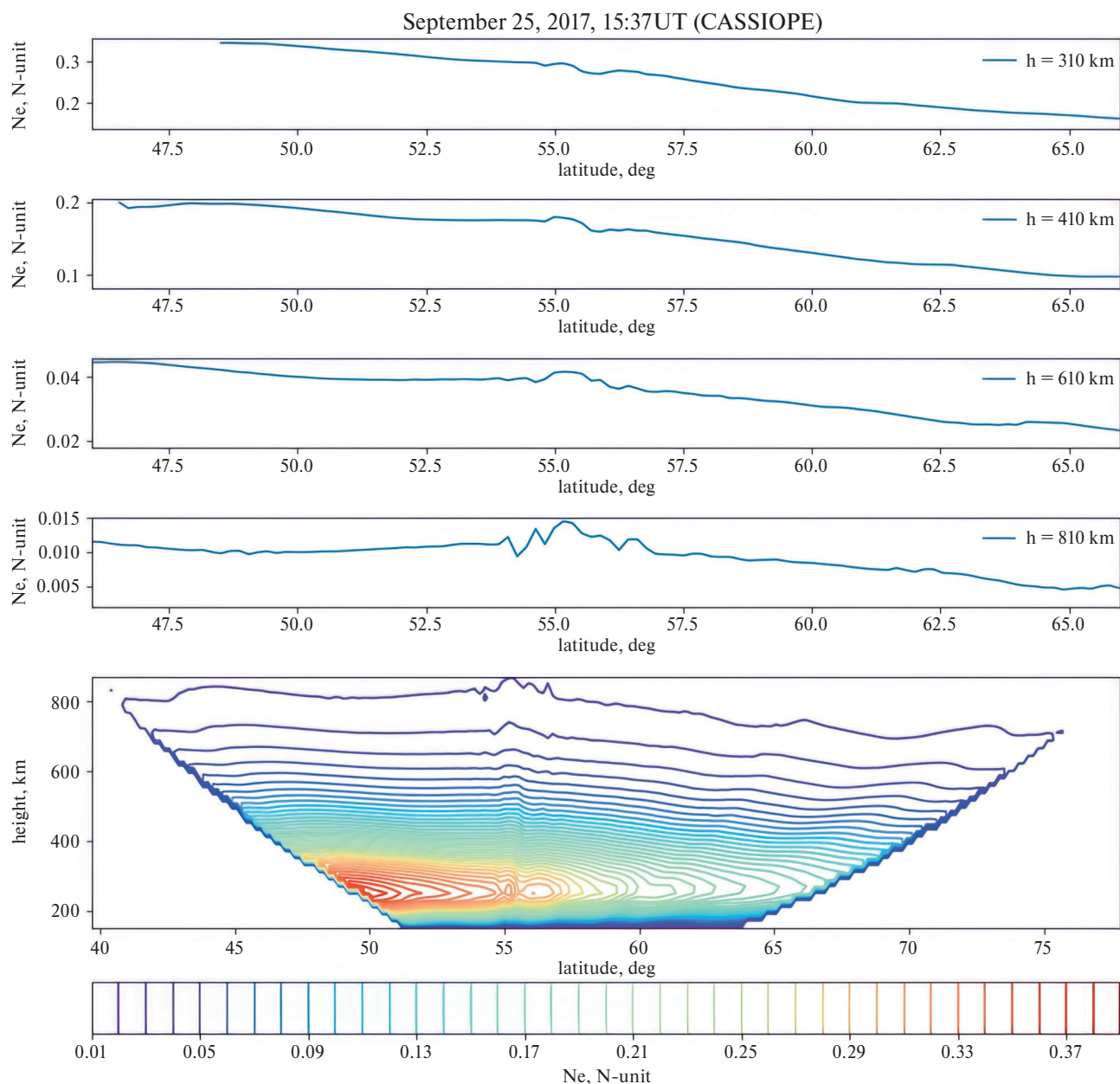


Рис. 4. Радиотомограмма, полученная 25.09.2017 г. в 18:37 мск. На четырех верхних панелях приведены профили концентрации электронов на высотах 310, 410, 610 и 810 км (сверху вниз).

ми. Размер этой области вдоль орбиты спутника (приблизительно в северо-южном направлении) увеличивается от 55 км для $h \approx 310$ км до 160 км для $h \approx 810$ км, как и для дактов. Для этой структуры, в отличие от дактов, с ростом высоты наблюдается резкое увеличение уровня флуктуаций концентрации плазмы относительно ее фонового значения, составляющее $\sim 10\%$ для $h \approx 400\text{--}600$ км и $\sim 35\%$ для $h \approx 800$ км. Отмечается также уси-

ние с ростом высоты флуктуаций плотности плазмы, которые на высоте $h \approx 800$ км имеют горизонтальный размер $l \sim 70$ км вдоль орбиты спутника. Поскольку, как отмечалось выше, рассматриваемые возмущения плотности плазмы расположены в вертикальном столбе над станцией СУРА, а не вытянуты вдоль направления линий геомагнитного поля, следует заключить, что в основе механизма их образования должно лежать рас-

пространство вариаций плотности нейтральной компоненты атмосферы, источник которых находится вблизи высоты отражения ВН. Если считать, что начало генерации этих возмущений определяется временем с момента начала нагрева ионосферной плазмы, то можно оценить среднюю скорость их вертикального распространения на интервале высот 235–800 км как $V \geq 300$ м/с, которая соответствует скорости ВГВ на этих высотах.

Как видно из рис. 4, вблизи северного и южного краев области построения радиотомограммы регистрируются максимумы концентрации плазмы, которые с ростом высоты все более удалены от центрального возмущения на широте $\sim 55.6^\circ$ N. Структура этих возмущений напоминает структуру уединенной волны, расходящейся от источника ее генерации со скоростью, увеличивающейся с ростом высоты. Координаты по широте ближайших к центру максимумов составляют $\sim 50^\circ$ N ($\sim 5^\circ$ на юг от центрального возмущения) и $\sim 61^\circ$ N ($\sim 6^\circ$ на север) для высоты $h \approx 300$ км и $\sim 44^\circ$ N ($\sim 11^\circ$ на юг от центрального возмущения) и $\sim 66^\circ$ N ($\sim 11^\circ$ на север от него) для высоты $h \approx 800$ км. В сторону севера на томограмме видна еще одна волна с координатами максимума $\sim 66^\circ$ N (отклонение $\sim 11^\circ$) для высоты $h \approx 300$ км и $\sim 73^\circ$ N (отклонение $\sim 18^\circ$) для высоты $h \approx 800$ км. Если допускать, что включение ВН в $T = 18:06$ мск привело к генерации этой волны, то ее скорость на высоте 300 км можно оценить, как не меньше, чем 660 м/с, и более высокую скорость 1075 м/с для высоты 800 км. Эти скорости превышают скорость ВГВ на этих высотах. Аналогичные результаты в случае моноимпульсного излучения ВН были получены в работах [Черногор, 2014; Chernogor and Blaunstein, 2013]. Если же сделать привязку генерации этих возмущений к окончанию излучения ВН в режиме “несущая”, это даст оценку их скорости распространения в 8 раз более высокую, чем было найдено выше. Заметим, что возмущения с такими высокими скоростями их распространения $V \approx (5-8)$ км/с ранее никогда не обнаруживались в нагревных экспериментах.

На рис. 5 представлена радиотомограмма, демонстрирующая еще один пример пространственной структуры ВО, которая была зарегистрирована при модификации F -области ионосферы мощными КВ-радиоволнами. Этот эксперимент был выполнен 25 марта 2014 г. с помощью спутника COSMOS-2407 в спокойных геомагнитных условиях ($\Sigma K_p = 12$, $AE \approx 50-100$ нТл). Над стендом СУРА он пролетал в $T^* = 18:49$ UT ($T^* = 22:49$ мск), при этом угол наклона луча на спутник состав-

лял $87-88^\circ$. Следовательно, осуществлялось зондирование центральной части ВО в ночных условиях ее образования. Критическая частота f_{oF2} составляла около 6.3 МГц. Начиная с 19:58 мск, почти за три часа до пролета спутника, ВН излучалась все время в режиме $[\pm 10 \text{ мин}]$ на частоте $f_{ВН} = 5455$ кГц ($h_{отр} \approx 230$ км) с $P_{эфф} = 90$ МВт. Цикл нагрева 22:38 – 22:48 мск был продлен на 4 минуты, чтобы модификация ионосферы выполнялась и во время пролета спутника над стендом. Во время излучения мощной радиоволны наблюдались развитие сильного F_{spread} , который полностью не исчезал и во время паузы излучения ВН; регистрировалось также подавление O -моды на ионограммах вертикального зондирования на частотах около и выше $f_{ВН}$. Все это указывает на развитие интенсивной ИИТ.

Из представленной на рис. 5 радиотомограммы хорошо видно, что на высотах максимума $F2$ -слоя ионосферы (~ 300 км) на широте $\sim 55^\circ$ N во время излучения ВН образуется полость с дефицитом плотности плазмы $\sim 15\%$ и размером в направлении СЮ ~ 40 км, которая с севера и юга окаймлена областями с несколько повышенной относительно фоновой концентрацией плазмы. На радиотомограмме эти области как бы определяют начало ВВ, идущих от области сильного разогрева плазмы вблизи максимума $F2$ -слоя, которые более ярко выражены к северу от ВО_ц ионосферы и регистрируются здесь на большем расстоянии от стенда, чем на более южных широтах; их свойства соответствуют характеристикам ВГВ.

Из представленных на рис. 5 данных также можно заключить, что на высотах выше максимума $F2$ -слоя продолжает регистрироваться структура с минимумом плотности плазмы в центре возмущенной трубки с увеличенной плотностью плазмы по ее краям. Область минимума плотности плазмы на высоте $h \approx 400$ км имеет размер около 80 км и увеличивается до 150 и далее до 220 км на высотах 600 и 800 км соответственно, что, как это отмечалось выше, отвечает характеру изменения поперечного размера дакта с увеличенной плотностью плазмы. Внутри этого минимума плотности на высотах 500–800 км обнаруживается существование слабого максимума плотности плазмы, который может отвечать формированию дакта. На больших высотах он становится неразличимым на фоне флуктуаций концентрации плазмы. Область существования всех этих возмущений вытянута вдоль силовых линий геомагнитного поля.

Из рис. 5 можно также видеть, что на высотах внешней ионосферы до 1000 км и более к северу

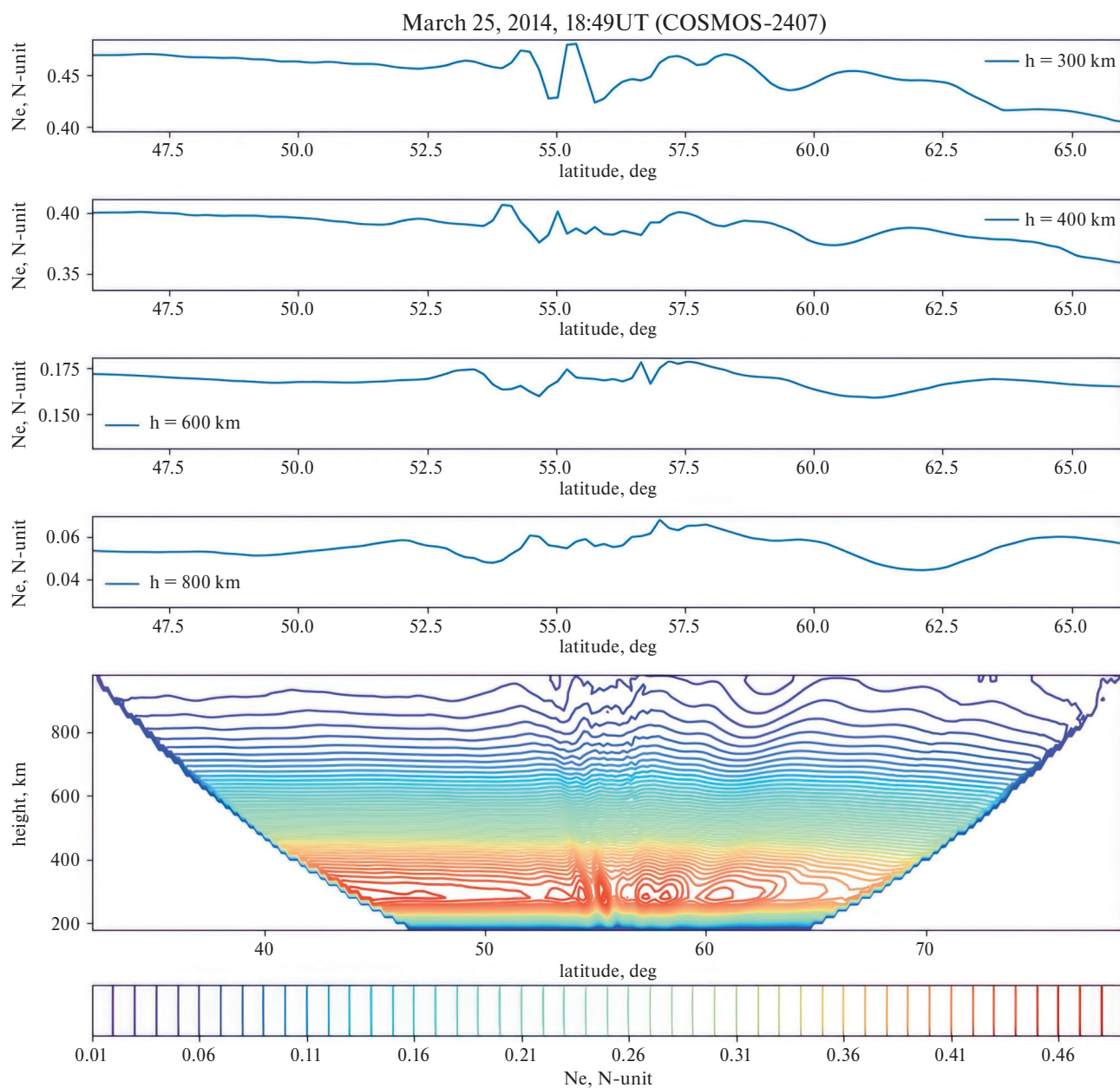


Рис. 5. Радиотомограмма, полученная 25.03.2014 г. в 22:49 мск. На четырех верхних панелях приведены профили концентрации электронов на высотах 300, 400, 600 и 800 км (сверху вниз).

от возмущенной магнитной силовой трубки (или на широтах $\sim 56.6^\circ$ N) регистрируется вертикальный столб с возмущениями плотности плазмы, который имеет характерный размер вдоль орбиты спутника ~ 60 и ~ 75 км для высот 600 и 800 км соответственно. Из полученных данных можно заключить, что величина относительных вариаций концентрации плазмы для диапазона высот 600–800 км практически не изменяется с ростом высоты, составляя $\delta N \approx 10\%$.

Особенностью рассматриваемой вертикальной структуры, как это следует из всех рассмотренных выше примеров, является то, что ее положение в пространстве не контролируется наклоном геомагнитного поля. Поэтому механизм ее образования не должен быть связан с генерацией возбуждаемых при модификации ионосферы мощным КВ-радиоизлучением плазменных возмущений, распространяющихся на высотах верхней и внешней ионосферы вдоль силовых

линий геомагнитного поля, а должен быть связан с возмущениями плотности нейтральной атмосферы.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СВОЙСТВ СВЕРХКРУПНОМАСШТАБНЫХ ИСКУССТВЕННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ НА ВЫСОТАХ ОТРАЖЕНИЯ ВНЕ И ВО ВНЕШНЕЙ ИОНОСФЕРЕ. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Следуя классификации, предложенной в работе [Фролов, 2017], мы будем разделять искусственные неоднородности плотности плазмы с $l_{\perp} > 2$ км на крупномасштабные с $l_{\perp}$ до 10–20 км, механизм генерации которых на высотах F -области ионосферы определяется разогревом естественных неоднородностей в поле мощных радиоволн, и сверхкрупномасштабные с $l_{\perp}$ от 20 км до 50–200 км, имеющие различные механизмы своей генерации. К последним относятся такие рассмотренные в разделе 3 структуры, как полость с уменьшенной концентрацией плазмы на высотах 200–400 км, формирующиеся во внешней ионосфере дакты с увеличенной концентрацией плазмы, возмущения, индуцируемые ВГВ на высотах от ~ 100 км до 1000 км и выше, возмущения нейтральной атмосферы, генерируемые в вертикальном столбе атмосферы над станцией. Полученные результаты показали, что эти структуры характеризуются следующими основными свойствами.

4.1. Полость с уменьшенной концентрацией плазмы

Метод радиотомографии позволяет изучать пространственную структуру полости с уменьшенной концентрацией плазмы, которая образуется на высотах 200–400 км в результате нагрева F -области среднеширотной ионосферы мощными КВ-радиоволнами и выталкивания плазмы вверх и вниз из нагретой области вдоль силовых линий геомагнитного поля. В работах [Гуревич и Шварцбург, 1973; Гуревич, 2007; Ерухимов и др., 1987; Фролов и др., 2007; Фролов, 2015, 2017; Черногор, 2014; Gurevich, 1978; Streltsov et al., 2018] приведены ранее изученные ее свойства и определены необходимые условия для наиболее эффективного ее образования. Это: а) нагрев ионосферы волнами O -поляризации в вечерних и ночных условиях; б) частота ВН должна быть ниже частоты максимума $F2$ -слоя ионосферы f_{OF2} ; в) модификация ионосферы должна проводиться при достаточно высокой мощности излучения

ВН (как правило, не ниже 25 МВт); г) более оптимальным является нагрев не слишком плотной плазмы, когда критическая частота f_{OF2} не превышает 6 МГц; д) в условиях оптимального развития ИИТ длительность нагрева должна быть не меньше 3–5 минут. Все эти условия отвечают условиям эффективной модификации плазмы верхней ионосферы Земли и развития в ней интенсивной ИИТ. Горизонтальные размеры полости с уменьшенной плотностью плазмы определяются шириной диаграммы направленности излучения мощных радиоволн и пороговой мощностью генерации плазменных возмущений, что составляет до 50–100 км на высоте отражения ВН в $F2$ -слое ионосферы. При $P_{\text{эфф}} \approx 100$ МВт и в оптимальных условиях модификации ионосферы относительное уменьшение концентрации плазмы в ней может достигать 30% относительно ее фоновой величины. Такая полость с уменьшенной концентрацией плазмы вытянута вдоль силовых линий геомагнитного поля, занимая интервал высот как выше, так и несколько ниже высоты отражения ВН: от ~ 200 км до ~ 400 км. На ее развитие оказывает влияние эффект “магнитного зенита”. Она оказывает фокусирующее действие на распространяющиеся через нее радиоволны КВ-диапазона. Вытеснение плазмы вверх вдоль силовых линий геомагнитного поля приводит к формированию дактов с увеличенной концентрацией плазмы, обнаруживаемых на высотах выше 500 км.

Кроме того, на высотах 130–180 км формируется область с увеличенной плотностью плазмы как за счет ее вытеснения из области сильного разогрева, так и в результате нарушения на этих высотах ионизационно-рекомбинационного баланса при нагреве дневной ионосферы проходящим через нее мощным радиоизлучением [Бойко и др., 1985; Гуревич и Шварцбург, 1973; Ерухимов и др., 1987; Gurevich, 1978]. Эта область с увеличенной плотностью плазмы действует как дефокусирующая линза. В дневных условиях совместное влияние увеличения поглощения радиоволн и их дефокусировка приводит к сильному ослаблению плотности потока проходящего в F -область мощного радиоизлучения и, следовательно, к уменьшению эффективности воздействия мощной радиоволны на ионосферную плазму и интенсивности генерируемой ИИТ [Фролов, 2017].

Отметим, что согласно выполненным на станции СУРА измерениям [Фролов и др., 2007; Фролов, 2015, 2017], область с дефицитом плотности плазмы может быть опоясана слоем с увеличенной плотностью плазмы; при этом на еще больших расстояниях от центра ВО могут обнаруживаться и другие крупномасштабные структуры.

Все это еще больше усложняет наблюдаемую картину плазменных возмущений, формирующихся вокруг возмущенной магнитной силовой трубки, опирающейся на $BO_{\perp}$. Природа образования этих крупномасштабных неоднородностей и их пространственная структура сегодня еще слабо изучены, чтобы сделать какие-либо окончательные выводы. Можно предположить, что их генерация связана с возбуждением в фоновой плазме продольных электрических токов при развитии ИИТ. Такие токи были обнаружены в работе [Lukianova et al., 2019], их пространственная структура исследовалась в работе [Фролов и др., 2021].

Следует также иметь в виду, что за счет фокусировки мощных радиоволн на искусственных крупномасштабных неоднородностях в $BO_{\perp}$ за ее границами могут формироваться изолированные области с сильно развитой ИИТ, как это рассматривалось в работах [Вертоградов и др., 2012; Ружин и др., 2013; Урядов и др., 2008; Hansen et al., 1992], которые будут оказывать свое влияние на распространение радиоволн и на результаты зондирования BO ионосферы. В работе [Andreeva et al., 2016] приведены примеры моделирования распространения мощных радиоволн в такой возмущенной ионосфере.

4.2. Дакты с увеличенной концентрацией плазмы

Представленное в работе рассмотрение полученных новых экспериментальных данных и результаты модельных и теоретических расчетов позволяют сделать следующие выводы относительно свойств дактов с увеличенной концентрацией плазмы. Было установлено, что из области сильного разогрева электронов вблизи высоты отражения VH O -поляризации плазма за время 5–10 мин выталкивается вдоль силовых линий геомагнитного поля вверх до высот $h \approx 1000$ –1500 км (на большие высоты за большее время), формируя дакт с повышенной ее концентрацией. Существование дактов в области высот 300–450 км не было обнаружено экспериментально. Предполагается, что это связано с высокой концентрацией плазмы в максимуме $F2$ -слоя ионосферы, когда на ее фоне не может быть зарегистрировано не слишком большое увеличение концентрации в области дакта, особенно при наличии высокого уровня на этих высотах ее флуктуаций и влияния полости с пониженной концентрацией плазмы. На высотах $h \approx 500$ –800 км дакты хорошо обнаруживаются, их генерация при выполнении определенных условий — обычно наблюдаемое здесь явление. Это позволяет использовать искусственно создаваемые дакты в различных экспериментах в ка-

честве, например, инструмента влияния на ионосферно-магнитосферные связи. Установлено, что относительное приращение концентрации плазмы в области дакта слабо зависит от высоты. Отсюда следует, что на высотах внешней ионосферы приращении плотности плазмы в дакте быстро (экспоненциально) убывает с ростом h . После выключения VH плотность плазмы в дакте релаксирует до фонового уровня за время ~ 30 мин. Согласно выполненным на стенде HAARP измерениям, формирование дакта сопровождается интенсивным выносом ионов во внешнюю ионосферу, скорость которых увеличивается с ростом высоты вместе с уменьшением концентрации плазмы. При этом, как отмечается в работе [Milikh et al., 2010], профили скорости выноса ионов и изменения плотности плазмы совпадают. По результатам детальных измерений, выполненных с помощью радара некогерентного рассеяния на стенде EISCAT/Heating, величина скорости выноса ионов вдоль геомагнитного поля возрастает от $V_i \sim 0$ на высоте ~ 400 км до ~ 300 м/с на высоте ~ 600 км [Rietveld et al., 2003].

Было экспериментально установлено, что на формирование дактов сильное влияние оказывает эффект “магнитного зенита” за счет более интенсивного разогрева здесь плазмы.

Выполненные исследования показали, что метод низкоорбитальной радиотомографии, в которой используются спутники с высотой их орбиты до 1000–1500 км, дает возможность проведения одновременных измерений характеристик дактов в диапазоне высот от 200 до 800–1200 км. С его помощью были получены данные об ориентации дактов вдоль силовых линий геомагнитного поля, величины увеличения в них плотности плазмы, изменении размера дактов в поперечном к геомагнитному полю направлении. На основе полученных экспериментальных данных было установлено, что с ростом высоты от 500 до 800 км поперечный размер дактов $L_{\perp}$ увеличивается от 60–80 км до 120–150 км (на ~ 60 км или приблизительно в 2 раза). Перенос плазмы поперек линий геомагнитного поля не учитывается в выполненных задачах численного 2D-моделирования (см., например, [Демехов, 2022; Hansen et al., 1992; Milikh et al., 2010, 2012; Vartanyan et al., 2012]). Имеются большие сложности их решения в 3D-приближении, когда надо также учитывать влияние сильной зависимости концентрации плазмы от высоты и изменение профиля плотности ионосферной плазмы в $BO_{\perp}$ при нагреве F -области ионосферы мощными радиоволнами, степень возмущенности концентрации ионосферной плазмы (генерация в ней различного рода

неоднородностей) при ее модификации мощными радиоволнами, изменение функции распределения электронов по энергии в процессе их разогрева мощной радиоволной, индуцированные нагревом электрические токи на ионосферных высотах, а также влияние ускоренных до сверхтепловых энергий электронов фоновой плазмы, искусственной инжекции в ионосферу энергичных электронов из радиационного пояса Земли и др.

Вышеприведенные результаты касаются, в основном, результатов измерений в ночной ионосфере. В утренние и вечерние часы дакты характеризуются меньшим увеличением концентрации плазмы и меньшими его поперечными размерами. В дневной ионосфере дакты на стенде СУРА при мощностях ВН $P_{\text{эфф}} \leq 25\text{--}50$ МВт не были зарегистрированы. Непосредственное измерение вариаций температуры и концентрации плазмы с борта спутников, летающих на высотах 400–800 км, показали присутствие в дактах неоднородностей концентрации плазмы с размерами $l_{\perp} \sim 10$ м–15 км.

Важно отметить, что метод радиотомографии не позволяет изучать динамические характеристики дактов из-за быстрого пролета спутника через возмущенную ионосферу. В этом состоит его сильное ограничение.

Собранный банк экспериментальных данных показывает, что дакты могут иметь не всегда такую простую форму, как это было отмечено выше и продемонстрировано на рисунке 1. В некоторых случаях может формироваться структура, состоящая из нескольких дактов. Следует также отметить, что в наших измерениях в одном случае было зарегистрировано формирование дакта с уменьшенной концентрацией плазмы. Ограниченность полученных здесь экспериментальных данных не позволяет пока сформулировать свойства таких структур и условий их образования. Здесь требуется проведение дополнительных исследований.

Механизмы образования дактов плотности плазмы при модификации ионосферы мощными КВ-радиоволнами рассматривались во многих работах. Среди более ранних отметим работы, в которых рассмотрение переноса возмущений в магнитной силовой трубке проводилось на основе одномерной модели [Васьков и др., 1995; Fallen et al., 2011; Vas'kov et al., 1993]. Около 20 лет назад была разработана двумерная модель SAMI 2 для среднеширотной ионосферы, в которой учитываются динамика плазмы и химические процессы для ионосферы в интервале высот от 100 до нескольких тысяч километров, а также нагрев

плазмы мощными радиоволнами, принимая во внимание эффекты их самовоздействия; околоземная плазма в этой модели описывается гидродинамическими уравнениями переноса ионов и электронов, дополненных условием квазинейтральности и моделью нейтральной компоненты атмосферы [Демехов, 2022; Milikh et al., 2012; Vartanyan et al., 2012]. На основе модели SAMI2 было выполнено модельные расчеты в 2D-приближении полученных на стенде СУРА экспериментальных данных, показавшие, в целом, их хорошее совпадение с результатами измерений изменения концентрации плазмы в продольном к геомагнитному полю направлении [Демехов, 2022; Фролов и др., 2016; Milikh et al., 2012; Streltsov et al., 2018; Vartanyan et al., 2012].

Следует отметить, что модель SAMI 2 образования дактов с увеличенной плотностью плазмы обладает рядом недостатков, которые определяют ограничение точности расчетов с ее использованием. Например, в ней, кроме уже отмеченных выше, не учитывается влияние эффекта “магнитного зенита” при развитии ИИТ на развитие взаимодействия ВН с ионосферной плазмой и на характеристики генерируемой ИИТ. Кроме того, пренебрегается горизонтальным дрейфом плазмы, на важность учета которого указывалось в работе [Fallen et al., 2011], а также влиянием переноса плазмы поперек линий геомагнитного поля на свойства дактов, о чем свидетельствуют результаты настоящей работы. Все отмеченные здесь и другими авторами особенности образования дактов и их характеристик должны быть учтены в новой модели, построенной на основе SAMI-2, разработка которой еще не закончена.

По измерениям в магнитно сопряженной к стенду СУРА области ионосферы не были обнаружены какие-либо признаки существования здесь дактов с увеличенной концентрацией плазмы. Fallen et al. [2011] приводят аргументы, почему они принципиально не могут распространяться на всю магнитную силовую трубку.

4.3. Генерация возмущений плотности нейтральной атмосферы при модификации ионосферы мощными радиоволнами

Выполненные исследования ясно продемонстрировали, что при периодическом нагреве ионосферной плазмы мощными радиоволнами с $T \geq 10$ мин на ионосферных высотах возбуждаются ВВ в широкой области пространства: они обнаруживаются на расстояниях до 1000 км и более как к северу, так и к югу от стенда СУРА, а также на расстоянии ~ 300 км в меридиональном направлении [Куницын и др., 2009]. Приведенные

в работе оценки показывают, что на высотах F -области ионосферы горизонтальная скорость ВВ обычно составляет 300–500 м/с, что отвечает скорости ВГВ. При этом, с ростом высоты (с уменьшением концентрации плазмы) скорость распространения возмущений увеличивается, как это и следует из теории генерации ВГВ [Черногор, 2014; Григорьев, 1999]. Установлено, что источник генерации этих ВВ находится в F_2 -слое — в области наиболее интенсивной генерации ИИТ и наиболее сильного разогрева плазмы. Механизм их генерации определяется периодическим разогревом нейтралов при их столкновении с разогретыми ионами [Mishin et al., 2012; Pradipta et al., 2015]. Отмечено, что при моноимпульсной модификации ионосферы обнаруживается генерация ВВ, скорость распространения которых составляет 1.2–1.7 км/с, которая соответствует скорости распространения медленных МГД-волн [Chernogor and Blaunstein, 2013]. Важно, что колебания нейтральной атмосферы приводят к колебаниям ее ионизированной компоненты и через них — к генерации неоднородностей концентрации плазмы [Афраймович и др., 2006; Гершман, 1989; Pradipta et al., 2015].

Новым результатом выполненных нами исследований явилось обнаружение особой структуры плазменных возмущений, которые на радиотомограммах регистрируются как возмущения плотности плазмы на высотах до 1000 км и более, расположенные в вертикальном столбе атмосферы над станцией СУРА, пространственная ориентация которого не диктуется направлением геомагнитного поля. Размер этого столба вдоль орбиты спутника (приблизительно в северо-южном направлении) составляет 60–220 км, увеличиваясь с ростом высоты. Измерения показывают, что пространственное положение основания такого столба соответствует области минимума между главным лепестком диаграммы направленности и ее первым северным лепестком, т.е. области слабого разогрева плазмы, окруженной областями ее сильного разогрева. Внутри столба регистрируются неоднородности плотности плазмы с размерами $l_{\perp} \approx 35\text{--}70$ км, их интенсивность по отношению к концентрации фоновой плазмы возрастает с ростом высоты. Важно, что такая вертикальная структура возмущений образуется как при излучении ВН в периодическом режиме типа $[\pm (10 \div 15) \text{ мин}]$, так и при ее излучении в виде единичного импульса. Поскольку пространственная структура этого типа возмущений имеет вертикальное направление и не определяется направлением силовых линий геомагнитного поля, как это имеет место для рассмотренных

выше фокусирующей линзы или дакта концентрации плазмы, можно заключить, что в основе механизма их генерации должно лежать возмущение нейтральной компоненты ионосферы, которое инициирует появление наблюдаемых возмущений ионизированной ее компоненты. Из того, что эти возмущения расположены в вертикальном столбе, для механизма их образования, по-видимому, важно направление вектора ускорения g , которое в нашем случае совпадает по направлению с градиентом лотности нейтральной атмосферы. Следуя монографии Ландау и Лифшица [1988], можно допускать, что в основе переноса возмущений вертикально вверх лежит конвекция неравномерно разогретого газа в поле силы тяжести с развитием конвективной неустойчивости, приводящей к турбулизации атмосферного нейтрального газа. Неравномерность разогрева атмосферы определяется изменением плотности потока электромагнитного излучения ВН по диаграмме направленности передающей антенны станция.

Высказанное предположение о механизме генерации плазменных возмущений в вертикальном столбе над станцией СУРА нуждается в своем экспериментальном и теоретическом обосновании. Это касается выполнения сравнительных экспериментов при нагреве E - и F -областей ионосферы мощными радиоволнами обыкновенной и необыкновенной поляризации в разное время суток и в различных геофизических условиях при разных мощностях $P_{\text{эфф}}$ излучения ВН, а также, когда модификация ионосферы выполняется в режиме нагрева “на просвет” при $f_{\text{ВН}} > f_{oF_2}$ и др. Трудность выполнения этих исследований сегодня связана с тем, что в настоящее время практически не осталось низкоорбитальных спутников с радиомаяками, которые можно было бы использовать для проведения радиотомографических измерений.

Проведенные в последние годы на станции СУРА исследования продемонстрировали, что дальнейшее развитие модели ИИТ связано с учетом влияния искусственной инжекции энергичных электронов из радиационного пояса Земли в ионосферу, вызванные ее модификацией мощными КВ-радиоволнами, поскольку они могут прямо влиять на механизмы развития и свойства плазменной турбулентности, являясь их мощным вторичным источником [Frolov and Troitsky, 2023]. Не исключено, что инжектируемые в ионосферу энергичные электроны могут стимулировать генерацию ВВ, как это имеет место в высокоширотной ионосфере. Как ожидается, выполнение с учетом уже полученных результатов новых экс-

периментов и получение в них новых экспериментальных данных позволит разработать более полную модель генерации ИИТ и дать адекватную интерпретацию свойств этой турбулентности. Это, в свою очередь, даст возможность более полного использования ИИТ для решения различных практических задач.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Полу Бернхарду и Гарри Гордону Джеймсу за возможность проведения экспериментов со спутником CASSIOPE.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования Фролова В.Л. выполнены по проекту № FSWR-2023-0038 в рамках базовой части Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Афраймович Э.Л., Астафьева Э.И., Воейков С.И.* Генерация ионосферных неоднородностей при распространении уединенной внутренней гравитационной волны во время мощной магнитной бури 29–31 октября 2003 года // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 49. № 2. С. 89–104. 2006.
- *Беликович В.В., Грач С.М., Караштин А.Н., Котик Д.С., Токарев Ю.В.* Стенд “Сура”: исследование атмосферы и космического пространства // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 5. № 7. С. 545–576. 2007.
- *Бойко Г.Н., Васьков В.В., Голян С.Ф. и др.* Исследование дефокусировки радиоволн в ионосфере при воздействии мощного радиоизлучения // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 28. № 8. С. 960–971. 1985.
- *Васьков В.В., Комраков Г.П., Рябова Н.А.* Тепловые возмущения околоземной плазмы, создаваемые мощным радиоизлучением комплекса “Сура” // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 35. № 5. С. 75–82. 1995.
- *Вертоградов Г.Г., Вертоградова Е.Г., Урядов В.П., Вертоградов В.Г., Комраков Г.П., Крашенинников И.В., Черкашин Ю.Н., Валов В.А., Бредихин Д.В., Макаров А.В.* Кластерная структура искусственной ионосферной турбулентности по данным радарных измерений с помощью ионозонда-радиопеленгатора // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 55. № 1–2. С. 1–13. 2012.
- *Гершман Б.Н.* О влиянии перемещающихся возмущений на возникновение дополнительных ионосферных неоднородностей в области F // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 32. № 12. С. 1571. 1989.
- *Григорьев Г.И.* Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли (обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 42. № 1. С. 3–25. 1999.
- *Гуревич А.В., Шварцбург А.Б.* Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 272 с. 1973.
- *Гуревич А.В., Зыбин К.П., Карлсон Х.С.* Эффект магнитного зенита // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 48. № 9. С. 772–787. 2005.
- *Гуревич А.В.* Нелинейные явления в ионосфере // УФН. Т. 177. № 11. С. 1145–1177. 2007.
- *Демехов А.Г.* Формирование крупномасштабных возмущений при высокочастотном нагреве ионосферы: зависимость характеристик возмущений от частоты и мощности высокочастотного излучения // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 65. № 2. С. 79–95. 2022. https://doi.org/10.52452/00213462_2022_65_02_79
- *Ерухимов Л.М., Метелев С.А., Мясников Е.Н., Митяков Н.А., Фролов В.Л.* Искусственная ионосферная турбулентность (обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 30. № 2. С. 208–225. 1987.
- *Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С.* Радиотомография ионосферы. Москва: Физматлит, 255 с. 2007.
- *Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С., Григорьев В.Ф., Романова Н.Ю., Назаренко М.О., Вапиров Ю.М., Иванов И.И.* Трансконтинентальная радиотомографическая система. Результаты первых ионосферных измерений // Вестн. Московского ун-та. Серия 3: Физика, астрономия. № 6. С. 102–104. 2009
- *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Курс теоретической физики. Т. 6. Гидродинамика. М.: Наука, 733 с. 1988.
- *Ружин Ю.Я., Кузнецов В.Д., Пластинин Ю.А., Карабаджак Г.Ф., Фролов В.Л., Комраков Г.П., Парро М.* Авроральная активность, вызванная мощным радиоизлучением стенда “Сура” // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 53. № 1. С. 46–52. 2013. <https://doi.org/10.7868/S0016794013010173>
- *Троицкий А.В., Фролов В.Л., Востоков А.В., Ракуть И.В.* Радиоизлучение ридберговских атомов верхней атмосферы при ее модификации мощными КВ радиоволнами // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 62. № 10. С. 759–768. 2019.
- *Урядов В.П., Вертоградов Г.Г., Понятов А.А., Вертоградов В.Г., Кубатко С.В., Черкашин Ю.Н., Крашенинников И.В., Комраков Г.П., Валов В.А.* О структуре и динамике области ионосферы с искусственными мелкомасштабными неоднородностями по данным комплексных измерений характеристик рассеянных радиосигналов // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 51. № 12. С. 1011–1025. 2008.
- *Фролов В.Л., Бахметьева Н.В., Беликович В.В. и др.* Модификация ионосферы Земли мощным КВ радиоизлучением // УФН. Т. 177. № 3. С. 330–340. 2007. <https://doi.org/10.3367/UFGN.0177.200703j.0330>
- *Фролов В.Л.* Пространственная структура возмущений плотности плазмы, индуцируемых в ионосфере при ее модификации мощными КВ радиоволнами: обзор результатов экспериментальных исследований // Солнечно-земная физика. Т. 1. № 2. С. 22–45. 2015. <https://doi.org/10.12737/10383>
- *Фролов В.Л., Рапопорт В.О., Шорохова Е.А., Белов А.С., Парро М., Рош Ж.-Л.* Характеристики электромагнитных и плазменных возмущений, индуциру-

- емых на высотах внешней ионосферы Земли при модификации F_2 -области мощным КВ радиоизлучением стенда СУРА // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 59. № 3. С. 198–222. 2016.
- Фролов В.Л. Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы. Нижний Новгород: Изд. ННГУ, 468 с. 2017.
- Фролов В.Л., Лукьянова Р.Ю., Белов А.С., Болотин И.А., Добровольский М.Н., Рябов А.О., Шорохова Е.А. Характеристики плазменных возмущений, возбуждаемых на высотах 450–500 км при работе стенда СУРА // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 45. № 5. С. 359–373. 2018.
- Фролов В.Л., Лукьянова Р.Ю., Рябов А.О., Болотин И.А. Спутниковые измерения плазменных возмущений и электрических токов, индуцируемых в среднеширотной ионосфере при ее модификации мощными КВ радиоволнами // Космические исследования. Т. 59. № 4. С. 275–295. 2021. <https://doi.org/10.31857/S0023420621040014>
- Фролов В.Л., Андреева Е.С., Падохин А.М. Пространственная структура сверхкрупномасштабных возмущений плотности плазмы на ионосферных высотах // XXVIII Всероссийская открытая научная конференция “Распространение радиоволн”. 16–19 мая 2023 г. г. Йошкар-Ола. Тезисы докладов. С. 627–630. 2023.
- Черногор Л.Ф., Фролов В.Л. Перемещающиеся ионосферные возмущения, генерируемые периодическим нагревом плазмы мощным высокочастотным радиоизлучением // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 55. № 1–2. С. 14–36. 2012.
- Черногор Л.Ф. Физика мощного радиоизлучения в геокосмосе. Харьков: Изд. ХНУ им. В.Н. Каразина, 541 с. 2014.
- Черногор Л.Ф., Фролов В.Л. Вариации уровня и спектра геомагнитных пульсаций, сопровождавшие воздействие на ионосферу мощным радиоизлучением стенда “Сура” // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 57. № 5. С. 378–399. 2014.
- Черногор Л.Ф., Панасенко С.В., Фролов В.Л., Домнин И.Ф. Волновые возмущения в ионосфере, сопровождавшие воздействие на околоземную плазму мощным радиоизлучением: результаты наблюдений на харьковском радаре некогерентного рассеяния // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 58. № 2. С. 85–99. 2015.
- Черногор Л.Ф., Гармаш К.П., Фролов В.Л. Крупномасштабные возмущения в нижней и средней ионосфере, сопровождавшие воздействие на нее радиоизлучением стенда “Сура” // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 62. № 6. С. 440–459. 2019.
- Черногор Л.Ф., Фролов В.Л. Особенности крупномасштабных возмущений, индуцируемых в ионосфере мощным дециметровым радиоизлучением во время умеренных магнитных бурь // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 61. № 5. С. 618–640. 2021. <https://doi.org/10.31857/S0016794021040039>
- Шерстюков Р.О., Фролов В.Л., Акчурун А.Д. Контроль возмущенности ионосферы над стендом “СУРА” с помощью построения двумерных карт вариаций полного электронного содержания // Изв. вузов. Физика. Т. 59. № 12–3. С. 23–27. 2016.
- Andreeva E.S., Frolov V.L., Kunitsyn V.E., Kryukovskii A.S., Lukin D.S., Nazarenko M.O., Padokhin A.M. Radiotomography and HF ray tracing of the artificially disturbed ionosphere above the SURA heating facility // Radio Sci. V. 51. № 6. P. 638–644. 2016. <https://doi.org/10.1002/2015RS005939>
- Chernogor L.F., Blaunstein N. Radiophysical and geomagnetic effects of rocket burn and launch in the near the Earth environment. New York: Taylor and Francis Group, 542 p. 2013.
- Fallen C.T., Secan J.A., Watkins B.J. In situ measurements of topside ionosphere electron density enhancements during an HF-modification experiment // Geophys. Res. Lett. V. 38. № 8. ID L08101. 2011. <https://doi.org/10.1029/2011GL046887>
- Frolov V.L., Troitsky A.V. HF-induced artificial injection of energetic electrons from the Earth’s radiation belt as a powerful source for modification of ionized and neutral components of the Earth’s atmosphere // Atmosphere. V. 14. № 5. ID 843. 2023. <https://doi.org/10.3390/atmos14050843>
- Gurevich A.V. Nonlinear phenomena in the ionosphere. New York: Springer, 372 p. 1978.
- Hansen J.D., Morales G.J., Maggs J.E. Large-scale HF-induced ionospheric modifications: theory and modeling // J. Geophys. Res. – Space. V. 97. N 11. P. 17019–17032. 1992. <https://doi.org/10.1029/92JA01603>
- Kunitsyn V.E., Andreeva E.S., Frolov V.L., Komrakov G.P., Nazarenko M.O., Padokhin A.M. Sounding of HF heating-induced artificial ionospheric disturbances by navigation satellite radio transmissions // Radio Sci. V. 47. № 4. ID RS0L15. 2012. <https://doi.org/10.1029/2011RS004957>
- Lukianova R., Frolov V., Ryabov A. First SWARM observations of the artificial ionospheric plasma disturbances and field-aligned currents induced by the SURA power HF heating // Geophys. Res. Lett. V. 46. № 22. P. 12731–12738. 2019. <https://doi.org/10.1029/2019GL085833>
- Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V., Oinats A.V., Alsatkin S.S., Zherebtsov G.A. Relation of internal gravity wave anisotropy with neutral wind characteristics in the upper atmosphere // J. Geophys. Res. – Space. V. 122. № 7. P. 7567–7580. 2017. <https://doi.org/10.1002/2017JA024103>
- Milikh G.M., Mishin E., Galkin I., Vartanyan A., Roth C., Reinisch B.W. Ion outflows and artificial ducts in the topside ionosphere at HAARP // Geophys. Res. Lett. V. 37. № 18. ID L18102. 2010. <https://doi.org/10.1029/2010GL044636>
- Milikh G.M., Demekhov A., Vartanyan A., Mishin E.V., Huba J. A new model for formation of artificial ducts due to ionospheric HF-heating // Geophys. Res. Lett. V. 39. № 10. ID L10102. 2012. <https://doi.org/10.1029/2012GL051718>
- Mishin E., Sutton E., Milikh G., Galkin I., Roth C., Forster M. F2-region atmospheric gravity waves due to high-power HF heating and subauroral polarization stream // Geophys. Res. Lett. V. 39. № 11. ID L11101. 2012. <https://doi.org/10.1029/2012GL052004>

- Pradipta R., Lee M.C., Cohen J.A., Watkins B.J. Generation of artificial acoustic-gravity waves and travelling ionospheric disturbances in HF heating experiments // *Earth Moon Planets*. V. 116. № 1. P. 67–78. 2015. <https://doi.org/10.1007/s11038-015-9461-2>
- Rietveld M.T., Kosch M.J., Blagoveshchenskaya N.F., Kornienko V.A., Leyser T.B., Yeoman T.K. Ionospheric electron heating, optical emissions, and striations induced by powerful HF radio waves at high latitudes: Aspect angle dependence // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 108. № 4. ID 1141. 2003. <https://doi.org/10.1029/2002JA009543>
- Streltsov A.V., Berthelier J.-J., Chernyshov A.A., Frolov V.L., Honary F., Kosch M.J., McCoy R.P., Mishin E.V., Rietveld M.T. Past, present and future of active radio frequency experiments in space // *Space Sci. Rev.* V. 214. № 8. ID 118. 2018. <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0549-7>
- Vartanyan A., Milikh G.M., Mishin E., Parrot M., Galkin I., Reinisch B., Huba J., Joyce G., Papadopoulos K. Artificial ducts caused by HF heating of the ionosphere by HAARP // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 117. № 10. ID A10307. 2012. <https://doi.org/10.1029/2012JA017563>
- Vas'kov V.V., Dimant Y.S., Ryabova N.A. Magnetospheric plasma thermal perturbations induced by resonant heating of the ionospheric *F*-region by high-power radio waves // *Adv. Space Res.* V. 13. № 10. P. 1025–1033. 1993. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(93\)90047-F](https://doi.org/10.1016/0273-1177(93)90047-F)
- Zhang X., Frolov V., Shen X., Wang Y., Zhou C., Lu H., Huang J., Ryabov A., Zhai D. The electromagnetic emissions and plasma modulations at middle latitudes related to SURA-CSES experiments in 2018 // *Radio Sci.* V. 55. № 8. ID e2019RS007040. 2020. <https://doi.org/10.1029/2019RS007040>

Spatial Structure of Plasma Density Perturbations Excited at Altitudes of the Upper and Outer Ionosphere During *F2*-Layer Heating by Powerful HF Radio Waves

V. L. Frolov^{1, 2, *}, E. S. Andreeva^{3, **}, A. M. Padokhin^{3, 4, ***}

¹Radio Physical Research Institute in NNSU by N.I. Lobachvsky (NIRFI NNSU), Nizhny Novgorod, Russia

²Kazan Federal University (KazFU), Kazan, Russia

³Moscow State University by M.V. Lomonosov (MSU), Moscow, Russia

⁴Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS (IZMIRAN), Moscow, Troitsk, Russia

*e-mail: frolov@nirfi.unn.ru

**e-mail: es_andreeva@mail.ru

***e-mail: padokhin@physics.msu.ru

The results of measurements of the spatial structure of variations in the electron concentration excited at altitudes of the Earth's upper and outer ionosphere by modification of the *F2*-layer of the mid-latitude ionosphere by powerful HF radio waves of *O*-polarization radiated by the SURA heating facility are analyzed. The results were obtained by the method of low-orbit satellite radio tomography. The characteristics of a cavity with a reduced plasma concentration formed at altitudes near the height of reflection of a powerful radio wave, ducts with an increased plasma concentration formed at altitudes of the external ionosphere due to the displacement of plasma from the region of its strong heating along the geomagnetic field, and various wave disturbances HF-induced at ionospheric altitudes are considered. In addition, the properties of detected plasma density disturbances of a special nature, revealed in a vertical column above the SURA facility, were also studied. The sizes of studied irregularities are from several tens to several hundred kilometers, and the area of their registration extends far beyond the region of resonant interaction of a powerful *O*-polarized radio wave with the ionospheric plasma near the height of its reflection, where the most intense artificial ionospheric turbulence is excited.