

IV. Выполняемые в последние годы исследовательские работы

4.1. Руководитель работ, выполняемых по х/д с ААНИИ в рамках ФЦП "Геофизика": *«Исследование генерации искусственных плазменных возмущений в высоких и средних широтах»* (2011 – 2015 гг.)

Задачами НИР являлись:

1. Разработать эмпирическую модель генерации искусственных ионосферных неоднородностей (ИИН), возбуждаемых в F_2 -области среднеширотной ионосферы вблизи уровня отражения мощной радиоволны O -поляризации при различных режимах ее излучения и в различных ионосферных условиях.
2. Разработать эмпирическую модель генерации ИИН, возбуждаемых в E области среднеширотной ионосферы и в долине между E и F областями (на высотах 100 – 150 км).
3. Разработать эмпирическую модель генерации ИИН, возбуждаемых во внешней среднеширотной ионосфере при нагреве ее F_2 -области.
4. Разработать эмпирическую модель генерации электромагнитных полей, регистрируемых во внешней среднеширотной ионосфере при модификации её F_2 -области.
5. Определить параметры пространственной структуры возмущённой области среднеширотной ионосферы в интервале высот от 100 км до 1000 км.
6. Разработать эмпирическую модель генерации искусственных плазменных возмущений при воздействии мощным КВ радиоизлучением на высокоширотную ионосферу.
7. Разработать эмпирическую модель генерации сигналов комбинационных частот при модификации высокоширотной ионосферы мощным модулированным по амплитуде КВ радиоизлучением и изучение характеристик их распространения во внешней ионосфере.

Все поставленные в НИР задачи были полностью выполнены. Результаты исследований опубликованы в №№ 116, 135, 139, 146, 164.

4.2. Руководитель ОКР с ИЗМИРАН: *«Проведение экспериментов по воздействию мощным КВ радиоизлучением нагревного стенда СУРА на ионосферу Земли»* (СЧ ОКР «МКС (Наука)» Релаксация СУРА). (2010 – 2017 гг.)

Целью работ являлось:

1. Обеспечение в рамках СЧ ОКР СЧ ОКР «МКС (Наука)» Релаксация воздействия мощным коротковолновым радиоизлучением наземного нагревного стенда СУРА на ионосферу Земли при различных режимах нагрева и при минимальных значениях критической частоты слоя F_2 ионосферы.
2. Анализ ионосферной обстановки, в которой проводились измерения, и анализ полученных результатов по стимуляции развития суббуревой активности в ионосфере при её модификации мощными КВ радиоволнами.
3. Обзор новых результатов исследований, полученных на стенде СУРА.

Все поставленные в СЧ ОКР задачи были полностью выполнены.

В части генерации ИИН с $l_{\perp} \approx 50 - 200$ м. Выполненные исследования позволили установить, что генерация ИИН с $l_{\perp} \approx 50 - 200$ м на высотах F_2 -области ионосферы происходит как при модификации ионосферы мощными радиоволнами O -поляризации, так и мощными волнами X -поляризации. В первом случае, наличие у ИИН гирогармонических свойств свидетельствует о том, что их генерация должна быть связана с развитием верхнегибридной плазменной турбулентности и генерацией мелкомасштабных ИИН с $l_{\perp} \leq 50$ м. В случае волн X -поляризации резонанное взаимодействие мощной радиоволны с плазмой невозможно, и генерация этих неоднородностей должна определяться омическим нагревом плазмы и самофокусировочной неустойчивостью пучка мощных радиоволн. Результаты исследований опубликованы в №№ 132, 146, 150, 181.

В части, касающейся GPS-зондирования крупномасштабных возмущений плотности плазмы, возбуждаемых во внешней ионосфере Земли при модификации F_2 -области ионосферы мощными КВ радиоволнами. Выполненные впервые совместные радиотомографические исследования структуры ВО ионосферы и ее зондирование сигналами ИСЗ навигационной системы GPS с их приемом на стенде СУРА и в разнесенных в меридиональном направлении на ~ 50 км к северу и на ~ 100 км к югу от стенда приемных пунктах позволили установить, что помимо центральной части возмущенной области, где вблизи высоты отражения мощной радиоволны O -поляризации развивается наиболее интенсивная искусственная ионосферная турбулентность и генерируются наиболее интенсивные крупномасштабные ИИН и где на высотах 200 – 400 км формируется полость с уменьшенной плотностью плазмы (фокусирующая линза), на результаты ночных измерений заметное влияние оказывают искусственные крупномасштабные плазменные возмущения, которые обнаруживаются вне этой области как на высотах F_2 -слоя ионосферы, так и во внешней ионосфере. Результаты исследований опубликованы в №№129, 166, 167, 188.

В части возможности локализации суббури при работе нагревного стенда СУРА. Накопленные в последнее время экспериментальные факты, в

частности, при проведении экспериментов СУРА – МКС, свидетельствуют о возможности эффективного вмешательства в природные процессы с помощью среднеширотного стенда даже при небольшой (~ 10 МВт) эффективной мощности излучения волны накачки. Результаты серии экспериментов 2010 года подтвердили, что для возможной локализации суббури активные эксперименты на базе стенда СУРА следует планировать в периоды вблизи равноденствия и локальной полуночи, а также, предпочтительно, в конце восстановительной фазы геомагнитной бури (уже в предварительно подготовленной ионосфере). Результаты исследований опубликованы в №№ 133, 139.

4.3. Руководитель гранта РНФ № 14-12-00556: *«Разработка физической модели генерации искусственной плазменной турбулентности, возбуждаемой в ионосфере Земли при ее модификации мощным КВ радиоизлучением»* (2014 – 2016 гг.)

Аннотация

Настоящий проект направлен на решение проблем, связанных с разработкой теории генерации турбулентности в магнитоактивной плазме при её нагреве мощным радиоизлучением. Его целью является построение адекватной новым экспериментальным данным физической модели генерации возмущений ионизированной и нейтральной компонент земной атмосферы, которые развиваются при модификации ионосферы Земли мощными КВ радиоволнами. Совершенствование модели и развитие теоретических представлений о взаимодействии мощных радиоволн с магнитоактивной плазмой будет проводиться на основе экспериментальных данных, полученных в последние годы на нагревном стенде СУРА (ФГБНУ НИРФИ, Н. Новгород) и в лабораторной плазменной установке «Ионосфера» (ИПФ РАН, Н. Новгород), а также результатов исследований, которые будут получены в рамках данного проекта.

Скоординированное комплексное изучение свойств искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ) и возмущений нейтральной атмосферы с привлечением широкого набора различных диагностических средств в совокупности с лабораторным моделированием проходящих в магнитоактивной плазме процессов будет выполнено впервые и не имеет аналогов в практике мировых исследований модификации ионосферы мощными радиоволнами. Полученные здесь результаты позволят представить на качественно новом уровне особенности генерации и эволюции различных компонент ИИТ во всей толще ионосферы от 100 до 1500 км и определить механизмы формирования вторичной турбулентности, появление которой наблюдается далеко вне областей резонансного взаимодействия волны накачки О-поляризации с плазмой F₂-области ионосферы, где вблизи уровня отражения мощной

радиоволны генерируется наиболее интенсивная первичная искусственная плазменная турбулентность.

Ожидается, что в результате выполнения запланированных по проекту исследований будут получены принципиально новые экспериментальные данные, касающиеся структуры возмущённой области ионосферы и свойств индуцированных мощной радиоволной плазменных возмущений, изучены свойства и определены механизмы переноса плазменных возмущений вдоль силовых линий геомагнитного поля, а также определены механизмы генерации вторичной турбулентности, возбуждаемой вне областей резонансного взаимодействия мощной радиоволны с плазмой. Результаты выполненных исследований составят основу для построения новой физической модели взаимодействия мощных радиоволн с магнитоактивной плазмой. Эти результаты важны также для определения условий управления ионосферно-магнитосферными связями за счёт модификации ионосферы мощными КВ радиоволнами, для дальнейшего развития и совершенствования методов управления характеристиками ИИТ и определения способов повышения интенсивности генерации различных её компонент.

Все поставленные в НИР задачи были полностью выполнены. При этом получены следующие основные результаты:

Выполненные эксперименты позволили получить следующие новые данные о свойствах ИИТ, возбуждаемой при модификации магнитоактивной плазмы мощными радиоволнами.

1. Доказано, что в вечерних и ночных условиях проведения нагрева ионосферы Земли мощными радиоволнами О-поляризации наиболее интенсивная генерация ИИН всех масштабов от метров до десятков километров в F₂-области ионосферы имеет место в области «магнитного зенита» (МЗ) для ВН, где мощная радиоволна в области взаимодействия с плазмой распространяется вдоль силовых линий геомагнитного поля. Для частот ВН 4.3 – 5.8 МГц стенда СУРА это соответствует углам наклона диаграммы направленности излучения пучка мощных радиоволн на 12 – 16 градусов от вертикали на юг. Сама область МЗ характеризуется уменьшением плотности плазмы в ней до 20 – 30%, имеет горизонтальные размеры 30 – 50 км, вытянута вдоль геомагнитного поля на расстояние до 200 км и может рассматриваться как фокусирующая линза. Образование такой области приводит к появлению канала, через который мощность ВН может частично уходить во внешнюю ионосферу, если ее частота не более чем на 0.5 – 0.7 МГц ниже критической частоты f_{0F2} невозмущенного слоя плазмы. Выполненные численные расчеты распространения мощной радиоволны в таких условиях находятся в полном согласии с результатами измерений.

2. В условиях нагрева дневной ионосферы волнами обеих поляризаций на высотах 130 – 170 км происходит увеличение концентрации плазмы на 10 – 20% в силу нарушения здесь ионизационно-рекомбинационного баланса. Такая область обладает дефокусирующими свойствами, что приводит к уменьшению потока излучения мощной радиоволны до 20 дБ на высотах F₂-области. Вместе с более высоким уровнем регулярного поглощения радиоволн в нижних слоях ионосферы в дневных условиях это приводит к значительному уменьшению транспортируемой наверх мощности ВН и объясняет, почему развитие ИИТ и ИИН оказывается при этом в значительной степени подавленным по сравнению с вечерними и ночными условиями проведения измерений.
3. В области МЗ наблюдается развитие интенсивных сверхмелкомасштабных (дециметровых) ИИН, когда частота ВН на несколько десятков килогерц превышает значение частоты гармоники гирорезонанса в области взаимодействия мощной радиоволны с плазмой. Установлено, что сверхмелкомасштабные ИИН развиваются за несколько секунд вместе с развитием декаметровых неоднородностей и релаксируют за время ≤ 1 с, их интенсивность может достигать 10% при $P_{\text{эфф}} = 100$ МВт. Такие неоднородности способны формировать радиозеркало на ионосферных высотах, эффективно рассеивающее радиоволны на частотах ~ 1 ГГц.
4. Показано, что при нагреве F₂-области ионосферы мощными радиоволнами О-поляризации в условиях вечерей и ночной ионосферы возмущения плотности плазмы с масштабами 10 – 20 км наблюдаются во всей толще ионосферы от высот Е-слоя до высот ~ 800 км и выше; в горизонтальном направлении эти возмущения обнаруживаются на расстояниях до 300 км от стэнда, что далеко выходит за размеры диаграммы направленности излучения пучка мощных радиоволн. Ясно, что возмущения плазмы в столь больших объемах будут оказывать сильное влияние на характер распространения радиоволн КВ-УКВ диапазонов. Установлено, что генерация декаметровых ИИН обнаруживается на высотах выше максимума F₂-слоя ионосферы — до 50 км выше высоты отражения ВН. В ряде случаев зарегистрировано развитие нескольких локальных областей рассеяния КВ радиоволн, отстоящих от основной центральной области на расстояние до 170 км. Предполагается, что это связано с развитием ИИТ в области фокусировок лучей мощной радиоволны на крупномасштабных ИИН.
5. Обнаружен эффект «края диаграммы направленности» пучка мощных радиоволн, когда по периметру пучка имеет место усиление генерации крупномасштабных ИИН. Это определяется более быстрым изменением в этой области напряженности электрического поля мощной радиоволны в поперечном к оси пучка направлении, что

приводит к появлению силы стрикционного давления, сильно неоднородному нагреву плазмы, а как результат этого — к генерации соленоидального тока, опоясывающего пучок мощных радиоволн и стимулирующего генерацию крупномасштабных ИИН.

6. Исследования развития ИИН с $l_{\text{perp}} \approx 50 - 500$ м на высотах E-области ионосферы ($h \approx 110 - 130$ км) позволили установить, что генерация неоднородностей обнаруживалась здесь в утренние и дневные часы при модификации ионосферы мощными радиоволнами O-поляризации, если они отражались в F₂-слое ионосферы, и не наблюдалась: а) при нагреве ионосферы на просвет, то есть без отражения ВН O-поляризации от ионосферы; б) когда разность критической частоты f_{0F2} и частоты ВН составляла более 1 МГц; в) при нагреве ионосферы радиоволнами необыкновенной поляризации и г) при нагреве ионосферы радиоволнами O-поляризации в вечерние часы при уже слабом E-слое. При этом было показано, что развитие ИИН в E-слое происходит также быстро, как и их развитие в F₂-слое. Все это говорит о том, что развитие ИИН в E-области ионосферы должно быть прямо связано с развитием ИИТ в F₂-области. Можно предположить, что причиной этого является генерация продольных токов при генерации ИИТ в F₂-области, которые, замыкаясь внизу по высокопроводящей E-области, вызывают развитие здесь неустойчивостей и генерацию неоднородностей плотности плазмы.
7. Проведена детальная обработка результатов всех выполненных в 2005–2010 гг. с помощью бортовой аппаратуры французского микро ИСЗ DEMETER измерений плазменных возмущений на высотах ~ 660 км. Определены условия, когда на высотах внешней ионосферы наблюдается формирование дактов с повышенной плотностью плазмы, размеры которых поперек линий геомагнитного поля составляют 80 – 110 км при величине увеличения плотности плазмы в них на 15 – 25% относительно ее фонового значения при $P_{\text{эфф}} \approx 100$ МВт. Они легко обнаруживаются методом низкоорбитальной спутниковой радиотомографии. На основе экспериментов и численного моделирования показано, что такие дакты формируются за счет выноса ионов кислорода из области сильного разогрева плазмы вблизи высоты отражения ВН O-поляризации. Методом GPS-зондирования ионосферы было установлено, что время развития дактов не превышает 7 мин, их релаксация длится не менее 10 мин. Образование таких дактов в определенных условиях может стимулировать более интенсивное высыпание энергичных электронов с $E \approx 100$ кэВ из радиационных поясов Земли, влияя, таким образом, на состояние ионосферно-магнитосферных связей.
8. Развитие наиболее интенсивной первичной ИИТ за счет генерации различных плазменных неустойчивостей и сильного разогрева плазмы

вблизи высоты отражения ВН О-поляризации приводит к появлению переноса плазменных возмущений от этой области вдоль силовых линий геомагнитного поля на высоты нижней и внешней ионосферы. Эти возмущения передаются за счет механизмов амбиполярной и униполярной диффузий, потоками тепловых электронов и ионов, потоками энергичных электронов, ускоренных до надтепловых энергий (до 25 – 50 эВ) в областях плазменных резонансов, за счет электрических полей и токов, а также через волновые возмущения (ВВ) различной природы, возбуждаемые при генерации первичной ИИТ. Все это приводит к генерации вторичной турбулентности далеко вне области поглощения основной доли энергии ВН, а индуцируемые нагревом ионосферы плазменные возмущения занимают область пространства от 100 до 1000 км по высоте и до нескольких тысяч километров в горизонтальном направлении. Таким образом, достаточно локальная модификация ионосферной плазмы мощными радиоволнами приводит к ее турбулизации в значительных объемах, размеры которых намного превышают размеры области ее наиболее интенсивного первоначального нагрева.

9. Подтверждены ранее полученные результаты, касающиеся генерации внутренних гравитационных волн (ВГВ) при периодическом нагреве ионосферы с периодом $T \geq 20$ мин. Обнаружены знакопеременные всплески доплеровского смещения частоты зондирующей ионосферу над г. Харьковом пробной волны, регистрируемые через 12 – 17 мин после включения ВН, которые связываются с влиянием стимулированного нагревом высыпания высокоэнергичных электронов из радиационного пояса Земли в ионосферу. Были зарегистрированы отклики ионосферы типа ВВ на включения мощной радиоволны в режиме моноимпульсного излучения ВН, а иногда — и на ее выключение. Установлено, что слабые и умеренные магнитные бури не оказывают влияния на эффективность генерации искусственных ВВ. Это означает, что интенсивность искусственных ВВ превышает интенсивность естественных возмущений, возникающих во время таких бурь. Методом радиотомографии было продемонстрировано, что искусственные ВВ обнаруживаются во всей толще ионосферы от 100 до 1000 км и что более короткомасштабные и интенсивные ВВ наблюдаются к северу от стенда СУРА по сравнению с южным направлением. Построенные впервые двумерные карты вариаций ПЭС ясно продемонстрировали, что искусственные возмущения ПЭС наблюдаются в широкой области пространства вокруг стенда СУРА, обнаруживаясь, по крайней мере, до 50 град. сш., или на ~ 800 км на юг от стенда. При этом они появляются там уже спустя несколько минут после начала воздействия. Это позволяет оценить скорость распространения возбуждающего их агента как $V \geq 3 \cdot 10^3$ м/с, что почти на порядок превышает скорость

распространения ВГВ на ионосферных высотах. Предполагается, что перенос возмущений здесь связан с распространением медленных МГД-волн.

10. Выполненные на стенде СУРА эксперименты показали отсутствие какого-либо значимого влияния генерации ИИТ на работу спутниковых навигационных систем GPS/GLONASS.
11. На плазменном стенде «Крот» (ИПФ РАН, Н.Новгород) проведены экспериментальные исследования процессов формирования вытянутых вдоль внешнего магнитного поля возмущений плотности плазмы при локальном нагреве плазмы высокочастотным электромагнитным полем высокой напряженности. Исследована пространственная структура и динамика как формирующейся при этом уединенной плазменной неоднородности, так и группы неоднородностей, возникающих при одновременном «многопозиционном» ВЧ нагреве магнитоактивной плазмы, производимом системами из нескольких помещенных в плазму антенн.
12. Проведено численное моделирование распространения низкочастотных волн в плазме при наличии в ней мелкомасштабных неоднородностей ее плотности, вытянутых вдоль внешнего магнитного поля. По результатам численного моделирования эффект захвата излучения низкочастотных волн такими структурами имеет место как с периодическими, так и со случайно расположенными неоднородностями. Отметим, что каналирование низкочастотных волн свистового диапазона дактами плотности плазмы, которые содержат в себе более мелкомасштабные неоднородности, наблюдалось в экспериментах СУРА-ДЕМЕТЕР. Ясно, что такая схема распространения радиоволн может обеспечить эффективный транспорт низкочастотной мощности из волновода земля-ионосфера в магнитосферу.

Результаты исследований опубликованы в №№ 162-169, 177-188.

В рамках проекта издана монография: В.Л. Фролов. *Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы, возбуждаемая мощным КВ радиоизлучением наземных передатчиков: результаты экспериментальных исследований.* Издательство ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, 2016 г. (№ 185).

4.4. Руководитель Госзадания № 3.1844.2017/ПЧ на выполнение проекта по теме: **«Модификация нейтральной атмосферы Земли при нагреве ионосферной плазмы мощными КВ радиоволнами»** (2017 – 2019 гг.)

Аннотация

Целью проекта является построение эмпирической и теоретической моделей генерации возмущений температуры и плотности нейтральной компоненты земной атмосферы, которые наблюдаются при модификации ионосферы мощными КВ радиоволнами. Развитие моделей будет основываться на новых экспериментальных данных, которые были получены в последние годы и будут получены при выполнении данного проекта и которые касаются взаимодействия мощных радиоволн с атмосферой Земли, включая: 1) генерацию волновых структур типа ПИВ (внутренних гравитационных волн, ВГВ) при периодическом и моноимпульсном нагреве ионосферы мощными КВ радиоволнами, 2) влияние нагрева ионосферы на интенсивность микроволнового излучения в линии озона на частоте ~ 110 ГГц на мезосферных высотах, 3) генерацию на ионосферных высотах всплесков СВЧ радиоизлучения в диапазоне частот 1 – 2 ГГц, индуцированных мощными КВ радиоволнами, 4) измерения характеристик нейтральной атмосферы методом искусственных периодических неоднородностей (ИПН). При построении моделей будут учитываться такие факторы, как влияние на нейтральную атмосферу ее нагрева за счет увеличения температуры ионизированной компоненты ионосферы в поле мощных радиоволн, потоки энергичных электронов, ускоренных в областях плазменных резонансов до сверхтепловых энергий, генерация электрических полей и токов при развитии искусственной ионосферной турбулентности вблизи высоты отражения мощной радиоволны О-поляризации, перенос плазменных возмущений вдоль силовых линий геомагнитного поля от области их интенсивной генерации вблизи высоты отражения мощной радиоволны О-поляризации вниз до основания ионосферы и вверх до высот внешней ионосферы, а также воздействие на характер ионосферно-магнитосферных связей нагрева ионосферы мощной КВ радиоволной.

Для решения поставленных в проекте задач в качестве способа модификации состояния атмосферы будет использован нагрев ионосферной плазмы мощными КВ радиоволнами. Эксперименты будут выполняться на единственном в России нагревном стенде СУРА (НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород).

Все поставленные в проекте задачи полностью выполнены. При этом были получены следующие основные результаты.

1. Доказано, что в вечерних и ночных условиях проведения нагрева ионосферы Земли мощными радиоволнами О-поляризации наиболее интенсивная генерация искусственных ионосферных неоднородностей (ИИН) масштабов l_{\perp} от метров до десятков километров в F₂-области ионосферы имеет место в области «магнитного зенита» (МЗ) для волны накачки (ВН). Сама область МЗ характеризуется уменьшением

плотности плазмы в ней до 20 – 30%, имеет горизонтальные размеры 30 – 50 км, вытянута вдоль геомагнитного поля на расстояние до 200 км и обладает свойствами фокусирующей линзы.

2. В условиях нагрева дневной ионосферы мощными радиоволнами обеих поляризацій на высотах 130 – 170 км происходит увеличение концентрации плазмы на 10 – 20% в силу нарушения здесь ионизационно-рекомбинационного баланса. Такая область обладает дефокусирующими свойствами, что приводит к уменьшению потока излучения мощной радиоволны до 20 дБ на высотах F₂-области. Это объясняет, почему развитие ИИТ и ИИН в дневных условиях их образования оказывается в значительной степени подавленным по сравнению с вечерними и ночными условиями.
3. В области МЗ наблюдается развитие интенсивных сверхмелкомасштабных (дециметровых) ИИН, когда частота ВН на несколько десятков килогерц превышает значение частоты гармоника гирорезонанса в области взаимодействия мощной радиоволны с плазмой. Установлено, что сверхмелкомасштабные ИИН развиваются за несколько секунд вместе с развитием декаметровых неоднородностей и релаксируют за время ≤ 1 с, их интенсивность может достигать 10% при $P_{\text{эфф}} = 100$ МВт. Такие неоднородности способны формировать радиозеркало на ионосферных высотах, эффективно рассеивающее радиоволны на частотах ~ 1 ГГц.
4. Показано, что при нагреве F₂-области ионосферы мощными радиоволнами О-поляризации в условиях вечереи и ночной ионосферы возмущения плотности плазмы наблюдаются во всей толще ионосферы от высот Е-слоя до высот ~ 800 км и выше, в горизонтальном направлении эти возмущения обнаруживаются на расстояниях до 200 – 300 км от стенда, что далеко выходит за размеры диаграммы направленности излучения пучка мощных радиоволн. В ряде случаев зарегистрировано развитие нескольких локальных областей генерации декаметровых ИИН, отстоящих от центральной области развития ИИТ на расстояние до 170 км. Предполагается, что это связано с развитием ИИН в области фокусировок лучей мощной радиоволны на крупномасштабных неоднородностях.
5. Обнаружен эффект «края диаграммы направленности» излучения пучка мощных радиоволн, когда по периметру пучка имеет место усиление генерации крупномасштабных ИИН. Это определяется более быстрым изменением в этой области напряженности электрического поля мощной радиоволны в поперечном к оси пучка направлении, что приводит к сильно неоднородному нагреву плазмы и к генерации соленоидального тока, опоясывающего пучок мощных радиоволн и стимулирующего генерацию крупномасштабных ИИН.

6. Исследования характеристик ИИН с $l_{\perp} \approx 50 - 500$ м на высотах E-области ионосферы ($h \approx 110 - 130$ км) позволили установить, что их развитие должно быть здесь связано с нагревом плазмы и генерацией ИИТ в F₂-области. Предполагается, что причиной этого может быть возбуждение продольных токов при генерации ИИТ в F₂-области, которые, замыкаясь внизу по высокопроводящей E-области, вызывают развитие в ней неустойчивостей и, как следствие этого, генерацию неоднородностей плотности плазмы.
7. Проведена детальная обработка результатов, всех выполненных в 2005–2010 гг., с помощью бортовой аппаратуры французского микро ИСЗ DEMETER, измерений плазменных возмущений на высотах ~ 660 км. Определены условия, когда на высотах внешней ионосферы наблюдается формирование дактов с повышенной плотностью плазмы, и измерены их характеристики. Образование таких дактов в определенных условиях может стимулировать высыпание энергичных электронов с $E \approx 100$ кэВ из радиационных поясов Земли, влияя, таким образом, на состояние ионосферно-магнитосферных связей.
8. Развитие наиболее интенсивной первичной ИИТ за счет генерации различных плазменных неустойчивостей и интенсивного разогрева плазмы вблизи высоты отражения ВН O-поляризации стимулирует появление переноса плазменных возмущений от этой области вдоль силовых линий геомагнитного поля на высоты нижней и внешней ионосферы. Эти возмущения передаются за счет возбуждаемых при генерации первичной ИИТ потоков тепловых электронов и ионов, потоков энергичных электронов, электрических полей и токов, а также волновых возмущений (ВВ) различной природы. Все это приводит к генерации вторичной турбулентности далеко вне области поглощения основной доли энергии ВН. Таким образом, достаточно локальная модификация ионосферной плазмы мощными радиоволнами приводит к ее турбулизации в значительных объемах, далеко выходящих за область ее первоначального нагрева.

Таким образом, выполненные в рамках проекта исследования позволили выявить и изучить новые свойства ИИТ, которые составляют основу новой модели взаимодействия мощных радиоволн с магнитоактивной плазмой. Важнейшим результатом выполненных исследования явилось экспериментальное обоснование существования модификации нейтральной компоненты атмосферы на ионосферных высотах при нагреве мощными радиоволнами ее ионизированной компоненты.

4.5. Руководитель гранта РФФИ № 17-05-00475а: ***"Генерация плазменных возмущений во внешней ионосфере Земли при модификации F2-области мощными КВ радиоволнами"*** (2017 – 2019 гг.)

Аннотация

Проект направлен на решение проблем, связанных с физическими процессами, которые развиваются в ионосфере и магнитосфере Земли при искусственной модификации ионосферной плазмы. В круг его задач входят создание экспериментальной базы на основе уникальных радарных и спутниковых данных, разработка теории генерации турбулентности в магнитоактивной плазме (в верхней ионосфере Земли) при нагреве F₂-области мощными КВ радиоволнами, определение механизма распространения плазменных возмущений вдоль силовых линий магнитного поля.

В экспериментальной части проекта будет выполнена серия экспериментов на нагревном стенде СУРА (НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Н. Новгород), в которых, используя контролируемый нагрев ионосферной плазмы мощными КВ радиоволнами, можно проводить многократное возбуждение искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ) с заданными свойствами на определенной высоте ионосферы. Для диагностики процессов, протекающих в возмущенной магнитной силовой трубке, опирающейся на область генерации ИИТ, будут использоваться измерения с борта искусственных спутников Земли (ИСЗ) Swarm, летающих на высотах ~ 500 км, и зондирование возмущенной области ионосферы сигналами ИСЗ высокоорбитальных навигационных систем GPS/GLONASS. Обработка экспериментальных данных будет сопровождаться численным моделированием распространения плазменных возмущений с учетом реальных ионосферных условий и результатов измерений. Это позволит детализировать особенности генерации и распространения искусственных плазменных возмущений на высотах выше максимума F₂-слоя ионосферы, получить необходимые данные о динамических процессах, протекающих в возмущенной магнитной силовой трубке, и разработать способы оказания влияния на ионосферно-магнитосферные связи на основе модификации ионосферы мощными КВ радиоволнами.

Все поставленные в проекте задачи полностью выполнены.

При выполнении проекта планировалось проведение исследований по следующим шести направлениям:

1. провести измерения характеристик искусственных плазменных возмущений на высотах 450 – 500 км с помощью бортовой аппаратуры ИСЗ SWARM и CSES, когда спутники будут пересекать возмущенную магнитную силовую трубку над стендом СУРА и в магнитно сопряженной к нему ионосфере;
2. провести анализ и обобщение всех результатов выполненных в 2016 – 2019 гг. измерений; определить характеристики плазменных

возмущений, возбуждаемых во внешней ионосфере при нагреве её F₂-области мощными КВ радиоволнами О-поляризации;

3. провести обработку всех полученных при выполнении проекта экспериментальных данных с целью изучения свойств токов, индуцируемых в возмущённой области ионосферы при развитии искусственной ионосферной турбулентности;
4. выполнить обработку данных по измерению свойств плазменных возмущений в магнитно сопряженной к стенду СУРА ионосферы, полученных в рамках программы СУРА-DEMETER в 2005 – 2010 гг.
5. используя результаты зондирования ионосферы сигналами навигационных спутников GPS, определить характер и скорость распространения плазменных возмущений на высотах внешней ионосферы;
6. сформулировать результаты исследований, полученные в рамках настоящего проекта, и дать оценку возможным направлениям дальнейших исследований.

Ниже, в соответствии с перечисленными выше основными направлениями исследований, приводятся наиболее важные итоговые результаты работы над проектом.

По первому и второму направлениям исследований. С учётом результатов проведённых при выполнении проекта экспериментов, изучены характеристики вариаций плотности и температуры плазмы, которые индуцируются на высотах 450 – 500 км при нагреве F₂-области ионосферы мощными радиоволнами О-поляризации. Выполненные измерения характеристик плазменных возмущений позволили установить следующее.

- На высотах 450 – 500 км вариации плотности и температуры плазмы обнаруживаются на расстояниях до 200 км вдоль орбиты ИСЗ (приблизительно в северо-южном направлении), что в 1.5 – 3 раза превышает как горизонтальные размеры центральной части возмущённой области ионосферы на уровне отражения ВН, где наблюдается развитие наиболее интенсивной искусственной ионосферной турбулентности и наиболее сильный разогрев плазмы. Отмечается, что на пространственное распределение искусственных плазменных возмущений на высотах ~ 500 км сильное влияние оказывает эффект «магнитного зенита».
- В области высот 450 – 500 км наблюдается средний рост температуры электронов на величину 2 – 14% и сильные флуктуации её значений (1 – 8%). Сравнивая результаты измерений с помощью ИСЗ SWARM и

DEMETER, можно заключить, что величина вариаций T_e с ростом высоты достаточно быстро уменьшается.

- На высотах 450 – 500 км с точностью до 1% не было обнаружено характерного для дактов увеличения плотности плазмы, которые имеют размеры поперек геомагнитного поля около 100 км и хорошо регистрируются на высотах 660 км в экспериментах с ИСЗ DEMETER. Было установлено, что генерация плазменных возмущений на высотах ~ 500 км хорошо обнаруживается при проведении измерений в вечерней и ночной ионосфере в условиях, когда эффективная мощность излучения ВН превышает 40 МВт. Последние измерения, однако, показали, что в зимние месяцы эффективная генерация ИИТ возможна также в утренние и ранние вечерние часы при достаточно слабом линейном поглощении радиоволн в нижней ионосфере.
- На высотах 450 – 500 км наиболее интенсивными являются неоднородности плотности плазмы с размерами $l_{\perp} \approx 15$ км в ортогональном к геомагнитному полю направлении и с относительным изменением плотности плазмы $\delta N \approx 3\%$. Заметим, что неоднородности почти таких же размеров обнаруживаются как вблизи высоты отражения мощных радиоволн в F₂-слое, так и внутри дактов плотности плазмы. В такой пространственно неоднородной структуре возмущённой области ионосферы должно иметь место разбиение потока энергии мощной радиоволны на отдельные пучки волн и, как следствие этого, неоднородный нагрев ионосферной плазмы. Последнее регистрируется в измерениях вариаций N_e и T_e по сечению возмущённой магнитной силовой трубки. Поэтому модель источника выделения энергии ВН в пределах пучка мощных радиоволн, определяемых только формой диаграммы направленности его излучения, которая, как правило, задаётся в гауссовом виде, не отражает существующей реальности и должна быть заменена на источник с несколькими центрами нагрева, которая также должна учитывать влияние эффекта «магнитного зенита», где имеет место наиболее интенсивное развитие ИИТ. Такая пространственно неоднородная структура ВО ионосферы, возможно, позволит объяснить наблюдающиеся сильные вариации плотности и температуры плазмы сразу над источником, более точно описать высотную зависимость их характеристик и особенности развития плазменных возмущений во внешней ионосфере.
- На основе сравнения результатов экспериментальных исследований характеристик плазменных возмущений на высотах внешней ионосферы с помощью спутников DEMETER и DMSP выявлена сильная суточная зависимость эффективности формирования дактов с максимумом увеличения плотности в них $\delta N = 20 - 40\%$ в условиях ночной ионосферы и со значительно более низким значением ($\delta N = 1 - 10\%$) в утренние и вечерние часы. Это находится в соответствии с результатами

выполненных исследований на стенде HAARP (Vartanyan A., Milikh G.M., Mishin E., et al. // J. Geophys. Res. 2012. Vol. 117, No. 10. Art. no. A10307). Можно также считать, что размер дакта в поперечном к геомагнитному полю направлении увеличивается с ростом высоты, составляя около 100 км на высоте 660 км и 200 км на высоте 840 км.

- В целом, имеет место хорошее соответствие характеристик плазменных возмущений (вариаций плотности плазмы), измеренных с помощью спутников SWARM и DEMETER, данным томографических исследований крупномасштабной структуры ВО ионосферы и результатам ее зондирования сигналами навигационных спутников GPS/GLONASS.

По третьему направлению исследований были получены следующие результаты. Используемая для диагностики плазменных возмущений бортовая аппаратура ИСЗ SWARM позволяет измерять не только параметры плазмы, но и вариации геомагнитного поля на высотах 450 – 500 км. По измеренной вариации магнитного поля, когда спутники пролетают через возмущенную нагревом ионосферы магнитную силовую трубку, можно вычислить плотность продольных токов в плазме. В случае, когда два спутника летят вблизи друг друга, но только один из них пересекает возмущенную плазменную трубку, локальный рост электронной температуры, сопровождающийся уменьшением электронной плотности, наблюдается только этим спутником. При этом в центре возмущенной трубки обнаружен втекающий ток, связанный с выносом электронов вверх вдоль силовых линий геомагнитного поля, а по периферии этой области вытекающий ток, связанный с движением электронов вниз вдоль силовых линий магнитного поля по окружающей фоновой плазме. Величина плотности тока оценивается как $0,02 \text{ мкА/м}^2$. Такая пространственная структура токов в плазме отвечает процессу униполярной термодиффузии с возбуждением вихревых электрических токов в объеме плазмы, поперечные размеры которой в несколько раз превышают размеры облученной пучком мощных радиоволн ионосферы. Необходимо отметить, что такие измерения токов в ионосферной плазме, индуцированных ее нагревом мощными радиоволнами, выполнены впервые в мире. Генерация электрических токов далеко за пределами диаграммы направленности передающей антенны стенда может объяснить наблюдаемую здесь генерацию искусственных ионосферных неоднородностей

По четвертому направлению исследований были получены следующие результаты. В результате детального анализа результатов выполненных в 2005 – 2010 гг. экспериментов по программе СУРА-DEMETER было установлено, что в вечерних и ночных условиях модификации F₂-слоя ионосферы наблюдается появление высыпаний энергичных электронов из радиационных поясов Земли, которые регистрируются через 5 – 10 мин после

включения ВН и исчезают через 5 – 15 мин после её выключения, где бóльшие времена развития отвечают условию «холодного старта» начала нагрева плазмы после длительной паузы в излучении ВН. Показано, что формирование дактов плотности плазмы усиливает высыпание энергичных электронов. Максимальные потоки высыпающихся энергичных электронов имеют место при $E \approx 100$ кэВ с величиной потока $F \approx 10 - 100$ эл/(см²·с·стер·кэВ). Область высыпаний вдоль геомагнитного меридиана имеет размеры до 900 км к северу от стенда и до 400 км к югу от него; размер области высыпаний в ортогональном к меридиану направлении составлять не менее 400 км. Высыпания не регистрируются, если несколько дней перед измерениями имели место спокойные геомагнитные условия и в оболочке для стенда СУРА $L = 2.7$ истощается содержание высоко энергичных электронов. Высыпания энергичных электронов было зарегистрировано и в магнитно сопряжённой к стенду СУРА области ионосферы.

Полученные экспериментальные данные позволяют оценить полную мощность, вносимую высыпающимися электронами в ионосферу северного полушария как ~ 200 кВт, что сравнимо с мощностью, генерируемой передатчиками нагревного стенда (~ 500 кВт). На самом деле, мощность, вносимая высыпающимися электронами в ионосферу Земли может быть в несколько раз больше приведенной величины, если учесть высыпания в магнитно сопряженной относительно стенда СУРА ионосфере, а также мощность высыпающихся электронов с $E \leq 70$ кэВ (первые данные здесь были получены нами в 2019 г. по измерениям со спутниками серии NOAA).

Считается, что эффективным механизмом стимулирования высыпаний энергичных электронов из радиационного пояса Земли является их взаимодействие с ОНЧ радиоволнами (вистлерами). В случае излучения ВН в режиме «несущая», как это было в наших экспериментах, механизм генерации ОНЧ волн может быть следующим. Известно, что в области взаимодействия ВН с плазмой при развитии тепловой параметрической (резонансной) неустойчивости генерируются нижнегибридные волны. Рассеиваясь на мелкомасштабных неоднородностях, также генерирующихся при развитии тепловой параметрической неустойчивости, они могут трансформироваться в ОНЧ волны, занимающих диапазон частот от нескольких килогерц до 15 – 20 кГц, которые покидают область резонансного взаимодействия ВН с плазмой и уходят в магнитосферу вдоль силовых линий геомагнитного поля. Существование таких волн было зарегистрировано в экспериментах СУРА–DEMETER [В.Л. Фролов, В.О. Рапопорт, Е.А. Шорохова, А.С. Белов, М. Парро, Ж.-Л. Рош. Характеристики электромагнитных и плазменных возмущений, индуцируемых на высотах внешней ионосферы Земли при модификации F_2 -области мощным КВ радиоизлучением стенда СУРА. // Изв. вузов Радиофизика, 2016. Т. 59, № 3, с. 198-222]. Высыпания энергичных электронов из радиационных поясов Земли, стимулированное нагревом

ионосферы мощными КВ радиоволнами, можно рассматривать как эффективный механизм влияния на ионосферно-магнитосферные связи.

Выполненные исследования показали, что высыпающиеся электроны, поглощаясь в нижних слоях ионосферы, значительно увеличивают поглощение радиоволн СВ и КВ диапазонов, проходящих через область высыпаний, которая, как видно из вышесказанного, занимает большую область пространства как над стендом СУРА и севернее его, так и в магнитно сопряженной ионосфере. Общая площадь ионосферы, подверженная влиянию высыпающихся электронов может составлять до миллиона квадратных километров. Кроме того, высыпающиеся электроны могут возбуждать на ионосферных высотах атомы и молекулы верхней атмосферы до ридберговских состояний, которые, высвечиваясь, излучают микроволны в диапазоне от сотен мегагерц до гигагерц. Интенсивность этих микроволн может быть сравнима с излучениями, генерируемыми в ионосфере в естественных условиях во время солнечной активности, когда в ионосферу вторгаются потоки высокоэнергичных электронов. Эффект генерации микроволновых излучений при модификации ионосферы мощными радиоволнами был обнаружен и исследован в работе № 209.

По пятому направлению исследований были получены следующие результаты. Было проведено сравнение экспериментальных данных, касающихся свойств индуцированных во внешней ионосфере плазменных возмущений, с результатами модельных расчетов. В целом, имеется определенное согласие между экспериментальными данными и результатами численного моделирования. Однако ряд полученных новых экспериментальных данных не может быть объяснен в рамках обычно используемой гидродинамической модели SAMI2. Это, в первую очередь, касается учета генерации продольных токов на ионосферных высотах, которые сами могут стимулировать развитие вторичной ИИТ, влияния как высыпающихся энергичных электронов, так и электронов, ускоренных в областях с сильной турбулентностью, на характеристики взаимодействия мощной радиоволны в плазме. Уже собран обширный экспериментальный материал, свидетельствующий о генерации искусственных ионосферных неоднородностей на высотах E-области ионосферы, который имеет место даже при частоте волны накачки выше его критической частоты. Эти неоднородности могут оказывать сильное влияние на взаимодействие мощной радиоволны с плазмой в верхней ионосфере через свойства распространения радиоволн в турбулентной среде. Наконец, обнаруженная недавно генерация микроволнового излучения при модификации верхней ионосферы мощными радиоволнами может иметь далеко идущие последствия. Возможно, с ее влиянием связано обнаруженное в работе [Куликов Ю.Ю., Фролов В.Л., Григорьев Г.И. и др. Отклик мезосферного озона на нагрев нижней ионосферы мощным КВ радиоизлучением. // Геом. и Аэрон. 2013. Т. 53, №1, с. 102-109] влияние нагрева ионосферной плазмы на микроволновое излучение в линии

озона на частоте ~ 110 ГГц. Все эти эффекты еще требуют своего детального изучения и анализа. Полученные здесь результаты необходимо будет принимать во внимание при развитии модели взаимодействия мощной радиоволны с ионосферной плазмой.

По шестому направлению исследований были получены следующие результаты. Вопросы, которые должны быть решены при совершенствовании эмпирической модели генерации плазменных возмущений, были отмечены выше. Они касаются наличия пэтчевой структуры возмущенной области ионосферы, генерации в ней вихревых токов при развитии ИИТ, наличия потоков ускоренных в ВО ионосферы электронов и высыпающихся энергичных электронов из радиационных поясов Земли. Здесь еще только предстоит выполнить новые экспериментальные и теоретические исследования. В развитие этих исследований участниками проекта в 2019 г. подана заявка на грант РФФИ на более детальные исследования пространственной структуры токов, индуцируемых в ВО ионосферы при развитии в ней ИИТ, а также заявка на грант РНФ для выполнения аналогичных исследований в лабораторной плазменной установке для детализации происходящих в магнитоактивной плазме процессов при развитии и релаксации плазменных возмущений (совместно с ИПФ РАН, Н. Новгород). Еще предстоит выполнить исследования свойств высыпаний электронов с энергиями до 70 кэВ, особенностей развития ИИТ в магнитно сопряженной к стенду СУРА области ионосферы, изучить в деталях возможное влияние генерации микроволнового излучения под воздействием высокоэнергичных электронов на свойства атмосферы на ионосферных высотах и на генерацию ИИТ.

Результаты исследований опубликованы в работах №№ 191-194, 206, 208, 210, 214.

4.6. Участник международного проекта: *"Past, Present, and Future of Active Experiments in Space"* (ISSI, Bern, Switzerland, 2016 – 2018. A.V. Streltsov — team leader).

Abstract

Experiments involving the generation of intense ULF/ELF/VLF waves and plasma structures in the Earth's magnetosphere and ionosphere with powerful HF transmitters have been conducted in many countries for more than 50 years. During the last ten to fifteen years, these experiments revealed physical phenomena related to the redistribution of electromagnetic power, density, mass, and momentum between the ionosphere and the magnetosphere. Quantitative understanding of these phenomena can be achieved only by combining observations from the ground observatories and

satellites with numerical simulations and theoretical studies considering the magnetosphere and the ionosphere as a single, unified, and very complex system. To reach such an understanding, we propose to form a team of nine internationally known scientists conducting experiments at major heating facilities in the world; doing observations in space and on the ground; running multi-fluid, multi-dimensional numerical simulations; and developing the most comprehensive theoretical concepts in the field. The team will have two major goals. The first goal is to perform a comprehensive review of results from the experiments focused on the generation of large-amplitude waves, density structures, and fluxes of energetic particles in the near-earth space environment conducted during the last decade. The second goal is to develop “the road map” for future active experiments for the next 5 – 10 years. The results from this project will be published in five original research papers and one review paper.

По результатам работы над проектом был опубликован обзор: A.V. Streltsov, J.-J. Berthelier, A.A. Chernyshov, V.L. Frolov, F. Honary, M.J. Kosch, R.P. McCoy, E.V. Mishin, M.T. Rietveld. *Past, Present and Future of Active Radio Frequency Experiments in Space*. // Space Science Review. (2018) 214:118, <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0549-7>. (№ 193)

4.7. Руководитель гранта РФФИ № 20-05-00166а: «*Генерация электрических токов в ионосфере Земли при модификации F2-области мощными КВ радиоволнами*» (2020 – 2022 гг.)

Аннотация.

Целью проекта является изучение характеристик токов, возбуждаемых в ионосфере Земли при модификации её F2-области мощными КВ радиоволнами, включая определение: 1) механизмов возбуждения токов, 2) амплитуды и пространственной структуры токов, 3) их времён развития и релаксации, 4) влияния токов на термодиффузионные процессы и на генерацию различных компонент искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ).

Особенностью предлагаемого проекта является развитие нового направления исследований, связанного с определением характеристик токов, которые возбуждаются в ионосфере Земли при модификации её F2-области мощными КВ радиоволнами. На генерацию токов в ВО ионосферы при развитии ИИТ указывалось во многих работах. Однако до сих пор не было проведено прямых измерений их величин и характеристик. Постановка таких задач исследований была стимулирована полученными при выполнении гранта РФФИ № 17-05-00475 результатами начатых на стенде СУРА измерений продольных токов в ВО ионосферы и в окружающей её фоновой плазме, а также

кольцевых токов, которые опоясывают возмущённую область. Измерения продольных токов были выполнены в НИРФИ на стенде СУРА впервые в мире, а их даже предварительные результаты оказались многообещающими.

Основу проекта составят результаты экспериментов, выполненных на нагревном стенде СУРА (НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Н. Новгород). В них, используя контролируемый нагрев ионосферной плазмы мощными КВ радиоволнами, можно проводить многократное возбуждение ИИТ и изучать характеристики её возбуждения, эволюции и релаксации. Для диагностики плазменных возмущений, которые генерируются в возмущённой области (ВО) ионосферы при её нагреве мощными радиоволнами и затем распространяются преимущественно вдоль силовых линий геомагнитного поля, будут использоваться: 1) измерения с борта низкоорбитальных искусственных спутников Земли (ИСЗ) SWARM, CSES, NOAA как в ионосфере над стендом СУРА, так и в магнитно сопряжённой к ней области; 2) зондирование ВО ионосферы сигналами высокоорбитальных ИСЗ навигационных систем GPS/GLONASS; 3) измерения свойств возмущений с помощью ракурсного рассеяния радиоволн СВ и КВ диапазонов и с помощью искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ).

Обработка экспериментальных данных будет сопровождаться сравнением полученных результатов с результатами выполненных исследований по лабораторному моделированию генерации и распространения плазменных возмущений в магнитоактивной плазме, а также с результатами численного моделирования распространения плазменных возмущений в верхней ионосфере. Это позволит составить более детальное представление об особенностях генерации токов в ВО ионосферы и определить их влияние на генерацию различных компонент ИИТ, детализировать особенности распространения искусственных плазменных возмущений на высотах выше максимума F2-слоя ионосферы, получить необходимые данные о динамических процессах, протекающих в возмущённой магнитной силовой трубке, и разработать способы оказания влияния на ионосферно-магнитосферные связи на основе модификации ионосферы мощными КВ радиоволнами.

Выполненные на среднеширотном стенде СУРА исследования генерации продольных токов позволяют сделать следующие выводы.

- При модификации среднеширотной ионосферы мощными КВ волнами О-поляризации вместе с развитием искусственных крупномасштабных неоднородностей плотности плазмы на ионосферных высотах наблюдается образование системы продольных электрических токов. Преимущественно это имеет место в условиях развития интенсивной искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ), когда

модификация ионосферы выполняется в вечерних или ночных условиях при мощности волны накачки (ВН) $P_{\text{эфф}} \geq 50$ МВт при частоте ВН ниже критической частоты F2-слоя. Однако даже при выполнении этих условий, но при сильной геомагнитной возмущённости, когда зона аврорального овала опускалась до широты стенда СУРА, индуцированные нагревом ионосферы электрические токи не обнаруживались аппаратурой спутника на фоне токов, индуцированных естественными сильными вариациями геомагнитного поля. На генерацию индуцированных работой стенда СУРА электрических токов и их характеристики сильное влияние оказывает присутствие спорадического слоя Es, когда он ослабляет интенсивность прошедшей мощной радиоволны и может даже экранировать полностью или в локальных областях её прохождение в верхнюю ионосферу.

- Измеренная величина плотности втекающего в ионосферу тока, который связывается с выносом электронов из сильно нагретой центральной части возмущённой области (ВО) ионосферы, составляет около $0.02 \mu\text{A}/\text{m}^2$ при оптимальных условиях модификации верхней ионосферы; в неоптимальных условиях величина плотности тока могла быть в 2 – 4 раза меньше. Было установлено, что не всегда положение областей с уменьшенными значениями N_e и увеличенной температурой T_e совпадает с положением областей с втекающими токами (т.е. с выносом электронов из центральной части ВО вверх вдоль силовых линий геомагнитного поля), как это следует из свойств термодиффузионных процессов. Иногда область втекающего тока соответствует области сильного разогрева плазмы, но при этом не регистрируется обычно наблюдающееся уменьшение её плотности. И наоборот, положение втекающего тока может совпадать с областью изменения концентрации плазмы в отсутствии видимых изменений её температуры. Отсутствие прямой корреляции между вариациями плотности (температуры) плазмы и пространственной структурой индуцированных нагревом ионосферы продольных электрических токов является характерной чертой ионосферных экспериментов.
- Область высот орбит спутников SWARM 450 – 500 км является промежуточной, где происходит изменение механизмов формирования ИИТ. На этих высотах уже не проявляются в полной мере свойства центральной части ВО ионосферы (например, не регистрируется характерное для неё сильное понижение плотности плазмы), но ещё могут наблюдаться сильные вариации температуры электронов T_e , присущие центральной части ВО. В то же время, эта область находится ниже высот ~ 600 км, где при модификации F2-области наблюдается формирование дактов с большой избыточной плотностью плазмы, но с достаточно слабыми вариациями T_e . Поэтому в зависимости от того, как далеко по высоте орбита спутника проходит относительно центральной части ВО, положение которой зависит от высоты отражения ВН и

ионосферных условий, могут наблюдаться различные соотношения между индуцируемыми нагревом плазменными возмущениями и связанными с этим электрическими токами.

- При интерпретации результатов спутниковых измерений необходимо учитывать тот факт, что, измерения характеристик плазменных возмущений бортовой аппаратурой спутника происходит только вдоль его орбиты. Это резко ограничивает объём получаемой необходимой информации о свойствах плазменных возмущений во всей ВО ионосферы и уменьшает возможности соотносить их с результатами других измерений. В таком случае, пространственная структура электрических токов в ионосфере, которая формируется вкладом многих плазменных возмущений, располагающихся на разных высотах, может сильно отличаться от её предполагаемых характеристик, если основываться только на результатах выполненного спутником единичного измерения на фиксированной высоте и только вдоль его орбиты. Это является причиной, почему только в некоторых случаях наблюдалась явная связь между областью сильного разогрева плазмы и пространственной структурой индуцированных продольных токов.
- Генерация индуцированных нагревом ионосферы электрических токов не наблюдается в условиях, когда: а) частота ВН была близка или была выше критической частоты F2-слоя; б) высота её отражения была ниже 200 км, где свойства ионосферы начинают резко изменяться из-за быстро возрастающего влияния нейтралов на характеристики плазмы и на взаимодействие мощной радиоволны с ней; в) эффективная мощность излучения ВН была меньше 20 МВт и не наблюдается полного развития всех компонент ИИТ; г) эксперименты проводились в освещённой ионосфере с развитыми E и F1 слоями, и наблюдалось формирование дефокусирующей линзы на высотах 130 – 180 км, что, с учётом высокого регулярного поглощения радиоволн в нижней ионосфере, приводит к сильному (до 20 дБ и больше) уменьшению транспортируемой в верхнюю ионосферу мощности ВН; д) имело место развитие сильной геомагнитной активности и граница авроральной ионосферы опускалась до широты расположения стенда СУРА, что приводило к изменению характера взаимодействия мощной радиоволны с плазмой; при этом уровень развития естественной турбулентности может превышать уровень искусственной, маскируя тем самым нагревные эффекты.
- Обнаруженная на стенде СУРА пространственная структура продольных токов была измерена ранее в лабораторных плазменных установках при расплывании локально нагретой области магнитоактивной плазмы (см., например, [Голубятников Г.Ю., Егоров С.В., Костров А.В. и др. // Физика плазмы. 1988. Т. 14, №4. С. 482-486]), где было показано, что она отвечает униполярному характеру термодиффузионного распространения плазменных возмущений с

генерацией вихревых токов, продольные компоненты которых определяются движением электронов вдоль магнитного поля, а поперечные — движением ионов поперёк него. При этом скорость процессов термодиффузии с униполярными коэффициентами во много раз превышает скорость расплывания плазменных возмущений в амбиполярном приближении.

Были также получены следующие результаты.

1. Выполненные эксперименты с использованием для зондирования внешней ионосферы с помощью бортовой аппаратуры спутников SWARM, DEMETER, и CSES показали, что часто в 100 – 200 км к северу от центра возмущённой магнитной силовой трубки регистрировалась выделенная область с сильными флуктуациями концентрации и температуры плазмы, которые по своим характеристикам были очень похожи на искусственные. При этом в этой области регистрировалась своя система втекающих и вытекающих электрических токов. Существование такой обособленной области может быть связано с тем, что при наклоне диаграммы направленности излучения ВН на 12° на юг формируется боковой лепесток, излучение в котором составляет по своему уровню около -8 дБ по сравнению с излучением в главном лепестке. Это соответствует эффективной мощности излучения в нём ~ 10 МВт, достаточной для генерации ИИТ достаточно высокого уровня в вечерних и ночных условиях. Заметим, что наклон диаграммы направленности на 12° на юг обычно используется в наших экспериментах, чтобы усилить интенсивность генерации ИИТ за счёт эффекта «магнитного зенита».
2. С помощью спутников DEMETER и SWARM были выполнены измерения вариаций плотности и температуры плазмы в магнитно сопряжённой к стенду СУРА области ионосферы. Обработка полученных данных показала, что размер вдоль орбиты ИСЗ обнаруженных вариаций Ne (до 10%) и Te (до 3%) в разных экспериментах (в разных геофизических условиях) мог изменяться от ~ 100 км до ~ 500 км. Было установлено, что искусственные вариации электронной плотности и температуры плазмы регистрировались в сеансах, когда имели место интенсивные высыпания энергичных электронов из радиационного пояса Земли, и не регистрировались, если они отсутствовали. Это позволяет сделать вывод, что именно потоки высыпающихся энергичных электронов приводят к генерации регистрируемых в магнитно сопряжённой к стенду СУРА интенсивных возмущений плотности и температуры плазмы.
3. В рамках проекта был выполнен анализ экспериментальных данных по стимулированию работой стенда СУРА инъекции энергичных электронов из радиационного пояса Земли как в области расположения

стенда, так и в магнитно сопряжённой к стенду ионосфере. Определены условия появления таких высыпаний и их связь с интенсивностью возбуждаемой ИИТ и насыщенностью радиационного пояса энергичными электронами. Показано, что интенсивность высыпаний в южном полушарии оказывается выше, чем в северном, отражая влияние Южно-атлантической магнитной аномалии. Выполненные исследования позволили прийти к заключению, что искусственная инжекция энергичных электронов радиационного пояса Земли на ионосферные высоты, стимулированная модификацией F2-слоя, имеет большую интенсивность и может рассматриваться как интенсивный источник для модификации ионизированной и нейтральной компонент атмосферы на высотах от её приземного слоя до высот до 300 км и выше.

Полученные при выполнении проекта результаты опубликованы в работах №№ 212, 214, 215, 217, 219, 220, 222.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ГРАНТА РФФИ № 20-05-00166

- I. При проведении экспериментальных исследований на среднеширотном стенде СУРА была обнаружена генерация продольных электрических токов, возбуждаемых при развитии крупномасштабных неоднородностей концентрации плазмы (с размерами поперёк геомагнитного поля больше 10 километров) при модификации F2-области ионосферы мощными КВ радиоволнами O-поляризации; в зависимости от геофизических условий изучены пространственные характеристики этих токов и измерена их амплитуда. Измерения выполнялись с помощью бортовой аппаратуры спутников серии SWARM при их пролёте высотах 450 – 500 км через возмущённую магнитную силовую трубку.

Анализ результатов выполненных экспериментов позволяет сделать следующие выводы:

- 1.1) Установлено, что перераспределение плотности плазмы при развитии искусственных её неоднородностей, вызванное нагревом магнитоактивной плазмы F2-области ионосферы мощными КВ радиоволнами, происходит с возбуждением вихревых электрических токов. При этом, внутри нарастающей неоднородности концентрации эти токи соответствуют выносу электронов плазмы из области её

разогрева вдоль силовых линий геомагнитного поля (втекающий ток), на периферии неоднородности они имеют обратное направление. Таким образом, вдоль орбиты спутника наблюдается смена направления токов с вытекающего на втекающий и затем обратно на вытекающий. В случае генерации вдоль орбиты спутника нескольких неоднородностей его аппаратурой регистрируется образование череды втекающих и вытекающих токов. Эти токи имеют наибольшую плотность (до 0.02 мкА/м^2) при модификации ионосферы в оптимальных условиях, когда измерения проводятся в поздние вечерние или в ночные часы при достаточно высоких мощностях волны накачки (ВН) (как правило, при $P_{\text{эфф}} \geq 50 \text{ МВт}$), когда частота ВН не превышает 6 МГц , оставаясь несколько ниже критической частоты f_{0F2} , и наблюдается развитие интенсивной искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ) при взаимодействии мощной радиоволны О-поляризации с плазмой верхней ионосферы Земли. При этом полный втекающий ток по всему горизонтальному сечению возмущённой области ионосферы (ВО) радиусом $\sim 40 \text{ км}$ приблизительно равен 100 А . В неоптимальных условиях величина плотности продольного тока была в $2 - 4$ раза меньше. Численное моделирование показало, что выталкиваемая вдоль силовых линий геомагнитного поля плазма формирует на высотах внешней ионосферы области с повышенной её концентрацией — дакты с избыточной плотностью плазмы.

- 1.2) Генерация индуцированных нагревом ионосферы электрических токов не наблюдается в условиях, когда: а) частота ВН была выше критической частоты F2-слоя (нагрев "на просвет"); б) высота её отражения была ниже 200 км , где свойства ионосферы начинают резко изменяться из-за быстро возрастающего влияния нейтралов на характеристики плазмы и на взаимодействие мощной радиоволны с ней; в) эффективная мощность излучения ВН была меньше 20 МВт и не наблюдается полного развития всех компонент ИИТ; г) эксперименты проводились в освещённой ионосфере с развитым F1 слоем и наблюдалось формирование дефокусирующей линзы на высотах $130 - 180 \text{ км}$, что, с

учётом высокого регулярного поглощения радиоволн в нижней ионосфере, приводит к сильному (до 20 дБ и больше) уменьшению транспортируемой в верхнюю ионосферу мощности ВН; д) имело место развитие сильной геомагнитной активности и граница авроральной ионосферы опускалась до широты расположения стенда СУРА, что приводило к изменению характера взаимодействия мощной радиоволны с плазмой; при этом уровень развития естественной турбулентности может превышать уровень искусственной, маскируя тем самым нагревные эффекты.

- 1.3) В случае генерации единичной неоднородности положение области с уменьшенным значением концентрации N_e и увеличенной температурой T_e совпадает с положением области с втекающим током, в которой наблюдается вынос электронов из центральной части ВО вверх вдоль силовых линий геомагнитного поля. Подобная структура возмущений плотности и температуры плазмы отвечает структуре продольных токов, ранее измеренных в лабораторных экспериментах в условиях формирования уединённой неоднородности плотности плазмы. Следует отметить, что в нагревных ионосферных экспериментах такая корреляция положения плазменных возмущений и токов часто отсутствует. Это связано с тем, что в ВО ионосферы генерация возмущений плотности плазмы определяется несколькими механизмами и происходит в большой области пространства. Поэтому эти возмущения имеют сложную пространственную структуру как в горизонтальной плоскости, так и по высоте в отличие от уединённой неоднородности, с которой обычно имеют дело в лабораторных экспериментах и в модельных расчётах и которая редко реализуется в ионосферных экспериментах.
- 1.4) Обнаруженная на стенде СУРА пространственная структура продольных токов для уединённой неоднородности концентрации плазмы исследовалась ранее в лабораторных плазменных установках ИПФ РАН (г. Н. Новгород) при расплывании локально нагретой области магнитоактивной плазмы (см., например, [Голубятников Г.Ю., Егоров С.В., Костров А.В. и др. // Физика плазмы. 1988. Т. 14, №4. С. 482-

486]), где было показано, что она отвечает униполярному характеру термодиффузионного распространения плазменных возмущений с генерацией вихревых токов, продольные компоненты которых определяются движением электронов вдоль магнитного поля, а поперечные — движением ионов поперёк него. При этом скорость процессов термодиффузии с униполярными коэффициентами во много раз превышает скорость расплывания плазменных возмущений в амбиполярном приближении.

- 1.5) Поскольку генерируемые на ионосферных высотах втекающий и вытекающий продольные токи внизу замыкаются на высотах высокопроводящей E-области ионосферы, в ней под их влиянием возбуждаются плазменные неустойчивости, вызывающие генерацию искусственных ионосферных неоднородностей плотности плазмы, которые обнаруживаются экспериментально как возбуждение искусственного E_spread.

II. На стенде СУРА были выполнены детальные исследования характеристик искусственной инжекции энергичных электронов из радиационного пояса Земли на ионосферные высоты. Измерения проводились при непрерывном режиме излучения немодулированной мощной радиоволны O-поляризации в условиях наклона диаграммы направленности излучения ВН на 12 град. от вертикали к югу (в область «магнитного зенита», чтобы увеличить эффективность взаимодействия мощной радиоволны с плазмой). Регистрация искусственной инжекции (высыпаний) энергичных электронов на ионосферные высоты осуществлялась с помощью спутников DEMETER и NOAA (с 2022 г. измерения также проводились с помощью бортовой аппаратуры спутника «Метеор-2»). Индуцированная нагревом ионосферной плазмы инжекция энергичных электронов имела следующие характеристики:

- 2.1) Было установлено, что наиболее эффективная стимуляция инжекции энергичных электронов в диапазоне их энергий 40 – 612 кэВ (с максимальными потоками искусственной инжекции для энергий электронов 100 – 200 кэВ) имеет место в поздние вечерние и ночные часы с наиболее низкой эффективностью в дневных условиях. Она регистрируется в области пространства

до 1500 – 2000 км вдоль меридиана и до 400 – 500 км поперёк его. Такая структура инъекции объясняет наблюдающуюся большую область пространства, где возможна регистрация влияния локального нагрева ионосферной плазмы пучком мощных радиоволн на проходящие в ней процессы и генерацию вторичной ИИТ.

- 2.2) Эффективность инъекции энергичных электронов в магнитно сопряжённой к стенду ионосфере (в южном полушарии) выше по сравнению с областью над стендом СУРА (в северном полушарии). Это различие объясняется более низкой напряжённостью геомагнитного поля в Южно-Атлантической магнитной аномалии.
- 2.3) Было показано, что содержание энергичных электронов в радиационном поясе Земли оказывает более сильное влияние на уровень инъекции, по сравнению с изменением интенсивности генерируемой ИИТ.
- 2.4) Было установлено, что искусственная инъекция энергичных электронов на ионосферные высоты обнаруживается и при модификации дневного F2-слоя ионосферы мощными КВ радиоволнами О-поляризации, когда приведённая эффективная мощность излучения $VH P_{эфф}^*$, определённая с учётом регулярного поглощения радиоволн в нижних слоях ионосферы и её уменьшения в силу иных причин, не превышает 3 – 10 МВт и на ионограммах вертикального зондирования могут даже не обнаруживаться такие обычно наблюдаемые в вечернее и ночное время суток эффекты, как генерация искусственного F_{spread} , подавление О-ветви за счёт её аномального ослабления и уменьшение интенсивности Х-ветви за счёт её рассеяния в свою моду, являющиеся признаками высокого уровня генерации искусственных ионосферных неоднородностей различных масштабов и ИИТ, в целом. В таких условиях вызванная нагревом ионосферы инъекция энергичных электронов на ионосферные высоты регистрировалась только тогда, когда имел место высокий уровень заполнения радиационного пояса Земли энергичными электронами. В силу вышесказанного, искусственная инъекция является обычно наблюдаемым явлением и легко обнаруживается в различных геофизических процессах.

- 2.5) Было определено, что характерное время развития искусственной инъекции энергичных электронов составляет 1 – 7 минут, завися от ионосферных условий проведения измерений, геомагнитной возмущённости, режима излучения ВН и её эффективной мощности. После окончания нагрева ионосферной плазмы мощными КВ радиоволнами восстановление инъекции электронов до её естественного уровня продолжается в зависимости от ионосферных условий от нескольких минут до 10 – 15 мин, причём более короткие времена восстановления наблюдаются в сеансах с более длинными временами развития инъекции (или в неоптимальных условиях модификации ионосферной плазмы).
- 2.6) Выполненные оценки позволили установить, что при модификации утренней и вечерней ионосферы мощными КВ радиоволнами при оптимальном взаимодействии мощной радиоволны с плазмой верхней ионосферы вносимая в ионосферу энергичными электронами с $E \geq 20$ кэВ мощность составляет в спокойных геомагнитных условиях около 1 кВт, она может достигать величины 10 кВт в возмущённых геомагнитных условиях; в полуденные часы она, как правило, не превышает 0.1 кВт. В ночное время суток вносимая в ионосферу мощность высокоэнергичных электронов может достигать значений 100 – 200 кВт; в возмущённых геомагнитных условиях, когда содержание энергичных электронов в радиационном поясе может сильно увеличиваться, мощность высыпаний может быть в несколько раз больше, доходя до 500 кВт и более, величина которой становится сравнимой с генерируемой передатчиками станда ВЧ мощностью около 600 кВт.
- 2.7) Как показали исследования, потоки инжектируемых энергичных электронов способны вызывать дополнительную ионизацию нейтральных атомов и молекул на высотах 50 – 120 км или их возбуждение до ридберговских уровней, влиять на содержание озона на высотах мезосферы, на генерацию крупномасштабных неоднородностей концентрации плазмы на высотах верхней и внешней ионосферы и др., а также изменять условия взаимодействия мощной радиоволны с ионосферной плазмой.

III. Выполненные на стенде СУРА исследования позволяют утверждать, что индуцированная модификацией ионосферной плазмы мощными КВ радиоволнами инжекция энергичных электронов из радиационного пояса Земли на ионосферные высоты и вызванная ими генерация микроволнового электромагнитного излучения может рассматриваться как мощный источник эффективной генерации вторичной ИИТ и модификации нейтральной компоненты атмосферы Земли в широком диапазоне её высот и на больших удалениях от стенда СУРА. Воздействия на нейтральную атмосферу Земли на приземных и мезосферных высотах осуществляется через:

- a) изменение содержания озона в мезосфере на высотах $h \sim 50 - 60$ км, что влияет на высотные характеристики распределения ультрафиолетового излучения в атмосфере и может приводить к изменению её теплового баланса [Куликов Ю.Ю., Григорьев Г.И., Красильников А.А., Фролов В.Л. // Изв. вузов Радиофизика, 2012. Т. 55, № 1-2, с. 57-65];
- b) ионизацию атомов и молекул атмосферы на высотах 60 – 120 км, которая приводит к увеличению поглощения НЧ, СВ и КВ радиоволн, проходящих через эту область, и влияет на характеристики физико-химических процессов на высотах мезосферы [Л.Ф. Черногор, В.Л. Фролов, В.В. Барабаш. // Изв. вузов. Радиофизика, 2014. Т. 57, № 2, с. 110-128];
- c) генерацию микроволнового излучения, которое оказывает влияние на механизмы конденсации водяного пара в приземной атмосфере и образование водных кластеров (конденсационно-кластерный механизм) [А.В. Троицкий, В.Л. Фролов, А.В. Востоков, И.В. Ракуть. // Изв. вузов. Радиофизика, 2019. Т. 62, № 10, с. 759-768];
- d) возмущение глобальной электрической цепи за счёт генерации электрических токов на ионосферных высотах, что может оказывать влияние на формирование облаков.

Представленные выше три результата являются самыми значимыми, которые были получены при выполнении проекта. Они не имеют аналогов в отечественных и в зарубежных исследованиях, носят фундаментальный характер и отвечают мировому уровню проводимых исследований, существенно дополняя ранее полученные сведения,

касающиеся свойств взаимодействия мощных радиоволн с ионосферной (магнитоактивной) плазмой и характеристик генерации и эволюции ИИТ. Важной их особенностью является то, что они были получены на среднеширотном нагревном стенде СУРА в более спокойных геомагнитных условиях по сравнению с авроральными широтами, где расположены два других работающих сегодня стенда HAARP (Аляска, США) и EISCAT-Heating (Сев. Норвегия). Такие благоприятные условия позволили провести впервые в мире измерения характеристик индуцированных при нагреве верхней ионосферы продольных токов бортовой аппаратурой ИСЗ, изучить свойства искусственной инъекции энергичных электронов из радиационного пояса Земли на ионосферные высоты, определить энергетику такой инъекции и предложить рассматривать её как новый мощный источник эффективного воздействия на атмосферу Земли в условиях средних широт.

При выполнении гранта проводились также исследования по следующим направлениям:

- IV. Изучение характеристик дактов плотности плазмы, формирующихся на высотах внешней ионосферы при модификации F2-слоя мощными КВ радиоволнами.

Была проведена обработка всего объёма данных радиотомографических измерений, выполненных на стенде СУРА в 2008 – 2018 гг., с помощью которых можно проводить исследования пространственной структуры крупномасштабных (с размерами $L \geq 20$ км) неоднородностей плотности плазмы вдоль орбиты спутника одновременно во всём интервале высот от 200 до 800 км, включая изучение характеристик дактов с увеличенной плотностью плазмы и перемещающихся на ионосферных высотах волновых возмущений. Установлено, что: а) дакты плотности плазмы регистрируются на высотах выше 500 км внутри магнитной силовой трубки, опирающейся на область с сильно развитой ИИТ вблизи высоты отражения ВН, что дакты вытянуты вдоль геомагнитного поля, а также, что их размер в поперечном к магнитному полю направлении составляет 80 – 100 км на высотах 500 – 600 км, увеличиваясь до 200 – 300 км на высотах 800 – 1000 км.

- V. Анализ связи между потенциалом корпуса спутника и температурой электронов окружающей спутник плазмы.

Используя данные, полученные при измерении плазменных возмущений бортовой аппаратурой ИСЗ DEMETER, была детально проанализирована связь между потенциалом корпуса спутника и температурой электронов в окружающей спутник плазме. Установлено, что при пролёте спутника через область с искусственными ионосферными неоднородностями высокой интенсивности имеет место сильная корреляция между отрицательным значением потенциала корпуса спутника и электронной температурой по сравнению со случаем, когда неоднородности были слабы или отсутствовали. Учитывая, что зашумленность канала измерения T_e выше, чем канала измерения потенциала корпуса спутника, открывается возможность обнаружения более слабых вариаций T_e по данным измерения потенциала.

- VI. Выполнялись измерения характеристик ИИТ и распространения радиоволн с помощью китайского спутника CSES (ZH-1). Эксперименты касались: а) измерения характеристик плазменных возмущений в условиях дневной и ночной ионосферы; б) определения условий генерации ОНЧ волн при модификации ионосферы модулированным по амплитуде мощным радиоизлучением; в) измерения характеристик диаграммы направленности излучающей антенны стенда СУРА. По всем этим направлениям получены первые результаты. Продолжается накопление экспериментальных данных.
- VII. Проводились эксперименты по возбуждению перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) и внутренних гравитационных волн (ВГВ) при периодическом нагреве ионосферы мощными радиоволнами с периодом ≥ 10 мин. Проведены эксперименты с моноимпульсным режимом излучения мощной радиоволны. Собран обширный объём экспериментальных данных, который в настоящее время систематизируется и анализируется.
- VIII. Проводилось изучение пространственной структуры крупномасштабных возмущений концентрации плазмы с помощью зондирования возмущённой области ионосферы сигналами

навигационных спутников GPS. За последние несколько лет измерений собран обширный банк экспериментальных данных, позволяющий определять пространственные и временные характеристики крупномасштабных неоднородностей, строить двумерные карты вариаций полного электронного содержания в большой области пространства над станцией СУРА, измерять скорость переноса плазменных возмущений вдоль силовых линий геомагнитного поля. В настоящее время проводится предварительный анализ экспериментальных данных и их отбор и систематизация для последующей детальной обработки.

Большинство перечисленных выше полученных экспериментальных данных уже опубликовано и доложено на различного рода конференциях (см. перечень публикаций по гранту, приведённому ниже), другие — анализируются и готовятся к публикации.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ НАПРАВЛЕНИЙ ИССЛЕДОВАНИЙ.

В планах работы станция СУРА в ближайшее время предполагается:

- 1) продолжить изучение свойств генерации электрических токов, возбуждаемых в ВО ионосферы при развитии её неоднородной структуры, и инъекции энергичных электронов из радиационного пояса Земли на ионосферные высоты, стимулированной модификацией ионосферы мощными КВ радиоволнами, уделяя особое внимание сравнению характеристик наблюдаемых эффектов при различных поляризациях ВН;
- 2) разработать методы регистрации возмущений нейтральной компоненты атмосферы Земли, индуцируемых при нагреве ионосферной плазмы мощными радиоволнами;
- 3) сравнить характер эволюции плазменных возмущений, наблюдаемой в ионосферной плазме и в лабораторных плазменных установках, включая в анализ более широкий набор параметров плазменной турбулентности;
- 4) провести дополнительные исследования характеристик крупномасштабных неоднородностей концентрации плазмы, возбуждаемых в ионосфере при её модификации мощными КВ

радиоволнами, используя данные измерений с помощью GPS-зондирования ионосферы и радиотомографии;

- 5) продолжить изучение характеристик плазменных возмущений, возбуждаемых в магнитно сопряжённой к стенду СУРА ионосфере, изучить механизмы, приводящие к их появлению;
- 6) Продолжить сравнительные исследования характеристик плазменной турбулентности, возбуждаемой в космической плазме и в лабораторных плазменных установках. Важно подчеркнуть, что исследования одних явлений более эффективно проводить в ионосфере, в условиях практически безграничной плазмы, свойства которой, однако, подвержены сильным естественным вариациям и могут значительно изменяться от эксперимента к эксперименту, при этом некоторые характеристики плазмы оказываются трудно измеряемыми и контролируемыми; другие — в лабораторных плазменных установках с использованием широкого набора помещённых непосредственно в плазму различных диагностических средств, но в условиях ограничений, характерных для плазменных установок.

РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ЗА ВРЕМЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОЕКТА.

Список публикаций по проекту за 2020 г.

Статьи:

- 1) A.O. Ryabov, V.L. Frolov. Relationship between the potential of an artificial Earth satellite and the temperature of electrons in the upper ionosphere perturbed by high-power short-wave radiation of the “Sura” ground-based facility. // Radiophysics and Quantum Electronics, 2020. Vol. 62(10), pp. 657-666, doi: 10.1007/s11141-020-10011-5.
- 2) Xuemin Zhang, Vladimir Friolov, Xuhui Shen, Yalu Wang, Chen Zhou, Hengxin Lu, Jianpin Huang, Alexander Ryabov, Dulin Zhai. The Electromagnetic Emissions and Plasma Modulations at Middle Latitudes Related to SURA-CSES Experiments in 2018. // Radio Science, 2020. 55(8), e2019RS007040. <https://doi.org/10.1029/2019RS007040>
- 3) В.Л. Фролов, Р.Ю. Лукьянова, А.О. Рябов, И.А. Болотин. Спутниковые измерения плазменных возмущений и электрических токов, индуцируемых в среднеширотной ионосфере при её модификации

мощными КВ радиоволнами. // *Космические исследования*, 2020
(принята в печать).

Тезисы докладов:

- 4) A.G. Demekhov, V.L. Frolov, A.O. Ryabov. Formation of artificial plasma ducts during HF ionospheric heating: comparison of modeling and observations. // *URSI GASS 2020, Rome, Italy, 29 August – 5 September 2020*.
- 5) А.О. Рябов, В.Л. Фролов. Высыпания энергичных электронов при модификации ионосферы мощным радиоизлучением стендом СУРА над возмущенной стендом областью. // *Труды Пятнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 10-14 февраля 2020 г., ИКИ РАН, Москва, Россия. С. 109.*
- 6) А.О. Рябов, В.Л. Фролов. Высыпания электронов высоких энергий в магнитосопряженной относительно стенда СУРА области ионосферы // *Труды Пятнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 10-14 февраля 2020 г., ИКИ РАН, Москва, Россия. С. 86.*
- 7) Р.Ю. Лукьянова, В.Л. Фролов, А.О. Рябов. Продольные токи и плазменные неоднородности, индуцированные высокочастотным нагревом стенда СУРА, по наблюдениям спутников SWARM на высотах 400 – 500 км. // *Труды конференции «Физика плазмы в солнечной системе», 10 – 14 февраля 2020. Москва, ИКИ РАН. С. 403.*
- 8) R. Lukianova, V. Frolov, A. Ryabov. SWARM observations of the artificial ionospheric plasma disturbances and field-aligned currents induced by the SURA power HF heating. // *EGU GA 2020. Report EGU2020-11746.*
- 9) Р.Ю. Лукьянова, В.Л. Фролов, А.О. Рябов. Плазменные возмущения и токовые системы, индуцированные нагревом среднеширотной ионосферы мощными КВ радиоволнами. // *Материалы 18-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2020. С. 403. DOI 10.21046/18DZZconf-2020a.*
- 10) В.Л. Фролов. Новые представления о генерации искусственной ионосферной турбулентности. // *VI Всероссийская научная конференция «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». С.-Петербург, 16 – 18 сентября 2020 г. Материалы конференции, с. 26 – 30.*

- 11) A.O. Ryabov, V.L. Frolov. Artificial precipitation of energetic electrons from the Earth's radiation belt. // Atmosphere, ionosphere, safety, 2020, Kaliningrad. Proceedings, P. 73-76.
- 12) А.О. Рябов, В.Л. Фролов. Взаимосвязь между потенциалом искусственного спутника Земли и температурой электронов в верхней ионосфере. // Труды конференции «Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества», 6-8 октября 2020 г., Омск, Россия. С. 44-45.

Список публикаций по проекту за 2021 г.

Статьи:

- 1) 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, 2021. Т. 59, № 4, с. 275-295.
- 2) Yasyukevich Yu.V., Syrovatskii S.V., Padokhin A.M., Frolov V.L., Vesnin A.M., Zatolokin D.A., Kurbatov G.A., Zagretdinov R.V., Pershin A.V., Yasyukevich A.S. GPS positioning accuracy during the 2016 September and 2010 August campaigns at the SURA heater // XXXIVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS), 2021, pp. 1-3, doi: 10.23919/URSIGASS51995.2021.9560199. (Статья в трудах URSI).
- 3) В.Л. Фролов, А.О. Рябов, А.Д. Акчурин. Характеристики искусственной инжекции энергичных электронов из радиационного пояса Земли в среднеширотную ионосферу и их зависимость от геофизических условий. // Космические исследования, 2021 (направлена в печать).

Тезисы докладов:

- 4) В.Л. Фролов, А.О. Рябов, И.А. Болотин, А.Д. Акчурин. Суточная зависимость характеристик высыпаний энергичных электронов, стимулированных мощным радиоизлучением стенда СУРА. // XXVII Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн» (РРВ'2021). 28 июня – 3 июля 2021, Калининград, Россия. Тезисы докладов, стр. 983-987.
- 5) В.Л. Фролов. Современные представления о механизмах генерации ИИТ. // XXVII Всероссийская открытая научная конференция

- «Распространение радиоволн» (РРВ'2021). 28 июня – 3 июля 2021, Калининград, Россия. Тезисы докладов, стр. 988-993.
- 6) В.Л. Фролов, А.О. Рябов, Р.Ю. Лукьянова. Измерение пространственной структуры электрических токов, индуцированных в среднеширотной ионосфере при её модификации мощными радиоволнами. // XXVII Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн» (РРВ'2021). 28 июня – 3 июля 2021, Калининград, Россия. Тезисы докладов, стр. 1006-1011.
- 7) Фролов В.Л., Лукьянова Р. Ю., Рябов А. О., Болотин И.А. Спутниковые измерения плазменных возмущений и электрических токов, индуцированных в среднеширотной ионосфере при её модификации мощными КВ радиоволнами. // XIX международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». ИКИ РАН, 15-19 ноября 2021 г. Тезисы докладов, XIX.I.57, с. 424.

Список публикаций по проекту за 2022 г.

Статьи и диссертация:

- 1) Фролов В.Л., Рябов А.О., Акчурин А.Д. Характеристики искусственной инжекции энергичных электронов из радиационного пояса Земли в среднеширотную ионосферу и их зависимость от геофизических условий. // Косм. исследования. 2022. Т. 60. № 4. С. 285-306.
- 2) В.Л. Фролов, Куликов Ю.Ю., Троицкий А.В. Искусственная инжекция энергичных электронов из радиационного пояса Земли — новый канал модификации ионизированной и нейтральной компонент атмосферы. // Химическая Физика, 2022. Т. 41, № 10, с. 38-64.
- 3) Рябов А.О. Диссертация (кф-мн): «Свойства искусственных возмущений верхней ионосферы Земли, возбуждаемых при нагреве F_2 -слоя мощными КВ радиоволнами (по результатам спутниковых исследований)». Защита состоялась 16 февраля 2022 г. в диссертационном совете ННГУ им. Н.И. Лобачевского по специальности 1.3.4. – Радиофизика.

Тезисы докладов:

- 4) Фролов В.Л., Рябов А.О., Болотин И.А. Стимулированная инжекция электронов высоких энергий из радиационного пояса Земли в

- ионосферу. // XVII ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе». 1 – 11 февраля 2022 г. Тезисы докладов, с. 178.
- 5) Лукьянова Р.Ю., Фролов В.Л., Рябов А.О. Новые результаты координированных экспериментов по модификации среднеширотной ионосферы: нагревный стенд СУРА и спутники SWARM. // XVII ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе». 1 – 11 февраля 2022 г. Тезисы докладов, с. 184.
- 6) Фролов В.Л. Новый источник искусственного возмущения ионизированной и нейтральной компонент атмосферы Земли, индуцированный нагревом ионосферы мощными КВ радиоволнами. // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 395. DOI 10.21046/20DZZconf-2022a.
- 7) Лукьянова Р.Ю., Фролов В.Л., Рябов А.О. Спутниковые наблюдения структуры искусственных ионосферных неоднородностей и локальных токовых систем, генерируемых при модификации среднеширотной ионосферы нагревным стендом СУРА. // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 373. DOI 10.21046/20DZZconf-2022a.
- 8) Рябов А. О., Фролов В.Л. Взаимосвязь между потенциалом искусственного спутника Земли и температурой электронов в верхней ионосфере в авроральной области. // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 388. DOI 10.21046/20DZZconf-2022a.