

СОВРЕМЕННЫЙ НАГРЕВНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ СРЕДНИХ ШИРОТ

MODERN HEATING FACILITY FOR RESEARCH INTO THE MID-LATITUDE IONOSPHERE

Р.В. Васильев

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, roman_vasilyev@iszf.irk.ru*

А.Г. Сетов

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, setov@iszf.irk.ru*

В.Л. Фролов

*Научно-исследовательский радиофизический институт,
Нижний Новгород, Россия, frolov.418@nirfi.sci-nnov.ru
Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Казань, Россия, frolov@nirfi.unn.ru*

К.Г. Раговский

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, ratovsky@iszf.irk.ru*

А.Б. Белецкий

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, beletsky@iszf.irk.ru*

А.В. Ойнац

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, oinats@iszf.irk.ru*

Ю.В. Ясюкевич

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, yasukevich@iszf.irk.ru
Иркутский государственный университет,
Иркутск, Россия, yasukevich@iszf.irk.ru*

А.В. Медведев

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, medvedev@iszf.irk.ru*

R.V. Vasilyev

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, roman_vasilyev@iszf.irk.ru*

A.G. Setov

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, setov@iszf.irk.ru*

V.L. Frolov

*Radiophysical Research Institute
Nizhny Novgorod, Russia, frolov.418@nirfi.sci-nnov.ru
Kazan (Volga region) Federal University
Kazan, Russia, frolov@nirfi.unn.ru*

K.G. Ratovsky

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, ratovsky@iszf.irk.ru*

A.B. Beletsky

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, beletsky@iszf.irk.ru*

A.V. Oinats

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, oinats@iszf.irk.ru*

Yu.V. Yasyukevich

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, yasukevich@iszf.irk.ru
Irkutsk State University,
Irkutsk, Russia, yasukevich@iszf.irk.ru*

A.V. Medvedev

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, medvedev@iszf.irk.ru*

Аннотация. Создание новых устройств для проведения исследований в области физики верхней атмосферы и околоземного космического пространства, на которых можно проводить контролируемые эксперименты по модификации ионосферы мощным коротковолновым излучением, является актуальной задачей сегодняшнего дня в области солнечно-земной физики, прогнозирования космической погоды, эксплуатации спутниковых группировок в околоземном космическом пространстве, радиосвязи и радиолокации. В работе описывается современный нагревный стенд, разрабатываемый в рамках Национального гелиогеофизического комплекса Российской академии наук, приводится обзор задач, которые можно решать с его помощью, обсуждаются его основные технические характеристики, и дается описание окружающей стенд наблюдательной инфраструктуры. В работе обосновывается перспективность создания в средних широтах Восточной Сибири нагревного стенда, который может излучать в частотном диапазоне 2.5–6.0 МГц с эффективной мощностью порядка нескольких сотен мегаватт. Важно, что стенд будет находиться в окружении многофункциональных инструментов, таких как совре-

Abstract. The development of new devices for research in physics of the upper atmosphere and near-Earth space, which can be used to carry out controlled experiments on the modification of the ionosphere by powerful short-wave radiation, is an urgent task of modern solar-terrestrial physics, space weather, operation of satellite constellations in near-Earth space, radio communications, and radar. The paper describes a modern heating facility, created within the framework of the National Heliogeophysical Complex of the Russian Academy of Sciences. We review the tasks facing the heater, discuss its main technical characteristics, and describe the capability of the observational infrastructure surrounding the heating facility. The paper justifies the long-term benefits of the development of a heating facility at middle latitudes of Eastern Siberia, which can radiate in a frequency range 2.5–6.0 MHz with an effective power of the order of several hundred megawatts. It is important that the heater will be surrounded by such multifunctional instruments as the modern incoherent scatter radar, mesostratospheric lidar, observational systems that can provide a wide range of possibilities for diagnosing artificial plasma disturbances and artificial airglow structures.

менный радар некогерентного рассеяния, мезосферный и стратосферный лидар, а также набора современных оптических и радиофизических наблюдательных систем, которые могут обеспечить широкие возможности диагностики искусственных плазменных возмущений и искусственных образований оптического свечения верхней атмосферы.

Ключевые слова: радиофизика, ионосфера, нагревный стенд, солнечно-земная физика, космическая погода.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение особенностей взаимодействия мощного коротковолнового (КВ) радиоизлучения с ионосферой Земли относится к числу наиболее активно разрабатываемых в последние десятилетия областей физики плазмы и солнечно-земных связей. История исследований активных воздействий на ионосферу берет свое начало в 60–70-х гг. XX столетия [Шлюгер, 1974; Гуревич, 2007]. Возрастание интереса к этой тематике диктуется разнообразными возможными приложениями, связанными с нагревом плазмы мощным коротковолновым радиоизлучением. Принципиальным моментом здесь является то, что взаимодействие мощных электромагнитных волн с плазмой сопровождается развитием целого ряда фундаментальных нелинейных явлений. К ним относятся развитие параметрических неустойчивостей плазмы и возбуждение сильной плазменной турбулентности, генерация искусственных ионосферных неоднородностей с размерами поперек линий геомагнитного поля от долей метра до десятков километров, модификация профиля плотности плазмы под действием сил светового и теплового давления, ускорение электронов до сверхтепловых энергий и генерация оптического излучения в результате ударного возбуждения ускоренными электронами атомов нейтральной компоненты атмосферы, генерация вторичного электромагнитного излучения в областях сильно развитой плазменной турбулентности, возбуждение электрических полей и токов в плазме с развитой искусственной ионосферной турбулентностью (ИИТ), стимулированное нагревом высыпание энергичных электронов из радиационного пояса Земли и другие процессы. Вместе это приводит к общему сильному нагреву плазмы вблизи высоты отражения мощной радиоволны, когда температура электронов плазмы может увеличиться в несколько раз [Гуревич, 2007]. Сегодня ионосфера может рассматриваться как природная плазменная лаборатория, в которой возможно проведение исследований с использованием ИИТ, генерируемой посредством нагрева плазмы мощными радиоволнами специально построенных наземных радиосредств — нагревных стендов [Ерухимов, Генкин, 1992; Perkins et al., 1974; Gurevich, 1978; Stubbe, Hagfors, 1997; Streltsov et al., 2018].

Необходимо отметить, что мощности работающих сегодня в мире радиостанций различного назначения достаточны, чтобы вызывать заметные

Keywords: radiophysics, ionosphere, heating facility, solar-terrestrial physics, space weather.

изменения характеристик ионосферной плазмы. Это означает, что ионосфера в настоящее время фактически постоянно находится в возбужденном состоянии и это необходимо принимать во внимание при рассмотрении протекающих в ней процессов.

Исследования модификации ионосферы Земли мощными радиоволнами в разное время проводились с использованием более десятка различных нагревных стендов [Фролов, 2017]. Сегодня они проводятся на четырех [Streltsov et al., 2018]: два работающих стенда расположены в высоких широтах (EISCAT-Heating, Северная Норвегия и HAARP, Аляска, США), один в средних широтах (СУРА, Россия) и один в низких широтах (Аресибо, Пуэрто-Рико, США). Продолжающиеся уже более пятидесяти лет целенаправленные исследования в области взаимодействия мощного коротковолнового радиоизлучения с плазмой, проводимые в России, США и странах Западной Европы, позволили выявить основные закономерности развития ИИТ и построить эмпирические и теоретические модели генерации различных ее компонент. Основные результаты этих исследований изложены в монографиях [Фролов, 2017; Gurevich, 1978], обзорах [Гуревич, 2007; Грач и др., 2016; Erukhimov et al., 1987; Stubbe, 1996; Stubbe, Hagfors, 1997; Leyser, 2001; Streltsov et al., 2018], спецвыпусках журналов [Изв. вузов. Радиофизика. 1999, 2005, 2008, 2012; J. Geophys. Res. 1970; J. Atmos. Terr. Phys. 1982, 1985, 1997] и в цитируемых во всех этих источниках многочисленных публикациях.

Научные задачи, которые с помощью нагревных стендов могут решаться в радиофизике, исследованиях верхней атмосферы Земли и космической погоды, физике магнитосферы и радиационных поясов, а также в лазерном синтезе, описаны в работе [Streltsov et al., 2018]. Среди явлений, которые можно исследовать в средних широтах, используя нагревный стенд, отметим следующие.

- Радиофизика и распространение радиоволн в ионосфере:
 - создание искусственных плазменных слоев и связанные с этим эффекты распространения КВ- и УКВ-радиоволн;
 - генерация ОНЧ-, УНЧ- и КНЧ-радиоволн и исследование особенностей их распространения;
 - генерация искусственных неоднородностей плазмы и их влияние на распространение радиоволн разных диапазонов и спутниковые системы связи и навигации;

- генерация и исследование искусственного радиоизлучения ионосферы;
- генерация и исследование Люксембург-Горьковского эффекта;
- коротковолновая радиолокация атмосферы, околоземного космического пространства и ближнего космоса.

- Верхняя атмосфера, мезосфера, термосфера и мезосферно-термосферные связи:

- генерация искусственных периодических неоднородностей и исследование поведения плотности нейтральной компоненты и ее температуры в областях D, E и F ионосферы;

- генерация искусственного оптического свечения верхней атмосферы и искусственная ионизация атмосферы на ионосферных высотах;

- ускорение электронов в областях с сильно развитыми ленгмюровской и верхнегибридной турбулентностями, индуцированными мощной радиоволной;

- нагрев термосферы и генерация волновых возмущений плотности нейтральной компоненты (перемещающиеся ионосферные возмущения, акустико-гравитационные волны и инфразвук);

- модификация спорадического слоя E.

- Космическая погода:

- суббури и их возможные триггеры;
- триггерные эффекты химических реакций, обусловленных высокой электронной температурой и неоднородностями плотности;

- атмосферные гравитационные волны, индуцированные высокотемпературными ионными потоками.

- Физика магнитосферы и радиационных поясов:

- использование виртуальных антенн для инжекции ОНЧ-, УНЧ- и КНЧ-волн в магнитосферу и для воздействия на радиационные пояса Земли;

- изменение и исследование условий распространения, затухания, трансформации мод вистлеров и альфвеновских волн;

- формирование искусственных каналов и волноводов в плазме;

- изменение питч-угла частиц, захваченных в радиационные пояса вистлерами, альфвеновскими волнами и электромагнитными ионно-циклотронными волнами;

- возбуждение магнитосферных резонаторов и исследование ионосферных и магнитосферных волноводов.

- Лазерный синтез:

- нелинейные эксперименты в неограниченной плазме (области без ограничивающих стенок из проводящего материала);

- генерация и исследование параметрических неустойчивостей в рамках физики нелинейных процессов в плазме.

Несмотря на значительные успехи, достигнутые сегодня в изучении природы и свойств этих явлений, исследования по ряду направлений еще нельзя считать полностью завершенными. Поэтому крайне актуально в настоящее время создание нового нагревного стенда, окруженного широким набором различных современных диагностических средств. На таком стенде можно будет решать стоящие перед

исследователями задачи в достаточно спокойных (стабильных) геомагнитных условиях, присущих среднеширотной ионосфере.

В рамках Национального гелиогеофизического комплекса (НГК) Российской академии наук в средних широтах (52.4° N, 103.6° E) создается новый нагревный стенд — Иркутская коротковолновая антенная решетка с активными излучателями (ИКАР-АИ). Этот стенд предназначен для проведения исследований, связанных с воздействием мощного коротковолнового радиоизлучения на ионосферную плазму, и в полной мере обеспечивает решение перечисленных выше задач. Все необходимые диагностические инструменты в настоящее время имеются в составе научной инфраструктуры ИСЗФ СО РАН или будут созданы в рамках НГК РАН. Создающийся исследовательский комплекс, помимо нагревного стенда, включает в себя современные средства диагностики атмосферы, такие как радар некогерентного рассеяния (НР); мезосферно-стратосферный (МС) лидар; когерентные коротковолновые радары типа SuperDARN; камеры всего неба, дифракционные спектрометры и интерферометры Фабри—Перо, работающие в спектральных областях основных атмосферных эмиссий; сеть ионозондов вертикального, наклонного и возвратно-наклонного зондирования; сеть приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем. Это позволит осуществить активные эксперименты по исследованию атмосферных и ионосферных процессов, успешно решать актуальные задачи физики нелинейной плазмы, проводить исследования верхней атмосферы Земли и околоземного космического пространства, а также заниматься вопросами, связанными с космической погодой. Таким образом, комплекс будет обладать уникальным исследовательским потенциалом и обеспечит высокий уровень научных результатов.

Целью настоящей работы является представление возможной архитектуры будущего нагревного стенда ИКАР-АИ, обсуждение его основных технических характеристик и возможностей, а также места в существующей и создающейся инфраструктуре научных инструментов ИСЗФ СО РАН и НГК РАН.

1. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАГРЕВНОГО СТЕНДА ИКАР-АИ

Очевидно, что для определения характеристик нового нагревного стенда следует отталкиваться от уже существующих устройств подобного типа. Краткие сводные характеристики нагревных стендов, работающих в настоящее время, приведены в табл. 1 (см. [Фролов, 2017; Streltsov et al., 2018]). Для выбора оптимальных характеристик стенда ИКАР-АИ надо принимать во внимание многие особенности генерации различных компонент ИИТ на средних широтах. Здесь можно полностью основываться на результатах исследований свойств ИИТ, выполненных на среднеширотном стенде СУРА, которые подробно рассмотрены в монографии [Фролов, 2017] и кратко приводятся ниже.

Таблица 1

Характеристики современных нагревных стенов

	«Аресибо» (США)	СУРА (Россия)	«Тромсё» (Сев. Норвегия)	HAARP (США)	ИКАР-АИ (Россия)
Географические координаты	18.34° N 66.75° W	56.15° N 46.1° E	69.6° N 19.2° E	62.39° N 145.15° W	52.42° N 103.65° E
Диапазон частот, МГц	а) 5.1 б) 8.175	4.3–9.5	а) 3.85–5.6 б) 5.4–8	2.8–10	2.5–6.0
Генерируемая мощность, МВт	0.6	0.75	1.0	3.6	0.9
Усиление антенны, дБ	а) 22 б) 25.5	19–24	а) 22–25 б) 28–31	21–31	21–27
Эффективная мощность излучения, МВт	а) 95 б) 210	100–280	а) 180–340 б) 630–1260	400–3600	120–470
Поляризация	О, Х или линейная	О или Х	О или Х	О, Х или линейная	О, Х или линейная
Диаграмма направленности излучения	вертикально	сканирование в геомагнитной плоскости (до 40° от вертикали)	сканирование в геомагнитной плоскости (до 20° от вертикали)	сканирование в пространстве (до 30° от вертикали)	сканирование в пространстве (до 30° от вертикали)
Наклонение магнитного поля	42°	19°	12°	15°	17°

1.1. Выбор эффективной мощности излучения

Генерация ИИТ в F2-области среднеширотной ионосферы наиболее эффективно происходит при использовании радиоволн О-поляризации, которые излучаются с поверхности Земли вертикально или почти вертикально. Развитие наблюдающихся здесь явлений, как правило, носит пороговый характер по эффективной мощности излучения волны накачки (ВН). Эффективная мощность излучения определяется как $P_{эфф} = P_0 G$, где P_0 — полная ВЧ-мощность, генерируемая передатчиками стенда; G — коэффициент усиления антенной решетки стенда для его главного лепестка по отношению к изотропному излучателю.

На первой стадии развития ИИТ вблизи высоты отражения мощной радиоволны на интервале времени 1–10 мс наблюдается развитие стрикционной параметрической неустойчивости за счет рассеяния электромагнитной волны в ленгмюровские плазменные колебания на ионах плазмы с последующим формированием спектра плазменных волн. Это пороговый эффект с $P_{эфф пор} \approx 2 \div 4$ МВт, излучаемой на частотах ВН $f_0 \approx 4 \div 6$ МГц в условиях вечерней и ночной спокойной ионосферы при отражении ВН на высотах больше 200 км. Значение $P_{эфф пор}$ возрастает с ростом частоты ВН и может значительно увеличиваться с ростом геомагнитной возмущенности ионосферы, например из-за увеличения поглощения радиоволн в нижних слоях ионосферы и присутствия резких градиентов плотности плазмы в области развития неустойчивости. При развитии стрикционной параметрической неустойчивости до 90 % мощности ВН за несколько миллисекунд поглощается

в ионосфере вблизи высоты ее отражения. При этом наблюдается формирование спектра ленгмюровской турбулентности, ускорение электронов фоновой плазмы до сверхтепловых энергий, которые, в свою очередь, вызывают появление искусственного свечения атмосферы и ее дополнительную ионизацию. Наблюдается также возбуждение мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей с размерами $l_{\perp} \approx 2 \div 3$ м поперек линий геомагнитного поля. Эти неоднородности могут служить затравочными на следующей стадии развития ИИТ — стадии развития тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости. При высоком уровне развития стрикционной параметрической неустойчивости возможен переход к режиму возбуждения сильной ленгмюровской турбулентности.

На второй стадии развития ИИТ через 0.3–10 с после начала модификации F2-области ионосферы мощными радиоволнами О-поляризации на высоте верхнегибридного резонанса (1–5 км ниже высоты отражения ВН) происходит возбуждение тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости (ТПН или РН). Развитие ТПН происходит за счет рассеяния электромагнитной волны на мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностях с $l_{\perp} \approx 1 \div 50$ м в верхнегибридные плазменные колебания. Пороговая мощность развития ТПН составляет $P_{эфф пор} \approx 0.5 \div 1$ МВт для $f_0 \approx 4 \div 6$ МГц в условиях вечерней и ночной спокойной ионосферы при отражении ВН на высотах больше 200 км. С ухудшением ионосферных условий значение $P_{эфф пор}$ (ТПН) увеличивается. При развитии ТПН практически вся энергия ВН поглощается в ионосфере (эффект аномального ослабления). Отличительной чертой развития ТПН является генерация интенсивных

мелкомасштабных искусственных неоднородностей в широком диапазоне масштабов l_1 поперек линий геомагнитного поля от 1 м до 30–100 м, которые вызывают интенсивное ракурсное рассеяние радиоволн. На стадии ТПН происходит также ускорение электронов фоновой плазмы до сверхтепловых энергий. Возбуждаемые верхнегибридные плазменные волны вместе с мелкомасштабными неоднородностями участвуют в формировании тепловых компонент искусственного излучения ионосферы.

На третьей стадии развития ИИТ через 3–60 с после начала модификации F2-области ионосферы мощными радиоволнами развивается тепловая самофокусирующая неустойчивость и генерация вблизи высоты отражения ВН среднемасштабных искусственных ионосферных неоднородностей плотности плазмы с $l_1 \approx 0.2 \div 1.0$ км. Эта неустойчивость развивается для мощных радиоволн обеих поляризации, но более интенсивно — для волн О-поляризации вследствие более интенсивного (резонансного) разогрева плазмы. Пороговая мощность развития самофокусирующей неустойчивости составляет 3–5 МВт в условиях вечерней и ночной ионосферы и сильно зависит от геомагнитных условий. Считается, что генерация неоднородностей плотности плазмы километровых масштабов происходит за счет усиления естественных неоднородностей.

Важно отметить влияние эффекта «магнитного зенита» на развитие ТПН и самофокусирующей неустойчивости, когда интенсивность мелкомасштабных и среднемасштабных искусственных неоднородностей возрастает на несколько децибел. Это происходит при условии, что мощная волна О-поляризации на уровне верхнегибридного резонанса распространяется вдоль силовых линий геомагнитного поля, что обеспечивает ее более эффективное взаимодействие с плазмой [Гуревич, 2007; Streltsov et al., 2018]. Для этого на широте стенда СУРА используется наклонное излучение ВН с углами наклона 10° – 16° от вертикали в сторону геомагнитного юга. Вторым фактором, определяющим сильное увеличение интенсивности ИИТ и ее свойства, является генерация турбулентности в условиях, когда частота ВН приблизительно равна удвоенной гирочастоте электронов в области взаимодействия мощной радиоволны О-поляризации с плазмой [Streltsov et al., 2018; Kosch et al., 2007].

На всех стадиях взаимодействия ВН с ионосферной плазмой происходит ее разогрев и изменение профиля плотности плазмы в области, ограниченной шириной главного лепестка диаграммы направленности (ДН) антенны нагревного стенда. Температура электронов вблизи магнитного зенита при этом может увеличиться в 2–3 раза по сравнению с фоновым значением, при этом наблюдающееся уменьшение плотности плазмы вблизи высоты отражения ВН может достигать 30–40 %. Такая полость с пониженной плотностью плазмы ведет себя как фокусирующая линза. Однако присутствие в ней во время модификации ионосферы мощными КВ-радиоволнами интенсивных искусственных неоднородностей различных масштабов сильно ухудшает ее фокусирующие свойства, которые могут явно обнаруживаться

только после выключения ВН, когда произойдет релаксация более мелкомасштабной части спектра неоднородностей.

Особенностью модификации дневной ионосферы является формирование на высотах 130–170 км области повышенной концентрации плазмы в результате ее нагрева и последующего нарушения ионизационно-рекомбинационного баланса. Такая область обладает дефокусирующими свойствами. Ослабление в результате этой дефокусировки может достигать до 20 дБ при мощности ВН $P_{\text{эфф}} \approx 100$ МВт. Вместе с регулярным поглощением мощной радиоволны в ионосфере ослабление интенсивности ВН на уровне ее отражения может достигать 30 дБ, поэтому интенсивность ВН на высоте ее отражения может оказаться меньше ее пороговых значений для развития вышеперечисленных неустойчивостей. Кроме того, в дневных условиях высота отражения мощной радиоволны не превышает, как правило, 200 км, ниже которой из-за сильного роста частоты столкновений электронов с нейтралами наблюдается резкое увеличение пороговых мощностей рассмотренных выше неустойчивостей. Свое негативное влияние на взаимодействие мощной радиоволны с плазмой оказывает также присутствие F1-слоя ионосферы. Поэтому интенсивность ИИТ в верхней ионосфере в дневных условиях ее модификации, как правило, остается незначительной. Исключение в средних широтах составляют зимние месяцы в условиях отсутствия геомагнитных возмущений, когда величина регулярного поглощения мощных радиоволн в нижней ионосфере может оставаться небольшой.

Подводя итоги сказанному, можно заключить, что с учетом необходимого (5–10)-кратного превышения порогов развития неустойчивостей в вечерних и ночных условиях проведения измерений достаточно иметь стенд с эффективной мощностью излучения $P_{\text{эфф}} \approx 10 \div 20$ МВт. Именно такими мощностями обладали стенд Аресибо (первый вариант), стенды в Зименках, Мончегорске и Гиссаре, где в 70-х гг. прошлого столетия уже была получена большая часть основных результатов нагревных экспериментов. С учетом изменяющихся ионосферных условий и расширения экспериментов на утренние и предвечерние часы необходимо иметь возможность излучения более мощной ВН. Как правило, в этом случае хватает мощности 50–200 МВт, какими обладают стенды СУРА и EISCAT-Heating. Этим мощностям оказывается достаточно для измерения характеристик ионосферы на высотах от D- до F2-области с помощью метода искусственных периодических неоднородностей [Беликович и др., 1999], а также для измерения характеристик эффектов кроссмодуляции и генерации СНЧ–ОНЧ-волн на высотах нижней ионосферы [Беляев и др., 1987; Stubbe et al., 1981; Гинзбург, 1967].

Завершая данный раздел, следует отметить следующее. Выполненные в последние годы эксперименты позволили обнаружить и исследовать такие явления, как генерация дополнительных ионосферных слоев [Mishin et al., 2016], стимулированное высыпание энергичных электронов из радиационных поясов Земли [Фролов и др., 2019], генерация

волновых возмущений на ионосферных высотах при периодическом нагреве ионосферной плазмы [Черногор и др., 2019; Mishin et al., 2012], генерация каналов (дактов) с повышенной плотностью плазмы на высотах внешней ионосферы [Фролов и др., 2016; Vartanyan et al., 2012], генерация электрических токов на ионосферных высотах при развитии ИИТ [Lukianova et al., 2019]. Все эти явления наблюдались, когда эффективная мощность ВН была не меньше 50 МВт. Таких же больших мощностей требуют генерация искусственного оптического свечения, эксперименты по модификации магнитосферы и магнитно-сопряженной области ионосферы, а также использование нагревного стенда в качестве мощного коротковолнового локалятора или радара частичных отражений для локализации атмосферы, околоземного космического пространства и ближнего космоса. Исходя из сказанного выше и учитывая вариации в широких пределах ионосферных условий, необходимо, чтобы стенд ИКАР-АИ имел эффективную мощность излучения не меньше 100–200 МВт.

1.2. Выбор частотного диапазона излучения

Частотный диапазон существующих нагревных стендов лежит в пределах 2.7–10 МГц. При выборе частотного диапазона ИКАР-АИ необходимо принимать во внимание следующее. С одной стороны, чем шире диапазон, тем больше возможностей выбора оптимальной частоты для проведения измерений в различных геофизических условиях. С другой стороны, чем уже диапазон, тем проще конструкция передающей антенны стенда и дешевле создаваемый комплекс. Очевидно, основными критериями выбора частотного диапазона нагревного стенда являются пределы изменения критической частоты F2-слоя ионосферы (f_oF2) в месте его расположения в течение суток в разные сезоны года при разном уровне солнечной и геомагнитной активности, а также возможность его работы на частотах ВН вблизи второй гармоники гирочастоты электронов.

Рассмотрим возможность работы нагревного стенда в условиях средних широт (~52°) Восточной Сибири. Для этого оценим вероятность определенного значения критической частоты F2-слоя ионосферы в определенное время. Чтобы ИКАР-АИ был способен работать при самых низких уровнях ионизации верхней атмосферы, необходимо провести оценку вероятности для минимума солнечной активности. С использованием базы данных Иркутского ионосферного DPS-4 были рассчитаны статистические распределения f_oF2 и h_mF2 в различные моменты UT для 2016–2019 гг. (рис. 1). Приведенные ионосферные данные с учетом того, что модификация F2-слоя ионосферы наиболее эффективна в вечернее и ночное время, а модификация нижней ионосферы в дневных условиях эффективнее на более низких частотах ВН, позволяют определить диапазон рабочих частот нагревного стенда как 2.5–6.0 МГц.

Отметим, что этот диапазон дает возможность нагрева ионосферы на частотах, близких к гармонич-

кам гирочастоты электронов со второй по четвертую (1.4–1.5 МГц для предполагаемого местоположения стенда). Важно, что он захватывает частоты, близкие ко второй гармонике гирочастоты электронов, где модификация верхней ионосферы имеет свои важные специфические особенности и преимущества, связанные с дисперсионными свойствами электромагнитных волн в магнитоактивной плазме. При частотах ВН $f_0 \approx 2f_{ce}$ высокая интенсивность генерируемой ИИТ достигается при значительно меньших мощностях ее излучения, чем это имеет место в области частот 4–6 МГц [Streltsov et al., 2018]. Свойства взаимодействия мощных электромагнитных волн с магнитоактивной плазмой при выполнении условий кратного гирогармонического резонанса (как и в условиях двойного резонанса), когда частота ВН в области взаимодействия ВН с плазмой оказывается одновременно равной частоте верхнегибридного резонанса и частоте гирогармоники, до сих пор представляют большой интерес и требуют дальнейшего изучения. В первую очередь, это касается свойств ускорения электронов до сверхтепловых энергий и вызываемых ими оптического свечения и дополнительной ионизации [Грач, 1999; Грач и др., 2014; Kosch et al., 2002; Grach et al., 2004; Pedersen et al., 2009, 2011a, b; Sergeev et al., 2013].

В гирогармонических экспериментах чрезвычайно интересно будет проследить поведение искусственных ионосферных неоднородностей различного масштаба с одновременным использованием радиофизических и оптических регистрирующих средств. Кроме того, в случае регистрации искусственного свечения в нескольких разнесенных в пространстве пунктах появляется возможность оценки пространственных характеристик светящейся области, а при использовании подходящей модели — определения параметров трехмерного распределения возбужденных атомов кислорода. Измерение вертикального профиля яркости искусственного свечения также представляет интерес как метод исследования энергетических характеристик сверхтепловых электронов и экспериментальной проверки теоретических моделей ускорения и глубины проникновения ускоренных электронов вверх и вниз от турбулентного слоя [Shindin et al., 2018].

Таким образом, представленный выше анализ ионосферных данных для предполагаемого месторасположения стенда ИКАР-АИ и перечень задач исследований, а также опыт работы на стенде СУРА показал, что для достижения поставленных целей в большинстве случаев достаточно иметь возможность излучения ВН в диапазоне частот 2.5–6.0 МГц.

1.3. Технический облик стенда

Как отмечалось ранее, на средних широтах волны О-поляризации из-за возможности их резонансного взаимодействия с плазмой при вертикальном или почти вертикальном излучении приводят к более интенсивной генерации ИИТ по сравнению с волнами Х-поляризации. Тем не менее, среди прочих характеристик стенда, необходимых для проведения фундаментальных и прикладных исследований, необходимо иметь возможность излучения радиоволн как

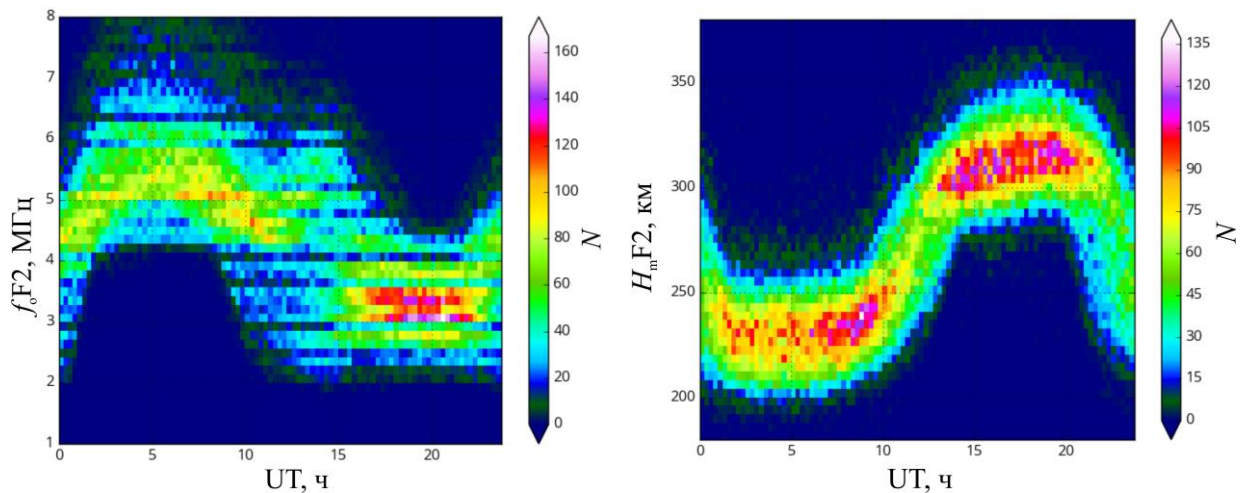


Рис. 1. Статистические распределения (гистограммы) частоты f_oF2 (слева) и высоты h_mF2 (справа) максимума F2-слоя ионосферы в различные моменты UT над предполагаемым местом расположения будущего нагревного стенда. Цветом обозначено количество событий для определенного значения характеристики в выбранный момент времени

O-, так и X-поляризации (желательно и волн с линейной поляризацией). Надо рассмотреть также возможность использования ИКАР-АИ как коротковолнового радара или радара частичных отражений с углом наклона луча до $40\text{--}50^\circ$ от вертикали в любом направлении; возможность работы стенда, по крайней мере, на двух частотах ВН, каждая из которых излучается со своей поляризацией, мощностью, в своем временном режиме, а также возможность использования всей антенной решетки или ее отдельных частей в режиме приема радиоизлучения.

В соответствии с предъявляемыми к стенду требованиями предполагается, что ИКАР-АИ будет представлять собой активную фазированную антенную решетку, состоящую из скрещенных широкополосных дипольных антенн, каждый диполь которых будет подключен к отдельному твердотельному передатчику с выходной мощностью около 5 кВт. Для минимизации потерь в согласующих элементах и фидерах используется модульная схема конструкции антенной решетки, когда два передатчика располагаются в непосредственной близости от пары скрещенных диполей, образуя один модуль стенда. Все модули стенда управляются общей системой синхронизации и фазирования, которая задает фазовое смещение излучения каждого излучателя таким образом, чтобы сформировать в заданном направлении узкий луч коротковолнового излучения. Необходимо электронная система управления положением этого луча в пространстве, а также выбора мощности, частоты, поляризации и временного режима излучения ВН независимо для каждого модуля. Управляющие сигналы для каждого модуля формируются при помощи цифровых синтезаторов, синхронизированных единым стандартом частоты и времени. Управление режимами работы стенда осуществляется через оптоволоконную сеть для минимизации наводок от излучающих элементов и уровня паразитных обратных связей. Необходимо также предусмотреть возможность использования каждого элемента антенной решетки в режиме приема с соответствующей системой регистрации и обра-

ботки принимаемых сигналов. Подобная система существенно расширит возможности использования активной фазированной антенной решетки и позволит ИКАР-АИ эффективно функционировать в режиме коротковолнового радара или радара частичных отражений.

Как следует из предыдущего анализа, для обеспечения эффективной мощности излучения 200 МВт в диапазоне частот 2.5–6.0 МГц архитектура ИКАР-АИ должна включать в себя антенную решетку с $G=200\div 400$ и соответственно 50–100 блоков по два 5-киловаттных ВЧ-генератора в каждом. Эти базовые цифры вместе с требованиями к стенду в плане возможностей его использования для решения различных задач являются основой разработки его структуры.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Для успешной работы стенда необходимо обеспечить высокую эффективную мощность излучения во всем рабочем диапазоне частот 2.5–6.0 МГц, т. е. с перекрытием 2.4. Конструирование единой антенной решетки на весь диапазон является трудной задачей, поскольку в этом случае пришлось бы использовать большие сложные излучатели при не всегда оптимальной высоте их подвеса. Поэтому предполагается разбиение рабочего диапазона на два поддиапазона и размещение двух разных наборов антенн. В таких условиях оптимально иметь две отдельные антенные решетки: одну на частотный диапазон 2.5–3.5 МГц, другую — на диапазон 4–6 МГц. При этом излучающие диполи будут иметь достаточно простую конфигурацию с оптимальной высотой подвеса, а две антенные решетки позволят работать вблизи 2-й (2.5–3.5 МГц), 3-й и 4-й (4–6 МГц) гармоник гирочастоты электронов. Ниже приводятся результаты моделирования антенн двух типов: 1) создание одной решетки со специальными широкополосными антеннами; 2) разбиение диапазона на два поддиапазона и создание двух антенных решеток, каждая из которых работает в своем поддиапазоне.

Таблица 2

Характеристики диаграмм направленности двух конфигураций антенного поля

Конфигурация	Размер антенного поля, м ²	Диапазон, МГц	Ширина луча, град.	Коэффициент усиления G , дБ	Средний уровень боковых лепестков, дБ	Beam efficiency
Прямоугольная, 64 элемента	78 400	2.5–3.5	17.9/14.4	20.5/22.2	–26.8/–25.8	0.93/0.87
		4.0–6.0	11.8/7.9	24/27	–27.3/–27.3	0.88/0.79
Гексагональная, 61 элемент	66 500	2.5–3.5	20.2/16.2	19.7/21.4	–27.7/–26.4	0.95/0.9
		4.0–6.0	13.2/8.8	23.2/26.2	–27.9/–27.7	0.9/0.83
Кольцевая, по 36 элементов на поддиапазон	320 000	2.5–3.5	9.5/7.5	25.2/24.3	–27.4/–22/7	0.76/0.37
		4.0–6.0	9.3/6.1	24.2/23.5	–23.2/–19.9	0.48/0.185

В качестве варианта с широкополосными антеннами мы рассмотрим две решетки с прямоугольной и гексагональной сетками. Для двухдиапазонного варианта проанализируем кольцевую решетку с наборами из двух колец для каждого поддиапазона (2.5–3.5 МГц и 4–6 МГц) с отдельно размещенными диполями в центре колец для снижения уровня боковых лепестков. Характеристики антенных полей могут сильно варьировать в зависимости от количества элементов решетки и их взаимного расположения. Особое внимание следует уделить коэффициенту усиления G и эффективной мощности $P_{эфф}$ стенда как основным параметрам, определяющим значение плотности потока мощности ВН в области нагрева. Приведенные конфигурации значительно отличаются друг от друга, поэтому при сравнении мы будем использовать примерно одинаковое количество скрещенных дипольных антенн (60–65 штук) как основной параметр, определяющий конечную стоимость создания фазированной антенной решетки с двумя отдельными передатчиками по 5 кВт для каждого элемента (по одному передатчику на каждую поляризацию скрещенного диполя).

Моделирование включает расчет ДН фазированной решетки для разных конфигураций; диаграммы антенн решетки рассчитывались с учетом влияния земли, но без учета взаимных влияний элементов. Особое внимание уделялось сектору сканирования стенда — при наклоне луча на 30° от нормали не должны появляться дифракционные лепестки (лепестки ДН, равные по величине основному лепестку). В качестве отдельного элемента решетки используется скрещенный диполь с высотой подвеса и длиной диполей, равными 25 м для нижней части рабочего диапазона (четверть длины волны для 3 МГц) и 15 м для верхней части диапазона (четверть длины волны для 5 МГц). На рис. 2 показано сравнение ДН для разных конфигураций без фазового смещения между излучающими элементами для частот 3 и 5 МГц в координатах $u = \sin\theta\cos\varphi$, $v = \sin\theta\sin\varphi$, где θ — угол, отсчитываемый от вертикали, φ — азимутальный угол. В табл. 2 даны основные характери-

стики ДН различных конфигураций в двух диапазонах. Помимо стандартных характеристик, включена величина beam efficiency — доля мощности, излучаемой в основном лепестке ДН [Balanis, 2005].

2.1. Антенная решетка с широкополосными элементами

В конфигурации поля с широкополосными элементами используется плотное заполнение антенн в решетке (прямоугольная и гексагональная сетки). В первом случае элементы располагаются в точках пересечения рядов и столбцов решетки. Во втором случае тройки соседних антенн находятся в вершинах равнобедренных треугольников, образуя правильную гексагональную сетку. Многие радары и большинство нагревных стендов построены по схеме с плотным заполнением. Известно, что дифракционные лепестки для прямоугольного и гексагонального расположения элементов появляются при одинаковом расстоянии d между антеннами [Sharp, 1961]. Поэтому для сравнения мы будем использовать прямоугольную решетку 8×8 (64 элемента) и гексагональную решетку с ребром 5 (61 элемент), а расстояние d примем равным 40 м в обоих случаях. Такое расстояние между антеннами приведет к появлению дифракционного лепестка с углом места ~14.5° на частоте 6 МГц, который, тем не менее, будет значительно подавлен ДН самих диполей. Полная ДН для прямоугольной решетки показана на рис. 2, а, б. Видно, что основные боковые лепестки возникают вдоль двух осей решетки. Поскольку расстояние между антеннами не меняются, лепесток для частоты 5 МГц более узкий, чем для частоты 3 МГц. ДН для гексагональной решетки показана на рис. 2, в, г. Как и сама сетка, диаграмма состоит из шести одинаковых секторов с шагом 60°. По сравнению с прямоугольной в ДН гексагональной решетки боковые лепестки расположены более равномерно и имеют меньшую амплитуду. Сравнение характеристик разных заполнений представлено в табл. 2. Прямоугольная решетка обладает большим коэффициентом усиления, но и большим средним уровнем боковых

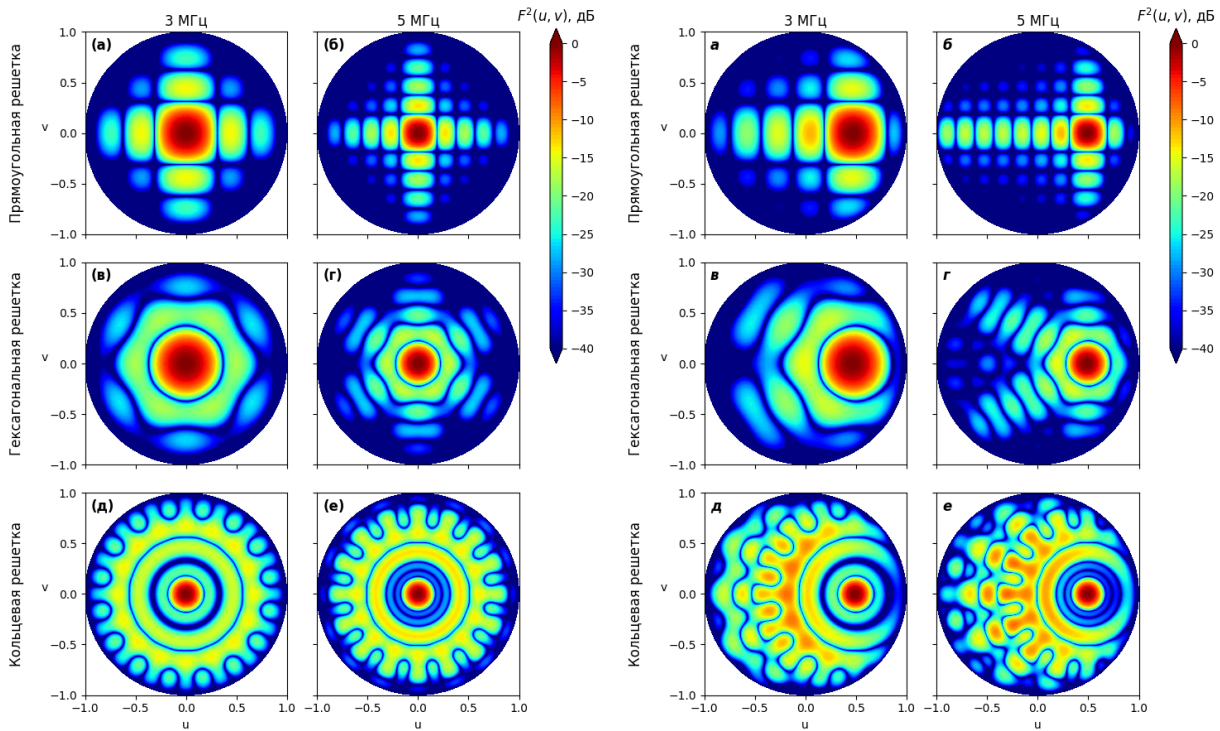


Рис. 2. Сравнение диаграмм направленности фазированных антенных решеток разных конфигураций без фазового смещения между излучающими элементами (слева) и при наклоне основного лепестка ДН на 30° (справа): *а, б* — прямоугольная решетка (64 антенны); *в, г* — гексагональная решетка (61 антенна); *д, е* — кольцевая решетка (по 36 антенн на каждый поддиапазон); *а, в, д* — для частоты 3 МГц; *б, г, е* — 5 МГц

лепестков. Кроме того, она занимает больше места с точки зрения как площади всего поля, так и занимаемой площади на одну антенну. На нижней частоте диапазона G приблизительно одинаков для обоих типов заполнения и составляет 50–100, поэтому $P_{\text{эфф}} \approx 60 \div 90$ МВт. Мощность вычисляется из расчета 10 кВт на одну антенну, поэтому $P_{\text{эфф}}$ для прямоугольной решетки будет немного больше. На максимальной частоте 6 МГц G различается и составляет 500 и 415, а $P_{\text{эфф}} \approx 320$ МВт и 250 МВт для прямоугольной и гексагональной решеток соответственно.

При моделировании ДН решетки с плотной сеткой в качестве антенны использовалось два набора скрещенных диполей с разной высотой подвеса. В реальной фазированной антенной решетке такая конструкция вряд ли окажется целесообразной — из-за взаимного влияния большого количества близко расположенных проводников ухудшится согласование диполей. Требуется специальная широкополосная антенна, сохраняющая рабочие характеристики в диапазоне частот с высоким коэффициентом перекрытия 2.4. Тем не менее, близкое расположение проводников и неоптимальная высота подвеса над землей могут привести к тому, что коэффициент стоячей волны антенн будет варьировать в рабочем диапазоне частот, из-за чего снизится $P_{\text{эфф}}$. Возможным вариантом может быть логопериодическая антенна, но для указанного диапазона конструкция антенны будет сложной, требующей большого количества высоких (порядка 50 м) мачтовых сооружений, что может привести к снижению эффектив-

ности работы вследствие значительных эксплуатационных затрат. Кроме того, проектирование и создание таких антенн существенно увеличит стоимость стенда.

2.2. Двухдиапазонная антенная решетка

В этом случае предполагается разбиение частотного диапазона на два поддиапазона 2.5–3.5 МГц и 4–6 МГц и использование дипольных антенн с простой конструкцией и оптимальной высотой подвеса в решетке с кольцевой структурой. Вся антенная решетка — это набор диполей, размещенных по четырем концентрическим окружностям по 16 скрещенных диполей в каждом кольце, и по 4 антенны на каждый диапазон в центре кольца (72 антенны). Для каждого поддиапазона антенная решетка представляет собой два кольца: для поддиапазона 2.5–3.5 МГц кольца имеют радиусы 160 и 320 м, для поддиапазона 4–6 МГц — 100 и 220 м. В центре антенного поля располагается по 4 скрещенных диполя на каждый поддиапазон. Такая структура антенных решеток с приблизительно равными значениями коэффициента усиления для каждого поддиапазона позволяет максимально использовать отведенную под их размещение площадку. Кроме того, благодаря отдельным передатчикам для каждой антенны возможна работа в многочастотном режиме, когда происходит одновременное излучение ВЧ на двух частотах разных поддиапазонов. Можно в два раза снизить количество требуемых передатчиков, разместив их между 1–2 и 3–4 кольцами по радиусам, на которых расположены элементы антенных реше-

ток. В этом случае одновременно работает только один набор колец. Эту конструкцию будет удобно использовать в режиме приема при работе ИКАР-АИ в качестве КВ-локатора. Кроме того, симметричная конструкция антенной решетки по азимуту значительно упрощает управление ее ДН.

Расчетные ДН для кольцевой антенной решетки на средней частоте каждого поддиапазона приведены на рис. 2, δ , ϵ ; их характеристики — в табл. 2. Основной лепесток решетки является самым узким среди всех конфигураций, однако средний уровень боковых лепестков в этом случае выше, чем для прямоугольной и гексагональной решеток, в особенности для верхнего поддиапазона. Особенностью данной решетки с двумя кольцами является низкий уровень первых боковых лепестков — основные боковые лепестки прижаты ближе к земле. Величина G решеток примерно одинакова для поддиапазонов и составляет 200–250. Таким образом, энергетический потенциал стенда с кольцевой антенной решеткой будет составлять $P_{\text{эфф}} \approx 90 \div 120$ МВт в нижнем поддиапазоне и 80–95 МВт в верхнем поддиапазоне. Повышение величины $P_{\text{эфф}}$ возможно за счет увеличения генерируемой ВЧ-мощности, что при использовании фиксированных передатчиков (10 кВт) означает увеличение числа антенн в кольцах. Однако в случае кольцевой решетки сложнее добавлять дополнительные антенны, так как расстояние между антеннами внутренних колец ограничено. Величина beam efficiency для верхней границы диапазонов кольцевой решетки резко снижается, поскольку значительная часть мощности излучается в направлении боковых лепестков. Об этом свидетельствует также снижение G , хотя для решеток других типов ожидается повышение G с ростом частоты.

В отличие от решеток с плотным заполнением, антенны кольцевой структуры расположены дальше друг от друга, поэтому взаимное влияние между ними ниже. Кольца разных диапазонов обладают разными радиусами, и в качестве антенн можно использовать простые скрещенные диполи, рассчитанные на соответствующий диапазон. В этом случае проще сохранять рабочие характеристики антенны в узких диапазонах частот с коэффициентами перекрытия 1.4 и 1.5 для нижнего и верхнего поддиапазонов.

На рис. 2 справа показаны ДН при наклоне луча стенда на 30° от нормали, что соответствует координатам $(u, v) = (0.5, 0)$. Видно, что ни для одной конфигурации не появляются дифракционные максимумы. Тем не менее, общий уровень боковых лепестков возрастает, причем наибольшее увеличение наблюдается у ДН кольцевой антенны, где уровень боковых лепестков начинает превышать -10 дБ в широком диапазоне направлений. Это приводит к значительному понижению коэффициента усиления решетки при качании луча в рабочем секторе обзора.

2.3. Итоги предварительного моделирования

Исходя из проведенного анализа можно сделать следующие выводы.

1. Решетки с плотным заполнением обладают наибольшими G и $P_{\text{эфф}}$ в верхнем поддиапазоне частот 4–6 МГц ($P_{\text{эфф}} \approx 160$ МВт на частоте 4 МГц и 320 МВт на частоте 6 МГц). На малых частотах нижнего поддиапазона кольцевая решетка обладает преимуществом по G ($P_{\text{эфф}} \approx 120$ МВт на частоте 2.5 МГц). Для кольцевой решетки G немного уменьшается к верхней границе обоих поддиапазонов из-за повышения уровня боковых лепестков ($P_{\text{эфф}} \approx 92.5$ МВт на частоте 3.3 МГц — ниже, чем для прямоугольной решетки). Средняя $P_{\text{эфф}}$ в нижнем диапазоне для кольцевой конфигурации немного выше, чем для прямоугольной конфигурации. Стоит отметить, что для кольцевой конфигурации возможен режим работы вблизи пересечения диапазонов, когда задействованы сразу все антенны. Для этого, например, диапазон частот низкочастотной антенны достаточно немного повысить до 2.7–4 МГц. Были проведены расчеты такого режима на частоте 4 МГц, и было показано, что в этом случае $P_{\text{эфф}}$ может возрасти до 180 МВт.

2. Решетка с прямоугольной структурой обладает большим G по сравнению с гексагональной. Гексагональную решетку стоит рассматривать при необходимости экономии пространства, например, если будет планироваться создание двух отдельных антенн с плотным заполнением на разные диапазоны.

3. Решетки с плотным заполнением требуют проектирования качественной широкополосной антенны. С другой стороны, антенны кольцевой структуры могут представлять собой простые скрещенные диполи, обладающие оптимальной высотой подвеса для разных поддиапазонов.

4. Ширина основного лепестка кольцевой решетки в нижнем диапазоне значительно меньше, а в верхнем диапазоне немного меньше, чем у решеток с плотным заполнением.

5. $P_{\text{эфф}}$ кольцевой решетки можно повысить путем добавления антенн на кольца, однако количество добавляемых антенн ограничено. С другой стороны, решетки с плотным заполнением меньше и их легче масштабировать.

6. В кольцевой решетке возможен режим многочастотного излучения, либо можно вдвое уменьшить число используемых передатчиков. Однако из-за разбиения на два поддиапазона при работе в одночастотном режиме используется только половина антенн и, следовательно, вдвое меньше передатчиков.

Таким образом, если возможно создание широкополосной антенны для эффективной работы в диапазоне 2.5–6.0 МГц, предпочтительнее будет решетка с прямоугольной сеткой. Если же требуется работа в многочастотном режиме либо невозможно создать широкополосную антенну с требуемыми характеристиками по целесообразной стоимости, стоит выбрать кольцевую структуру. Также стоит рассмотреть вариант размещения на площадке двух небольших фазированных антенных решеток на разные поддиапазоны. В этом случае для экономии места можно использовать решетки с гексагональной сеткой. Характеристики такого нагревного

стенда в нижнем диапазоне частот будут лучше, и не потребуется создавать сложную широкополосную антенну.

3. МЕСТОРАСПОЛОЖЕНИЕ СТЕНДА ИКАР-АИ И СУЩЕСТВУЮЩАЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ ИНФРАСТРУКТУРА

Стенд ИКАР-АИ планируется расположить на территории бывшего ретрансляционного центра радиовещания к юго-западу от Одинска Ангарского района Иркутской области (52.42° N, 103.65° E; наклонение геомагнитного поля $\theta=17^\circ$, параметр Мак-Илвайна $L=2.5$). Для размещения нагревного стенда, включающего антенное поле и здание с управляющим оборудованием, доступна площадка размерами 700×700 м вблизи транспортных и энергетических сетей. Выбор места размещения стенда обусловлен тем, что возможная область нагрева ионосферы должна пересекаться с секторами обзора основных инструментов радиофизического и оптического мониторинга верхней атмосферы. Кроме того, поскольку стенд обладает значительным энергетическим потенциалом, к нему должны быть подведены необходимые электрические мощности (около 1 МВт), при этом он должен располагаться вне населенных пунктов.

Существующая исследовательская инфраструктура Института солнечно-земной физики СО РАН регулярно развивается и содержит необходимые инструменты, способные проводить исследования свойств ИИТ и ее влияния на распространение радиоволн различных диапазонов. Среди инструментов одним из наиболее мощных является Иркутский радар некогерентного рассеяния (ИРНР) [Medvedev, Potekhin, 2019]. Радары НР диагностируют ионосферную плазму методом рассеяния радиоволн на тепловых флуктуациях концентрации заряженных частиц. Основой анализа служит спектр доплеровских смещений частоты зондирующей радиоволны, в котором можно выделить плазменную и ионно-звуковую линии, соответствующие рассеянию на тепловых флуктуациях концентрации плазмы. Анализируя спектральные характеристики рассеянного в плазме радиосигнала, можно получать информацию о концентрации и температуре плазмы, ее скорости дрейфа, химическом составе и других параметрах. Сопровождение сеансов нагрева ионосферной плазмы работой радаров НР по модифицируемой области позволяет исследовать физические характеристики искусственно разогретой плазмы: пространственную структуру температуры и концентрации, динамику этих параметров и характерные масштабы их изменения, спектральные характеристики возбуждаемой мощной радиоволной высокочастотной плазменной турбулентности.

Новый радар НР-МСТ, создаваемый в рамках НГК, будет обладать существенно более широкими возможностями по сравнению с существующим радаром [Потехин и др., 2016]. Построенный по схеме активной фазированной антенной решетки радар

будет работать в более широком диапазоне высот и направлений, а также иметь более высокое пространственное разрешение как по дальности, так и по ракурсу. Предполагаемое взаимное расположение нового и старого радаров НР и нагревного стенда и взаимное пересечение основных лепестков их ДН показаны на рис. 3. Становится возможным исследование эффектов нагрева при помощи интерферометрических методов регистрации сигнала НР для исследования тонкой пространственной структуры разогретой области. Удачное взаимное расположение радара НР и нагревного стенда позволяет исследовать особенности эффектов развития ИИТ при нагреве ионосферы в магнитный зенит (см. табл. 1) и проводить исследования по искусственной генерации магнитных суббурь и стимулированию нагревом ионосферы высыпаний энергичных электронов из радиационного пояса Земли в верхнюю атмосферу.

Одним из основных средств диагностики вертикальных профилей параметров и компонент нейтральной атмосферы считаются лидары. Интенсивность и спектральные характеристики рассеянного в верхней атмосфере монохроматического лазерного излучения позволяют получать вертикальные профили плотности, химического состава (в особенности слоев металлических Na и K) аэрозоля, а также температуры воздуха. Для этой цели планируется использовать МС-лидар, создаваемый в рамках НГК, способный вести диагностику нейтральной компоненты верхней атмосферы в области, модифицированной стендом ИКАР-АИ. Профили параметров нейтральной компоненты верхней атмосферы, полученные в общем объеме с профилями параметров заряженной компоненты (см. рис. 3), позволяют определить высотные особенности обмена энергией между заряженной и нейтральной компонентами.

Важное значение при исследовании свойств мелкомасштабной части искусственных ионосферных неоднородностей имеет их диагностика методом ракурсного рассеяния СВ- и КВ-радиоволн. Из-за относительной близости южной границы России к стенду ИКАР-АИ (около 250 км) здесь не реализуемо исследование обратного рассеяния радиоволн в диапазоне выше 10–15 МГц. Однако ракурсное рассеяние возможно в диапазоне 1–10 МГц для сигналов близко расположенных (до 200–400 км) к стенду станций. Для этого можно использовать сигналы ионозондов. Возможен также прием рассеянных сигналов от станций в диапазоне 10–15 МГц, если они располагаются к востоку и западу от стенда, с размещением приемного пункта на максимально возможном расстоянии от стенда на юг. При этом условия приема будут в значительной степени определяться рефракцией радиоволн в ионосфере.

Существующая вблизи места расположения ИКАР-АИ инфраструктура средств КВ-радиозондирования ионосферы, поддерживаемая ИСЗФ СО РАН, включает цифровой ионозонд вертикального зондирования (ВЗ) DPS-4 (Иркутск) [Haines, Reinisch, 1995] и многофункциональный ЛЧМ-ионозонд «Ионозонд-МС» [Подлесный и др., 2013] в с. Торы, реализующий вертикальное и слабонаклонное зондирование на трассе Усолье—Торы (длина радиотрассы

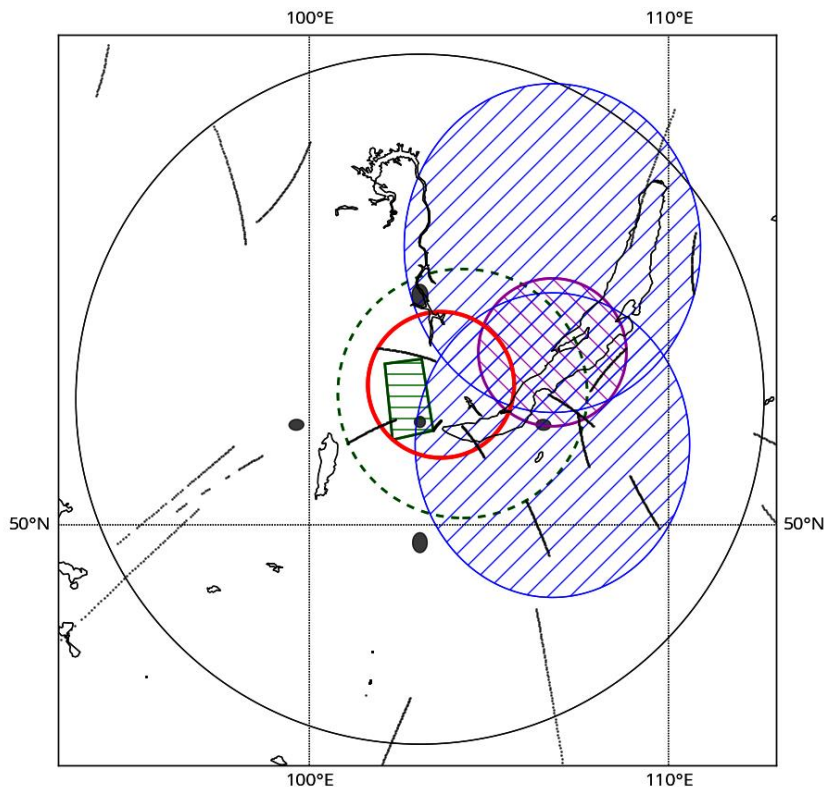


Рис. 3. Расположение инструментов НГК. Проекции полей зрения инструментов на высоте 250 км на поверхность Земли. Красная утолщенная окружность — нагревный стенд ИКАР-АИ; синие эллипсы с правой штриховкой — НР-МСТ-радар; фиолетовая окружность с левой штриховкой — МС-лидар; зеленая трапеция с горизонтальной штриховкой — существующий радар НР; зеленая штриховая окружность — существующий ионозонд DPS-4; черная окружность — камера всего неба; серые эллипсы — интерферометр Фабри—Перо, серые кривые — подыоносферные точки линий ГНСС спутник—приемник

~120 км). В перспективе возможно развертывание дополнительных слабонаклонных радиотрасс. Данные инструменты позволяют регистрировать динамику (в том числе и быстротекущие процессы) ионосферных возмущений различных масштабов, появляющихся ниже высоты максимума ионосферы непосредственно в зоне нагрева. Регистрация мелко- и среднemasштабных возмущений в простейшем варианте возможна по анализу временных вариаций основных ионосферных параметров (критические частоты и действующие высоты ионосферных слоев), или с использованием так называемых амплитудных карт (А-карт) [Акчурин и др., 2013; Куркин и др., 2014], или по изменению формы высотно-частотных характеристик (ВЧХ) на ионограммах ВЗ [Ларюнин, Куркин, 2011; Ларюнин и др., 2014].

Более сложные методы позволяют восстанавливать сглаженный полный высотный профиль электронной концентрации по измеренным ВЧХ [Михайлов, 2000; Reinisch, Huang, 1983], что позволяет выделять средне- и крупномасштабные возмущения. Анализ ионограммы ВЗ дает также возможность регистрации таких явлений, как F-рассеяния и появления спорадических образований в зоне нагрева.

Сеть трасс наклонного ЛЧМ-зондирования, поддерживаемая ИСЗФ СО РАН, с передающими пунктами в Магадане, Норильске, Хабаровске и прием-

ным пунктом в с. Торы позволит регистрировать волнообразные ионосферные возмущения (внутренние гравитационные волны [Andreeva et al., 2016]), возбуждаемые при периодическом нагреве ионосферной плазмы мощными радиоволнами. Планируемый к размещению вблизи Иркутска когерентный КВ-радар позволит проводить диагностику и мониторинг средне- и крупномасштабных ионосферных возмущений, распространяющихся от зоны нагрева, методом возвратно-наклонного зондирования на фиксированной частоте [Ойнац и др., 2013; Oinats et al., 2016].

При проведении исследований характеристик искусственных плазменных возмущений планируется использование сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou/Compass и др. Технология ГНСС-зондирования [Афраймович, Перевалова, 2006] активно применяется в последние годы, в том числе для изучения эффектов модификации ионосферы мощным КВ-излучением [Фролов, 2017; Kunitsyn et al., 2011, 2012]. Ключевым измеряемым параметром при ГНСС-зондировании является полное электронное содержание (ПЭС), определяемое по двухчастотным измерениям. Его вариации достаточно чувствительны к ионосферным возмущениям различного типа. Методика определения ПЭС, разработанная для приемников ГНСС, и возможность регистрации фазовых

и амплитудных мерцаний навигационного радиосигнала сетью приемников, расположенных вблизи нагревного стенда, позволяют исследовать характеристики неоднородностей электронной плотности различного масштаба, генерируемые в секторе обзора нагревного стенда.

Относительная дешевизна регистрирующего оборудования позволяет создать достаточно плотные сети станций. В настоящее время в Прибайкальском регионе развернута сеть SibNet ИСЗФ СО РАН, состоящая из восьми приемных пунктов [Ясюкевич и др., 2018]. Она позволяет регистрировать сигналы GPS/ГЛОНАСС/Galileo, а также сигналы BeiDou/Compass на одном из пунктов. Плотность покрытия подыоносферными точками (точками пересечения луча спутник—приемник и тонкого сферического слоя на высоте 300 км) показана на рис. 3. Для его построения использовались измерения в течение 0.5 ч. Представленные данные позволяют регистрировать возмущения ионосферы вблизи планируемого стенда. Для повышения пространственного разрешения требуется развертывание дополнительных пунктов. Геоостационарные наблюдения ПЭС на основе приема сигналов SBAS [Kunitsyn et al., 2015] в данном случае не являются целесообразными, так как их подыоносферные точки лежат существенно южнее стенда. Кроме того, углы места на спутники составляют 12° – 30° и расположение станций севернее используемых пунктов приведет к дальнейшему снижению угла места.

Наряду с вертикальным/наклонным зондированием ионосферы, регистрацией искусственного радиоизлучения ионосферы и другими радиофизическими методами диагностики возмущенной КВ-радиоизлучением области ионосферы применяется регистрация искусственного оптического свечения ионосферы и анализ его характеристик [Biondi et al., 1970; Bernhardt et al., 2000]. Одним из основных методов регистрации пространственных распределений является использование специализированных широкоугольных фотокамер (камер всего неба) на основе малошумящих высокочувствительных ПЗС-матриц с интерференционными узкополосными светофильтрами, пропускающими свечение стратифицированных по высоте основных оптических эмиссий верхней атмосферы. Свечение атомарного кислорода 630 нм связано с надтепловыми электронами (>2 эВ), ускоренными плазменными волнами. Как предсказывает теория [Vas'kov et al., 1983; Gurevich et al., 1985], максимум яркости свечения должен быть смещен в сторону более плотной атмосферы вниз от области ускорения в турбулентном слое на расстояние порядка нескольких длин свободного пробега электронов с энергией >2 эВ. Это наблюдалось экспериментально [Haslett, Megill, 1974; Gustavsson et al., 2001, 2008]. Измерения вертикального профиля яркости искусственного свечения представляют интерес как метод исследования энергетических характеристик надтепловых электронов и экспериментальной проверки теоретических моделей ускорения и проникновения ускоренных электронов вверх и вниз от турбулентного слоя. Опубликованных на данный момент экспериментальных данных [Haslett,

Megill, 1974; Gustavsson et al., 2001, 2008; Pedersen et al., 2011a] недостаточно для построения физической модели ускорения и распространения электронов из области плазменной турбулентности [Shindin et al., 2018]. Поэтому использование стереоскопических систем на основе камер всего неба чрезвычайно востребовано в исследованиях модификации ионосферы.

Оптическое излучение верхней атмосферы имеет линейчатый спектр. Соотношение спектральных компонент излучения несет информацию о динамике протекающих фотохимических реакций и температуре газа, а характеристики линий — их положение и ширина — отражают скорость движения и температуру светящегося вещества. Поэтому использование в составе оптических инструментов НГК современных дифракционных спектрометров с охлаждаемыми высокочувствительными фотосенсорами поможет определять степень изменения хода химических реакций в верхней атмосфере в зависимости от степени и характера модификации ионосферы, а также от температуры электронов. Соотношение интенсивностей искусственно генерируемых красной и зеленой линий атомарного кислорода определит высоту, на которой происходит максимальное энерговыделение, и также будет индикатором возникновения стимулированных высыпаний частиц. Использование современных интерферометров Фабри—Перо, адаптированных для проведения аэрономических исследований [Shiokawa et al., 2012], поможет оценить степень нагрева нейтральной компоненты верхней атмосферы и локальное изменение циркуляции (ветра) вследствие передачи энергии от модифицированной заряженной компоненты верхней атмосферы к нейтральной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создаваемый нагревный стенд ИКАР-АИ учитывает весь опыт работ по нагревной тематике в России и за рубежом, а также требования, обусловленные нерешенными в настоящее время задачами.

Предлагаемый частотный диапазон, как показывают результаты предыдущих исследований, является наиболее оптимальным для выполнения новых исследований на стенде ИКАР-АИ. Передача энергии коротковолнового излучения заряженной компоненте верхней атмосферы наиболее эффективна в нижнем диапазоне 2.5–3.5 МГц, где находится вторая гармоника гирочастоты электронов и наблюдается наиболее интенсивная генерация ИИТ, включая и оптическое свечение. Верхняя часть диапазона 4–6 МГц представляет возможность эффективной работы нагревного стенда при повышенном уровне солнечной активности, а также использования ИКАР-АИ в качестве коротковолнового радиолокатора для диагностики ионосферы.

Моделирование разных конфигураций антенного поля показало возможность создания нагревного стенда с необходимыми энергетическими характеристиками, причем решетка с прямоугольной сеткой обладает большей эффективной мощностью в верхней части частотного диапазона по сравнению с коль-

цевой решеткой. Однако создание решетки с плотным заполнением затруднено необходимостью проектирования широкополосной антенны для эффективной работы в диапазоне 2.5–6.0 МГц. В дальнейшем стоит рассмотреть вариант размещения двух гексагональных решеток на нижний и верхний поддиапазоны.

Полноценное использование стенда в качестве КВ-радаров предполагает использование частотного диапазона до 10 МГц и выше, но реализация этого требования может существенно усложнить конструкции антенн и привести к снижению эффективности работы в диапазоне 2.5–6.0 МГц. Поэтому расширять частотный диапазон до 10 МГц для создания полноценного высокопотенциального радиолокационного средства нет необходимости. Возможно, в реальных условиях верхнюю границу диапазона надо будет поднять на величину ~1 МГц, что приведет лишь к незначительному ухудшению характеристик антенны ИКАР-АИ. Функционирование ИКАР-АИ в качестве радара, исследующего ионосферу методом частичных отражений в нижней части рабочего диапазона 2.5 МГц, или коротковолнового радара в верхней части диапазона (6 МГц и выше) может быть обеспечено уже после его создания. Для этого каждый излучающий элемент необходимо будет оснастить соответствующими цифровыми приемниками. Регистрируемые радиолокационные сигналы можно передавать по оптоволоконным линиям системы управления передатчиками, а устройство, суммирующее сигналы с антенн, разместить в центре управления ИКАР-АИ.

Нагревный стенд ИКАР-АИ, входящий в состав НГК, является устройством, обеспечивающим проведение активных экспериментов по воздействию на процессы в верхней атмосфере Земли. Он предоставляет возможность натурального моделирования процессов, влияющих на космическую погоду, и искусственной генерации некоторых событий: стимулированных высыпаний частиц, генерации внутренних гравитационных волн в верхней атмосфере, возбуждения магнитосферных резонансов и др. Модифицированная мощным излучением нагревного стенда заряженная компонента верхней атмосферы (преимущественно разогретые электроны) будет передавать полученную энергию ионам и нейтральной компоненте верхней атмосферы. Особенности этого процесса и его эффективность являются ключевыми пунктами для задач космической погоды, в которых необходимо исследовать транспорт энергии от заряженной компоненты к нейтральной. Впервые на протяжении всей истории радиофизических исследований верхней атмосферы в России с вводом в эксплуатацию ИКАР-АИ в составе НГК реализуется ситуация, в которой исследования процесса транспорта энергии между компонентами атмосферы будут обеспечены наиболее полным составом современных наблюдательных средств. Такими средствами проведения наблюдений будут НР-МСТ радар и МС-лидар, а также широкий набор существующих и создающихся оптических и радиофизиче-

ских средств мониторинга верхней атмосферы. Собранные в одном регионе устройства позволяют наблюдать высотные профили параметров модифицированной мощным коротковолновым излучением ионосферы и нейтральной компоненты верхней атмосферы, оценивать интенсивность и пространственную структуру возникающих неоднородностей плотности, регистрировать изменение хода химических реакций, в том числе для малых компонент атмосферы, исследовать динамику заряженных частиц. Таким образом, ИКАР-АИ и развернутые вокруг него различные диагностические средства помогут более точно определить сечения процессов взаимодействия ионов, электронов и нейтральных атомов азота, кислорода и других атмосферных составляющих при относительно низких энергиях столкновения, труднореализуемых в наземных плазменных установках и ускорителях частиц.

Полученные результаты позволят исследователям по-новому взглянуть на роль различных физико-химических процессов в верхней атмосфере и совершить качественный переход к пониманию солнечно-земных связей, формирования космической погоды, физики атмосферы и околоземного космического пространства.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16. Работа Фролова В.Л. поддержана грантом Министерства науки и высшего образования РФ, полученным в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.» (идентификатор проекта RFMEFI62020X0003, номер соглашения 075-15-2020-529)».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акчурин А.Д., Юсупов К.М., Шерстюков О.Н., Ильдиряков В.Р. Выделение быстротекущих и мелкокомасштабных неоднородностей на одноминутных ионограммах ионозонда «Циклон» // Гелиогеофизические исследования. 2013. № 4. С. 101–110.
- Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ РВЧ ВСНЦ СО РАН, 2006. 480 с.
- Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Толмачева А.В., Бахметьева Н.В. Исследование ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей. Н. Новгород: ИПФ РАН, 1999. 156 с.
- Беляев П.П., Котик Д.С., Митяков С.Н. и др. Генерация сигналов комбинационных частот в ионосфере // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30, № 2. С. 248–286.
- Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 1967. 683 с.
- Грач С.М. О кинетических эффектах в F-области ионосферы, возмущенной мощными радиоволнами // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42, № 7. С. 651–669.
- Грач С.М., Сергеев Е.Н., Шиндин А.В. и др. Искусственные ионосферные слои при частотах волны накачки в области 4-й электронной гирогармоники на стенде HAARP // Доклады Академии наук. 2014. Т. 454, № 5. С. 526–530.
- Грач С.М., Сергеев Е.Н., Мишин Е.В. и др. Динамические характеристики плазменной турбулентности ионосферы, инициированной воздействием мощного корот-

ковольного радиоизлучения // УФН. 2016. Т. 186, № 11. С. 1189–1228. DOI: [10.3367/UFNr.2016.07.037868](https://doi.org/10.3367/UFNr.2016.07.037868).

Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // УФН. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145–1177. DOI: [10.3367/UFNr.0177.200711a.1145](https://doi.org/10.3367/UFNr.0177.200711a.1145).

Ерухимов Л.М., Генкин Л.Г. Ионосфера как космическая плазменная лаборатория (обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. 1992. Т. 35, № 11–12. С. 863–888.

Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42, № 7–8. С. 599–826. (Спец. вып.).

Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 9. С. 719–822. (Спец. вып.).

Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 11. С. 915–1003. (Спец. вып.).

Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1–2. С. 1–140. (Спец. вып.).

Куркин В.И., Ларюнин О.А., Подлесный А.В. Анализ квазиволновых возмущений ионосферы с помощью амплитудных карт по данным ЛЧМ-ионозонда ИСЗФ СО РАН // XXIV Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн (РРВ-24)»: Труды конференции. Иркутск, 2014. С. 214–215.

Ларюнин О.А., Куркин В.И. Восстановление параметров ионосферных возмущений по динамике серпообразных особенностей на ионограммах // Солнечно-земная физика. 2011. Вып. 19. С. 107–115.

Ларюнин О.А., Куркин В.И., Подлесный А.В. Использование данных двух близко расположенных ионозондов при диагностике перемещающихся ионосферных возмущений // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. Т. 19, № 1. С. 10–17.

Михайлов С.Я. Многозначность восстановления профилей плазменной частоты по заданной ВЧХ и их различимость для наклонного распространения коротких радиоволн в изотропной ионосфере // Изв. вузов. Радиофизика. 2000. Т. XLII, № 10. С. 855–872.

Ойнац А.В., Куркин В.И., Ништитани Н., Сайто А. Определение параметров перемещающихся ионосферных возмущений по данным радаров SuperDARN // Электромагнитные волны и электронные системы. 2013. Т. 18, № 8. С. 30–39.

Подлесный А.В., Брынько И.Г., Куркин В.И. и др. Многофункциональный ЛЧМ-ионозонд для мониторинга ионосферы // Гелиогеофизические исследования. 2013. № 4. С. 24–31.

Потехин А.П., Сетов А.Г., Лебедев В.П. и др. Перспективный радар НР-МСТ: потенциал и диагностические возможности // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 3. С. 3–16. DOI: [10.12737/19444](https://doi.org/10.12737/19444).

Фролов В.Л. Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы. Н. Новгород: Изд-во Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 2017. 468 с.

Фролов В.Л., Рапопорт В.О., Шорохова Е.А. и др. Характеристики электромагнитных и плазменных возмущений, индуцируемых на высотах внешней ионосферы Земли при модификации F2-области мощным КВ-радиоизлучением стенда СУРА // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 3. С. 198–222.

Фролов В.Л., Акчурин А.Д., Болотин И.А. и др. Высыпания энергичных электронов из радиационного пояса Земли, стимулированные модификацией среднеширотной ионосферы мощными КВ-радиоволнами // Изв. вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62, № 9.

Черногор Л.Ф., Гармаш К.П., Фролов В.Л. Крупномасштабные возмущения в нижней и средней ионосфере, сопровождавшие воздействие на ионосферу радиоизлучением стенда СУРА // Изв. вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62, № 6. С. 440–459.

Шлюгер И.С. Само модуляция мощного электромагнитного импульса, отраженного от верхних слоев ионосферы // Письма в ЖЭТФ. 1974. Т. 19, вып. 5. С. 247–251.

Ясюкевич Ю.В., Веснин А.М., Первалова Н.П. Сибирская сеть приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем SibNet: текущее состояние // Солнечно-земная физика. 2018. Т. 4, № 4. С. 82–94. DOI: [10.12737/szf-44201809](https://doi.org/10.12737/szf-44201809).

Andreeva E.S., Frolov V.L., Kunitsyn V.E., et al. Radiotomography and HF ray tracing of the artificially disturbed ionosphere above the Sura heating facility // Radio Sci. 2016. V. 51, iss. 6. P. 638–644. DOI: [10.1002/2015RS005939](https://doi.org/10.1002/2015RS005939).

Balanis C.A. Antenna Theory. Analysis and Design. 3rd Edition. John Wiley & Sons, Inc. Publ., 2005. 1099 p.

Bernhardt P.A., Wong M, Huba J.D., et al. Optical remote sensing of the thermosphere with HF pumped artificial airglow // J. Geophys. Res. 2000. V. 105, N A5. P. 10657–10671.

Biondi A.A., Sipler D.P., Hake R.D. Jr. Optical ($\lambda=6300$) detection of radio frequency heating of electrons in the F-region // J. Geophys. Res. 1970. V. 75, N 31. P. 6421.

Erukhimov L.M., Metelev S.A., Myasnikov E.N., et al. Artificial ionospheric turbulence (a review) // Radiophys. Quantum Electronics. 1987. V. 30, N 2. P. 208–225.

Grach S.M., Men'kova Yu.E., Stubbe P. On the penetration of upper hybrid waves into a plasma depletion // Adv. Space Res. 2004. V. 34, iss. 11. P. 2428–2432.

Gurevich A.V. Nonlinear phenomena in the ionosphere. New York: Springer Publ., 1978. 372 p.

Gurevich A.V., Dimant Ya.S., Milikh G.M., Vaskov V.V. Multiple acceleration of electrons in the regions of high-power radio-wave reflection in the ionosphere // J. Atmos. Terr. Phys. 1985. V. 47, N 11. P. 1057–1070.

Gustavsson B., Sergienko T., Rietveld M.T., et al. First tomographic estimate of volume distribution of HF-pump enhanced airglow emission // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2001. V. 106, N A12. P. 29105–29124.

Gustavsson B., Kosch M., Wong A., et al. First estimates of volume distribution of HF-pump enhanced emissions at 6300 and 5577 Å: a comparison between observations and theory // Ann. Geophys. 2008. V. 26, N 12. P. 3999–4012.

Haines D.M., Reinisch B.W. Digisonde Portable Sounder System Manual // University of Massachusetts Lowell Center for Atmospheric Research. 1995. 45 p.

Haslett J.C., Megill L.R. A model of the enhanced airglow excited by RF radiation // Radio Sci. 1974. V. 9, N 11. P. 1005.

J. Atmos. Terr. Phys. 1982. V. 44, N 12. P. 1005–1171. (Special Iss.).

J. Atmos. Terr. Phys. 1985. V. 47, N 12. P. 1149–1333. (Special Iss.).

J. Atmos. Terr. Phys. 1997. V. 59, N 18. P. 2251–2488. (Special Iss.).

J. Geophys. Res. 1970. V. 75, N 31. P. 5961–6452. (Special Iss.).

Kosch M.J., Rietveld M. T., Kavanagh A. J., et al. High-latitude pump-induced optical emissions for frequencies close to the third electron gyro-harmonic // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29, iss. 23. CiteID 2112. DOI: [10.1029/2002GL015744](https://doi.org/10.1029/2002GL015744).

Kosch M.J., Pedersen T., Mishin E., et al. Coordinated optical and radar observations of ionospheric pumping for a frequency pass through the second electron gyroharmonic at HAARP // J. Geophys. Res. 2007. V. 112, A12317. DOI: [10.1029/2006JA015854](https://doi.org/10.1029/2006JA015854).

Kunitsyn V.E., Padokhin A.M., Vasiliev A.E., et al. Study of GNSS-measured ionospheric total electron content variations generated by powerful HF-heating // Adv. Space Res. 2011. V. 47, N 10. P. 1743–1749. DOI: [10.1016/j.asr.2010.03.031](https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.03.031).

Kunitsyn V.E., Andreeva E.S., Frolov V.L., et al. Sounding of HF heating-induced artificial ionospheric disturbances by navigational satellite radio transmissions // Radio Sci. 2012. V. 47, RS0L15. DOI: [10.1029/2011RS004957](https://doi.org/10.1029/2011RS004957).

Kunitsyn V., Kurbatov G., Yasyukevich Yu., Padokhin A. Investigation of SBAS L1/L5 signals and their application to the ionospheric TEC studies // Geoscience and Remote Sens-

ing Lett. 2015. V. 12, N 3. P. 547–551. DOI: [10.1109/LGRS.2014.2350037](https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2350037).

Leyser T.B. Stimulated electromagnetic emissions by high-frequency electromagnetic pumping of the ionospheric plasma // *Space Sci. Rev.* 2001. V. 98, N 3-4. P. 223–328. DOI: [10.1023/A:1013875603938](https://doi.org/10.1023/A:1013875603938).

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.* 2019. (accepted for publication, Paper #2019GL085833R). DOI: [10.1029/2019GL085833](https://doi.org/10.1029/2019GL085833).

Medvedev A.V., Potekhin A.P. Irkutsk Incoherent Scatter Radar: history, present and future // *History of Geo- and Space Sci.* 2019. V. 10, iss. 2. P. 215–224. DOI: [10.5194/hgss-10-215-2019](https://doi.org/10.5194/hgss-10-215-2019).

Mishin E., Sutton E., Milikh G., et al. F2-region atmospheric gravity waves due to high-power HF heating and subauroral polarization streams // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39, L11101. DOI: [10.1029/2012GL052004](https://doi.org/10.1029/2012GL052004).

Mishin E., Wotkins B., Lehtinen N., et al. Artificial ionospheric layers driven by high-frequency radio waves: An assessment // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016. V. 121, iss. 4. P. 3497–3524. DOI: [10.1002/2015JA021823](https://doi.org/10.1002/2015JA021823).

Oinats A.V., Nishitani N., Ponomarenko P., Ratovsky K.G. Diurnal and seasonal behavior of the Hokkaido East SuperDARN ground backscatter: simulation and observation // *Earth, Planets and Space.* 2016. V. 68. Article id. 18. DOI: [10.1186/s40623-015-0378-9](https://doi.org/10.1186/s40623-015-0378-9).

Pedersen T., Gustavsson B., Mishin E., et al. Optical ring formation and ionization production in high-power HF heating experiments at HAARP // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36, iss. 18, L18107. DOI: [10.1029/2009GL040047](https://doi.org/10.1029/2009GL040047).

Pedersen T.R., Holmes J.M., Gustavsson B., Mills T.J. Optical imaging of artificial ionospheric plasmas // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2011a. V. 39, N 11. P. 2704–2705.

Pedersen T., McCarrick M., Reinisch B., Watkins B., Hamel R., Paznukhov V. Production of artificial ionospheric layers by frequency sweeping near the 2nd gyroharmonic // *Ann. Geophys.* 2011b. V. 29. P. 47–51. DOI: [10.5194/angeo-29-47-2011](https://doi.org/10.5194/angeo-29-47-2011).

Perkins F.W., Oberman C., Valeo E.J. Parametric instabilities and ionospheric modification // *J. Geophys. Res.* 1974. V. 79, N A10. P. 1478–1496.

Reinisch B.W., Huang X. Automatic calculation of electron density profiles from digital ionograms: 3. Processing of bottom side ionograms // *Radio Sci.* 1983. V. 18, N 3. P. 477–492.

Sergeev E., Grach S., Shindin A., et al. Artificial ionospheric layers during pump frequency stepping near the 4th gyroharmonic at HAARP // *Phys. Rev. Lett.* 2013. V. 110, iss. 6-8, 065002. DOI: [10.1103/PhysRevLett.110.065002](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.065002).

Sharp E. A triangular arrangement of planar-array elements that reduces the number needed // *IRE Transactions on Antennas and Propagation.* 1961. V. 9, N 2. P. 126–129. DOI: [10.1109/TAP.1961.1144967](https://doi.org/10.1109/TAP.1961.1144967).

Shindin A.V., Klimenko V.V., Kogogin D.A., et al. Spatial characteristics of the 630-nm artificial ionospheric airglow generation region during the Sura facility pumping // *Radiophysics and Quantum Electronics.* 2018. V. 60, N 11. P. 849–865. DOI: [10.1007/s11141-018-9852-0](https://doi.org/10.1007/s11141-018-9852-0).

Shiokawa K., Otsuka Y., Oyama S., et al. Development of low-cost sky-scanning Fabry—Perot interferometers for airglow and auroral studies // *Earth, Planets and Space.* 2012. V. 64, iss. 11. P. 1033–1046. DOI: [10.5047/eps.2012.05.004](https://doi.org/10.5047/eps.2012.05.004).

Streltsov A.V., Berthelie J.J., Chernyshov A.A., et al. Past, present and future of active radio frequency experiments in space // *Space Sci. Rev.* 2018. V. 214, N 118. DOI: [10.1007/s11214-018-0549-7](https://doi.org/10.1007/s11214-018-0549-7).

Stubbe P. Review of ionospheric modification experiments at Tromsø // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1996. V. 58, N 1-4. P. 349–368. DOI: [10.1016/0021-9169\(95\)00041-0](https://doi.org/10.1016/0021-9169(95)00041-0).

Stubbe P., Hagfors T. The Earth's ionosphere: A wall-less plasma laboratory // *Surveys in Geophysics.* 1997. V. 18, N 1. P. 57–127. DOI: [10.1023/A:10065831](https://doi.org/10.1023/A:10065831).

Stubbe P., Kopka H., Dowden R.L. Generation of ELF and VLF waves by polar electrojet modulation: Experimental results // *J. Geophys. Res.* 1981. V. 86, N A11. P. 9073–9078.

Vartanyan A., Milikh G.M., Mishin E., et al. Artificial ducts caused by HF heating of the ionosphere by HAARP // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117, A10307. DOI: [10.1029/2012JA017563](https://doi.org/10.1029/2012JA017563).

Vas'kov V.V., Gurevich A.V., Dimant Ya.S. Multiple acceleration of electrons in plasma resonance // *Journal of Experimental and Theoretical Physics.* 1983. V. 57, N 2. P. 310.

REFERENCES

Afraimovich E.L., Perevalova Y.P. *GPS-monitoring verknei atmosfery Zemli* [GPS Monitoring of Earth's Upper Atmosphere]. Irkutsk, 2006, 480 p. (In Russian).

Akchurin A.D., Yusupov K.N., Sherstyukov O.N., Ildiryakov V.R. Disclosure of transient and small-scale irregularities in the one-minute ionograms of "Cyclon" ionosonde. *Heliogeophys. Res.* 2013, no. 4. pp. 101–110. (In Russian).

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.* 2016, vol. 51, iss. 6, pp. 638–644. DOI: [10.1002/2015RS005939](https://doi.org/10.1002/2015RS005939).

Balanis C.A. *Antenna Theory. Analysis and Design.* Third Edition. John Wiley & Sons, Inc. Publ., 2005. 1099 p.

Belikov V.V., Benediktov E.A., Tolmacheva A.V., Bakhmetyeva N.V. *Issledovanie ionosfery s pomoshchyu iskusstvennykh periodicheskikh neodnorodnostei* [Research into the Ionosphere from Artificial Periodic Irregularities]. Nizhny Novgorod, IAP RAS Publ., 1999, 156 p. (In Russian).

Belyaev P.P., Kotik D.S., Mityakov S.N., Polyakov S.V., Rapoport V.O., Trakhtengerts V.Yu. Generation of signals of combination frequencies in the ionosphere. *Izvestiya vuzov. Radiofizika* [Radiophysics and Quantum Electronics]. 1987, vol. 30, no. 2. pp. 248–286. (In Russian).

Bernhardt P.A., Wong M, Huba J.D., Fejer B.J., Wagner L.S., Goldstain J.A., Selcher G.A., Frolov V.L., Sergeev E.N. Optical remote sensing of the thermosphere with HF pumped artificial airglow. *J. Geophys. Res.* 2000, vol. 105, no. A5, pp. 10657–10671.

Biondi A.A., Sipler D.P., Hake R.D. Jr. Optical ($\lambda=6300$) detection of radio frequency heating of electrons in the F-region. *J. Geophys. Res.* 1970, vol. 75, no. 31, p. 6421.

Chernogor L.F., Garmash K.P., Frolov V.L. Large-scale disturbances in the lower and middle ionosphere accompanied the action on the ionosphere by Sura heating facility. *Izvestiya vuzov. Radiofizika* [Radiophysics and Quantum Electronics]. 2019, vol. 62, no. 6, pp. 440–459. (In Russian).

Erukhimov L.M., Metelev S.A., Myasnikov E.N., Mityakov N.A., Frolov V.L. Artificial ionospheric turbulence (review). *Radiophys. Quantum Electronics.* 1987, vol. 30, no. 2, pp. 208–225.

Erukhimov L.M., Genkin L.G. The ionosphere as a space plasma laboratory (review). *Izvestiya vuzov. Radiofizika* [Radiophysics and Quantum Electronics]. 1992, vol. 35, no. 11-12, pp. 863–888. (In Russian).

Frolov V.L. *Iskusstvennaya turbulentnost' sredneshirotnoi ionosfery* [Artificial turbulence of the Mid-Latitude Ionosphere]. Nizhny Novgorod, National Research Lobachevsky State University Publ. 2017, 468 p. (In Russian).

Frolov V.L., Rapoport V.O., Shorokhova E.A. Characteristics of electromagnetic and plasma disturbances induced at Earth's outer ionosphere heights when modifying F2 region by

powerful HF radiation from Sura heating facility. 2016, vol. 59, no. 3, pp. 198–222. (In Russian).

Frolov V.L., Akchurin A.D., Bolotin I.A., Ryabov A.O., Bertlie Zh.-Zh. Energetic electron precipitation from Earth's radiation belt induced by the modification of the mid-latitude ionosphere by high-power HF radio waves. *Izvestiya vuzov. Radiofizika* [Radiophysics and Quantum Electronics]. 2019, vol. 62, no. 9. (In Russian).

Ginsburg V.L. *Rasprostraneniye elektromagnitnykh voln v plazme* [Propagation of electromagnetic waves in plasma]. Moscow, Nauka Publ. 1967, 683 p. (In Russian).

Grach S.M. On kinetic effects in the F region of the ionosphere disturbed by high-power radio waves. *Izvestiya vuzov. Radiofizika* [Radiophysics and Quantum Electronics]. 1999, vol. 42, no. 7, pp. 651–669. (In Russian).

Grach S.M., Men'kova Yu. E., Stubbe P. On the penetration of upper hybrid waves into a plasma depletion. *Adv. Space Res.* 2004, vol. 34, iss. 11, pp. 2428–2432.

Grach S.M., Sergeev E.N., Shindin A.V., Mishin E.V., Botkine B. Artificial ionospheric layers at pump wave frequencies in the 4th electron gyroharmonic range at HAARP facility. *Doklady AN* [Doklady Physics]. 2014, vol. 454, no 5, pp. 526–530. (In Russian).

Grach S.M., Sergeev E.N., Mishin E.V. Dynamic characteristics of the ionosphere plasma turbulence induced by the action of high-power HF radiation. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Physics-Uspekhi]. 2016, vol. 186, no. 11, pp. 1189–1228. DOI: [10.3367/UFNr.2016.07.037868](https://doi.org/10.3367/UFNr.2016.07.037868). (In Russian).

Gurevich A.V. Nonlinear effects in the ionosphere. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Physics-Uspekhi]. 2007, vol. 177, no. 11, pp. 1145–1177. DOI: [10.3367/UFNr.0177.200711a.1145](https://doi.org/10.3367/UFNr.0177.200711a.1145). (In Russian).

Gustavsson B., Sergienko T., Rietveld M.T., Honary F., Steen A., Brändström B.U.E., et al. First tomographic estimate of volume distribution of HF-pump enhanced airglow emission. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2001, vol. 106, no. A12, pp. 29105–29124.

Gustavsson B., Kosch M., Wong A., Pedersen T., Heinselman C., Mutiso C., et al. First estimates of volume distribution of HF-pump enhanced emissions at 6300 and 5577 Å: a comparison between observations and theory. *Ann. Geophys.* 2008, vol. 26, no. 12, pp. 3999–4012.

Gurevich A.V. Nonlinear phenomena in the ionosphere. New York: Springer Publ. 1978, 372 p.

Gurevich A.V., Dimant Ya.S., Milikh G.M., Vaskov V.V. Multiple acceleration of electrons in the regions of high-power radio-wave reflection in the ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1985, vol. 47, no. 11, pp. 1057–1070.

Haslett J.C., Megill L.R. A model of the enhanced airglow excited by RF radiation. *Radio Sci.* 1974, vol. 9, no. 11, p. 1005.

Haines D.M., Reinisch B.W. Digisonde Portable Sounder System Manual. *University of Massachusetts Lowell Center for Atmospheric Research.* 1995, 45 p.

J. Atmos. Terr. Phys. 1982, vol. 44, no. 12, pp. 1005–1171. (Special Iss.).

J. Atmos. Terr. Phys. 1985, vol. 47, no. 12, pp. 1149–1333. (Special Iss.).

J. Atmos. Terr. Phys. 1997, vol. 59, no. 18, pp. 2251–2488. (Special Iss.).

J. Geophys. Res. 1970, vol. 75, no. 31, pp. 5961–6452. (Special Iss.).

Kosch M.J., Rietveld M.T., Kavanagh A.J., Davis C., Yeoman T.K., Honary F., Hagfors T. High-latitude pump-induced optical emissions for frequencies close to the third electron gyro-harmonic. *Geophys. Res. Lett.* 2002, vol. 29, iss. 23, CiteID 2112. DOI: [10.1029/2002GL015744](https://doi.org/10.1029/2002GL015744).

Kosch M.J., Pedersen T., Mishin E., Oyama S., Hughes J., Senior A., Watkins B., Bristow B. Coordinated optical and radar observations of ionospheric pumping for a frequency pass through the second electron gyroharmonic at HAARP. *J.*

Geophys. Res. 2007, vol. 112, A12317. DOI: [10.1029/2006JA015854](https://doi.org/10.1029/2006JA015854).

Kunitsyn V.E., Padokhin A.M., Vasiliev A.E., Kurbatov G.A., Frolov V.L., Komrakov G.P. Study of GNSS-measured ionospheric total electron content variations generated by powerful HF-heating. *Adv. Space Res.* 2011, vol. 47, no. 10, pp. 1743–1749. DOI: [10.1016/j.asr.2010.03.031](https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.03.031).

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 navigational satellite radio transmissions. *Radio Sci.* 2012, vol. 47, RS0L15. DOI: [10.1029/2011RS004957](https://doi.org/10.1029/2011RS004957).

Kunitsyn V., Kurbatov G., Yasyukevich Yu., Padokhin A. Investigation of SBAS L1/L5 signals and their application to the ionospheric TEC studies. *Geoscience and Remote Sensing Lett.* 2015, vol. 12, no. 3, pp. 547–551. DOI: [10.1109/LGRS.2014.2350037](https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2350037).

Kurkin V.I., Laryunin O.A., Podlesnyi A.V. Analysis of quasi-wave ionospheric disturbances using amplitude maps from ISTP SB RAS LFM ionosonde data. *Proc. XXIV Russian National Scientific Conference "Radio Wave Propagation (RWP-24)".* Irkutsk, 2014, pp. 214–215. (In Russian).

Laryunin O.A., Kurkin V.I. Restoring the parameters of ionospheric disturbances from dynamics of sickle-shaped structures on ionograms. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Physics] 2011, iss. 19, pp. 107–115. (In Russian).

Laryunin O.A., Kurkin V.I., Podlesnyi A.V. Using data of two closely spaced ionosondes when detecting travelling ionospheric disturbances. *Elektromagnitnye volny I elektronnye sistemy* [J. Electromagnetic Waves and Electronic Systems]. 2014, vol. 19, no. 1, pp. 10–17. (In Russian).

Leyser T.B. Stimulated electromagnetic emissions by high-frequency electromagnetic pumping of the ionospheric plasma. *Space Sci. Rev.* 2001, vol. 98, no. 3-4, pp. 223–328. DOI: [10.1023/A:1013875603938](https://doi.org/10.1023/A:1013875603938).

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.* 2019, (accepted for publication, Paper #2019GL085833R). DOI: [10.1029/2019GL085833](https://doi.org/10.1029/2019GL085833).

Medvedev A.V., Potekhin A.P. Irkutsk Incoherent Scatter Radar: history, present and future. *History of Geo- and Space Sci.* 2019, vol. 10, iss. 2, pp. 215–224. DOI: [10.5194/hgss-10-215-2019](https://doi.org/10.5194/hgss-10-215-2019).

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 streams. *Geophys. Res. Lett.* 2012, vol. 39, L11101. DOI: [10.1029/2012GL052004](https://doi.org/10.1029/2012GL052004).

Mishin E., Watkins B., Lehtinen N., Eliasson B., Pedersen N., Grach S. Artificial ionospheric layers driven by high-frequency radio waves: An assessment. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016, vol. 121, iss. 4, pp. 3497–3524. DOI: [10.1002/2015JA021823](https://doi.org/10.1002/2015JA021823).

Mikhailov S.Ya. Ambiguity of restoring profiles of plasma frequency by given height–frequency characteristic, and their distinguishability for oblique propagation of short radio waves in the isotropic ionosphere. *Izvestiya vuzov. Radiofizika* [Radiophysics and Quantum Electronics]. 2000, vol. XLII, no. 10, pp. 855–872. (In Russian).

Oinats A.V., Kurkin V.I., Nishitani N., Saito A. Determining parameters of travelling ionospheric disturbances from SuperDARN data. *Elektromagnitnye volny I elektronnye sistemy* [J. Electromagnetic Waves and Electronic Systems]. 2013, vol. 18, no. 8, pp. 30–39. (In Russian).

Oinats A.V., Nishitani N., Ponomarenko P., Ratovsky K.G. Diurnal and seasonal behavior of the Hokkaido East SuperDARN ground backscatter: simulation and observation. *Earth, Planets and Space.* 2016, vol. 68, article id. 18. DOI: [10.1186/s40623-015-0378-9](https://doi.org/10.1186/s40623-015-0378-9).

Pedersen T., Gustavsson B., Mishin E., MacKenzie E., Carlson H.C., Starks M., Mills T. Optical ring formation and

ionization production in high-power HF heating experiments at HAARP. *Geophys. Res. Lett.* 2009, vol. 36, iss. 18, L18107. DOI: [10.1029/2009GL040047](https://doi.org/10.1029/2009GL040047).

Pedersen T.R., Holmes J.M., Gustavsson B., Mills T.J. Optical imaging of artificial ionospheric plasmas. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2011a, vol. 39, no. 11, pp. 2704–2705.

Pedersen T., McCarrick M., Reinisch B., Watkins B., Hamel R., Paznukhov V. Production of artificial ionospheric layers by frequency sweeping near the 2nd gyroharmonic. *Ann. Geophys.* 2011b, vol. 29, pp. 47–51. DOI: [10.5194/angeo-29-47-2011](https://doi.org/10.5194/angeo-29-47-2011).

Perkins F.W., Oberman C., Valeo E.J. Parametric instabilities and ionospheric modification. *J. Geophys. Res.* 1974, vol. 79, no. A10, pp. 1478–1496.

Podlesnyi A.V., Bryn'ko I.G., Kurkin V.I., Berezovsky V.A., Kiselev A.M., Petukhov E.V. Multi-functional LFM ionosonde for the ionosphere monitoring. *Geliogeofizicheskie issledovaniya* [Heliogeophys. Res.]. 2013, no. 4, pp. 24–31. (In Russian).

Potekhin A.P., Setov A.G., Lebedev V.P., Kushnarev D.S. Perspective IS-MST radar: potential and diagnostic capabilities. *Solar-Terr. Phys.* 2016, vol. 2, no 3, pp. 3–21. DOI: [10.12737/22281](https://doi.org/10.12737/22281).

Radiophysics and Quantum Electronics. 1999, vol. 42, no. 7-8, pp. 525–736. (Special Iss.).

Radiophysics and Quantum Electronics. 2005, vol. 48, no. 9, pp. 639–730. (Special Iss.).

Radiophysics and Quantum Electronics. 2008, vol. 51, no. 11, pp. 862–889. (Special Iss.).

Radiophysics and Quantum Electronics. 2012, vol. 55, no. 1-2, pp. 1–141. (Special Iss.).

Reinisch B.W., Huang X. Automatic calculation of electron density profiles from digital ionograms: 3. Processing of bottomside ionograms. *Radio Sci.* 1983, vol. 18, no. 3, pp. 477–492.

Sergeev E., Grach S., Shindin A., Mishin E., Bernhardt P., Briczinski S., Isham B., Broughton M., Labelle J., Watkins B. Artificial ionospheric layers during pump frequency stepping near the 4th gyroharmonic at HAARP. *Phys. Rev. Lett.* 2013, vol. 110, iss. 6-8, 065002. DOI: [10.1103/PhysRevLett.110.065002](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.065002).

Sharp E. A triangular arrangement of planar-array elements that reduces the number needed. *IRE Transactions on Antennas and Propagation.* 1961, vol. 9, no. 2, pp. 126–129. DOI: [10.1109/TAP.1961.1144967](https://doi.org/10.1109/TAP.1961.1144967).

Shindin A.V., Klimenko V.V., Kogogin D.A., Beletsky A.B., Grach S.M., Nasyrov I.A., Sergeev E.N. Spatial characteristics of the 630-nm artificial ionospheric airglow generation region during the Sura facility pumping. *Radiophysics and Quantum Electronics.* 2018, vol. 60, no. 11, pp. 849–865. DOI: [10.1007/s11141-018-9852-0](https://doi.org/10.1007/s11141-018-9852-0).

Shiokawa K., Otsuka Y., Oyama S., Nozawa S., Satoh M., Katoh Y., et al. Development of low-cost sky-scanning Fabry—Perot interferometers for airglow and auroral studies. *Earth, Planets and Space.* 2012, vol. 64, iss. 11, pp. 1033–1046. DOI: [10.5047/eps.2012.05.004](https://doi.org/10.5047/eps.2012.05.004).

Shlyuger I.S. Self-modulation of powerful electromagnetic pulse reflected from upper layers of the ionosphere. (In Russian). *Pis'ma v ZhETF* [JETP Lett.] 1974, vol. 19, iss. 5, pp. 247–251. (In Russian).

Streltsov A.V., Berthelier J.J., Chernyshov A.A., Frolov V.L., Honary F., Kosch M.J., et al. Past, Present and Future of Active Radio Frequency Experiments in Space. *Space Sci. Rev.* 2018, vol. 214, no. 118. DOI: [10.1007/s11214-018-0549-7](https://doi.org/10.1007/s11214-018-0549-7).

Stubbe P. Review of ionospheric modification experiments at Tromsø. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1996, vol. 58, no. 1-4, pp. 349–368. DOI: [10.1016/0021-9169\(95\)00041-0](https://doi.org/10.1016/0021-9169(95)00041-0).

Stubbe P., Hagfors T. The Earth's ionosphere: A wall-less plasma laboratory. *Surveys in Geophysics.* 1997, vol. 18, no. 1, pp. 57–127. DOI: [10.1023/A:10065831](https://doi.org/10.1023/A:10065831).

Stubbe P., Kopka H., Dowden R.L. Generation of ELF and VLF waves by polar electrojet modulation: Experimental results. *J. Geophys. Res.* 1981, vol. 86, no. A11, pp. 9073–9078.

Vartanyan A., Milikh G.M., Mishin E., Parrot M., Galkin I., Reinisch B., et al. Artificial ducts caused by HF heating of the ionosphere by HAARP. *J. Geophys. Res.* 2012, vol. 117, A10307. DOI: [10.1029/2012JA017563](https://doi.org/10.1029/2012JA017563).

Vas'kov V.V., Gurevich A.V., Dimant Ya.S. Multiple acceleration of electrons in plasma resonance. *Journal of Experimental and Theoretical Physics.* 1983, vol. 57, no. 2, p. 310.

Yasyukevich Yu.V., Vesnin A.M., Perevalova N.P. SibNet — Siberian Global Navigation Satellite System Network: Current state. *Solar-Terr. Phys.* 2018, vol. 4, no. 4, pp. 63–72. DOI: [10.12737/stp-44201809](https://doi.org/10.12737/stp-44201809).

Как цитировать эту статью:

Васильев Р.В., Сетов А.Г., Фролов В.Л., Ратовский К.Г., Белецкий А.Б., Ойнац А.В., Ясюкевич Ю.В., Медведев А.В. Современный нагревательный стенд для исследования ионосферы средних широт. *Солнечно-земная физика.* 2020. Т. 6, № 2. С. 61–78. DOI: [10.12737/szf-62202005](https://doi.org/10.12737/szf-62202005).