

Физические явления, происходящие на Солнце, оказывают сильное влияние на процессы в магнитосфере и ионосфере Земли, вызывают изменения нижней атмосферы и биосферных ритмов. Флуктуации магнитосферно-ионосферных параметров — близкого околоземного космического пространства (ОКП) — становятся причиной снижения работоспособности наземных средств радиосвязи, радионавигации и загоризонтной радиолокации, использующих ионосферу как канал распространения радиоволн. Для обеспечения надежной работы радиотехнических средств необходимо диагностирование процессов в ближнем ОКП и прогнозирование его состояния. Проблема диагноза и прогноза системы магнитосфера–ионосфера имеет и другое, не менее важное значение. В последнее время осуществляется определенное антропогенное влияние на геофизические процессы, которое может быть как случайным, так и преднамеренным, поэтому важно научиться отличать естественные возмущения от искусственных. К наиболее сильным искусственным факторам воздействия можно отнести высотные взрывы, выбросы химических реагентов с борта ракет или космических аппаратов, но, на наш взгляд, наиболее перспективным методом активных воздействий на ОКП является мощное радиоизлучение. Именно при помощи мощного радиоизлучения специальных КВ-нагревных стенов можно получить

контролируемые и повторяемые результаты воздействия на ионосферу и магнитосферу Земли. Вследствие особенностей строения магнитного поля Земли наиболее сильные возмущения наблюдаются в высоких широтах.

Для удовлетворительного диагноза и прогноза с целью предупреждения и минимизации последствий от опасных гелиогеофизических явлений необходим комплексный подход, который включает в себя большой ансамбль методов и средств наблюдений и, что особенно важно, рассматривает систему солнечно-земных связей как единое целое.

Целью выполненных в 2022–2024 годах в ААНИИ работ являлись комплексные исследования, направленные на развитие методов и средств мониторинга геофизической обстановки над территорией РФ и Арктики. Исследования выполнялись на большом массиве данных, полученных с сети геофизического мониторинга Росгидромета и научно-исследовательских станций ААНИИ, результатов экспериментов по активным воздействиям при помощи нагревных стенов и из открытых источников.

Работы проводились одновременно по нескольким направлениям. Большое внимание уделялось разработке моделей и программных средств, позволяющих диагностировать параметры ионосферы в высоких широтах. Необходимость разработки подобных продуктов свя-

Рис. 1. Сеть геофизического мониторинга Росгидромета в Арктике



зана с тем, что существующая сеть пунктов наблюдения не обеспечивает получения данных с необходимым пространственно-временным разрешением, поскольку большая часть высоких широт покрыта морями Северного Ледовитого океана. Разработка оптимизированных адаптивных моделей, способных с высоким разрешением оценивать параметры ионосферы, является крайне актуальной.

Моделирование процессов в высокоширотной ионосфере

В рамках выполненных исследований реализован программный код модели E-слоя ионосферы (AIM-E), с помощью которой возможно количественно оценить изменения 10 ионосферных компонент и рассчитать 39 химических реакций. Программный комплекс численной модели AIM-E позволяет производить диагностирование авроральной ионосферы при различных уровнях солнечной и геомагнитной активности в диапазоне высот от 90 до 140 км и геомагнитных широт выше 50°. В программный комплекс модели входят блоки расчета фото- и корпускулярной ионизации, что позволяет производить расчеты химического состава высокоширотной ионосферы в дневное и ночное время. Реализовано численное решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений для малых нейтральных компонент и ионов с использованием метода Гира.

Количественная информация об уровне ионной и электронной концентрации является критически важной для прогноза ионосферы и связанной с ней динамики плазмы в ОКП. Разработана серверная версия кода модели, которая доступна на странице сайта Полярного геофизического центра <https://geophys.aari.ru>. На сайте представлены и другие программные продукты, разработанные в рамках данного проекта и предоставляющие информацию с геофизических средств измерений в Арктической зоне РФ.

Исследования искусственных воздействий на ионосферу

Другим направлением геофизических исследований являлась оценка антропогенного воздействия на ионосферу мощного КВ-радиоизлучения нагревных

стендов. Нагревной стенд представляет собой комплекс радиопередатчиков и фазированную антенную решетку — несколько десятков антенн, способных сфокусировать излучаемый радиосигнал в узкий луч. Такие установки работают в КВ-диапазоне от 2,8 до 10 МГц. В настоящее время подобные эксперименты проводятся на трех действующих установках, которые обладают эффективной мощностью излучения сотни мегаватт: стенд EISCAT/Heating, расположенный на севере Норвегии, HAARP на Аляске и Сура в Нижегородской области. Для исследований использовался массив данных, нарабатанных сотрудниками института на стендах EISCAT/Heating, Сура и SPEAR (арх. Шпицберген) за несколько десятков лет. Стенд SPEAR в 2014 году был законсервирован. Рис. 2 показывает расположение нагревных стендов (синие звезды) и средств диагностики (желтые ромбы), на которых в разное время проводились эксперименты сотрудниками отдела геофизики.

При выполнении работ проанализированы конструкция нагревных стендов, их основные характеристики и типы излучаемых сигналов. В целях прогнозирования возможности приема радиоизлучения комплексов HAARP и EISCAT/Heating было проведено моделирование траекторных и энергетических характеристик на радиолиниях, соединяющих нагревные стенды с приемными пунктами на территории России.

На рис. 3 приведена карта, поясняющая геометрию расположения нагревных стендов HAARP и EISCAT/Heating и пунктов приема в Санкт-Петербурге, Баренцбурге (арх. Шпицберген), Петропавловске-Камчатском и Уэлене (п-ов Чукотка), а также радиотрасс распространения КВ-радиосигналов, соединяющих нагревные стенды с пунктами приема. На рисунке также представлено географическое распределение зоны аврорального поглощения (авроральный овал). На изолиниях овала цифрами отмечены вероятности появления аврорального поглощения более 1 дБ (по данным риометрических измерений на частоте 32 МГц).

Пример результатов моделирования траекторных характеристик распространения КВ-радиосигнала на трассе HAARP — Санкт-Петербург на частоте $f = 6$ МГц

Рис. 2. Расположение нагревных стендов и средств дистанционной диагностики

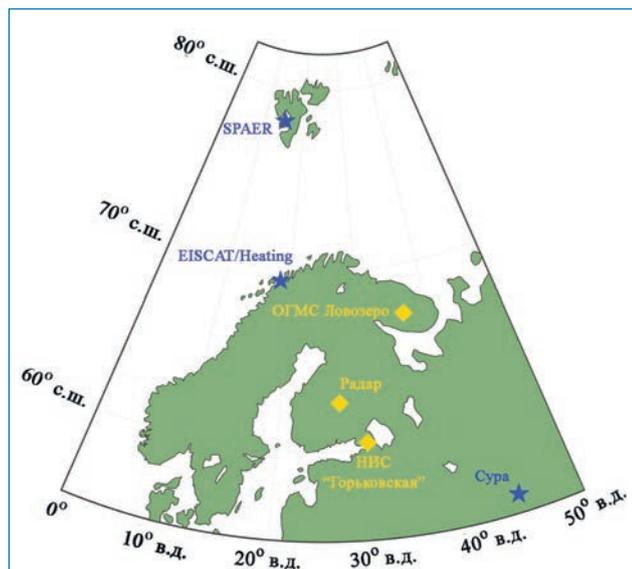
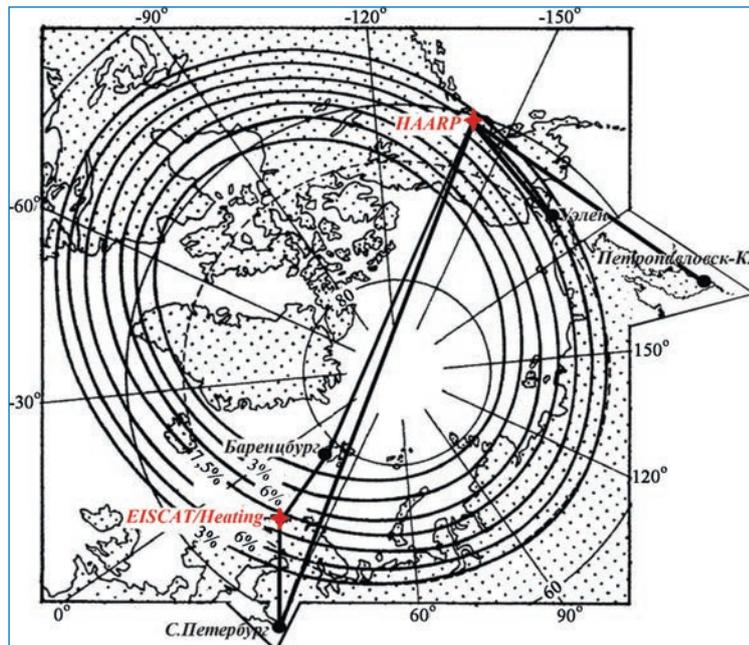


Рис. 3. Радиотрассы распространения сигналов нагревных стендов при моделировании



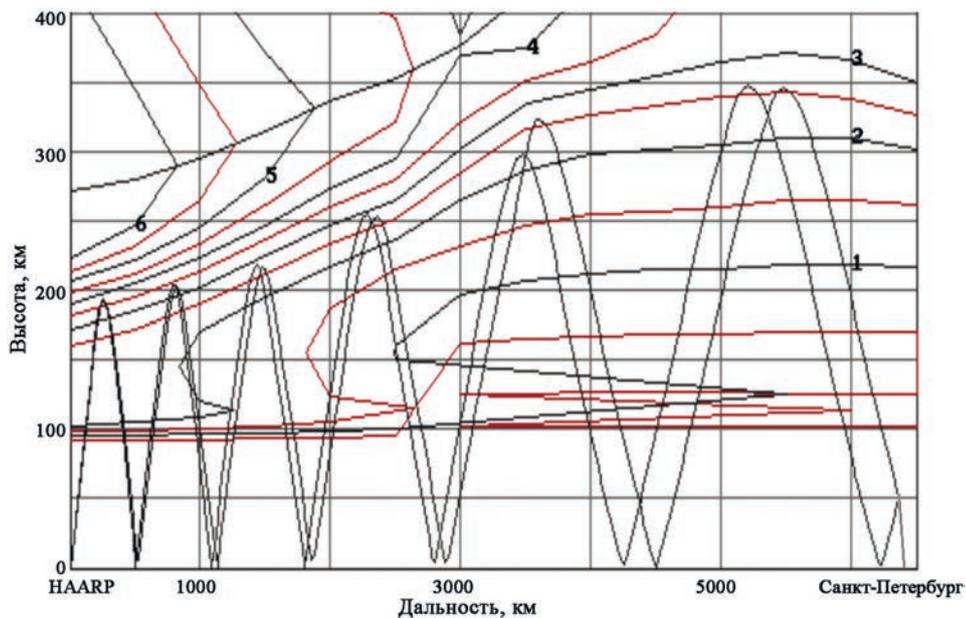


Рис. 4. Траектория распространения сигнала от станда HAARP до приемного пункта в Санкт-Петербурге

для условий равноденствия в полночь по всемирному времени приведен на рис. 4. Солнечная активность задана числом Вольфа $W = 150$. Изолиниями на рисунке показано распределение критических частот ионосферы в МГц. Расчеты показали, что вероятность приема сигналов нагревных стандов имеет сильную зависимость от времени года, солнечной активности и геофизических условий, выражаемых авроральным поглощением и поглощением в полярной шапке.

Особое внимание было уделено исследованию свойств мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) — «пузырей» плазмы с пониженной или повышенной концентрацией электронов, которые образуются под действием мощного излучения

станда, и их влияния на распространение радиоволн. Для диагностирования МИИН использовались технические средства, расположенные на станции ААНИИ «Горьковская» в Ленинградской области, ОГМС Ловозеро и радар CUTLASS в Финляндии. Рассмотрены такие характеристики неоднородностей, как время их образования и релаксации (исчезновения), показано, что время существования неоднородностей после прекращения излучения станда может составлять от единиц секунд до десятка минут. Горизонтальные размеры искусственно возмущенной области, в которой регистрируются МИИН, существенно зависят от режимов излучения нагревного станда и могут достигать 200 км. Разработано программное обеспечение, позволяющее смоделировать влияние

Рис. 5. Сеть станций наклонного зондирования ионосферы



МИИН на траекторные характеристики распространения радиоволн.

Результаты выполненной работы по исследованию влияния мощного излучения нагревных стэндов на ионосферу нашли широкое применение при проектировании нового стэнда ИКАР-АИ (Иркутская коротковолновая антенная решетка с активными излучателями). Сотрудники ААНИИ были приглашены в группу по разработке требований научных задач стэнда ИКАР-АИ, который будет строиться в рамках проекта Национального геофизического комплекса Российской академии наук на юге Иркутской области. Ввод установки в эксплуатацию намечен на 2030 год.

Оценка влияния геофизических условий на распространение радиоволн

Высокоширотная ионосфера, особенно в возмущенных геофизических условиях, обладает значительной турбулентностью. Поэтому для уверенного определения условий функционирования любых КВ-радиосистем в этом регионе необходим мониторинг ионосферы и условий распространения радиоволн. В Арктической зоне для изучения ионосферы и распространения радиоволн КВ-диапазона развернута сеть наклонного зондирования ионосферы. Сеть состоит из пунктов приема и передачи диагностических сигналов. Работа сети наклонного зондирования построена таким образом, что в заданные промежутки времени из передающего пункта излучается диагностический сигнал, а все остальные пункты сети его принимают. Анализ зарегистрированных сигналов позволяет определить условия распространения радиоволн на трассе передатчик — приемник и оценить параметры ионосферы. В настоящее время в рамках научно-технического сотрудничества проводится интеграция сетей наклонного зондирования ионосферы ФГБУ ААНИИ и Института солнечно-земной физики РАН. Дальнейшая предполагаемая кооперация с академическими институтами позволит существенно расширить покрытие сети.

Разработка методов и алгоритмов, позволяющих автоматически в оперативном режиме проводить обработку данных наклонного зондирования ионосферы и выводить рекомендации по использованию частотного диапазона, имеет большую практическую значимость как для определения оптимальных режимов функционирования средств радиотехнических систем, так и для задач изучения физики околоземного космического пространства.

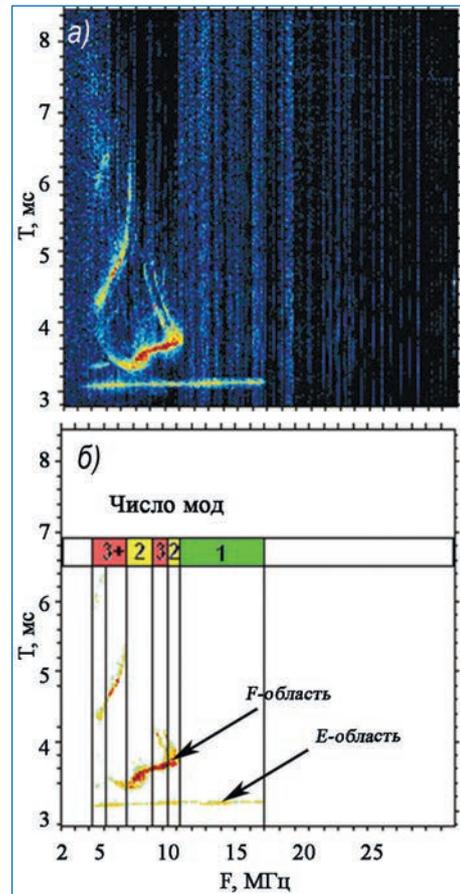
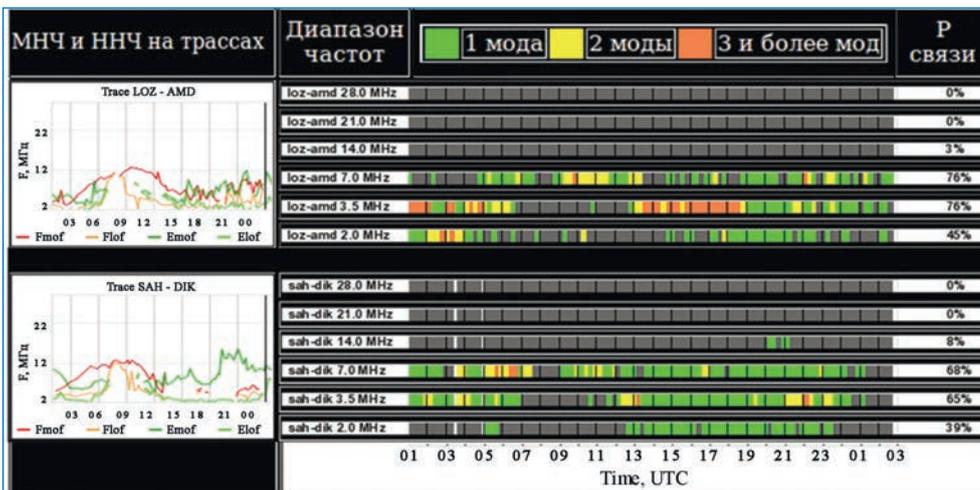


Рис. 6. Исходная ионограмма наклонного зондирования ионосферы (а) и принцип работы алгоритма автоматической обработки (б)

Результатом наклонного зондирования является ионограмма — частотно-временная характеристика радиотрассы. Большинство пунктов сети автоматически в режиме реального времени отправляют результаты зондирования в Полярный геофизический центр (ПГЦ) ААНИИ. В течение только одного часа в базе данных ПГЦ накапливается несколько десятков ионограмм.

Для обработки таких массивов данных требуются большие человеческие ресурсы. В рамках проекта НИТР был выполнен комплекс работ по обработке результатов зондирования, их систематизации и представлению потребителям в автоматическом режиме. Разработанные алгоритмы и программное обеспечение позволя-

Рис. 7. Результаты обработки ионограмм наклонного зондирования ионосферы в автоматическом режиме



ют выполнить фильтрацию ионограмм (очистить от помех), автоматически идентифицировать следы треков, определить интересующие параметры треков и многомодовость распространения на конкретных частотах. Исходная ионограмма и принцип работы алгоритма автоматической обработки представлены на рис. 6. Результаты обработки сохраняются в базах данных ПГЦ и визуализируются оператору в виде графиков суточного хода параметров радиотрасс. На рис. 7 приведен пример результатов автоматической обработки ионограмм наклонного радиозондирования на трассах Ловозеро — Амдерма (LOZ-AMD) и Салехард — Диксон (SAH-DIK). Слева на панелях показан суточный ход максимальных и минимальных частот радиосвязи посредством отражения от F-области (F_{mof} и F_{lof}) и E-области (E_{mof} и E_{lof}) ионосферы. Справа на рисунке представлена информация о траекториях распространения радиоволн на данных трассах и вероятности радиосвязи на конкретных частотах.

Цели, поставленные в плане научно-исследовательских и технологических работ, были продиктованы актуальностью проблем мониторинга геофизической

обстановки в высоких широтах. В рамках реализации данного Проекта были разработаны алгоритмы автоматического анализа информации, поступающей в оперативном режиме с пунктов геофизического мониторинга Росгидромета, получены количественные характеристики естественных и искусственных ионосферных возмущений, усовершенствован и внедрен комплекс моделей для оценки параметров высокоширотной ионосферы. Полученные результаты позволили решить часть проблем в области диагноза геофизической обстановки в Арктике и вскрыть новые, требующие дальнейших исследований.

Авторы выражают большую благодарность всем сотрудникам отдела геофизики, принявшим участие в реализации проекта, сотрудникам Высокоширотной арктической экспедиции и Российской научной арктической экспедиции на арх. Шпицберген за поддержку.

*А.С. Калишин, Н.Ф. Благовещенская, Т.Д. Борисова,
С.А. Долгачева (АНИИ)*