

## РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И ТЕХНОЛОГИЙ НАБЛЮДЕНИЙ ЕСТЕСТВЕННЫХ И ИСКУССТВЕННЫХ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В АРКТИКЕ

В 2022 году были продолжены работы в рамках развития и модернизации технологий мониторинга геофизической обстановки над территорией Российской Федерации и Арктики. Основными целями мониторинга геофизической обстановки на сети станций Росгидромета являются прогноз и своевременное предупреждение об опасных гелиогеофизических явлениях и изменениях условий распространения радиоволн. Прошедший этап научно-исследовательских работ касался разработки методов диагноза состояния высокоширотной ионосферы программно-аппаратными комплексами и адаптивными моделями, методов исследований в области генерации искусственных возмущений ионосферы, разработки руководящих документов по проведению ионосферных наблюдений. Выполненные работы нацелены на повышение качества наблюдений на сети станций мониторинга, своевременный прогноз и оповещение об опасных геофизических условиях. Ниже мы приводим основные результаты, полученные в ходе реализации очередного этапа работ.

ценных условиях, при различных уровнях солнечной и геомагнитной активности (в т. ч. в периоды геомагнитных бурь и суббурь), т. к. учитывает как солнечное УФ-излучение, так и электронные высыпания в качестве источников ионизации. Схема модели приведена на рис. 1.

Информация о химическом составе E-слоя ионосферы крайне важна как для теоретических задач ионосферно-магнитосферного взаимодействия, изучения связи космической погоды и климата, построения глобальной электрической цепи, так и для различных практических целей, например для определения условий распространения радиоволн. Динамическая система электрических токов, возникающая в E-слое во время сильных магнитосферных возмущений, способна формировать паразитные токи в линиях связи, электрических энергосистемах и трубопроводах на поверхности Земли. AIM-E позволяет рассчитывать состав ионосферы во всей высокоширотной E-области и применима для оценки текущих условий и прогнозирования. С ее помощью можно с высокой точностью восстановить круп-

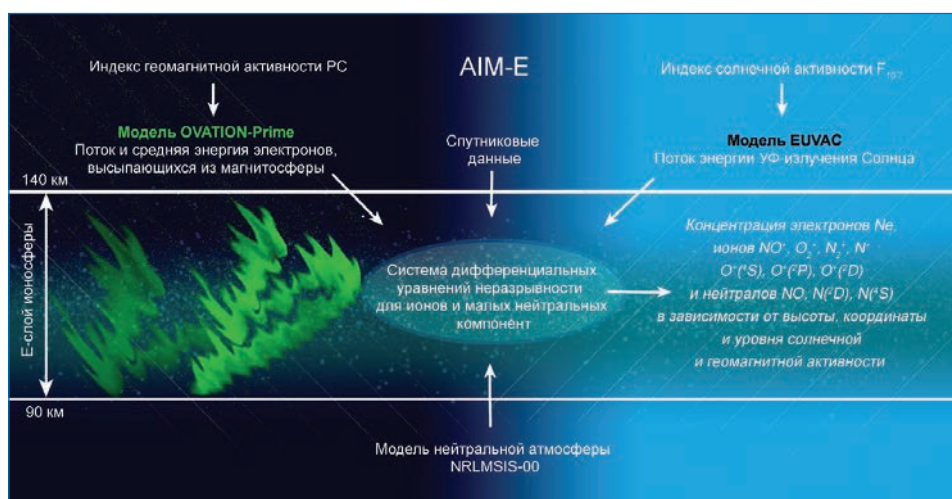


Рис. 1. Схема модели AIM-E

В настоящее время большое количество исследований посвящено космической погоде — влиянию космических факторов на техническую, промышленную, экономическую деятельность человека. Полярные сияния, регистрируемые в авроральной зоне на высотах слоя E ионосферы (90–140 км), являются зеркалом, отражающим космическое воздействие на нашу планету. На ионизацию этой динамичной области верхней атмосферы влияет ультрафиолетовое (УФ) излучение Солнца, а также в высоких широтах большую роль играет эффект высыпаний энергичных электронов из магнитосферы.

В отделе геофизики ФГБУ «АНИИ» была создана диагностическая модель E-слоя авроральной ионосферы Земли — Aurora Ionosphere Model (AIM-E). Модель применима для расчета концентрации малых нейтральных компонент  $NO$ ,  $N(^4S)$ ,  $N(^2D)$ , ионов  $N^+$ ,  $N_2^+$ ,  $NO^+$ ,  $O_2^+$ ,  $O(^4S)$ ,  $O(^2D)$ ,  $O(^2P)$  и электронов  $N_e$ . Она позволяет производить диагностику ионосферы в освещенных и неосве-

номасштабную динамику авроральной ионосферы в возмущенных геомагнитных периодах.

Модель можно использовать для ретроспективного анализа состояния ионосферы, используя индексы геомагнитной и солнечной активности. На рис. 2 показан пример расчета электронной концентрации и содержания основных ионов, формирующих E-слой ионосферы. Значения концентраций  $N_e$ ,  $NO^+$ ,  $O_2^+$  и  $N_2^+$  (панели б–д) были получены для высокоширотной станции Тромсё, Норвегия (69° с. ш., 19° в. д.) в высотном интервале от 90 до 140 км с шагом по высоте 1 км для 18 января 2007 года. На панели (а) приведены индексы геомагнитной активности AE и PC. Периоды их возрастания говорят об увеличении геомагнитной активности. В рассматриваемый период наблюдалось две геомагнитные суббури: первая с 18:45 до 20:45 UTC и вторая с началом примерно в 21:45. Одновременно с возрастанием геомагнитной активности можно наблюдать рост расчетной элек-

тронной концентрации в 3–4 раза относительно спокойного уровня до начала суббурь, а также увеличение содержания ионов на высотах E-слоя ионосферы. Благодаря учету высыпаний электронов магнитосферного происхождения, модель AIM-E позволяет количественно оценивать состав ионосферы и его динамику во время геомагнитных суббурь. Модифицированная модель AIM-E (PC), использующая в качестве входного параметра геомагнитный индекс PC, является уникальной моделью высокоширотной ионосферы, работающей только с наземными данными, что позволяет производить расчеты даже в отсутствие спутниковых измерений.

Искусственное воздействие на ионосферную плазму при помощи мощных КВ-радиоволн обладает огромным потенциалом в области генерации целого ряда

явлений космической погоды, а также может служить инструментом диагностирования ионосферы. Классические пассивные исследования ионосферы включают в себя дистанционное радиозондирование, оптические наблюдения, зондирование при помощи ракет и космических аппаратов и модельные исследования. Определенной сложностью исследования ионосферы пассивными методами является необходимость дожидаться требуемых условий и параметров ионосферы, а также выделить изучаемое событие на фоне других происходящих процессов. В отличие от этого, активные воздействия по разработанному методикам позволяют возбуждать необходимые физические явления в исследуемой области ионосферы, а интенсивность их может превосходить естественные. Стоит отметить, что искусственные возмущения в ионосфере могут контролироваться возбуждаться в рамках научно-исследовательских работ или случайно/преднамеренно различными радиотехническими средствами большой мощности, работающими в декаметровом диапазоне.

К основным направлениям исследований в области искусственного изменения состояния космической погоды и условий распространения радиоволн можно отнести следующие: создание искусственных слоев ионосферы и связанных с этим эффектов распространения КВ- и УКВ-радиоволн, генерация очень низкочастотных (ОНЧ) — крайне низкочастотных (КНЧ)-радиоволн (от 3 Гц до 30 кГц) и исследование особенностей их распространения, возбуждение искусственных мелкомасштабных неоднородностей плазмы и их влияние на распространение радиоволн разных диапазонов, исследование генерации и свойств искусственного радиоизлучения ионосферы, исследование механизмов триггирования магнитных суббурь, исследование механизмов возбуж-

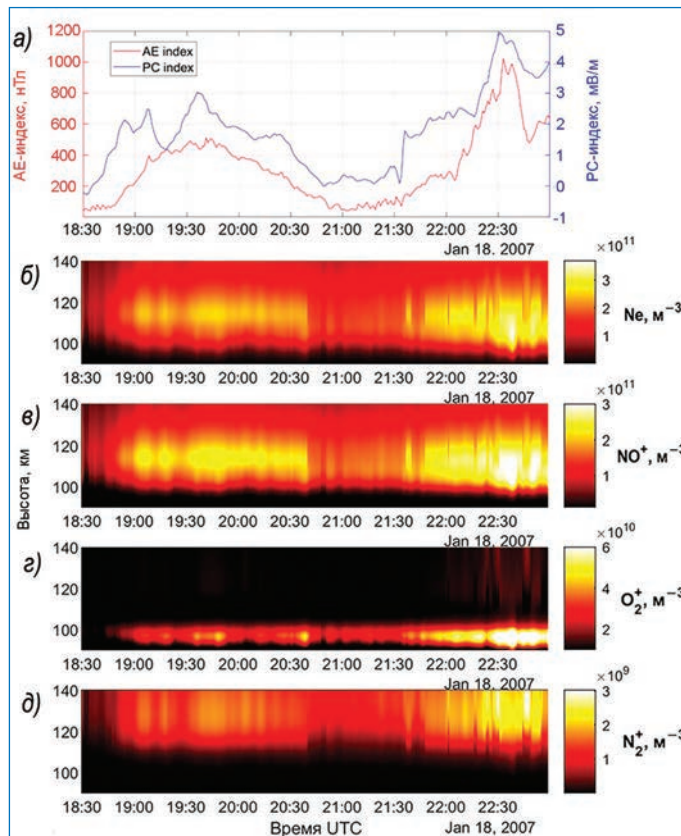


Рис. 2. Индексы геомагнитной активности AE и PC (а, красная и синяя кривые соответственно), а также расчет электронной концентрации  $N_e$  (б) и концентрации ионов  $NO^+$ ,  $O_2^+$  и  $N_2^+$  (в–д) по модели AIM-E (PC) для 18 января 2007 года

дения атмосферных гравитационных волн и т. д.

Для возбуждения конкретного явления необходимо излучать мощную радиоволну в определенном режиме — с мощностью не ниже пороговой; использовать длительность излучения большую, чем период возбуждения; соблюдать определенные соотношения частоты излучаемой мощной радиоволны и собственных плазменных частот в ионосфере; выбрать правильное направление излучения относительно магнитного зенита; использовать нужный тип поляризации волны; применять различные режимы излучения сигнала (например, амплитудная модуляция).

По текущим и архивным экспериментальным данным был проведен анализ спектральной структуры радиоизлучения различных КВ нагретых стенов. Исследование спектральной

структуры нагретого сигнала, а также его динамики представляет не только научный интерес с точки зрения изучения особенностей распространения и происхождения сигналов в высоких и средних широтах, но и имеет также сугубо практические приложения. Осуществляя дистанционный контроль за излучением различных КВ нагретых стенов, возможно определить режимы излучения и сделать заключение о том, какие искусственные физические явления могут быть при этом созданы.

Для исследования спектральной структуры и контроля радиоизлучения различных КВ нагретых стенов использовался разработанный в ААНИИ многоканальный приемный КВ доплеровский комплекс, установленный на научно-исследовательской станции (НИС) ААНИИ «Горьковская» под Санкт-Петербургом. Уникальное географическое расположение НИС «Горьковская» обеспечивает возможность контроля и исследования спектральной структуры радиоизлучения как зарубежных высокоширотных КВ нагретых стенов EISCAT/Heating (г. Тромсё, Норвегия) и SPEAR (арх. Шпицберген), так и среднеширотного нагретого стенов Сура, расположенного в пос. Васильсурск вблизи Нижнего Новгорода. Расположение нагретых стенов и НИС «Горьковская» представлено на рис. 3.

В ходе выполнения работ экспериментально показана возможность регистрации нагретого сигнала не только на частоте излучения ( $f_H$ ), но и на второй гармонике ( $2f_H$ ), которая возбуждается в результате нелинейного взаимодействия мощной радиоволны и ионосферной плазмы. Рассмотрены технические возможности КВ нагретых стенов, и дана оценка влияния геомагнитных и ионосферных возмущений на прием нагретых сигналов на частотах  $f_H$  и  $2f_H$ .

Возмущенные геофизические условия оказывают существенное влияние на распространение сигналов нагревных стенов в высоких широтах. Поскольку радиоизлучение нагревных стенов находится в нижней части диапазона коротких волн, оно наиболее подвержено ионосферному поглощению. Интенсивности регистрируемых нагревных сигналов в периоды геомагнитных возмущений на один-два порядка меньше, чем в спокойных условиях. Сильное влияние оказывают и естественные ионосферные неоднородности, развивающиеся во время магнитных бурь и суббурь в авроральной зоне. Возникновение подобных неоднородностей на пути распространения радиоволны приводит к существенному искажению спектра радиосигнала. Поскольку регистрация сигналов происходила на значительном удалении от нагревных стенов (от нагревного стенов SPEAR до НИС «Горьковская» более 2500 км), сильное поглощение и спектральные искажения принимаемого сигнала не позволяли однозначно идентифицировать режим работы нагревного стенов.

В данных условиях вырочала регистрация сигнала на второй гармонике излучения. Благодаря более высокой частоте, радиосигнал на второй гармонике менее подвержен ионосферному затуханию, влиянию ионосферных неоднородностей и имеет отличную от нагревного сигнала траекторию распространения. На рис. 4 приведен наиболее показательный пример влияния ионосферных возмущений на сигнал нагревного стенов SPEAR. В координатах частота — время — амплитуда приведены спектрограммы зарегистрированного на НИС «Горьковская» радиоизлучения нагревного комплекса на частоте  $f_H$  и радиоизлучения на второй гармонике  $2f_H$ . Комплекс SPEAR расположен на арх. Шпицберген, поэтому трасса распространения сигнала SPEAR — Санкт-Петербург проходит через зону полярных сияний — область выпадающих из магнитосферы в ионосферу электронов. Высыпания электронов являются источником генерации ионосферных неоднородностей.

На стенов SPEAR проводились исследования по возбуждению крайне низкочастотного радиоизлучения (КНЧ) из искусственно-возмущенной области. В данного рода экспериментах используется амплитудная модуляция излучения стенов. В результате са-

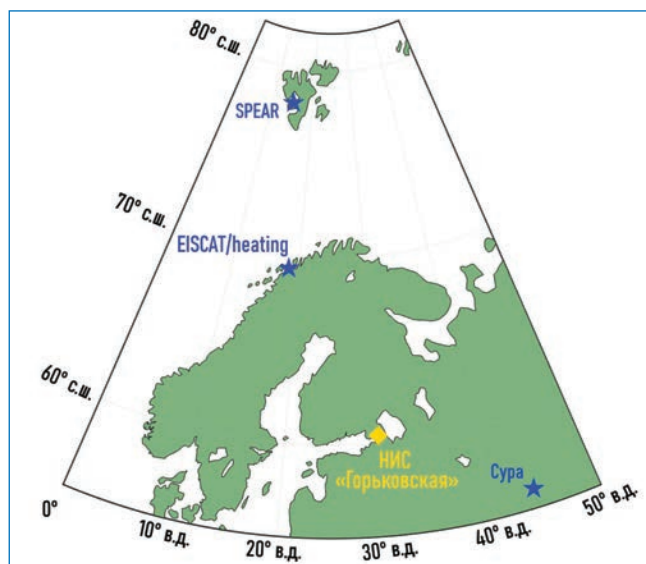


Рис. 3. Расположение различных нагревных стенов и НИС «Горьковская»

модетектирования волны в ионосфере происходит переизлучение КНЧ-волны на частоте модуляции. В период работы стенов частота модуляции плавно изменялась от 1,5 до 3 Гц. Стенов SPEAR излучал непрерывно в течение 25 минут на частоте 4450 кГц, модуляция осуществлялась прямоугольными импульсами (меандром).

Возмущения в зоне полярных сияний вызывали сильное искажение спектра принимаемого сигнала, что сделало невозможным идентификацию режима его излучения. Однако условия распространения для второй гармоники излучения были более благоприятные, что однозначно позволяло определить режим излучения, тип и частоту модуляции. По результатам выполненной работы было показано, что с высокой степенью надежности можно принимать сигналы КВ нагревных стенов как на частоте излучения, так и на частоте второй гармоники при различных фоновых геофизических условиях и детально исследовать их спектральную структуру. Установлено, что по данным регистрации представляется возможным определять следующие параметры излучения: время излучения, длительность циклов нагрева и пауз между циклами нагрева, частоту и тип используемой модуляции. Для детального исследования спектральных характеристик нагревных сигналов высокоширотных КВ нагревных стенов при возмущенных геофизических условиях необходимо регистрировать излучение на частоте второй гармоники.

Выполненные научно-исследовательские работы были направлены на изучение явлений естественного и искусственного характера в высокоширотной ионосфере и ионосферы как среды распространения радиоволн. Представленные результаты позволяют повысить качество оценки и возможности краткосрочного прогнозирования изменений геофизической обстановки в Арктической зоне Российской Федерации, осуществлять своевременное оповещение об опасных геофизических явлениях.

*А.С. Калишин,  
Н.Ф. Благовещенская,  
В.Д. Николаева,  
Т.Д. Борисова,  
А.В. Николаев,  
И.М. Егоров,  
Е.И. Гордеев (АНИИ)*

Рис. 4. Спектры нагревного сигнала и его второй гармоники на трассе SPEAR — Санкт-Петербург

