

ИОНОСФЕРА

ИЗ ИСТОРИИ ИССЛЕДОВАНИЙ

ГЕОФИЗИКА ИОНОСФЕРЫ

Ионосфера находится в промежутке между космическим пространством и земной поверхностью и поэтому испытывает возмущения и «сверху» и «снизу». Внешний источник возмущений глобального масштаба определяется эффектами взаимодействия *солнечного ветра с магнитосферой*; снизу ионосфера возмущается за счет *ветров в термосфере и ионосфере* и *грозовой активности*. Наиболее сильным из них является первый из упомянутых источников возмущений.

Внешний источник возмущений – *солнечный ветер – магнитосфера* – выделяет энергию преимущественно в авроральной зоне (зона шириной $67^{\circ} \pm 6^{\circ}$ геомагнитной широты), в которой наиболее часто появляется видимое северное сияние. Энергия, заключенная в этой области, колеблется от десятков гигаватт при спокойной геомагнитной обстановке до сотен гигаватт при суббурях.

Внутренний источник возмущений – *ветры в термосфере и ионосфере* – на высотах 90–500 км движет проводящую среду ионосферы сквозь геомагнитное поле, создавая электродвижущую силу, которая, в свою очередь, перемещает заряды и генерирует поляризационное электрическое поле. Созданный этим механизмом электрический потенциал имеет разброс от 5 до 10 кВ в зависимости от местоположения на земном шаре.

Грозы воздействуют на ионосферу в силу того, что каждый удар молнии создает электромагнитный импульс, который нагревает электронный газ нижней ионосферы.

Ионосфера как среда под действием указанных возмущений находится в состоянии непрерывных изменений суточного и сезонного характера, связанных с конкретной геофизической обстановкой. Подстраиваясь под изменения условий или реагируя на пришедшие возмущения, ионосферная плазма постоянно испытывает колебания различной природы, например повышенный уровень электромагнитных шумов в диапазоне сотен герц над сейсмическими районами. Человеческая

деятельность, активные эксперименты, такие, например, как работа нагревных стендов, способны инициировать активные процессы в ионосфере, используя уже накопленную в ней энергию. В частности, возбуждения в ионосфере колебаний миллигерцевого диапазона – это возможность изменения условий традиционной радиосвязи. Возбуждения колебаний в диапазоне Гц – кГц – это возможность связи как на Земле и под водой, так и в космосе для систем Земля – спутник.

Современные экспериментальные данные, полученные с использованием спутников и радаров когерентного и некогерентного рассеяний, изменили прежние представления об ионосфере как о пассивной однородно-слоистой среде. Нелинейные процессы, происходящие в плазме ионосферы под действием возмущений, происходящих из магнитосферы, в свою очередь оказывают влияние на эти магнитосферные возмущения. Кроме того, в ионосфере происходит генерация мелкомасштабных (~10–100 км) плазменных и полевых структур, играющих важную роль в глобальной электродинамике магнитосферно-ионосферной системы.

СРЕДА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН И ИСТОЧНИК ВОЗМУЩЕНИЙ

Влияние ионосферы на распространение радиоволн определяется электропроводностью ионосферы и длиной электромагнитной волны. Ее структурные особенности определяются неравномерным распределением электропроводности и созданием объемных волноводных и резонаторных образований, имеющих специфические выделенные частоты распространения электромагнитных колебаний.

Так поглощение электромагнитных волн в некоторых частотных диапазонах увеличивается вплоть до радиозатмения во время солнечных вспышек. Радиопередачи между Землей и спутником осуществляются на частотах

более 100 МГц, при которых радиоволны проходят через ионосферу без сильного поглощения. Однако в процессе распространения через ионосферу происходит изменение фазы сигнала, что оказывается существенным при точных измерениях, таких как, например, измерения уровней океана и суши с использованием систем GPS и ГЛОНАСС, а также радиоастрономических измерениях.

Во время магнитных бурь и суббурь в ионосфере протекают сильные электрические токи. Магнитное поле, создаваемое такими токами, в свою очередь вызывает электрические токи в Земле, которые, протекая через наземные силовые электрические сети, могут наносить вред трансформаторам или сетевым выключателям. В случае сильной геомагнитной активности магнитные суббури вызывают крупномасштабные разрушения энергетических сетей, как это случилось в Квебеке 13 марта 1989 года. Даже во время меньших возмущений вариации магнитного поля на поверхности Земли, связанные с ионосферными токами, усложняют получение прецизионных данных, необходимых для построения точных моделей геомагнитного поля. Джоулев нагрев верхней атмосферы выше 120 км, происходящий во время сильной геомагнитной активности, увеличивает температуру окружающей среды, что приводит к увеличению плотности на больших высотах. Спутники, вращающиеся вокруг Земли на орбитах ниже 1000 км, испытывают при этом заметные изменения своих траекторий вследствие увеличенного атмосферного сопротивления движению. Указанный нагрев изменяет также направления ветров и состав верхней атмосферы, что оказывает дополнительное влияние на распределение плотности плазмы и, соответственно, ее электропроводности.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ИОНОСФЕРЫ

Свойства и структура ионосферы, ее возможные изменения под действием возмущений природного и техногенного характера исследуются с помощью наземных средств, геофизических ракет и спутников. Геофизические ракеты имеют суборбитальные высоты зондирования от нескольких десятков до 300 км – аэростаты и баллоны, выше – спутники. Эти исследования осуществляются в реальной среде и в реальных пространственных масштабах. Лабораторные эксперименты с плазмой выполняются в камерах ограниченного объема, что влияет на экспериментальные данные и усложняет интерпретацию результатов.

Особым классом геофизических ракетных экспериментов являются эксперименты с инъекцией высокоскоростных плазменных струй. При таких условиях струя начинает эффективно взаимодействовать с фоновым газом и геомагнитным полем сразу после инъекции, что позволяет производить измерения на относительно небольших расстояниях от генератора плазменной струи. Многие активные эксперименты были проведены на российских полигонах. Высокая скорость, плотность и степень ионизации плазменного потока позволили эффективно исследовать широкий спектр эффектов взаимодействия движущейся плазмы с геомагнитным полем.

Наиболее полно ионосферные исследования можно провести при комплексных измерениях: наземные, ракетные и спутниковые. Удачными примерами таких исследований являются российско-американские эксперименты Fluxus и North Star, проведенные в 1997 и 1999 годах в среднеширотной (российский полигон Капустин Яр) и высокоширотной (американский полигон Fairbanks, Аляска) ионосферах. В качестве источника калиброванного воздействия на геофизическую среду в этих экспериментах использовались специально разработанные генераторы высокоскоростной плазменной струи. В них использовался принцип испарения твердого пористого рабочего вещества (алюминия) и ионизации и ускорения паров сходящейся ударной волной, возбуждаемой взрывом заряда мощного взрывчатого вещества.

С помощью уникального набора измерительных датчиков, установленных на научных модулях геофизических ракет MP-12 и Black Brandt XII, были исследованы магнитогидродинамические процессы, динамика вытеснения геомагнитного и электрического полей, потоки заряженных частиц, в частности стимулированное высыпание электронов радиационных поясов, критическая ионизационная скорость плазмы ионосферы, а также радиационно-газодинамические и оптические эффекты (рис. 1). Одновременно проводились измерения со спутника MSX (США) и наземные измерения.

К сожалению, это были последние исследования с помощью геофизических ракет и спутников в нашей стране, несмотря на то что исследования ионосферы с использованием геофизических ракет и спутников абсолютно необходимы как в интересах фундаментальной науки, так и в интересах национальной безопасности.

В частности, с 1951 до 1991 год было проведено 1254 пуска с полигонов Капустин Яр, Тикси, о. Хейса и специально оборудованного корабля «Профессор Зубов». С 1978 по 1994 год осуществлялись также систематические спутниковые исследования, в частности с использованием спутников серий «Космос» и «Интеркосмос». С 2001 года ни одного запуска спутника в интересах фундаментальной науки не осуществлялось.

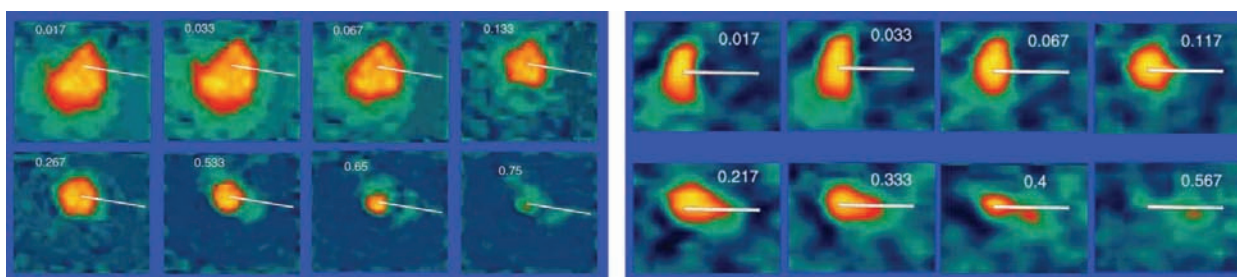
Наиболее развитыми и доступными средствами наблюдения геофизических процессов являются средства наземного базирования.

Для осуществления таких наблюдений необходим парк современных геофизических приборов и оборудования. Это, в частности: радары когерентного и некогерентного рассеяния, цифровые зонды, риометры, оптические системы, включающие в себя лидары, интерферометры, спектрометры, фотометры, широкоугольные камеры изображения полного неба, измерители геомагнитного поля и его вариаций, широкополосные измерители электромагнитного излучения, электрометры и измерители атмосферных токов, акустические системы и др.

Еще одну группу должны составлять мобильные геофизические станции. Эти станции важны, например, для задач исследования возможных воздействий на ионосферу процессов, происходящих на поверхности Земли, например выхода газа, локальных электрических или тепловых «пятен» на поверхности Земли

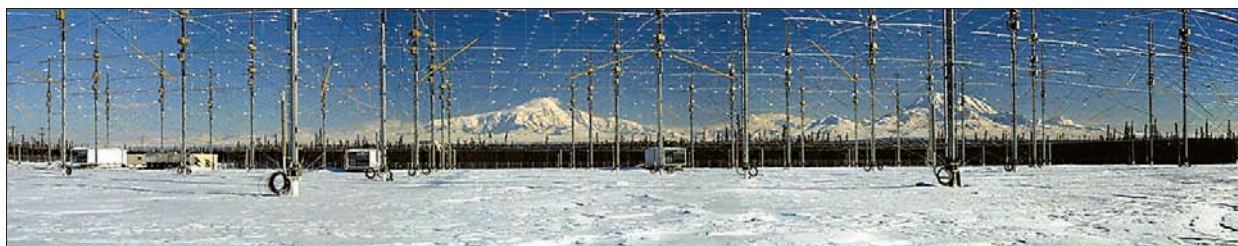


1



ДИНАМИКА ПЛАЗМЕННОГО ОБРАЗОВАНИЯ В ИОНОСФЕРЕ НА ВЫСОТЕ ~140 КМ (ЛЕВЫЙ РИСУНОК) И ~300 КМ (ПРАВЫЙ РИСУНОК). БЕЛЫЕ ЛИНИИ – НАПРАВЛЕНИЯ ИНЖЕКЦИИ СТРУИ, БЕЛЫЕ ЦИФРЫ – ВРЕМЯ ПОСЛЕ ИНЖЕКЦИИ В СЕКУНДАХ. ГЕОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ НАПРАВЛЕНО ПЕРПЕНДИКУЛЯРНО НАПРАВЛЕНИЮ ИНЖЕКЦИИ СТРУИ

2



АНТЕННОЕ ПОЛЕ НАГРЕВНОГО СТЕНДА HAARP

и т.д. Состав геофизической аппаратуры такой станции определяется конкретной задачей.

К сожалению, положение дел с оснащением институтов средствами наземного базирования наблюдения геофизических процессов оставляет желать лучшего. Ввиду того что в настоящий момент в стране отсутствует современное научное приборостроение, из перечисленных выше необходимых приборов в разных институтах имеются либо отдельные экземпляры, изготовленные собственными силами, либо, что в основном, приобретенные за границей.

Но целый класс наблюдений вообще недоступен российским исследователям. Это наблюдения с использованием системы радаров некогерентного и когерентного рассеяний. Между тем 9 стран, включая США, Канаду, Великобританию и Японию, уже организовали систему ионосферных наблюдений, объединенную в сеть SuperDARN. Из 17 радаров, которые используются для исследовательских целей, 10 предназначено для арктических и 7 для антарктических исследований.

Тем не менее российские геофизики не только поддерживают свою «спортивную форму», но и получают новые достаточно убедительные результаты в фундаментальных и прикладных исследованиях системы литосфера – ионосфера – магнитосфера, и в частности в области динамики ионосферных процессов и распространения радиоволн.

Учитывая значительную протяженность России в широтном (верхние и нижние широты, причем большая часть страны находится в средних широтах) и в долготном (10 часовых поясов) направлениях, необходимо воссоздание общенациональной системы мониторинга с оснащением входящих в эту систему геофизических обсерваторий указанными выше наблюдательными средствами.

Создание такой системы является жизненно необходимым делом и поэтому можно приветствовать положительные сдвиги в данном направлении, связанные с работами по созданию общенациональной сети геофизических наблюдений.

НАГРЕВНЫЕ СТЕНДЫ

Изучение процессов в магнитосферно-ионосферной системе, инициированных активными воздействиями с использованием мощных радиоволн ВЧ-диапазона, относится к числу интенсивно развивающихся направлений. Возрастание интереса к проблеме модификации ионосферы мощными КВ-радиоволнами вызвано в значительной степени успешными исследованиями, проводимыми на нагревных стендах США, Норвегии, Великобритании и России.

Воздействие мощной волны ВЧ-радиодиапазона (2,8÷10 МГц) на ионосферу вызывает широкий класс геофизических и физических явлений. Это, в частности: возбуждение искусственных ионосферных неоднородностей; искусственное радиоизлучение ионосферы; возбуждение ионосферно-магнитосферных связей; стимулированное выпадение магнитосферных частиц; образование искусственных ионосферно-магнитосферных каналов для передачи УНЧ/ОНЧ-волн в магнитосопреженные области; образование в ионосфере новых структур типа полярного мезосферного эха; свечение в F- и E-областях ионосферы (искусственная аврора); генерация атмосферных гравитационных волн и ряд других.

Использование нагревных стендов дает также возможность осуществлять радиолокационные наблюдения глобального масштаба. В частности, с помощью



стенда HAARP было успешно осуществлено радиолокационное зондирование Луны.

Понимая, что нагревные стенды представляют собой новые современные и перспективные технологии с точки зрения достижения широкого класса активных воздействий на ионосферу, в США сформулировали некоторые прикладные задачи использования нагревных стендов:

- обеспечение связи с глубоко погруженными подводными лодками;
- обнаружение подземных и подводных объектов;
- фокусировка значительной величины ВЧ-энергии в ионосфере на высоких широтах с целью подготовки и возбуждения триггерных ионосферных процессов;
- генерация ИК-излучения и других оптических эмиссий для создания дополнительной ионизации в выбранных областях ионосферы с целью управления свойствами распространения радиоволн;
- создание областей ионизации, ориентированных вдоль геомагнитного поля, для управления процессами отражения/рассеяния радиоволн;
- наклонный нагрев ионосферы для создания эффектов распространения радиоволн на больших расстояниях от нагревных стендов и, таким образом, расширение потенциальных применений технологии возбуждения ионосферы;
- создание ионизированных слоев ниже 90 км, служащих зеркалами для радиоволн, которые могут быть использованы при больших зонах действия за горизонтом для слежения за объектами, включая обнаружение крылатых ракет и других малозаметных объектов.

Исследования, проведенные учеными на указанных нагревных стендах, показали реальность решения этих задач. В последнее время на стенде HAARP (США) (рис. 2), вследствие увеличения его мощности до 3,6 ГВт, получены принципиально новые результаты, которые открывают широкие перспективы использования нагревных стендов как в области фундаментальных исследований, так и в решении прикладных задач. Кроме того, так как в процессе взаимодействия радиоизлучения нагревных стендов с ионосферой проявляется комплекс разнообразных эффектов, исследования, проводимые на этих стендах, стимулировали разработку широкого класса измерительных методов и инструментов для наблюдений.

К сожалению, несмотря на пионерские работы в этой области, проводившиеся в СССР на отечественных нагревных стендах в 70–80-х годах прошлого столетия, в настоящее время наблюдается существенное

отставание России от Европы и США. Указанное отставание должно быть ликвидировано проведением собственных фундаментальных и прикладных работ по активному воздействию на ионосферу в среднеширотной и высокоширотной областях России. Это может быть реализовано только при условии модернизации существующего среднеширотного нагревного стенда СУРА, а также создания нового отечественного высокоширотного нагревного стенда и оснащения этих стендов современной измерительной аппаратурой наземного, надводного и космического базирования.

Стенд СУРА представляет собой уникальную возможность проведения исследований в среднеширотной ионосфере. Модификация этого стенда, включающая в себя создание вертикального и наклонного радаров некогерентного рассеяния радиоволн СВЧ-диапазона, даст возможность опробования новых механизмов активного воздействия на ионосферу, а также прямого воздействия на магнитосферу, при которых возможно получение результатов, сравнимых с последними результатами, полученными в США и Европе.

Предлагаемый отечественный высокоширотный нагревный стенд АКВИОН (Активные Воздействия на ИОносферу) должен стать развитием мирового опыта, полученного при сооружении и эксплуатации имеющихся нагревных стендов, превосходить по своим возможностям эти стенды и предназначаться для решения новых, сформулированных нашими специалистами фундаментальных и прикладных задач.

Работоспособность всех существующих систем связи, управления и навигации определяется состоянием ионосферы и магнитосферы Земли. Ионосферные и магнитные бури влияют на работу радиолокаторов, спутников, электроэнергетических сетей, а также на здоровье человека. Результаты исследования ионосферы и ионосферно-магнитосферных процессов дают не только новые знания в геофизике и физике, но и позволяют обеспечить обществу принципиально новые технологии предсказания и использования природных процессов. Однако получение новых данных требует наличия развитых наземной и космической систем наблюдений, создания сети мониторинга ионосферных процессов, способной в реальном масштабе времени получать, обрабатывать и передавать потребителю полученную информацию о состоянии ионосферы, а также создания трехмерных физических и прогностических моделей нового поколения, способных интерполировать многоточечные измерения для представления общей картины ионосферы в реальном масштабе времени в заданной точке пространства.

ДИРЕКТОР ИНСТИТУТА ДИНАМИКИ ГЕОСФЕР РАН
Д. Ф.-М. Н., ПРОФЕССОР
Ю.И. Зецер