
КОМПЛЕКС ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

COMPLEX OF HELIOGEOPHYSICAL INSTRUMENTS OF NEW GENERATION

Г.А. Жеребцов

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

G.A. Zherebtsov

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

Аннотация. В статье рассматривается актуальность проблемы неблагоприятных воздействий космических процессов и явлений (факторов космической погоды) на наземную инженерно-техническую инфраструктуру, радиоэлектронные средства, работающие в космосе, и другие объекты.

Анализируется состояние экспериментальной базы в нашей стране и за рубежом для исследований в области физики Солнца, атмосферы и околоземного космического пространства. Обосновывается необходимость создания инструментов нового поколения, разработанных с применением современных инженерных решений и технологий.

Рассмотрен комплекс основных установок и инструментов создаваемого Национального гелиогеофизического комплекса РАН. Сформулированы основные научные направления фундаментальных исследований и прикладные задачи.

Ключевые слова: космическая погода, солнечно-земные связи, мониторинг, прогноз, геофизические эффекты, солнечная активность.

Abstract. The paper discusses the importance of the problem of adverse effects of cosmic processes and phenomena (space weather factors) on the ground engineering and technical infrastructure, space-born radio-electronic facilities, etc.

It examines the state of the experimental base for research in solar, atmosphere, and near-Earth space physics in Russia and abroad. The necessity of creating new-generation instruments, developed using advanced engineering solutions and technologies, is justified.

The complex of the main facilities and instruments of the National Heliogeophysical Complex of the Russian Academy of Sciences is analyzed. The main scientific directions of basic research and applied problems are formulated.

Keywords: space weather, solar-terrestrial relations, monitoring, forecast, geophysical effects, solar activity.

ВВЕДЕНИЕ

К концу 1980-х гг. Институт солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ СО РАН) имел самую современную по тем временам материально-техническую экспериментальную базу в стране, которая позволяла проводить непрерывные регулярные наблюдения и измерения, вести исследования в области физики солнечно-земных связей, решать актуальные прикладные задачи. Наземная гелиогеофизическая инфраструктура объединила восемь обсерваторий, расположенных в Иркутской области, Красноярском крае, Республике Бурятия. Для исследований в области физики Солнца Институтом были разработаны и созданы Горизонтальный автоматизированный солнечный телескоп, Большой внезатменный солнечный коронограф, инфракрасный телескоп АЗТ-33ИК, Солнечный телескоп оперативных прогнозов, Большой солнечный вакуумный телескоп, несколько хромосферных телескопов, Сибирский солнечный радиотелескоп. Для исследования космических лучей были созданы спектрограф космических лучей и сеть станций космических лучей. Проводились наблюдения и исследования геомагнитного поля Земли и физических процессов в магнитосфере с использованием меридиональной цепочки магнитных станций, велись комплексные исследования высокоширотных геофизических про-

цессов в ионосфере и магнитосфере в Норильской обсерватории, оснащенной ионозондами, риометрами, магнитометрической аппаратурой, оптическими приборами и другими инструментами. В области физики ионосферы и распространения радиоволн Институт наряду с использованием станций вертикального зондирования и оптических инструментов развернул на территории Сибири и Дальнего Востока сеть экспериментальных радиотрасс, разработал специальные установки для исследований динамических процессов в ионосфере.

На базе радиолокационной станции, переданной Институту в соответствии с программой конверсии Вооруженных сил СССР, был создан и модернизирован радар некогерентного рассеяния, являющийся пока единственным в стране, на котором не только проводятся исследования ионосферы и магнитосферы, но и решаются задачи по проблеме космического мусора.

Однако базовые элементы основных установок были разработаны в 60–80 гг. прошлого века и многие из них принципиально не могут быть изменены, поэтому в перспективе потребуются кардинальная модернизация всей экспериментальной базы. Логика развития науки, а также потребности практики ставят новые научные задачи, для решения которых необходимы нестандартные подходы к исследованиям

Солнца, околоземного космического пространства, верхней атмосферы Земли и протекающих в них процессов. Для достижения научного прогресса необходимо проводить исследования, рассматривая систему Солнце—Земля как единую систему со сложными внутренними связями и взаимодействиями.

Для решения этой важной проблемы необходимы не только исследования, проводимые с помощью космических аппаратов — требуется также создание новой наземной инфраструктуры. Нужны новые крупные экспериментальные установки, которые не создавались в стране в последние 35–40 лет, комплексы инструментов с принципиально новыми возможностями измерений и экспериментов. Чтобы достигнуть мирового уровня в этой области исследований и обеспечить стратегию развития на ближайшие 25–30 лет, необходимо создать такие установки и комплексы в ближайшие годы.

С целью развития фундаментальных исследований в области солнечно-земной физики и ОКП, ориентированных на решение актуальных прикладных задач по проблеме космической погоды в интересах экономики и обеспечения безопасности страны, развития новых, конкурентоспособных космических технологий ИСЗФ СО РАН по поручению Президента Российской Федерации и соответствующего постановления Правительства Российской Федерации подготовил укрупненный инвестиционный проект «Национальный гелиогеофизический комплекс Российской академии наук (НГК РАН)», который был утвержден Президентом Российской академии наук. Проектом предусмотрено создание научно-исследовательской структуры комплекса нового поколения на базе ИСЗФ СО РАН, что позволит перейти на качественно новый уровень экспериментальных исследований в области физики Солнца и ОКП, решения задач по разработке и освоению новых космических технологий.

1. АКТУАЛЬНОСТЬ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ

Околоземное космическое пространство (ОКП), включающее в себя такие области окружающей среды, как верхняя атмосфера (ВА), ионосфера и магнитосфера Земли, представляет собой пространство, физическое состояние которого определяется солнечной и геомагнитной активностью.

Это пространство в последние десятилетия не только продолжает целенаправленно и широко масштабно исследоваться — оно стало сферой активной практической деятельности. В ОКП работает большое количество космических аппаратов (КА) различного назначения, с помощью которых ведутся научные исследования в интересах экономики страны, решаются прикладные задачи, в том числе и в интересах обеспечения безопасности. Надежность и эффективность работы КА определяются как использованием новейших технологий, так и состоянием окружающей аппараты среды.

Поэтому исключительно важно иметь полную информацию о процессах, протекающих в ОКП, возможность диагностировать и прогнозировать космические явления (космическую погоду), а также оценивать возможные последствия.

В ОКП время от времени возникают сильные возмущения, вызванные мощными потоками заряженных частиц, или потоками замагниченной плазмы, выброшенными с поверхности Солнца (солнечный ветер). Результатами этих воздействий являются отказы или сбои в работе КА. Они могут проявляться в виде поверхностной электризации корпуса КА или объемной электризации в результате проникновения внутрь КА потоков энергичных частиц. В условиях невозмущенной околоземной плазмы воздействия на КА могут усиливаться при прохождении ими участков неоднородной магнитосферно-ионосферной плазмы. Анализ аварий КА убедительно свидетельствует о том, что одной из главных причин отказов электронной аппаратуры являются экстремальные условия космической погоды. Наиболее неблагоприятные факторы обязаны мощным солнечным возмущениям — в первую очередь, корональным выбросам массы, солнечным вспышкам и другим эруптивным процессам. Кроме того, большую роль играет выносимое в межпланетное пространство с поверхности Солнца его магнитное поле. Солнечные эруптивные явления создают в плазме солнечного ветра ударные волны, которые эволюционируют по мере распространения от Солнца до орбиты Земли, образуя ударные потоки, представляющие собой межпланетную ударную волну, имеющую сложную плазменно-магнитную структуру. Взаимодействуя с магнитным полем Земли, солнечный ветер приводит к образованию вокруг Земли магнитной полости — магнитосферы. В спокойных условиях границы магнитосферы экранируют геомагнитное поле, не допуская проникновения внутрь плазмы солнечного ветра. Однако при определенных условиях небольшое количество энергии солнечного ветра все же проникает в магнитосферу и в виде корпускулярных потоков инжектируется в высокоширотную атмосферу, вызывая магнитосферную суббурю, которая характеризуется появлением в высоких широтах авроральных свечений и кратковременной перестройкой геомагнитного поля внешней магнитосферы. Ударные потоки солнечного ветра, воздействуя на магнитосферу, приводят к более длительным интенсивным атмосферным возмущениям — геомагнитным бурям, вызывающим заметные флуктуации геомагнитного поля даже в средних и низких широтах.

Перечисленные выше геофизические явления существенно влияют на технологические объекты в космосе и на Земле. Неблагоприятные явления космической погоды нарушают нормальную работу таких объектов, сетей телекоммуникаций и связи, навигационных систем, линий электропередач, трубопроводов. Стремительное развитие техносферы и ее нарастающая экспансия в космическое пространство приводят к тому, что космическая погода создает высочайшие риски для инфраструктуры экономики. Эта проблема особенно важна и требует особого внимания в Арктике, являющейся своеобраз-

разной «кухней» космической погоды на планете. Здесь в максимальной степени проявляются как отклики ОКП на экстремальные события на Солнце, так и эффекты взаимодействия глобальных и волновых явлений в атмосфере с региональными динамическими структурами.

Определяющую роль в высоких широтах играют электродинамические процессы в ионосферной плазме при ее взаимодействии с магнитосферой. Особенно сильно они проявляются во время геомагнитных бурь, когда происходит интенсивное высвобождение энергичных частиц, генерируются мощные электрические поля и токи. В результате этого происходит сильный джоулев нагрев ВА, перестройка ее динамического режима, значительные изменения параметров, развитие неустойчивостей ионосферной плазмы, генерирующих неоднородности различных масштабов и др. Высокоширотные ионосферные возмущения распространяются в средние широты, при этом в силу несовпадения географических и магнитных полюсов пространственно-временные закономерности развития возмущений весьма сложны и до сих пор являются предметом исследований.

Актуальными являются исследования структуры и взаимодействия среднеширотной и субарктической стратосферы, мезосферы и нижней термосферы как важного связующего звена в вертикальном переносе энергии и импульса в атмосфере. Явления в мезосфере служат наиболее чувствительным индикатором климатических изменений температуры. Знания особенностей этой области становятся необходимы для развития аэрокосмических и радиокommunikационных технологий. Возмущения плотности ВА в нижней части мезосферы способны повлиять на траекторию запусков ракет, изменить карту вероятных областей падения отработанных частей ракет. Приливные и внутренние атмосферные волны, распространяющиеся через области нижней и верхней атмосферы, приводят к изменению параметров ионосферы, что влияет на системы радиосвязи. Для улучшения точности и надежности работы беспроводных систем связи, радарной и спутниковой навигации важен мониторинг волновой активности в области мезосферы и нижней термосферы.

Постоянное развитие технологий, реализуемых в арктической зоне, использование высокочувствительных коммуникационных средств требует непрерывного совершенствования систем мониторинга и прогнозирования окружающей среды. Большая протяженность территории Российской Федерации (долготный сектор которой превышает 100°) требует проведения мониторинга магнитосферно-ионосферно-атмосферного взаимодействия для составления общей глобальной картины развития возмущений при различных экстремальных событиях на Солнце, в магнитосфере и атмосфере Земли. Состояние ОКП в Арктике оказывает определяющее влияние на работоспособность и эффективность использования жизненно важных технологических систем энергетики, навигации, радиосвязи с региональными центрами, кораблями, самолетами, включая обеспечение безопасности высокоширотных маршрутов. В связи с интенсификацией работ по

развитию экономики в Арктических районах, в том числе и в отношении добычи природных ресурсов, задачи создания высокоэффективных систем управления, оповещения и связи, а также задачи, обеспечивающие безопасность страны, выходят на передний план в масштабе национальной народно-хозяйственной деятельности.

Космическую среду не только изучают, но и ведут исследования по ее искусственной модификации различными способами с той или иной целью — для ухудшения или улучшения ее состояния в зависимости от поставленной задачи. За рубежом интенсивно изучаются вопросы искусственной модификации, управления процессами в ОКП, использования искусственных геофизических эффектов для разработки новых технических средств двойного назначения. Поэтому исключительно важно владеть полной информацией о процессах, протекающих в ОКП, и отличать процессы естественного характера от эффектов искусственного воздействия на ОКП.

Необходимо иметь возможность оценки этих природных явлений (космической погоды) и принимать меры к снижению их возможных последствий. Поэтому для обеспечения высокой надежности и повышения эффективности техники космического и наземного базирования необходимо глубокое понимание физических процессов, происходящих на Солнце и в ОКП.

Солнечная активность и ее предсказание на всех масштабах времени стали важными факторами сохранения технологической инфраструктуры в ОКП и на Земле. Следует отметить, что текущие модели влияния солнечной активности на ОКП еще не обладают достаточной точностью для оперативной оценки рисков и эффективности функционирования техники в космической среде и на Земле.

В основе системы геофизического обеспечения диагностики и прогноза возмущений в ОКП лежат диагностика и прогноз основных геоэффективных явлений солнечной активности. Корональные выбросы плазмы обычно достигают Земли за 2–3 дня, а самые мощные — за 15 ч. Достигая Земли, они вызывают геомагнитные бури, которые влияют на связь, наводят токи и электрические потенциалы на распределенные энергетические сети и т. д. Солнечные вспышки генерируют всплески электромагнитного излучения, мощные вспышки нарушают работу КА, наземных радаров, систем навигации и связи в широком диапазоне частот. Всплески достигают Земли за 8 мин, оказывая основное влияние на ее дневную сторону. Потоки вторичных ионизированных частиц через десятки минут после вспышек приводят к росту радиации в ОКП, которая опасна для людей, находящихся в КА и самолетах во время трансполярных перелетов, а также вызывают ложные срабатывания и разрушение электроники КА.

Диагностика возмущений обеспечивается мониторингом электромагнитного излучения Солнца в оптическом и радиодиапазонах, а их предсказание возможно только при достаточно полном понимании физических процессов, построении физически обоснованных моделей и алгоритмов прогноза. Основной причиной отсутствия адекватных моделей

эволюции активной области, в которой происходят нестационарные процессы и наблюдаются геоэффективные явления, является недостаток знаний о физике процессов на Солнце на пространственном масштабе около 50–100 км. Измерения параметров солнечной плазмы на таком масштабе возможны только с помощью телескопов с апертурой 2–4 м, что обуславливает необходимость строительства крупных солнечных оптических телескопов.

До настоящего времени диагностический потенциал радионаблюдений Солнца не используется в полной мере из-за отсутствия радиогелиографов с высоким временным, пространственным и спектральным разрешением.

За рубежом в последние годы созданы и разрабатываются крупнейшие телескопы нового поколения. В США, Китае, Бразилии разработаны проекты многоволновых радиогелиографов нового поколения, которые находятся в настоящее время на разных стадиях реализации. Европейский консорциум начал разработку четырехметрового оптического солнечного телескопа, в США строительство такого телескопа практически завершено. В Германии создан и установлен на Канарских островах телескоп GREGOR с диаметром зеркала 1.5 м. Франция и Италия создали практически свободный от инструментальной поляризации телескоп для изучения магнетизма и переменности Солнца. С 2003 г. в США работает специализированный телескоп для синоптических исследований Солнца, эксплуатация которого рассчитана на 25 лет. Кроме того, создано большое количество крупных экспериментальных установок и обсерваторий нового поколения для исследования геофизических процессов. Так, в США существуют нагревные стенды на Аляске (HAARP) и в Пуэрто-Рико (Arecibo Heating Facility) для модификации ионосферы мощными КВ-радиоволнами. В США создан и тиражируется мобильный радар некогерентного рассеяния (радар НР) AMISR, на Шпицбергене — радар НР ESR. Вблизи магнитного полюса создается обсерватория полярного каспа (США, Канада). Вокруг Северного и Южного полюсов развернута международная сеть когерентных КВ-радаров SuperDARN для изучения магнитосферно-ионосферного взаимодействия, тринадцать из них принадлежит США. Построено несколько мезосферно-стратосферно-тропосферных (МСТ) радаров. Разработаны проекты сверхмощного экваториального МСТ-НР-радар (Япония) и многопозиционной системы радаров НР нового поколения Европейской ассоциации EISCAT. К настоящему времени ведущие мировые геофизические центры сформировались в виде кластеров инструментов, объединяющих вокруг радаров НР набор радио- и оптических средств, позволяющих проводить наиболее полную диагностику заряженной и нейтральной компонент верхней атмосферы. Их возможности существенно дополняют и расширяют сети магнитных станций. Такие кластеры имеют статус международных или национальных центров.

К настоящему времени в РФ сложилось критическое положение в области исследований по гелиогеофизике. Ситуацию можно объяснить несколькими причинами, но главная состоит в недооценке важности фундаментальных исследований, ориентиро-

ванных на решение проблем практического использования ОКП, его влияния на развитие новых космических технологий, включая технологии двойного назначения. Отставание особенно заметно в развитии наземной исследовательской инфраструктуры, что наглядно показывает сравнение с мировым уровнем. Это обусловлено тем, что государство до последнего времени не проводило работ по созданию новых крупных установок (телескопов, радиогелиографов, радаров НР и МСТ, лидаров и др.).

Следует отметить, что в США разработка и использование подобных исследовательских кластеров реализуется в рамках программы «Национальная стратегия по космической погоде», предусматривающей готовность страны к краткосрочным и долгосрочным воздействиям космических природных явлений, которые невозможно предотвратить, но которые нужно глубоко изучать, уметь их предсказывать и принимать меры к снижению их последствий.

Схожая по целям и задачам получения оперативной и достоверной информации о состоянии гелиогеофизической среды национальная программа «Космическая погода» должна быть разработана и в нашей стране. Ее конечной стратегической целью является создание эффективной научно-обоснованной национальной системы предупреждений и оповещений об опасных космических явлениях для принятия соответствующими службами необходимых превентивных мер и снижения негативных последствий.

Такая национальная программа должна состоять из двух концептуально-связанных частей:

- организация фундаментальных исследований с использованием космических и наземных средств, ориентированных на решение конкретных прикладных задач;
- организация наземной сети необходимых гелиогеофизических наблюдений и измерений с привлечением специальных космических средств.

2. НАЗНАЧЕНИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ СОСТАВ НАЦИОНАЛЬНОГО ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА РАН

Гелиогеофизический комплекс РАН включает пять уникальных крупных экспериментальных научных инструментов для исследований в области физики Солнца и ОКП, которые будут разработаны и изготовлены главным образом на промышленных предприятиях РФ:

- Крупный солнечный телескоп-коронограф с диаметром зеркала 3 м (КСТ-3);
- Многоволновый радиогелиограф;
- Радиофизический комплекс для исследования атмосферы и ионосферы (РФК);
- Сеть когерентных ионосферных радаров (СЕКИРА);
- Лидарно-оптический комплекс (ЛОК).

2.1. Крупный солнечный телескоп-коронограф с диаметром зеркала 3 м (КСТ-3)

Современный крупноапертурный солнечный оптический телескоп (КСТ-3) [Григорьев и др., 2020]

представляет собой сложное инженерно-техническое сооружение. Создание крупноапертурных телескопов обусловлено необходимостью изучения физических процессов на Солнце с экстремально высоким пространственным разрешением, соответствующим всего нескольким километрам на солнечной поверхности, так как именно на таких масштабах происходят основные магнитогидродинамические процессы, определяющие вариации светимости Солнца в различных спектральных диапазонах.

Солнечные явления охватывают значительные области солнечной поверхности и связаны с нарушением равновесия крупномасштабного магнитного поля Солнца. Природа накопления энергии и спусковой механизм нарушения равновесия лежат в тонкоструктурной организации солнечного магнетизма. Именно микроструктура магнитных полей на Солнце играет существенную роль в физике крупномасштабных явлений солнечной активности, имеющих важные геоэффективные проявления.

Необходимыми элементами таких новых телескопов, без которых даже большие размеры зеркал не обеспечивают надлежащего пространственного разрешения, являются системы адаптивной оптики (АО), опыт создания которых применительно к солнечным наблюдениям в настоящее время в России полностью отсутствует. Такие системы требуют специфических матричных фотоприемников, сложнейших деформируемых зеркал, высокоскоростных специализированных компьютеров, разработки сложнейших математических алгоритмов. Поэтому, нет сомнений, что приобретение опыта в создании и эксплуатации таких систем АО будет способствовать преодолению технологического отставания России в этой отрасли, имеющей бесспорно и важное прикладное значение.

КСТ-3 с диаметром зеркала 3 м, оснащенный системой АО, позволит выполнять наблюдения различных слоев атмосферы и короны Солнца с недостижимыми прежде пространственным разрешением, поляризационной и фотометрической точностью. Это позволит решать задачи, связанные с проблемами энергетического выделения в плазменных динамических явлениях на Солнце и процессами нагрева короны, что, в свою очередь, позволит оценивать состояние межпланетной среды, уровень радиационного облучения КА и высотных самолетов, особенно на приполярных трассах.

В программе работ на КСТ-3 предполагается создание количественных моделей основных явлений солнечной активности и определение оптимальных количественных и качественных параметров активных процессов на Солнце как входных параметров для алгоритмов краткосрочного и среднесрочного прогноза явлений солнечной активности. Значительный размер апертуры телескопа позволит активно использовать его и для наблюдений в ночное время. Особенно эффективными представляются наблюдения слабосветящихся объектов, в том числе на геостационарных орбитах. Использование АО в ночное время позволит значительно увеличить разрешающую способность инструмента и сделает возможным определение пространственной структуры отдель-

ных космических объектов. Важным представляется координированное использование КСТ-3 с другими наблюдательными средствами создаваемого гелиогеофизического комплекса, а также имеющимися телескопами (АЗТ-ЗЗИК, АЗТ-33ВМ) Саянского астрокомплекса ИСЗФ СО РАН.

Работа телескопа в коронографическом режиме позволит наблюдать в дневное время космические объекты, в частности, околосолнечные кометы и астероиды, в том числе представляющие опасность, что значительно расширит возможности контроля ОКП.

Основные направления исследований на КСТ-3:

- совершенствование модели крупномасштабного магнитного поля в короне, расчеты характеристик межпланетного магнитного поля и гелиосферного токового слоя; прогноз параметров магнитного поля на орбите Земли;
- создание модели эволюции активных областей на Солнце и методов среднесрочного прогноза на стадии развития активной области;
- разработка модели предвспышечного состояния активной области, совершенствование модели солнечных вспышек, методы прогноза вспышек и их энергетических параметров;
- разработка динамической модели корональных выбросов массы и кинематики их движения в межпланетном пространстве, алгоритмы прогноза эффектов корональных выбросов массы в околоземном космосе;
- совершенствование моделей переменности потока солнечного излучения в различных спектральных диапазонах;
- наблюдения в ночное время слабосветящихся космических объектов и КА.

Таким образом, создание крупноапертурного солнечного телескопа-коронографа должно внести решающий вклад в наше понимание происхождения солнечной активности, которая управляет явлениями космической погоды, что будет способствовать решению важнейших прикладных задач.

2.2. Многоволновый радиогелиограф и комплекс спектрополяриметров

Важную, и во многих аспектах уникальную, информацию о процессах в атмосфере Солнца дают наблюдения в радиодиапазоне с помощью специализированных радиотелескопов, отличительными особенностями которых являются всепогодность и относительная дешевизна инструментов.

Наиболее динамичными процессами, определяющими возмущения ОКП, являются динамические процессы магнитных полей в короне Солнца. В настоящее время единственным методом измерения корональных магнитных полей является анализ спектров и поляризации радиоизлучения. Для этого требуются измерения, выполненные с высоким временным, пространственным и спектральным разрешением.

Создание радиогелиографов [Алтынцев и др., 2020] с необходимыми характеристиками стало возможным благодаря появлению аналоговых широкополосных волоконных линий, совершенствованию

элементной базы СВЧ-электроники, удешевлению вычислительной техники с одновременным ростом ее быстродействия, достижению высокой точности позиционирования антенных элементов с помощью космических технологий.

Использование радиогелиографа позволит развить существующие методы обнаружения начала и места старта корональных выбросов на диске Солнца по затенению локальных областей диска. Отметим, что длительность затенения, пока выброс плазмы еще достаточно плотный, составляет порядка десяти минут, поэтому для детектирования таких эффектов в последовательностях радиокарт и для использования полученных данных в динамической модели корональных выбросов массы и кинематики их движения в межпланетном пространстве требуются значительные вычислительные ресурсы.

Проведение наблюдений с высоким спектральным разрешением позволит проводить магнитографию корональных магнитных полей на постоянной основе и заранее выявлять магнитные структуры, взрывная диссипация магнитных полей в которых приводит к солнечным вспышкам. В результате интерактивной подгонки пространственной структуры и спектральных характеристик модельных радиосточников, рассчитанных по данным фотосферных магнитограмм, и изображений в оптическом диапазоне к спектральным и пространственным характеристикам, реально наблюдаемым на радиогелиографе, можно существенно повысить точность определения характеристик корональных магнитных полей. Следовательно, достоверность и точность прогноза солнечных вспышек, основанных на моделях предвспышечного состояния активной области, существенно возрастут. В случае краткосрочного прогноза требуемая частота предоставления таких комбинированных карт — несколько карт в течение светового дня.

Помимо наблюдений солнечного диска, на радиогелиографе с высоким пространственным разрешением будет проводиться мониторинг интегрального излучения Солнца в уникально широком диапазоне частот 0.05–150 ГГц, что позволит рассчитывать отечественный (а не канадский) индекс $F10.7$, соответствующий потоку радиоизлучения спокойного Солнца на частоте 2.8 ГГц. Широкий диапазон принимаемых частот позволит уточнить модели переменности потока солнечного излучения в различных спектральных диапазонах и разработать дополнительные радиоиндексы солнечной активности, полезные для решения конкретных прогностических задач.

Мониторинг излучения, анализ его спектрального состава и мощности радиовсплесков, во время которых мощность электромагнитного излучения может превышать фоновые значения в миллионы раз, позволит в ряде случаев установить причины сбоев в работе электронных систем на КА, радаров, систем навигации и связи, а обобщение и систематизация такой диагностической информации весьма полезны для разработчиков аппаратуры. Отметим, что результаты мониторинга солнечной активности будут доступны в режиме онлайн.

Классификация вспышек путем выделения прогностических признаков мощных солнечных вспышек (предвсплески), генерации ударных волн (всплески II типа) и потоков ускоренных электронов (всплески III типа), потоков протонов (миллиметровое излучение во время вспышек) позволит использовать ее в режиме онлайн национальным прогностическим центром.

Картографирование микроволновых источников с помощью многоволнового радиогелиографа в диапазоне частот 3–24 ГГц позволит локализовать различные структуры в атмосфере Солнца, включая активные области, волокна и корональные дыры. Полученная в результате наблюдений информация о положении центра радиояркости диска Солнца может использоваться для навигации. Картография активных областей в круговой поляризации будет использоваться в разработанных методах краткосрочного прогноза мощных солнечных вспышек и модели эволюции активной области. Особый интерес представляет прогноз вспышечной активности для восходящих и заходящих активных областей вблизи солнечного лимба, не наблюдаемых оптическими телескопами. Управление списком принимаемых частот позволяет выбирать режимы мониторинга, т. е. наблюдать либо быстрые процессы с ограниченным набором частот с секундным разрешением, либо квазистационарные корональные структуры с высоким спектральным разрешением. Например, для магнитографии активных областей наборы изображений с достаточно малым шагом по частоте приема, т. е. с высоким спектральным разрешением, можно будет получать за несколько минут. Длительность наблюдений определяется длительностью светового дня и составляет до 6 ч зимой и 10 ч летом.

Таким образом, многоволновый радиогелиограф реализует всепогодный мониторинг процессов солнечной активности в атмосфере Солнца, результаты которого необходимы для задач прогноза и диагностики геоэффективных проявлений солнечной активности.

Всепогодный контроль взрывных процессов на Солнце позволит решить важную прикладную задачу — оценить их влияние на работу космических средств, а также наземных систем связи, навигационных, радиолокационных и других технологических систем. Математической основой решения такой задачи является разработка количественных моделей основных явлений солнечной активности, определение оптимальных количественных и качественных параметров активных процессов на Солнце как входных параметров для краткосрочного и среднесрочного прогноза явлений солнечной активности.

Разработанные при выполнении Проекта спектрополяриметры и развернутая на их основе территориально разнесенная сеть станций позволят существенно повысить качество прогноза геоэффективных проявлений солнечной активности. Особенно перспективным является размещение двух комплексов спектрополяриметров в приполюсных областях, что позволит обеспечить круглосуточный мониторинг геоэффективных проявлений солнечной

активности и уточнение прогнозной модели параметров магнитного поля на орбите Земли.

В результате мониторинга в радиодиапазоне будут уточнены модели крупномасштабного магнитного поля в короне Солнца, проведены расчеты межпланетного магнитного поля и гелиосферного токового слоя.

Таким образом, можно сформулировать основные фундаментальные научные направления и прикладные задачи, которые будут реализовываться с помощью радиогелиографа:

- топология корональных магнитных полей при активном и спокойном Солнце;
- определение областей, ответственных за конверсию магнитного поля;
- волновые процессы и ударные волны в солнечной атмосфере;
- эволюция крупномасштабных структур в атмосфере Солнца в 11-летнем солнечном цикле;
- регулярные измерения радиоизлучения на длине волны 10.7 см;
- мониторинг радиоизлучения в широком диапазоне частот в интересах потребления этой информации (системы связи, радиолокации, радионавигации и др.);
- оценка геоэффективности параметров солнечной вспышки;
- краткосрочный прогноз мощных солнечных вспышек с заблаговременностью 2–3 сут.

2.3. Радиофизический комплекс для исследования ионосферы и атмосферы

В рассматриваемом Проекте Радиофизический комплекс (РФК) является наиболее крупной сложной и многофункциональной информационной системой, предназначенной для решения проблем физики ионосферы и атмосферы, управляемого воздействия на ионосферу мощными радиоволнами и изучения влияния физических процессов ОКП на технологические системы.

Структурно РФК состоит из основного кластера инструментов, который включает в себя наиболее мощные и перспективные в данной области науки средства исследований: радар некогерентного рассеяния (НР) радиоволн для зондирования ионосферы, мезосферно-стратосферно-тропосферный (МСТ) радар для зондирования нейтральной атмосферы [Медведев и др., 2020] и нагревный стенд (НС) для модификации ионосферы мощными КВ-радиоволнами [Васильев и др., 2020a]. К РФК можно отнести и сеть когерентных ионосферных радаров (СЕКИРА) [Бернгардт и др., 2020].

Этот кластер крупных исследовательских измерительных установок будет дополнен системой малых проблемно-ориентированных инструментов и меридиональной цепью станций Норильск-Иркутск (ионозонды, магнитометры, фотометры и др.).

РФК является многоцелевым комплексом, позволяющим быстро осуществлять переход к решению новых задач. Научные направления будут меняться вследствие развития исследований верхней атмосферы (ВА) и солнечно-земных связей. В настоящее время в РФ нет установок подобного типа, поэтому

широкий круг научных вопросов, связанных с динамикой атмосферы, не поддерживается современными высокоточными экспериментальными данными. Создание современного радара НР-МСТ в Иркутске позволит восполнить недостаток экспериментальных данных в этой области исследований.

Расположение РФК является уникальным, так как комплекс позволит получать важные геофизические данные и осуществлять контроль ОКП в центре России, существенно дополняя данные наблюдений геофизических центров США, Европы и Японии при исследованиях глобальных распределений параметров среды.

Основным объектом исследований РФК является верхняя атмосфера (ВА) (высоты 80–1500 км), составляющая одну из важных частей единой системы Солнце—Земля, которая играет ключевую роль в процессах взаимодействия ионизированной и нейтральной газовых оболочек Земли. С одной стороны, эти процессы определяются солнечным излучением и плазменными механизмами преобразования энергии и передачи импульса в цепочке солнечный ветер—магнитосфера—ионосфера—термосфера. С другой стороны, энергетика, структура и динамика ВА определяются также воздействием планетарных и приливных колебаний, внутренних атмосферных волн и турбулентных процессов, генерируемых в нижележащих слоях атмосферы, т. е. вблизи поверхности Земли и акватории океана.

РФК является принципиально важным в изучении этого взаимодействия на основе комплексных взаимодополняющих измерений параметров ионизированной и нейтральной составляющих ВА с помощью РФК и лидарно-оптического комплекса (ЛОК). Важную роль в этих исследованиях будет играть МСТ-радар, позволяющий проводить измерения параметров атмосферы в интервале высот 10–90 км. Этот эффективный метод будет впервые реализован в нашей стране на РФК. Это позволит проводить с помощью РФК и ЛОК изучение всех слоев атмосферы как единой системы, что является одним из магистральных направлений развития атмосферных исследований.

Приоритетным и интенсивно развивающимся направлением станут экспериментальные исследования лабораторного типа по модификации ионосферы мощными КВ-радиоволнами. Они позволят проводить более глубокое изучение свойств ионосферы и ВА, исследовать вопросы управляемого воздействия на процессы в ионосфере и ОКП. В РФК для таких исследований будет создан нагревный стенд, сравнимый с ведущими зарубежными аналогами по средствам диагностики и энергетическому потенциалу.

Создаваемый РФК даст уникальную возможность исследования распространения радиоволн, в том числе нелинейного, с одновременной высокоинформативной диагностикой ионосферной плазмы.

Результаты исследований ионосферы и ВА на РФК, возможность проведения с его помощью высокоинформативного мониторинга ОКП представляются важными в различных областях науки и технологий: космической и наземной радиосвязи,

радиолокации и навигации; работе КА; контроле ОКП, включая проблемы кометно-астероидной опасности и космического мусора.

2.3.1. Радар некогерентного рассеяния и магнитосферно-стратосферно-термосферный радар (НР-МСТ-радар)

НР-МСТ-радар [Медведев и др., 2020] в условиях естественного помехового фона, реальной электромагнитной и геофизической обстановки в районе дислокации обеспечит дистанционное зондирование ионосферы, мезосферы, стратосферы, тропосферы в диапазоне высот от 10 до 2000 км над точкой размещения радара при отклонении луча от нормали на $\pm 45^\circ$ по любой угловой координате.

Многоцелевой НР-МСТ РАДАР позволит решить комплекс фундаментальных задач исследования атмосферы.

Взаимодействие магнитосферы с системой ионосфера—термосфера

Взаимодействие ВА с магнитосферой определяется комплексом плазменных процессов, оказывающих сильное влияние на структуру и динамику ВА, особенно в периоды геомагнитных бурь, когда на авроральных широтах происходят высыпания энергичных частиц, генерируются сильные электрические поля магнитосферного происхождения и токи. Вследствие этого возникают джоулев нагрев термосферы и градиенты давления, вызывающие сильные нейтральные ветры и внутренние гравитационные волны (ВГВ), которые распространяются к экватору и изменяют систему циркуляции термосферы. В результате изменяется нейтральный состав, происходит перемещение плазмы по линиям магнитного поля, что изменяет условия ионизации и рекомбинации ВА. В то же время нейтральные ветры за счет динамо-эффекта генерируют электрические поля, которые, в свою очередь, воздействуют на плазму и нейтральный газ. Таким образом, происходит нелинейное взаимодействие между ионизованной и нейтральной компонентами, во многом определяющее динамику и электродинамику ВА.

Особую проблему составляет отклик ВА на сверхмощные бури, когда среднеширотная ионосфера по своим основным свойствам и структуре становится близкой к авроральной. Требуют изучения механизмы проникновения электрических полей и высыпающихся энергичных частиц в столь низкие широты, возникновения неустойчивостей ионосферной плазмы.

НР-МСТ-радар позволит решить эти вопросы на основе детального изучения структуры и динамики ионизованной и нейтральной составляющих среднеширотной ВА во время бурь, распространения возмущений от высоких к средним и низким широтам.

Воздействие на ВА нижних слоев нейтральной атмосферы

Динамика ВА во многом определяются планетарными волнами и ВГВ ее нейтральной компоненты, которые имеют широкий диапазон пространственных (от единиц до тысяч километров) и временных (от нескольких минут до нескольких суток) масштабов. Источники этих волн разнообразны — метеорологические процессы в тропосфере,

джоулев нагрев ионосферными токами, взрывы, землетрясения, и др. Реакция ионосферы на ВГВ проявляется в виде перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), радиофизические исследования которых проводились на протяжении многих лет. Однако многие актуальные вопросы остаются нерешенными: определение частей спектра ВГВ, которые вносят основной вклад в тепловую режим, энергетику и динамику ВА; воздействие волнового переноса на химический состав мезосферы и термосферы; влияние ВГВ на генерацию электрических полей и плазменных неустойчивостей; взаимодействие ВГВ с приливами и нейтральным ветром и их влияние на вариации параметров ВА; идентификация источников ВГВ и др.

Решение этих задач возможно только с помощью НР-МСТ-радара, позволяющего измерять параметры ВГВ нейтралов и ПИВ, определять их пространственно-временные распределения в разнесенных точках, отслеживать распространение ПИВ с помощью меридиональной цепочки вспомогательных инструментов, а также с привлечением данных наблюдений региональных и глобальных сетей станций.

Глобальные изменения и региональные особенности

Глобальные изменения и долгопериодные тренды вариаций параметров окружающей среды составляют одну из актуальных проблем, при этом в исследованиях атмосферы наибольшее значение имеют ряды данных об изменениях всех ее слоев, которые могут быть получены с помощью НР-МСТ-радара.

Перспективным направлением исследований является комплексное изучение литосферно-атмосферно-ионосферных связей. Иркутский регион характеризуется высокой сейсмической активностью, что определяет необходимость исследований атмосферного и ионосферного проявления этой активности на основе данных НР-МСТ-радара и сейсмостанций.

Восточно-Сибирский регион имеет важные особенности регионального значения: наибольшее различие магнитных и географических широт и сильную магнитную аномалию, что еще раз подчеркивает уникальность расположения НР-МСТ-радара. Именно в этом регионе в последние годы зарегистрировано много необычайно мощных возмущений ВА, в том числе и при умеренных геомагнитных бурях, что требует выяснения причин этого явления.

Распространение радиоволн и радиофизические методы дистанционной диагностики ионосферы

Ионосферная плазма как среда распространения радиоволн характеризуется неоднородностями различных масштабов, дисперсией, поглощением, анизотропией и при определенных условиях нелинейностью. Неоднородные электрические свойства земной поверхности, ее сложный рельеф и покров также сильно влияют на свойства радиоволн. Для различных длин волн и разных радиотрасс эти свойства среды проявляются в виде различных эффектов, которые во многих случаях действуют в комплексе и сложным образом влияют на процесс распространения радиоволн. Изучение распространения радиоволн в таких сложных средах составляет одну из важнейших проблем радиофизики.

Различные эффекты взаимодействия радиоволн с ионосферой позволяют установить связь между ее параметрами и характеристиками радиосигналов, на основе чего разработаны и развиваются методы дистанционной диагностики ионосферы. Радиофизические методы дают наибольшую часть данных о структуре и свойствах ВА. Поэтому развитие этих методов, расширение их диагностических возможностей — одно из важных направлений.

С помощью НР-МСТ-радаров будут проводиться исследования ионосферного, в том числе нелинейного, распространения радиоволн КВ, УКВ и УВЧ диапазонов. Преимуществом НР-МСТ-радаров является возможность обеспечения этих исследований высокоинформативной диагностикой ионосферной плазмы.

Это позволит разрабатывать новые методы дистанционной диагностики окружающей среды, основанные на анализе отдельных реализаций сигнала, а не их статистических характеристик. При этом основное внимание будет уделяться когерентным и интерференционным методам диагностики.

Таким образом, возможности многоцелевого радара НР-МСТ позволят провести новые фундаментальные исследования и, кроме того, обеспечат решение ряда важных прикладных задач, таких как

- эффективный контроль текущей геофизической обстановки для обеспечения работы радиотехнических средств в юго-восточной Сибири, создание необходимых предпосылок для разработки эффективных моделей прогноза неблагоприятных геофизических событий;
- разработка новых технологий контроля низкоорбитальных КА и космического мусора с одновременной диагностикой ионосферной обстановки;
- разработка новых радиотехнических методов сверхразрешения, основанных на принципах прецизионной обработки сигналов и интерферометрии с малой базой, которые позволят достичь высоких точностей определения параметров низкоорбитальных космических объектов (КО). Новые методы позволят обнаруживать и сопровождать КО размером 10 см на дальностях до 1000 км при точности по дальности $\sigma_R \sim 100$ м, по углам σ_α и $\sigma_\gamma \sim 1$ угл. мин;
- разработка комплексных высокоинформативных радарно-оптических методов контроля космического пространства, позволяющих обнаруживать и определять траектории КО средствами НР-МСТ-радаров с последующим наведением на выбранный КО телескопов с узким полем обзора.

Одновременное и координированное наблюдение КО позволит осуществить его портретирование, существенно повысит точность и надежность получения некоординатной информации о КО, включая события разрушения, отделения малоразмерных фрагментов, работы бортовых двигателей и нарушения ориентации.

2.3.2. Нагревный стенд

Исследования по взаимодействию мощных КВ-радиоволн с ионосферной плазмой составляют обширный и интенсивно развивающийся раздел физики ВА. Управляемое воздействие на ионосферу открыло принципиально новую возможность прове-

дения контролируемых активных экспериментов, позволяющих более глубоко по сравнению с пассивными измерениями изучать свойства ионосферы и ВА, проводить исследования управляемого воздействия на процессы в ионосфере и ОКП, направленные на более глубокое изучение и управление процессами в ВА. Нагрев или модификация ионосферы мощными КВ-радиоволнами приводит к нагреву электронов и возникновению различных неустойчивостей плазмы, вследствие чего возникают разнообразные явления и эффекты.

В результате нагрева формируются крупномасштабные возмущения температуры и концентрации электронов, дефокусирующие (E-слой) и фокусирующие (F-слой) линзы, происходит кросс-модуляция и самовоздействие радиоволн. В поле стоячей мощной радиоволны в ионосфере формируются периодические искусственные неоднородности (решетки), радиолокация которых позволяет измерить ряд параметров плазмы и нейтральных компонент.

Амплитудная модуляция мощной волны вызывает модуляцию проводимости ионосферы и токов, обусловленных внешними электрическими полями (в высоких широтах) или нейтральным ветром (в средних широтах). Этот ток является источником искусственного низкочастотного СНЧ-КНЧ-ОНЧ-излучения, которое распространяется в волноводе Земля—ионосфера на большие дальности (до тысяч километров) либо в свистовой моде в магнитосфере. Данный эффект может быть использован для подземной радиолокации и воздействия на магнитосферу.

В результате возникновения неустойчивостей возбуждаются плазменные волны, слои, волокна, искусственная ионосферная турбулентность, т. е. неоднородности ионосферной плазмы различных типов. Одним из наиболее значимых эффектов является ярко выраженное мелкомасштабное расслоение плазмы на сильно вытянутые вдоль магнитного поля неоднородности. Важными являются искусственное свечение в слоях E и F и искусственное широкополосное радиоизлучение ионосферы, а также возбуждение (усиление) плазменных и ионных линий в спектрах сигналов, измеряемых радаром НР.

Данное направление исследований является одним из наиболее перспективных. Оно важно для изучения естественных свойств ВА, например условий возникновения неустойчивостей [Васильев и др., 2020a].

Кроме того стенд предполагает следующее:

- эксперименты по исследованию эффективности передачи энергии КВ-радиоволн в ионосферную плазму; исследование плазменных образований, образующихся в результате такого воздействия, их местоположения, времени жизни, вторичного радио- и оптического излучения, формы, степени неоднородности и т. п.;
- исследование эффектов прохождения КВ-, УКВ- и СВЧ-радиоволн через возмущенную область, возможности генерации СНЧ-радиоволн с помощью модуляции проводимости в ионосферной плазме;
- исследование явлений, связанных с генерацией магнитосферных ОНЧ-волн и управляемой стимуляцией магнитных суббурь и высыпаний частиц из радиационных поясов Земли.

2.4. Сеть когерентных ионосферных радаров (СЕКИРА)

Исследование процессов, возникающих под воздействием солнечного ветра на магнитосферу и ионосферу Земли, является одной из центральных проблем солнечно-земной физики. Одним из наиболее эффективных инструментов для исследований этой проблемы является международная кооперативная система SuperDARN (Super Dual Auroral Radar Network). Система представляет собой сеть высокочастотных (коротковолновых) радаров когерентного обратного рассеяния, радиолокационное поле которой покрывает полярные области в Северном и Южном полушариях. На основе доплеровских измерений система позволяет определять картину конвекции плазмы полярной ионосферы, являющейся важнейшим индикатором ее взаимодействия с магнитосферой. В настоящее время имеется 23 радара в Северном полушарии и 13 в Южном, окружающих полярные области.

ИСЗФ СО РАН осуществляет развертывание российской сети когерентных ионосферных радаров, подобной системе SuperDARN. Российские радары смогут вести наблюдения практически на всей долготной протяженности Российской Федерации и будут способны изучать магнитосферно-ионосферные связи, включая эффекты магнитосферных суббурь и геомагнитных бурь в среднеширотных и субавроральных областях.

Российская система когерентных радаров предполагает исследования по нескольким крупным направлениям как в рамках международной кооперации, так и по самостоятельным программам [Бернгардт и др., 2020].

Взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой и ионосферой

Основным вопросом взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой является оценка электрического поля пересоединения и его вариаций вдоль так называемой линии слияния, т. е. вдоль проекции на ионосферу области пересоединения на магнитопаузе. Имеющиеся системы могут это делать при определенных обстоятельствах, но ограничены довольно малым интервалом наблюдений. Необходим охват большей части дневного сектора. Вкладом, который внесут эти радары в России, будет расширение сферы обзора радаров для покрытия всех интервалов местного времени, устраняющее таким образом упомянутое ограничение.

Крупно- и средномасштабная конвекция авроральной плазмы является одним из важных параметров для изучения процессов взаимодействия магнитосферы с ионосферой. Российские радары смогут существенно сократить существующий пробел в долготном диапазоне наблюдений и будут способны изучать магнитосферно-ионосферные связи, включая эффекты магнитосферных суббурь и геомагнитных бурь в среднеширотных и субавроральных областях, интенсивно исследуемых в настоящее время.

Внутренние атмосферные волны

В то время, как на средних широтах основным источником внутренних атмосферных волн (ВАВ) являются воздействия на ионосферу снизу и пере-

ходные процессы в солнечном терминаторе, на высоких широтах одним из важных источников крупномасштабных внутренних волн в верхней атмосфере является сильный джоулев нагрев в высокоширотной ионосфере, связанный либо с суббурями и усиленными электроджетами, либо с усиленными ионосферными потоками в каспе. Такие волны, распространяясь в верхней атмосфере, вызывают ПИВ, которые фокусируют и дефокусируют распространяющиеся высокочастотные радиоволны. Радары SuperDARN регулярно наблюдают крупномасштабные и средномасштабные ПИВ. Российские радары увеличат сектор обзора системы и смогут облегчить поиск и экспериментальное исследование крупномасштабных волн, которые важны для количественной оценки передачи энергии в системе литосфера—атмосфера—ионосфера—магнитосфера.

Рассеяние на метеорах и мезосферные ветры

Эти радары позволят проводить наблюдения метеорного рассеяния радиоволн и на этой основе измерять ветры в мезосфере. Расширение сети за счет российского сегмента сможет обеспечить измерения во всех долготных секторах одновременно. Такие измерения обеспечат мониторинг и изучение средномасштабной структуры в мезосферных ветрах с высоким пространственно-временным разрешением и широким пространственным покрытием.

Естественные и искусственные плазменные неоднородности

Когерентные радары принимают когерентное обратное рассеяние от ионосферных неоднородностей в областях E и F ионосферы. Эти неоднородности генерируются, в первую очередь, действием электрических полей и градиентов электронной концентрации в этих областях. Поэтому радары могут быть использованы для исследования процессов, ответственных за формирование этих неоднородностей. Помимо неоднородностей, имеющих естественную природу, большой интерес представляют искусственные неоднородности, стимулированные такими мощными источниками радиоволн, как нагревный стенд «EISCAT Heating» (Тромсё, Норвегия). Хотя российские КВ-радары не смогут охватить регионы, где расположены существующие зарубежные нагревные стенды, российские ученые будут, тем не менее, иметь возможность использовать данные остальных радаров в своих будущих исследованиях.

УНЧ-волны

КВ-радары способны несколькими способами выполнять измерения ультранизкочастотных (УНЧ) волн, в частности, в диапазоне периодов геомагнитных пульсаций Pc5 (150–600 с). Они могут либо напрямую измерять возмущения ионосферы, обусловленные электрическим полем волны, либо регистрировать возмущения параметров сигналов возвратно-наклонного зондирования, которые обусловлены движением отражающего ионосферного слоя, вызванным электрическим полем волны. Расположение российских радаров уникально, так как позволит проводить измерения волн в окрестности плазмопаузы, являющейся одной из важнейших областей околоземного космического пространства.

Кроме фундаментальных исследований, российская сеть СЕКИРА обеспечит решение следующих прикладных задач:

- осуществление постоянного контроля развития ионосферных возмущений в приполярных областях, оказывающих существенное влияние на работу систем связи, навигационных, радиолокационных и других технологических систем на всей территории России;
- мониторинг границы аврорального овала, обеспечивающий экспериментальную базу для эффективного прогноза блэкаутов в КВ-радиоканалах во время мощных геомагнитных возмущений и прогноза оптимальных рабочих частот в различных геофизических условиях;
- реализация оперативной диагностики волновых возмущений ионосферы, являющихся наиболее непредсказуемым фактором возмущений для систем связи, локации и навигации.

В результате российская сеть когерентных радаров декаметрового диапазона, состоящая из четырех мобильных радаров быстрого развертывания с сектором обзора, покрывающим значительную часть арктической зоны России, позволит решить задачу оповещения федеральных и региональных органов исполнительной власти, радиосвязных и навигационных систем, ЕСИМО (Росгидромет) о неблагоприятных факторах космической погоды, зарождающихся в Арктике.

2.5. Лидарно-оптический комплекс

В настоящее время создание глобальной и региональных систем исследования атмосферы на различных высотных уровнях является актуальной фундаментальной задачей, в решении которой объединяются научный и технический потенциалы мирового сообщества.

Лидарно-оптический комплекс (ЛОК) [Матвиенко и др., 2020] предназначен для исследования профильных характеристик физических параметров (температура, плотность, ветер) и состава (ряд газовых составляющих, аэрозоль) средней и верхней атмосферы, формируемых под воздействием природных процессов и антропогенного (например, экологические нарушения, мощные излучения) влияния. Оптический комплекс объединяет активные лазерные системы и пассивные оптические инструменты для регистрации собственного оптического излучения атмосферных составляющих. Подобный комплекс позволит получать наиболее полную на данный момент информацию о состоянии атмосферы.

Лидарные измерения ЛОК позволят на качественно новом уровне проводить исследования состояния и состава атмосферы в широком диапазоне высот от 10 до 100 км. Применяемые различные методы зондирования позволяют получить информацию о гелиогеофизических процессах и явлениях, протекающих в этом интервале высот. Эта информация дает представление о влиянии солнечной активности, о состоянии магнитосферы, стратосферных потеплениях, гравитационных и планетарных волнах, вулкано-генной и сейсмической деятельности, полярных и серебристых облаках. Как известно, ВА, содержащая

заряженные частицы, изучается с помощью радиофизических комплексов, а нейтральная часть атмосферы может исследоваться с помощью лидарных систем. Сочетание этих систем обеспечит анализ взаимосвязи нейтральной и заряженной компонент, являющейся одной из ключевых проблем в физике атмосферы Земли. Эти вопросы пока еще слабо изучены и имеют фундаментальное и прикладное значение.

Для исследования высоких слоев атмосферы, включая мезосферу и термосферу, требуются лидарные системы с крупногабаритной оптикой и мощными лазерами. Именно такой мезосферно-стратосферный лидар будет впервые создан в нашей стране в составе НГК, что позволит определять параметры стратосферы и мезосферы с высоким пространственным и временным разрешением. Эти параметры необходимо будет получать одновременно с результатами радиофизических измерений, что крайне важно для исследования солнечно-земных связей.

Создаваемый мезосферно-стратосферный лидар с использованием полученных в Институте оптики атмосферы (ИОА СО РАН) теоретических и экспериментальных научных разработок по методикам зондирования обеспечит решение задач дистанционного определения основных параметров атмосферы: температуры, плотности, скорости ветра, содержания озона, распределения паров натрия в мезосфере.

Таким образом, использование новейших технических технологий и разработанных методик измерений мезостратосферным лидаром обеспечит непрерывный мониторинг термодинамических параметров и аэрозольно-газовых составляющих мезо- и стратосферы и обеспечит получение информации об атмосфере в диапазоне высот от 10 до 100 км.

Следует подчеркнуть, что при разработке этой лидарной системы предусмотрена возможность ее дальнейшей модернизации и развития.

Лидар представляет собой активный инструмент, включающий мощные излучатели и крупногабаритную оптику. В представленном Проекте он будет дополнен набором пассивных инструментов, которые позволят проводить измерения плотности, температуры, скорости, а также характеристик волновых процессов на высотах мезосферы и нижней термосферы. Достаточно хорошо исследованы спектральный состав и регулярные вариации излучения основных эмиссионных линий и полос ВА Земли на больших временных интервалах, что позволило перейти к созданию эмпирических моделей регулярных вариаций основных эмиссий излучения ВА.

В состав пассивных инструментов входят следующие приборы [Васильев и др., 2020б]:

- интерферометр Фабри—Перо — будет использоваться для изучения динамики мезосферы, термосферы, плазменных дрейфов, а также для измерения относительной плотности, температуры, скорости ветра и волн;
- камеры всего неба — необходимы для получения с высоким пространственным разрешением распределений интенсивностей основных оптических эмиссий на мезосферном и термосферном уровнях;

- фотометры — позволят с высоким временным и амплитудным разрешением интенсивностей измерять основные оптические эмиссии мезосферы и нижней атмосферы;

- спектрографы — позволят проводить измерение спектрального состава излучения и температуры.

Изменения ВА являются чувствительным индикатором физико-химических процессов и ее основных параметров. Установлена связь свечения в ВА с такими явлениями, как внезапные зимние стратосферные потепления, землетрясения и др. Наблюдения свечения ВА представляют большой научный интерес для климатических исследований атмосферы и изучения климата Земли. Другим важным практическим приложением является использование собственного оптического излучения в экспериментах по модификации ионосферы.

Таким образом, создаваемый ЛОК обеспечит решение актуальных фундаментальных проблем в исследовании атмосферы на различных высотных уровнях, что на сегодняшний день является также и важнейшей практической задачей в области экологии окружающей среды и глобального изменения климатической системы Земли.

Кроме того, в состав строящегося НГК входит еще один важный объект. Сбор, обработка в реальном времени и хранение информации, поступающей от инструментов комплекса, а также передача ее потребителям будет проходить в центре, который будет построен в Иркутске (ИСЗФ СО РАН). Его вычислительные возможности и архитектура программно-аппаратных средств должны обеспечивать требования к оперативности, объемам хранения данных (не менее 100 000 Тб в год), выработке необходимых предупреждений, индексов и других показателей состояния Солнца и ОКП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Строящийся Национальный гелиогеофизический комплекс РАН, в состав которого входят уникальные установки, инструменты и приборы, разработан на основе новых технических решений с применением современных технологий и соответствует мировому уровню.

Создаваемая экспериментальная база позволит осуществить переход на качественно новый уровень развития фундаментальных и прикладных исследований в области солнечно-земной физики (физики Солнца, атмосферы, ионосферы и магнитосферы Земли) и обеспечит выполнение этих работ на высоком уровне на ближайшие 25–30 лет.

Размещение строящегося комплекса на или вблизи сети обсерваторий ИСЗФ СО РАН обеспечит координацию и совместные эксперименты с действующей научной инфраструктурой.

Потенциальные научно-технические возможности комплекса инструментов нового поколения в решении фундаментальных и прикладных задач должны стать основой разработки научно-технической программы исследований негативных космических явлений и снижения их последствий, наряду с планируемыми космическими экспериментами.

Географическое положение создаваемого комплекса, его многофункциональность и техническое оснащение обеспечат участие российских ученых в международных программах и проектах в области космических исследований.

Исследовательский комплекс может быть центром просветительской, учебной и научной деятельности для российских и зарубежных студентов, аспирантов, исследователей, а также центром подготовки научных и инженерных кадров для научных организаций и университетов.

В разработанной концепции НГК РАН предусмотрено создание с учетом уже действующей научно-исследовательской инфраструктуры ИСЗФ СО РАН Федерального исследовательского центра фундаментальных и прикладных исследований в области физики Солнца и ОКП с участием других ассоциируемых научных организаций.

ИСЗФ СО РАН представил Министерству науки и высшего образования РФ вариант проекта создания такого центра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алтынцев А.Т., Лесовой С.В., Глоба М.В. и др. Многоволновый сибирский радиогелиограф // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6, № 2. С. 37–50. DOI: [10.12737/szf-62202003](https://doi.org/10.12737/szf-62202003).

Бернгардт О.И., Куркин В.И., Кушнарев Д.С. и др. Декаметровые радары ИСЗФ СО РАН // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6, № 2. С. 79–92. DOI: [10.12737/szf-62202006](https://doi.org/10.12737/szf-62202006).

Васильев Р.В., Сетов А.Г., Фролов В.Л. и др. Современный нагревный стенд для исследования ионосферы средних широт // Солнечно-земная физика. 2020а. Т. 6, № 2. С. 61–78. DOI: [10.12737/szf-62202005](https://doi.org/10.12737/szf-62202005).

Васильев Р.В., Артамонов М.Ф., Белецкий А.Б. и др. Научные задачи оптических инструментов Национального гелиогеофизического комплекса // Солнечно-земная физика. 2020б. Т. 6, № 2. С. 105–122. DOI: [10.12737/szf-62202008](https://doi.org/10.12737/szf-62202008).

Григорьев В.М., Демидов М.Л., Колобов Д.Ю. и др. Проект национального российского Крупного солнечного телескопа с диаметром зеркала 3 м // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6, № 2. С. 19–36. DOI: [10.12737/szf-62202002](https://doi.org/10.12737/szf-62202002).

Матвиенко Г.Г., Маричев В.Н., Бобровнико С.М. и др. Мезостратосферный лидар для гелиогеофизического комплекса // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6, № 2. С. 93–104. DOI: [10.12737/szf-62202007](https://doi.org/10.12737/szf-62202007).

Медведев А.В., Потехин А.П., Сетов А.Г. и др. Всатмосферный радар НР-МСТ // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6, № 2. С. 51–60. DOI: [10.12737/szf-62202004](https://doi.org/10.12737/szf-62202004).

REFERENCES

Altynytsev A.T., Lesovoi S.V., Globa M.V., Gubin A.V., Kochanov A.A., Grechnev V.V., et al. Multiwave Siberian Radioheliograph. *Solar-Terr. Phys.* 2020, vol. 6, no. 2, pp. 30–40. DOI: [10.12737/stp-61202004](https://doi.org/10.12737/stp-61202004).

Berngardt O.I., Kurkin V.I., Kushnarev D.S., Grkovich K.V., Fedorov R.R., Orlov A.I., et al. ISTEP SB RAS decameter radars. *Solar-Terr. Phys.* 2020, vol. 6, no. 2, pp. 63–73. DOI: [10.12737/stp-62202006](https://doi.org/10.12737/stp-62202006).

Grigoryev V.M., Demidov M.L., Kolobov D.Yu., Pulyaev V.A., Skomorovsky V.I., Chuprakov S.A., and the AMOS team. Project of the National Russian Large Solar Telescope with 3 m mirror diameter. *Solar-Terr. Phys.* 2020, vol. 6, no. 2, pp. 14–29. DOI: [10.12737/stp-62202002](https://doi.org/10.12737/stp-62202002).

Matvienko G.G., Marichev V.N., Bobrovnikov S.M., Yakovlev S.V., Chistilin A.Yu., Sautkin V.A. Mezostratospheric lidar

for the Heliogeophysical Complex. *Solar-Terr. Phys.* 2020, vol. 6, no. 2, pp. 74–83. DOI: [10.12737/stp-62202007](https://doi.org/10.12737/stp-62202007).

Medvedev A.V., Potekhin A.P., Setov A.G., Kushnarev D.S., Lebedev V.P. All-atmosphere IS-MST Radar. *Solar-Terr. Phys.* 2020, vol. 6, no. 2, pp. 41–48. DOI: [10.12737/stp-62202004](https://doi.org/10.12737/stp-62202004).

Vasilyev R.V., Setov A.G., Frolov V.L., Ratovsky K.G., Beletsky A.B., Oinats A.V., Yasyukevich Yu.V., Medvedev A.V., Modern heating stand for research of ionosphere of middle latitudes. *Solar-Terr. Phys.* 2020a, vol. 6, no. 2, pp. 49–62. DOI: [10.12737/stp-62202005](https://doi.org/10.12737/stp-62202005).

Vasilyev R.V., Artamonov M.F., Beletsky A.B., Zorkaltseva O.S., Komarova E.S., et al. Scientific goals of optical instruments of the National Heliogeophysical Complex. *Solar-Terr. Phys.* 2020b, vol. 6, no. 2, pp. 84–97. DOI: [10.12737/stp-62202008](https://doi.org/10.12737/stp-62202008).

Как цитировать эту статью:

Жеребцов Г.А. Комплекс гелиогеофизических инструментов нового поколения. *Солнечно-земная физика*. 2020. Т. 6, № 2. С. 6–18. DOI: [10.12737/szf-62202001](https://doi.org/10.12737/szf-62202001).