

А.В. МЕДВЕДЕВ



МЕДВЕДЕВ Андрей Всеволодович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией развития новых методов радиофизической диагностики атмосферы Института солнечно-земной физики СО РАН (Иркутск). Автор более 70 научных работ и 2 патентов

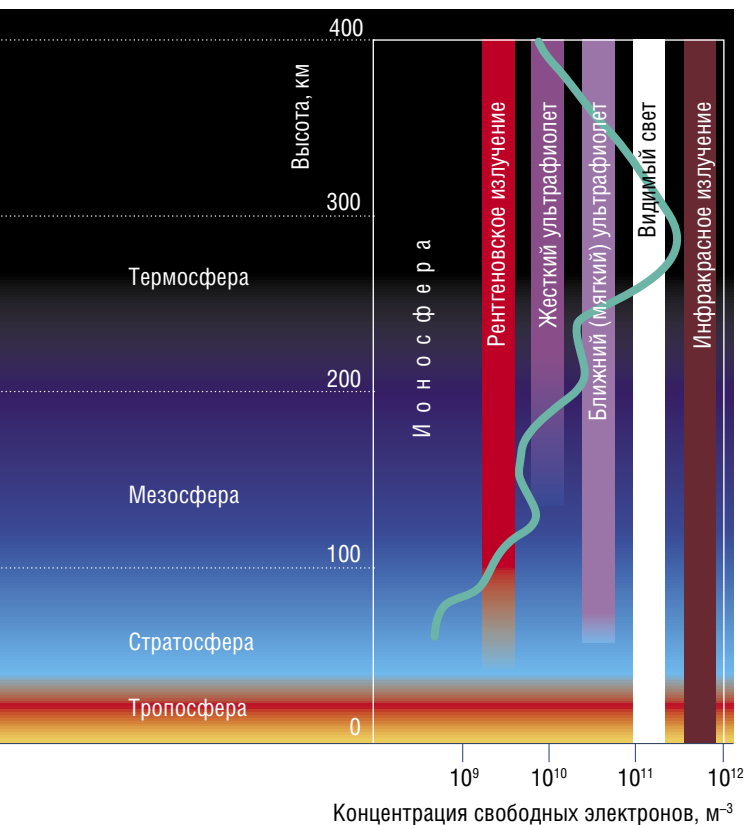
Прогноз «КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ»

История создания Иркутского радара НР – единственного в России радара некогерентного рассеяния радиоволн – представляет собой один из наиболее удачных и масштабных примеров конверсии военной техники в мощный инструментальный комплекс, предназначенный для исключительно мирных целей – научных исследований в области солнечно-земной физики. С помощью подобных современных радиолокационных установок можно изучать весь сложный комплекс проблем взаимодействия земной атмосферы, магнитного поля и солнечного ветра, чтобы дать прогноз «космической погоды», столь необходимый во многих сферах человеческой деятельности, от радиосвязи и спутниковой навигации до наземного электроснабжения

Ключевые слова: ионосфера, солнечно-земная физика, радар некогерентного рассеяния, космическая погода.
Key words: ionosphere, solar terrestrial physics, incoherent scatter radar, space weather

Предположение о существовании в верхней атмосфере Земли электропроводящего слоя (впоследствии названного *ионосферой*) было выдвинуто сразу несколькими учеными еще в конце XIX в. Гипотеза позволяла объяснить наблюдаемые регулярные вариации магнитного поля Земли, но была встречена научным сообществом довольно скептически.

Лишь эпоха радио позволила окончательно определиться в этом вопросе. Оказалось, что только существованием над земной поверхностью слоя ионизированного газа (*плазмы*), отражающего радиоволны, можно объяснить эффект сверхдальнего распространения электромагнитных волн дециметрового



Ионосфера – верхние (выше 50 км) слои земной атмосферы, характеризующиеся ионизированным состоянием вещества (в виде плазмы). Из-за наличия заряженных частиц (ионов и свободных электронов) ионосфера обладает электропроводностью и, следовательно, способностью отражать электромагнитные волны радиодиапазона. Благодаря отражению преимущественно «коротких» (длиной 10–100 м) радиоволн происходит их распространение за пределы прямой видимости, т. е. существует феномен сверхдальней радиосвязи. Ионизация молекул газа происходит под действием солнечной радиации в диапазоне частот от рентгеновского до мягкого ультрафиолетового излучения. Степень ионизации напрямую зависит от солнечной активности

Концентрация заряженных частиц в атмосфере распределена по высоте неравномерно. Каждый локальный пик концентрации в высотном профиле связан с тем, что в соответствующей «сфере» происходит преимущественное поглощение одного из видов солнечного излучения

диапазона («коротких» радиоволн). Это исключительно важное для практики свойство ионосферы, благодаря которому появилась возможность передавать радиосигналы на очень большие расстояния, побудило исследователей многих стран начать интенсивное экспериментальное и теоретическое изучение структуры ионосферы и процессов, в ней происходящих.

На основе накопленного знания об ионосфере в последние десятилетия сформировалось новое научное направление – *солнечно-земная физика*, занимающаяся в том числе и процессами трансформации разнообразных форм солнечной радиации при взаимодействии с веществом и полями в околоземном пространстве.

Пограничный мир

Физика земной ионосферы очень сложна. Это открытая система: потоки энергии и вещества поступают в нее и сверху – от Солнца и солнечного ветра, и снизу – из плотной и турбулентной нижней атмосферы.

В ионосфере дуют горизонтальные ветры и гуляют гигантские волны, генерируются электрические поля и протекают сложные химические реакции. Предсказать поведение ионосферы порой не проще, чем сделать верный метеопрогноз. Недаром в международном научном сообществе для описания всего комплекса

явлений в верхней атмосфере Земли бытует термин «космическая погода».

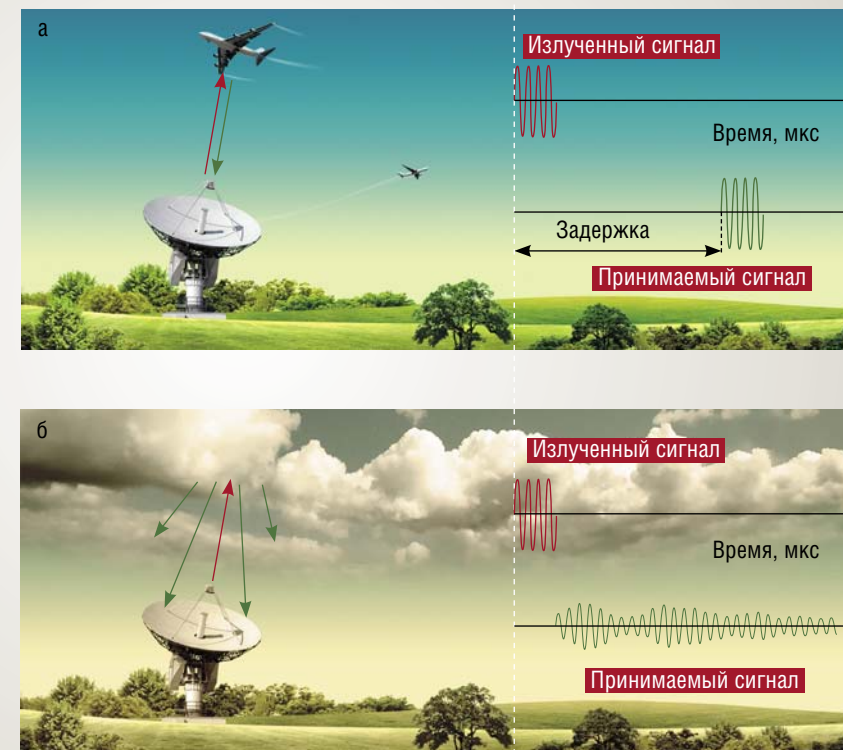
А прогнозировать, и точно прогнозировать, поведение ионосферной плазмы просто необходимо! Ведь от ее состояния зависит качество радиосвязи, динамика полета низкоорбитальных космических аппаратов, точность и надежность работы навигационных спутниковых систем, функционирование наземной энергетической инфраструктуры (особенно в высоких широтах).

Феномен отражения электромагнитных волн от проводящей среды был использован для изучения ионосферы методами радиолокации. Полное отражение происходит, когда частота волны совпадает с *собственной плазменной частотой* ионизированной среды, которая однозначно определяется объемной концентрацией свободных электронов.

Первоначально для исследования ионосферы использовали установки вертикального зондирования, принцип действия которых основан на измерении времени распространения коротковолновых сигналов до отражающего их слоя ионосферы и обратно. По *ионограмме* – графику зависимости задержки возвращающегося сигнала от частоты зондирования – определяли весьма ограниченный набор параметров, в частности высотное распределение электронной концентрации.

Радар (радиолокатор) – устройство для сканирования пространства с целью обнаружения инородных объектов, измерения расстояния до них и их относительной скорости. Принцип действия прибора, состоящего из передатчика и приемника, основан на отражении радиоволн от препятствий

Обычный радар (а) работает с компактными объектами. По времени задержки возвращения сигнала определяют расстояние до цели, по изменению частоты – скорость удаления (приближения). При сканировании рассредоточенного объекта (б) происходит не отражение, а рассеяние радиоволн. Принятый сигнал не похож на сигнал излученный, поэтому полезная информация может быть получена только после его статистической обработки



В средних широтах эта величина редко превышает $10^{13} m^{-3}$, поэтому шанс отразиться при вертикальном зондировании имеют только радиоволны с частотой не выше 20 МГц (т. е. длиной от 15 м и более). Но поскольку такие волны не проникают выше главного максимума ионизации (около 300 км) по причине их полного отражения от нижележащего слоя, этим методом невозможно исследовать верхние слои ионосферы.

Посланцы высших сфер

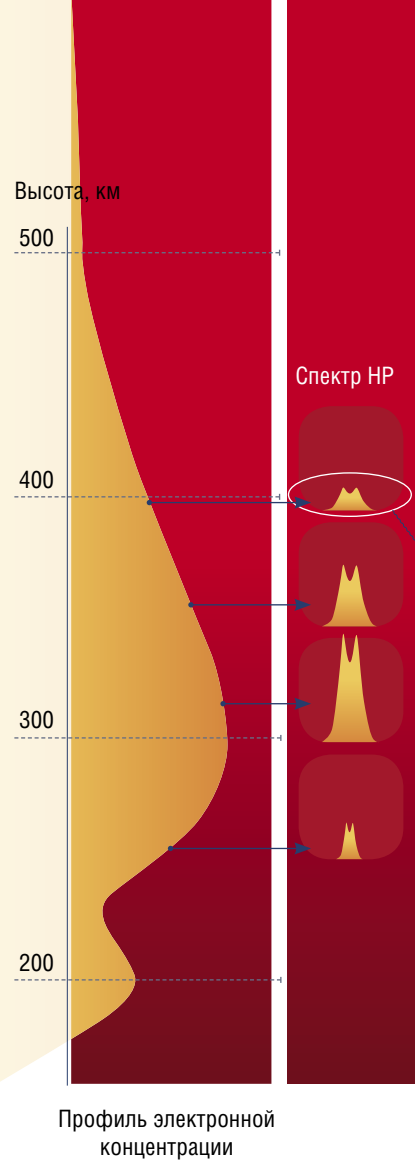
Стимулом к изобретению и развитию нового метода удаленного исследования ионосферной плазмы стало бурное развитие в военное и послевоенное время радиоэлектроники и, особенно, радиолокационной техники.

Весной 1958 г. профессор Корнельского университета (США) У. Гордон на рабочем семинаре поделился с молодыми сотрудниками своими соображениями. Дело в том, что для радиоволн с частотами выше критической частоты ионосферной плазмы среда практически прозрачна, поэтому львиная доля энергии уходит в космос. На землю возвращаются лишь очень слабые сигналы, рассеянные в обратном направлении, но зато эти информационные сигналы поступают от всех ионосферных высот, в том числе и находящихся выше главного пика ионизации, и могут быть зафиксированы.

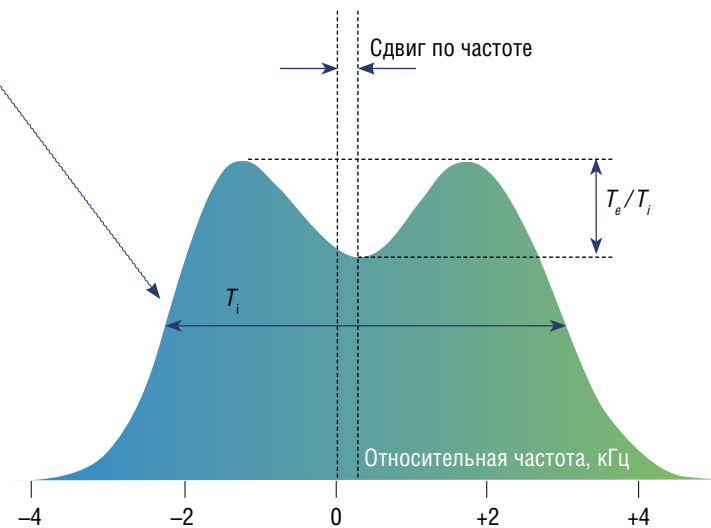
Согласно расчетам Гордона, наиболее мощные из существовавших на то время радаров были способны уловить слабые сигналы рассеяния электромагнитных волн на тепловых флуктуациях электронной концентрации. Это предложение открывало для изучения всю толщу ионосферы, и неудивительно, что ученые откликнулись на него с энтузиазмом.

Уже через полгода молодой американский физик К. Боулс на большом 41-мегагерцовом радаре в Иллинойсе получил первые спектры сигналов так называемого *некогерентного рассеяния* (НР). Вот только форма этих спектров оказалась для исследователей сюрпризом. Гордон рассчитывал, что рассеяние будет происходить на свободных электронах ионосферной плазмы и, следовательно, спектр рассеянного сигнала должен соответствовать максвелловскому распределению электронов по тепловым скоростям. Однако ширина спектров, полученных в эксперименте, соответствовала скорее тепловым скоростям ионов, а не электронов, и все спектры имели специфическую двугорбую форму, слабо напоминая распределение Максвелла.

Как бы то ни было, наука получила в руки мощный исследовательский инструмент, незаменимый в начале интенсивного освоения ближнего космоса. А в физике ионосферы и верхней атмосферы началась новая эпоха – эпоха радаров некогерентного рассеяния.



Спектр сигналов некогерентного рассеяния радиоволн имеет двугорбый симметричный вид. По параметрам спектра исследователи определяют физическое состояние плазмы. Так, площадь под спектральной кривой соответствует мощности рассеянного сигнала и прямо связана с величиной электронной концентрации в облучаемом секторе пространства. Сдвиг оси симметрии спектра относительно частоты зондирования свидетельствует о поступательном движении (дрейфе или течении) «облака» плазмы как целого вверх или вниз по лучу радара. С высотой свойства плазмы существенно меняются, это отражается на форме спектра: ширина его пропорциональна температуре ионов (T_i), а глубина провала между горбами зависит от соотношения между электронной и ионной температурой (T_e/T_i)



Профиль электронной концентрации

Создание экспериментальной и теоретической базы нового метода осуществлялось одновременно. В 1960-е гг. один за другим были построены радары НР в Центральной, Южной и Северной Америке, а также в Европе. Более совершенный вид начала принимать и сама теория некогерентного рассеяния: параметры спектра НР были увязаны со свойствами плазмы – химическим составом, температурой ионов и электронов, скоростью дрейфа и др.

В настоящее время диагностика ионосферы основана на радиолокационном уравнении, связывающем усредненный спектр принимаемого сигнала со спектром тепловых флуктуаций ионосферной плазмы.

Мощные и чувствительные

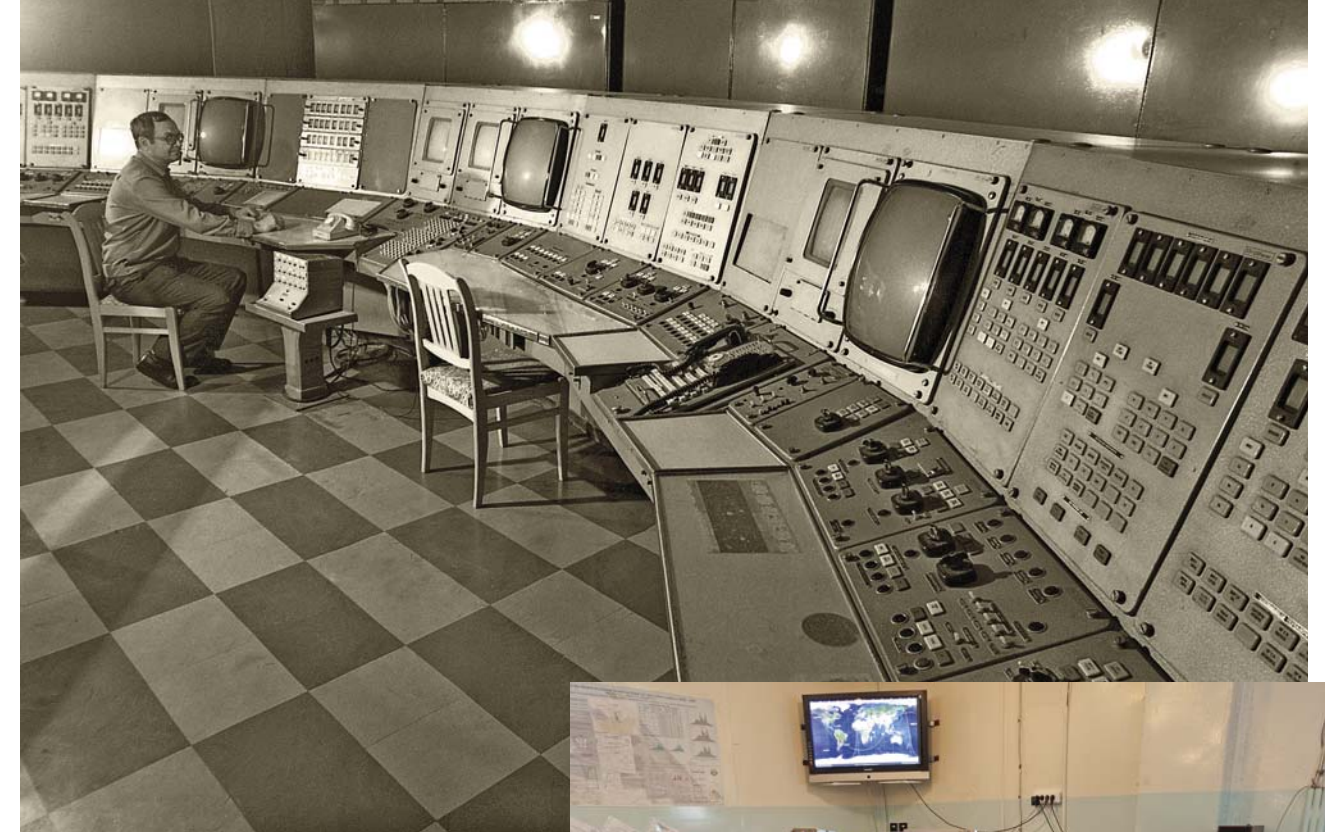
Радары НР значительно отличаются от традиционных радиолокационных станций по многим характеристикам.

Обычный радар имеет дело с отраженными сигналами, которые являются довольно точными копиями

излученных. Его главная задача – измерить задержку распространения сигнала и по ней определить расстояние до цели. Радар НР исследует рассредоточенный объект – тепловые флуктуации плазмы со случайными фазами. Рассеянный на этом объекте сигнал совсем не похож на сигнал излученный, к тому же уровень его мощности предельно мал. Весь огромный объем плазмы (порядка 10^4 км^3), который мгновенно, миллисекундным импульсом, «засвечивается» в облучаемом радаром секторе пространства, по отражающей способности эквивалентен рублевой монете. Поэтому для сигнала радара НР так важен энергетический потенциал – эти установки излучают мегаватты, а принимают пиковатты.

Все радары НР характеризуются большой поверхностью антенны и предельно высокой чувствительностью приемника. Самый большой радар, расположенный в г. Аресибо (Пуэрто-Рико), имеет антенну диаметром 300 м, а основанием его служит чаша потухшего вулкана!

Радары некогерентного рассеяния сегодня являются идеальными инструментами для исследования пере-



Иркутский радар некогерентного рассеяния – единственный в России – создан на базе военной радиолокационной станции «Днепр». Сегодня он является частью всемирной сети радаров НР



носа энергии и вещества по вертикали в системе «атмосфера–ионосфера–магнитосфера» и горизонтального перераспределения энергии по планете. В настоящее время в мире насчитывается 11 таких установок, каждая из которых уникальна по своей конструкции и методикам обработки сигналов. Результаты наблюдений всемирной радарной сети собираются и обобщаются в международных базах данных (например, «Madrigal», которая поддерживается американской обсерваторией Хайстэк).

В мировом сообществе разрабатывается глобальный проект, предусматривающий создание меридионального кольца радаров НР вокруг всего земного шара. Для этой цели планируется дополнить уже имеющуюся сеть аналогичными установками в Юго-Восточной Азии, Латинской Америке, и даже в Антарктиде. Такое расположение радаров даст возможность проводить одновременные круглосуточные наблюдения по всему земному шару, решая глобальные научные проблемы.

В нашей стране первый радар НР был создан в 1970-х гг. коллективом ученых Харьковского политехнического института под руководством профессора В. И. Тарана (сейчас эта установка является экспериментальной базой Института ионосферы АН и Минобразования Украины).



Размеры антенны Иркутского радара НР (слева) составляют 240 м в длину, 12 м в ширину и 20 м в высоту

Усмиренный «Днепр»

Начало ионосферных исследований в Сибири с помощью метода некогерентного рассеивания датируется 1980-ми гг. По инициативе тогдашнего директора иркутского Института солнечно-земной физики д. ф.-м. н. Г. А. Жеребцова для этой цели было использовано оборудование военных радиолокационных станций «Днепр», входящих в систему предупреждения о ракетном нападении. Именно там были получены

Заведующий обсерваторией радиофизической диагностики атмосферы А. В. Заворин демонстрирует масштаб антенного коммутатора – устройства, обеспечивающего переключение радара между режимами «излучение» и «прием». Каждый из шести передатчиков может развивать импульсную мощность разряда до 1,5 МВт



первые спектры сигналов некогерентного рассеяния, проведены наблюдения во время солнечного затмения. Использование военной техники позволило специалистам института приобрести необходимый опыт в обслуживании сложного оборудования и обработке получаемой информации.

Однако исследователям требовался свой собственный, «мирный» радар. Поэтому когда в 1993 г. одна из станций была выведена из состава вооруженных сил, она была переоборудована под исследовательские цели. Это была невероятно трудная задача в годы, когда любая попытка создания крупной экспериментальной установки казалась почти авантюрой. Но дожидаться лучших времен не приходилось, иначе станция была бы просто «сдана в утиль».

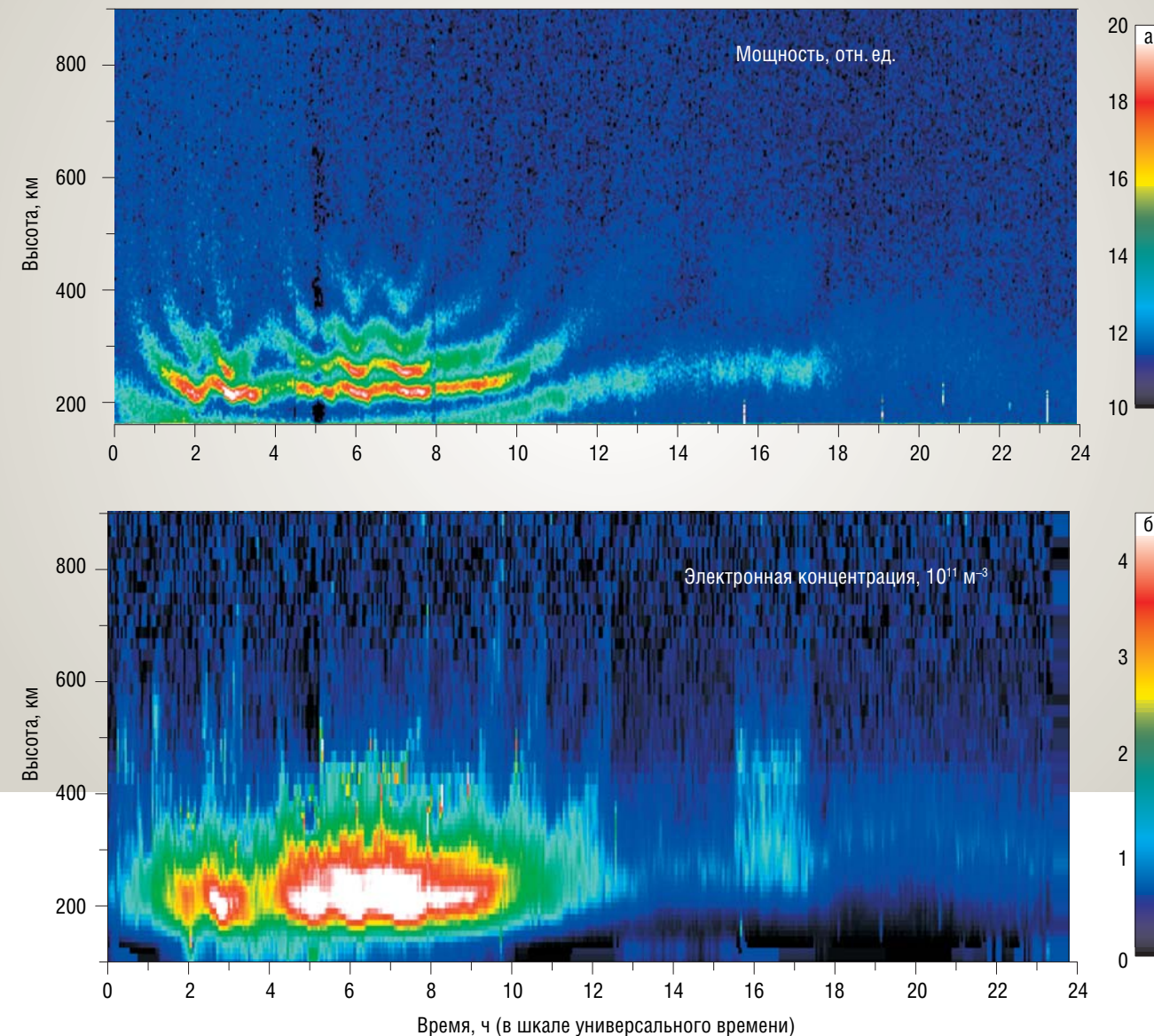
Группу «авантюристов» из молодых физиков и радиоинженеров возглавил к. ф.-м. н. А. П. Потехин (ныне чл.-кор. РАН и директор ИСЗФ СО РАН). Видя энтузиазм ученых и понимая всю сложность стоящих перед ними проблем, на помощь пришли многие, начиная от председателя СО РАН академика В. А. Коптюга, командующего войсками ракетно-космической обороны генерал-полковника В. М. Смирнова и главного конструктора станции «Днепр» В. Е. Ордановича. А отставные офицеры, многие годы служившие на «Днепре», взялись восстанавливать и обслуживать радиоэлектронное и технологическое оборудование станции.

В зарядной камере передатчика ИРНР сосредоточивается мощная энергия для миллисекундного импульса

И радар ИР состоялся! В дальнейшем известные специалисты отмечали, что передача радиолокационной станции на баланс ИСЗФ явилась единственным на постсоветском пространстве примером эффективной конверсии сложной и дорогостоящей военной техники.

Прежде чем стать радаром некогерентного рассеяния, бывший страж космических рубежей страны претерпел несколько этапов глубокой модернизации. Изменения коснулись всего комплекса управляющих, приемных, регистрирующих устройств и средств обработки сигналов. Все эти системы были воссозданы на базе современной цифровой быстродействующей техники, которая позволила наиболее полно использовать потенциал радара и особенности конструкции его антенны в исследовательских целях.

Сегодня *Иркутский радар ИР* (ИРНР) представляет собой многоцелевой исследовательский комплекс с очень широким кругом задач. Здесь проводятся регулярные продолжительные наблюдения состояния ионосферной плазмы с целью выявления закономерностей сезонных изменений, влияния уровня солнечной и геомагнитной активности, особых атмосферных со-



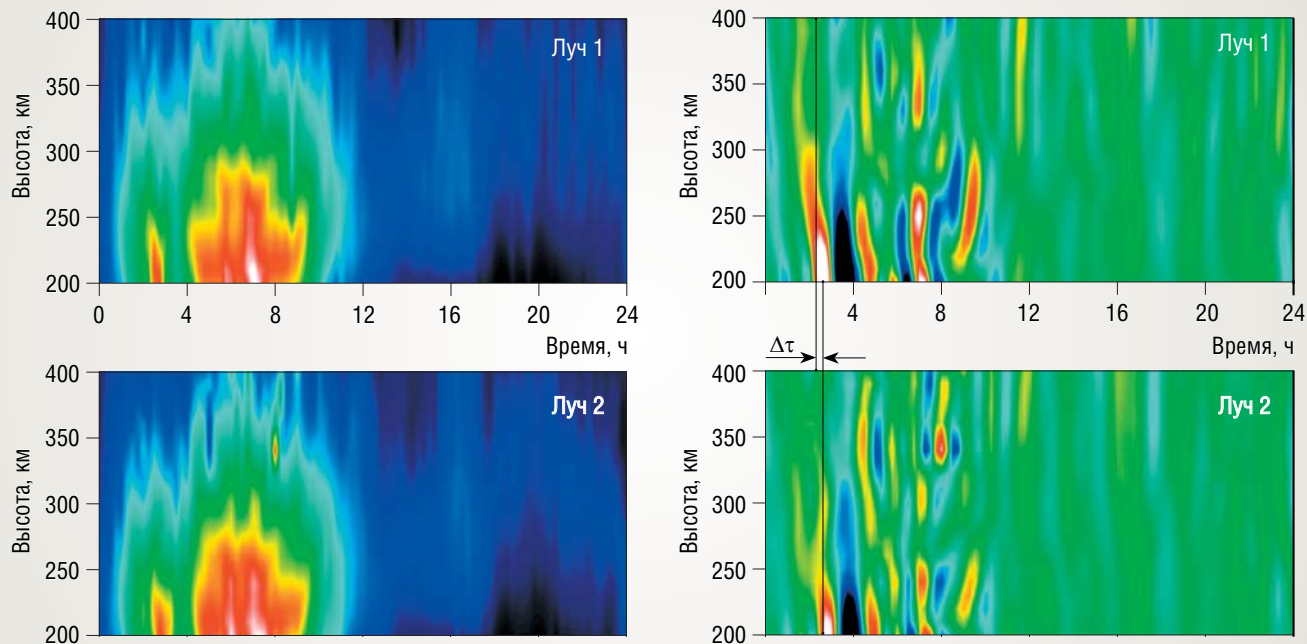
бытий (например, зимних стратосферных потеплений) и других факторов. Этот единственный в России радар ИР является важной частью мировой радарной сети, замыкая кругосветную «цепочку» среднеширотных радаров США, Европы и Японии.

Космический мониторинг

Из-за фиксированной ориентации рупора антенны и благодаря наличию поляризационного фильтра иркутский радар может излучать и принимать только одну линейную поляризацию электромагнитного поля.

Однако этот «недостаток» позволяет получать ценную информацию благодаря эффекту Фарадея. Суть его состоит в том, что при прохождении радиоволны сквозь ионосферную плазму происходит вращение плоскости ее поляризации вокруг луча распространения волны, причем угол поворота пропорционален интегральной электронной плотности вдоль пути волны. В результате в высотном профиле мощности рассеянного сигнала появляются «замирания» на тех высотах, с которых приходит подавляемая поляризационным фильтром волна. На основе измерений фазы «за-

На высотном профиле мощности рассеянного сигнала хорошо заметны периодические «замирания» (снижения уровня принимаемого сигнала), связанные с вращением плоскости поляризации радиоволны (а). Измерение фазы этих замираний позволяет определять электронную концентрацию в абсолютных значениях (б). 15 февраля 2011 г. Данные ИРНР



В ионосфере можно наблюдать волнообразные низкочастотные возмущения электронной концентрации. Это проявление так называемых *внутренних гравитационных волн*. Их можно выявить на высотных профилях концентрации электронов (слева) при помощи фильтрации (справа). Зафиксировав характерные сигналы от таких возмущений вдоль двух разнонаправленных лучей радара, по разнице во времени $\Delta\tau$ между ними можно рассчитать направление (азимут и угол наклона к горизонту) и скорость распространения этих волн

мираний» на ИРНР получают абсолютные значения электронной концентрации, не прибегая к внешним средствам калибровки, как это вынуждены делать на других радарах ИР.

Другой полезной особенностью иркутского радара является возможность мгновенного изменения направления излучения. Это очень важно, когда требуется исследовать пространственный градиент плазменных характеристик, в частности, высотно-временную структуру и особенности распространения волновых возмущений плотности в ионосфере.

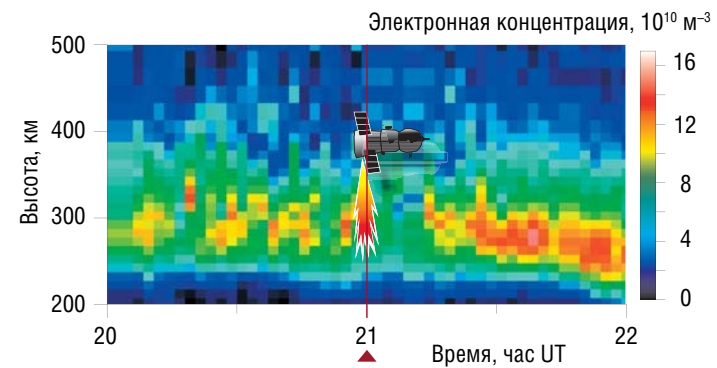
Кроме того, бывшая радиолокационная станция «Днепр» и после трансформации в радар не утратила способность обнаруживать компактные объекты на высотах 15–6000 км. Отраженные сигналы от спутников намного мощнее сигналов ионосферного рассеяния, поэтому при определении параметров плазмы один случайно попавший в луч радара спутник способен серьезно исказить данные о среде.

Поэтому на ИРНР каждая радиолокационная развертка автоматически исследуется на предмет наличия в ней отражений от сосредоточенных космических объектов. Если такой сигнал в развертке есть, она анализируется по другому алгоритму: измеряется амплитуда отраженного сигнала, угловые координаты и дальность до цели, ее лучевая скорость.

На сегодняшний день почти в 10 % получаемых радаром «снимков» отмечается влияние искусственных объектов, искажающее картину. Так что, изучая ионосферу, радар попутно исследует и распределение по орбитам действующих космических аппаратов и орбитального «мусора». А проблема загрязнения космоса сегодня стоит очень остро – число зарегистрированных фрагментов размером от 10 см на орбите исчисляется десятками тысяч! На низких (менее 1000 км) орбитах среднее расстояние между космическими объектами сократилось до 450 км.

Высокая концентрация обломков не только создает проблемы для исследования ионосферного сигнала, но и представляет угрозу для безопасности действующих спутников. Контроль над этой «орбитальной свалкой» можно обеспечить только с помощью достаточно плотной сети наблюдательных станций и при высокой точности измерений. И свою лепту в эту работу вносят радары ИР.

Возможности радара позволяют решать и другие интересные исследовательские задачи. Например, изучение эффектов, возникающих в ионосфере при работе двигателей космического аппарата на орбитальном участке полета, которое с 2007 г. ИСЗФ проводил совместно с Ракетно-космической корпорацией «Энергия» им. С. П. Королева и Центральным научно-исследова-

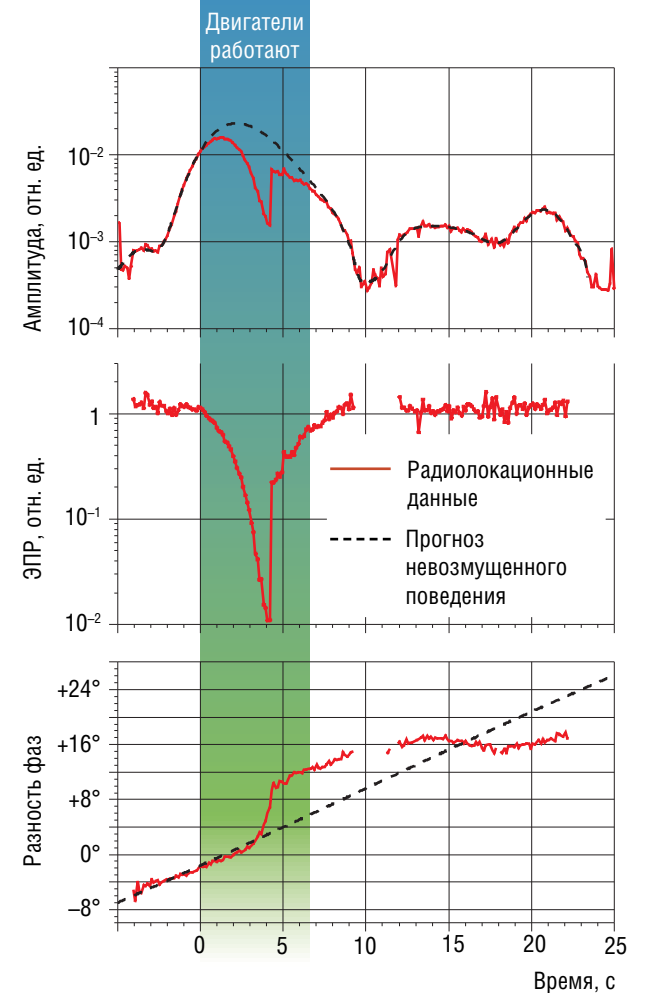


С помощью радара некогерентного рассеяния ученые изучали реакцию ионосферных параметров на строго дозированное воздействие выхлопной струи космического транспортного корабля «Прогресс». Было обнаружено, что после включения двигательной установки корабля в его окрестности на несколько минут снижалась концентрация свободных электронов (вверху). Изменились и параметры отраженного радиолокационного сигнала, по которым вычисляют кажущиеся характеристики корабля и его траектории (справа). В том числе произошло резкое падение эффективной площади рассеяния (ЭПР), как будто габариты корабля уменьшились в несколько раз. Наблюдалось также необычное поведение разности фаз принятых сигналов (определяющей угол визирования космического объекта), как если бы он круто изменил направление и скорость движения

тельским институтом машиностроения (г. Королев). Этой цели была посвящена серия экспериментов «Плазма–Прогресс» по воздействию транспортных грузовых космических кораблей на околоземную плазму.

Интерес к этой теме обусловлен тем, что природная плазма подвержена влиянию большого числа почти не контролируемых факторов. Исследователей же всегда привлекала возможность свести неопределенность в эксперименте к минимуму. И сейчас у них появилась возможность наблюдать реакцию атмосферы на известное и строго дозированное воздействие.

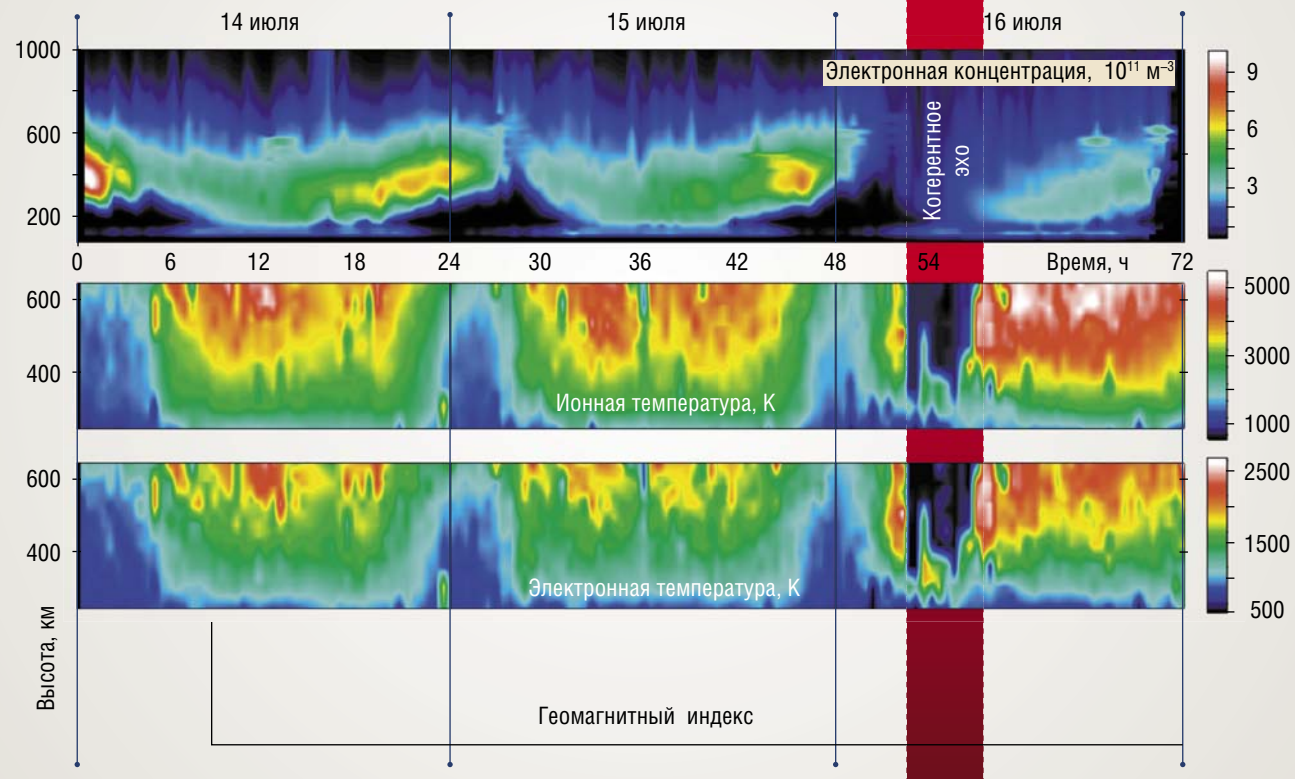
После выполнения своей миссии на Международной космической станции транспортный космический корабль «Прогресс» обычно имеет на борту некоторый избыточный запас топлива. Это горючее и было использовано для «полевых» экспериментов в зоне наблюдения иркутского радара. Двигательные установки корабля не отличаются большой мощностью и способны сжигать не более 10 кг топлива в секунду. Исследователей интересовало, сможет ли радар обнаружить какие-либо изменения в ионосферной плазме от такого незначительного воздействия? Изменится ли как-то форма радиолокационного сигнала от самого корабля во время работы двигателей?



На орбитальном участке полета «Прогресс» находится в секторе наблюдения радара всего лишь несколько десятков секунд. Поэтому эксперименты были спланированы очень тщательно: до долей секунды были согласованы между собой режимы работы радара и циклограммы включения двигателей.

К 2011 г. было проведено 44 сеанса наблюдения «Прогресса». Прежде всего был установлен устойчивый эффект локального 10–20-минутного понижения электронной концентрации на 10–15 % на высоте пролета корабля. Этот эффект наиболее ярко проявлялся при выбросе реактивной струи в направлении радара. Значит, с уверенностью можно сказать, что работу двигателей радар замечает. Значительные изменения происходили и в «радиооблике» самого космического корабля.

Математическое моделирование показало, что наблюдаемые эффекты можно объяснить интерференцией сигналов от двух целей, как будто вблизи корабля появился дополнительный отражающий объект. Причем эффективная площадь отражения этого образования составляет не меньше 10 % от площади отражения самого корабля. Но что это за объект – сгусток плазмы или просто облако кристалликов льда из продуктов сгорания? Это еще предстоит выяснить.



Во время сильных геомагнитных возмущений, когда «полярные сияния» в небе наблюдаются на широтах Москвы и Иркутска, среднеширотная ионосфера становится похожа на субполярную. Так, во время мощной магнитной бури в июле 2000 г. произошла резкая деградация содержания свободных электронов и разогрев плазмы. В момент наиболее сильного изменения геомагнитного индекса (показателя возмущения напряженности магнитного поля на поверхности Земли) радар ИР зарегистрировал «когерентное эхо» – сигнал от развивающихся ионосферных неустойчивостей, на много порядков превышающий обычный уровень некогерентного рассеяния

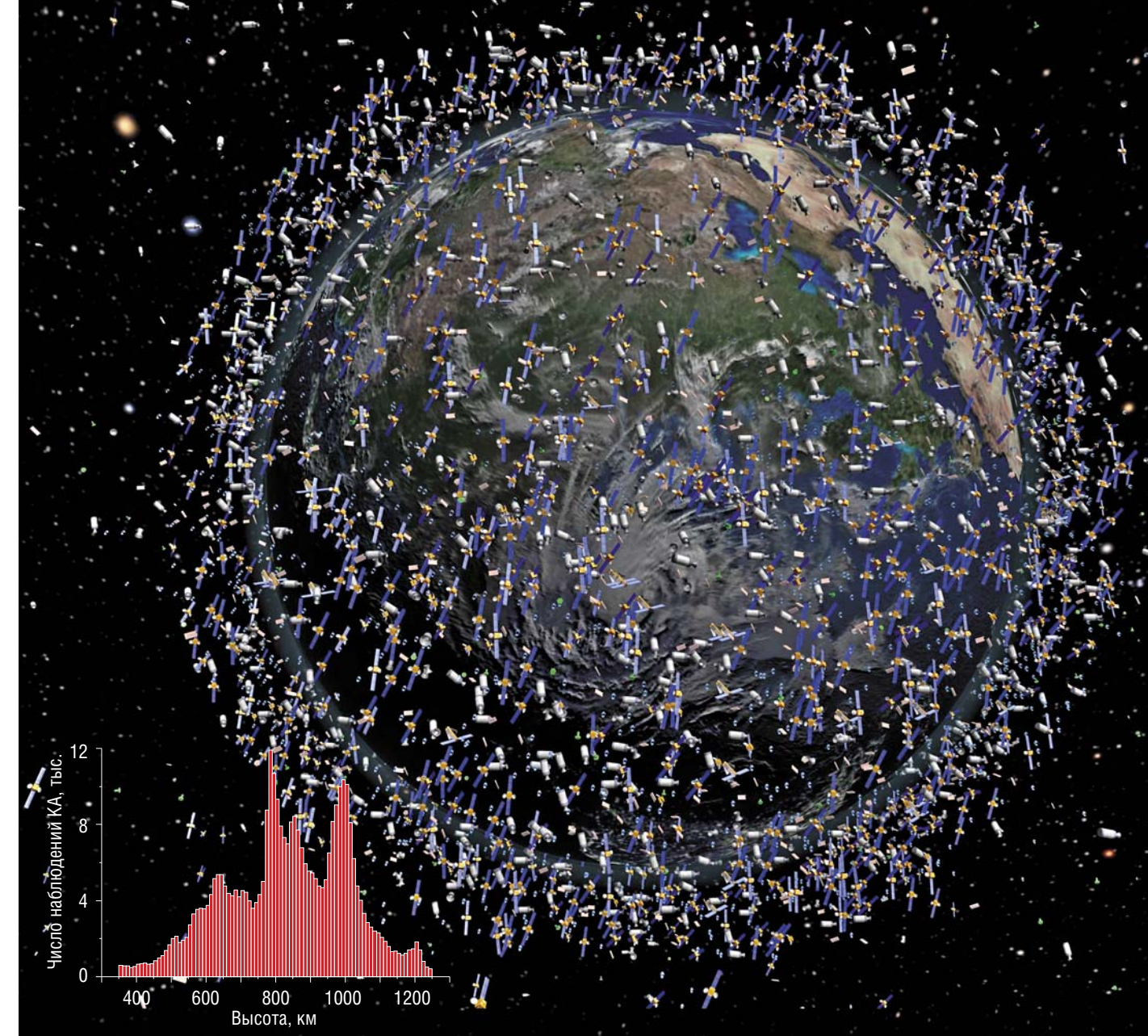
Итак, большая часть имеющейся в настоящее время информации об ионосфере основана на многолетних наблюдениях радаров некогерентного рассеяния, с помощью которых можно исследовать околоземную плазму в диапазоне высот 100–1000 км.

Однако в формировании структуры и ионного состава плазмы, а также в перераспределении энергии внутри газовой оболочки Земли ключевую роль играют физико-химические процессы, идущие в нижней, слабоионизированной части ионосферы и в нейтральной атмосфере. Осознание этого факта в конце прошлого века стимулировало развитие новых методов радиофизической диагностики атмосферы. В результате в нескольких странах были созданы так называемые мезосферно-стратосферно-тропосферные радары, способные исследовать динамику «ближних сфер», т. е. ниже 100 км.

Целый круг интересных задач породили исследования влияния солнечной активности на атмосферные процессы. Разрабатывается новая концепция «косми-

ческой погоды», которая будет охватывать все аспекты взаимодействия электромагнитного излучения Солнца и корпускулярного потока солнечного ветра с атмосферой Земли. В правительстве России в настоящее время рассматривается проект национального гелио-геофизического комплекса, в рамках которого планируется постройка современного радара ИР с возможностью исследования мезосферно-стратосферно-тропосферных высот.

В перспективе мирового сотрудничества также рассматривается возможность создания радара ИР в заполярном регионе России. Такой радар, размещенный, например, в Норильске, позволит замкнуть глобальную меридиональную цепь этих столь востребованных исследовательских инструментов. Участие ученых России в подобных крупных международных проектах не только престижно, но и необходимо для дальнейшего развития отечественных исследований околоземного космического пространства и решения важных практических задач в интересах экономики страны.



В ходе стандартных ионосферных измерений иркутский радар ИР ежемесячно регистрирует в автоматическом режиме десятки тысяч пролетов космических объектов размером крупнее 10 см. На диаграмме представлено распределение по высотам (с 10-километровым шагом) числа пролетов через весь сектор обзора ИРНР за период 2007–2010 гг. Существенный вклад в пик «заселенности» орбит около 800 км внесло испытание Китаем космического оружия в 2007 г., в результате которого был разрушен спутник «Фэн-Юнь-1С», добавивший на эти высоты более двух тысяч обломков

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракт 14.740.11.0078).

В публикации использованы фото В. Короткоручко (Иркутск)

Литература

Жеребцов Г.А. и др. Иркутский радар некогерентного рассеяния // *Радиотехника и электроника*, 2002. Т. 47. № 11. С. 1339–1345.

Казимировский Э.С. Волшебное зеркало планеты. Иркутск: Восточно-Сибирское книжное изд-во, 1978. 211 с.

Казимировский Э.С. Планета в космической плазме. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 184 с.

Медведев А.В. и др. Метод исследования пространственно-временной структуры волновых возмущений в ионосфере // *Геомагнетизм и аэрономия*, 2009. Т. 49. № 6. С. 812–823.

Потехин А.П. и др. Развитие диагностических возможностей Иркутского радара некогерентного рассеяния // *Космические исследования*. 2008. Т. 46. № 4. С. 356–362.