

Э.С. Казимировский

ПЛАНЕТА В КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ

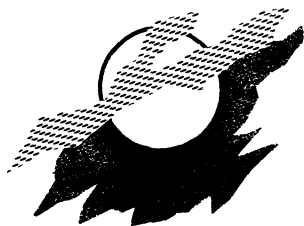


ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1990



Э.С. Казимировский

ПЛАНЕТА В КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ



ЛЕНИНГРАД ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1990



Рецензент канд. физ.-мат. наук А. В. Широчков

К 14 Казимировский Э. С. Планета в космической плазме.— Л.: Гидрометеиздат, 1990. 184 с.

ISBN 5-286-00107

Это было в 1901 г. Передатчик был установлен в Англии, на полуострове Корнуолл, приемное устройство — через океан, на полуострове Ньюфаундленд. С точки зрения теоретиков, это был безнадежный эксперимент. Но, как часто бывает, эксперимент опрокинул теорию — радиосигнал одолел просторы Атлантики, заставив ученых искать объяснение этому «чуду». В результате была открыта ионосфера — один из самых важных в практическом отношении и в то же время один из самых загадочных слоев атмосферы, — обязанная своим существованием нашему светилу. Автор, известный специалист в области солнечно-земной физики и популяризатор науки, предназначает свою книгу тем, кто интересуется проблемами изучения ближнего космоса, метеорологии, физики плазмы — и профессионально, и на любительском уровне.

Для широкого круга читателей

К 1803000000-085 52-90
069(02)-90

ББК 26.23

СОДЕРЖАНИЕ

О чем эта книга?	4
От земного воздуха — к космической плазме	17
Хорошо иметь собственную звезду	73
Мы живем на магните	95
Радиозеркало планеты	124
Проблемы, загадки, гипотезы	166
Список рекомендуемой литературы	183





Старый серый ослик Иа-Иа стоял один-одинешенек в заросшем чертополохом уголке... и думал о Серьезных Вещах. Иногда он грустно думал: «Почему?», а иногда: «По какой причине?», а иногда он думал даже так: «Какой же отсюда следует вывод?»

А. А. Милн

П

ланета в космической плазме... Звучит немного торжественно, немного загадочно, немного фантастично. А для современного геофизика-исследователя это привычное понятие, предмет изучения, рабочий термин. Обычно, когда употребляют литературно-публицистическое клише «мы живем в космическом веке», хотят подчеркнуть стремительный темп нашей жизни, обратить внимание на фантастические успехи научно-технической революции. Но можно понять это и так: космос стал местом обитания человека, областью его повседневной деятельности.

И дело даже не в том, что многие десятки людей стали пилотами космических кораблей и несут свою не-

легкую вахту на орбитальных обсерваториях, и не в том, что деятельность человека в космосе стала привычной, обыденной и необходимой. А дело в том, что все мы — космонавты, вся наша планета, вся Земля, — корабль в безбрежном космическом океане. Но этот океан — не пустота, а то, что в физике называют четвертым состоянием вещества (первые три — твердое, жидкое, газообразное): плазма.

Вспомним уроки физики: атомы или молекулы любого вещества в обычном состоянии электрически нейтральны, то есть не имеют электрического заряда. Каждый атом состоит из положительно заряженного тяжелого ядра и вращающихся вокруг него легких отрицательно заряженных электронов. В нейтральном атоме суммарный положительный заряд ядра в точности равен суммарному заряду электронов, потому-то атом и нейтрален. Но если в результате какого-нибудь процесса атом теряет хотя бы один электрон, то становится положительно заряженной частицей — положительным ионом. Если же атом приобретает лишний электрон, то становится ионом отрицательным. Смесь нейтральных частиц, электронов, положительных и отрицательных ионов это и есть плазма.

Вообще можно сказать, что почти весь окружающий нас мир, начиная с Земли и кончая далекими углами Вселенной, состоит в основном из частично или полностью ионизированной плазмы, пронизываемой магнитными полями. Неплазменными являются только такие тела, как межзвездная пыль, ядра комет, планеты, нейтронные звезды, но они занимают ничтожно малую часть объема известной нам Вселенной и содержат лишь небольшую, менее 1%, долю массы вещества.

Мы живем в Солнечной системе, испытывая воздействие всех видов излучения, поступающего к Земле. Замечательный советский ученый А. Л. Чижевский писал, что и наружный лик Земли, и жизнь, наполняющая его, являются результатом творческого воздействия космических сил.

«Не Земля, а космические просторы становятся нашей родиной, и мы начинаем ощущать во всем ее подлинном величии значительность для всего земного бытия и перемещения отдаленных небесных тел, и движения их посланников — радиаций...

Эти радиации представляют собой прежде всего электромагнитные колебания различной длины волн и производят световые, тепловые и химические действия. Проникая в среду Земли, они заставляют трепетать им в унисон каждый ее атом, на каждом шагу они

вызывают движение материи и наполняют стихийной жизнью воздушный океан, моря и суши. Встречая жизнь, они отдают ей свою энергию, чем поддерживают и укрепляют ее в борьбе с силами неживой природы...»

Сказано несколько возвышенно, но абсолютно верно — все может быть записано на языке строгих научных формул. Мы живем в Солнечной системе, в относительной близости к нашей «собственной» звезде — Солнцу. И как сейчас стало ясно, по существу Земля находится в атмосфере Солнца, точнее, в верхней ее части, расширяющейся во все стороны солнечной короне. Магнитное поле нашей планеты взаимодействует с потоком солнечной плазмы, образуя специфическую область — магнитосферу. Земля своей атмосферой, тонкой газовой оболочкой, простирающейся на сотни километров, и магнитосферой, сдуваемой солнечным ветром (то есть непрерывным потоком плазмы из солнечной короны) так, что ее ночной шлейф достигает орбиты Луны, плавает в плазменном «океане», заполненном электронами, протонами, ядрами элементов и пронизываемом волновыми излучениями, электрическими и магнитными полями.

Воздух, окружающий нашу планету, ее атмосфера у поверхности — это еще не плазма, а просто смесь многих химических веществ в газообразном состоянии, главным образом азота, кислорода и двуокиси углерода. И если у поверхности планеты и имеются заряженные частицы, то очень немного. Но чем выше мы поднимаемся, тем больше заряженных частиц, тем ближе воздух к плазме. Какая же сила превращает воздух в плазму?

«Виновником» такого превращения прежде всего является излучение самого Солнца, ведь Солнце — источник не только видимого света, но и электромагнитного излучения самых разных видов — от гамма-квантов и жестких рентгеновских лучей до радиоволн, а также мощных потоков заряженных частиц, обладающих фантастическими скоростями. Конечно, свою роль в превращении воздуха-изолятора в плазму-проводник играют и другие виды радиации, приходящей к нам из космических глубин. В результате вокруг Земли создается шаровой слой плазмы, который принято называть ионосферой. Начиная с 50—60 км над Землей и на десяток-другой тысяч километров простирается эта плазменная оболочка нашей планеты.

Появление искусственных спутников Земли, эффективного средства измерений в околоземном косми-



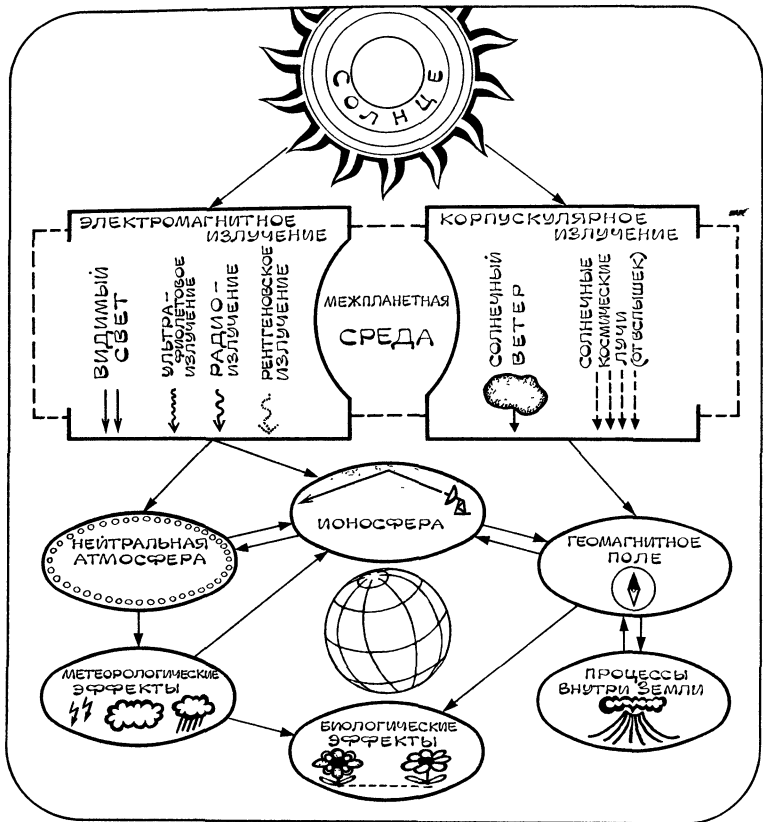
ческом пространстве, заставило пересмотреть наши представления о структуре и свойствах верхней атмосферы и магнитосферы Земли и позволило обнаружить много новых явлений в околоземной плазме.

Полярные сияния и магнитные бури (а о них человечество узнало много лет назад) оказались проявлениями мощнейших процессов, которые солнечный ветер время от времени вызывает в околоземном пространстве и которые приводят к нагреву магнитосферной плазмы до десятков миллионов градусов.

В наземных лабораториях физикам еще не удастся создать на длительное время сравнительно спокойную и достаточно горячую плазму. А в магнитосфере она существует постоянно и порой разогревается до таких температур, которых достаточно, чтобы «зажечь Солнце на Земле» — получить управляемую термоядерную реакцию. Поэтому изучение сложных процессов в ближайшем космосе представляет интерес не только для геофизики, но и для физики плазмы.

Возникшие в разогретых областях магнитосферы «горячие» частицы — электроны и протоны больших энергий, — направляемые силовыми линиями геомагнитного поля, гигантскими тысячекилометровыми струями вторгаются в атмосферу, «прожигая» ее и вызывая свечение полярного неба. Часть «горячих» частиц выбрасывается в магнитный шлейф Земли, а наибольшее их количество попадает в своеобразную магнитную «ловушку» и пополняет радиационные пояса нашей планеты.

Ионосфера обладает тем замечательным свойством, что она способна отражать радиоволны. Это ее свойство — просто подарок природы человечеству: наличие ионосферы у нашей планеты обеспечивает нам дальнюю и сверхдальнюю радиосвязь. В верхних слоях земной атмосферы происходят сложные физические процессы, которые трудно, а чаще просто невозможно наблюдать в лабораторных условиях на Земле. По существу, ионосфера — это большая естественная лаборатория, которая позволяет нам исследовать процессы взаимодействия разреженных газов с ионизирующими излучениями, различного рода фотохимические реакции, динамику неоднородных газов. Знать свойства ионосферы — на каких высотах она располагается, сколько заряженных частиц она содержит, какова температура, скорость и направление их потоков, как все эти свойства меняются в зависимости от широты (у полюсов, на экваторе, в средних



Система Солнце — Земля.

широтах) и долготы, ото дня к ночи, от зимы к лету и т. п.— стало сейчас не только интереснейшей научной задачей, но и практической необходимостью.

И действительно, возникла совершенно новая отрасль науки и техники — космонавтика. Искусственные спутники Земли, пилотируемые космические аппараты, орбитальные обсерватории (типа американской «Скайлэб» или нашего «Салюта»), челночные космические корабли многоразового использования летают именно в ионосфере: радиосвязь между космическими кораблями, а также между ними и Землей осуществляется также через ионосферу. Есть и еще одна важная сторона проблемы. В последние годы стало ясно, что нельзя

удовлетворительным образом прогнозировать погоду и климат без учета космических факторов — солнечной активности в электромагнитном диапазоне и взаимосвязи той нижней части атмосферы, где развиваются погодные процессы, с ионосферой. Таким образом, перед исследователями стоит задача создания самосогласованной модели взаимного влияния космических факторов и погодообразующих процессов. Эта задача требует проведения сложных экспериментов и не разовых, а длительных регулярных измерений. Измерения должны проводиться не в одной точке, а на сети обсерваторий, расположенных в разных геофизических условиях. Чтобы понять и объяснить результаты измерений, надо создать совершенно новую теорию, сочетающую в себе элементы физики плазмы, геофизики, метеорологии и радиофизики.

По существу, на наших глазах в последние десятилетия сформировалось и развивается новое научное направление — солнечно-земная физика, современная многоотраслевая область науки. Солнечно-земная физика исследует процессы, в которых разнообразные формы энергии, генерируемой Солнцем, воздействуют на околоземное пространство, и изучает взаимосвязь физико-химических процессов в каждом элементе системы Солнце — Земля. Солнце, межпланетная среда, магнитосфера, ионосфера и атмосфера составляют эту систему. Знание их свойств необходимо для разработки и использования аэрокосмической техники, обеспечения радиосвязи и радионавигации, совершенствования прогнозов погоды и климата, решения многих практических задач. Конечно, корни солнечно-земной физики уходят в Землю, но многочисленные ветви ее простираются настолько далеко, насколько могут проникнуть приборы для исследования Солнечной системы.

Техника техникой, но нельзя забывать, что сама жизнь, все биологические процессы самым тесным образом связаны с окружающей средой, в том числе с Солнцем и космической плазмой. И здесь практическое значение имеет та последовательность процессов, которая в конце концов оказывает воздействие на все живое. Нельзя забывать также и то, что сам человек своей активной технологической деятельностью вторгается в хрупкое космическое пространство, часто даже и не осознавая, не предвидя последствий такого вторжения.

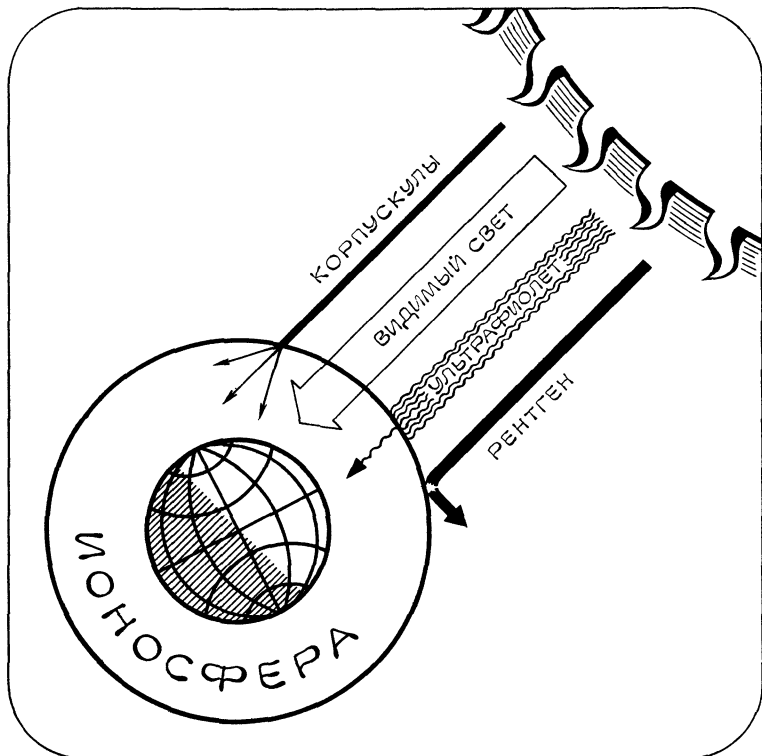
Я уже не говорю о проблемах промышленного загрязнения природной среды обитания, когда мы оказались на грани экологической катастрофы. Речь идет о необходимости изучения и прогнозирования глобальных, долговременных тенденций во всем околоземном пространстве, о выяснении связи солнечно-земной физики с экологическими проблемами и перспективами развития человечества в целом. Необходимо заранее, пока еще не поздно, определить границы допустимого воздействия и на приземный космос.

Существует такой научный термин, в последнее время получивший довольно мрачный оттенок, — «антропогенное воздействие». И означает он влияние человека на окружающую среду. Так, в последние годы возникла угроза антропогенного воздействия на атмосферный озон. Этот газ, молекулы которого состоят из трех атомов кислорода, играет существенную роль в сохранении жизни на Земле. Он поглощает почти всю смертоносную для живых организмов дозу солнечной ультрафиолетовой радиации, которая попадает в атмосферу.

Дело в том, что ультрафиолет разрушительно действует на такие вещества, как дезоксирибонуклеиновая кислота и протеин — основные строительные блоки для большинства форм жизни. К счастью, для биосферы, животные и растения разработали очень эффективные защитные механизмы против таких пагубных воздействий. У человека, например, вырабатываются такие дубильные пигменты, как меланин, препятствующий проникновению ультрафиолетовой радиации. А мы при этом просто говорим: человек загорает. И у животных, и у растений идут восстановительные процессы для защиты от радиации. Правда, многие организмы балансируют на грани разрушения и восстановления клеток, и любой внешний фактор, который этот баланс нарушает, может привести к необратимым последствиям.

Живые клетки очень уязвимы, очень чувствительны к росту интенсивности ультрафиолетовой радиации, который может произойти в результате уменьшения содержания озона. Но и уменьшение интенсивности той же радиации в случае обратного процесса — роста содержания озона — тоже опасно. Ведь эта радиация нужна для образования витамина D в живых организмах и растениях в результате их жизнедеятельности.

Что же контролирует содержание озона? В первую очередь то же Солнце, ведь оно является источником



Атмосфера — щит планеты, защищающий нас от жестких излучений.

того ультрафиолетового излучения, которое и необходимо для образования озона. Косвенным образом оно же управляет и процессами уничтожения озона. Интенсивность видимого солнечного излучения меняется во времени очень незначительно (на несколько десятых процента за десятки лет), а вот в ультрафиолетовой, невидимой, части солнечного спектра могут происходить очень заметные и сравнительно быстрые изменения. Наблюдения показывают, что похожие изменения, вариации, характерны и для общего содержания озона.

Помимо всего прочего, в изменения содержания озона вносит свою лепту и человек. Химическое производство, работа холодильных установок, испарение всевозможных аэрозолей — все это приводит к появлению в верхней атмосфере соединений хлора, фреонов и т. п. Высотные реактивные самолеты тоже добавляют в атмос-

феру продукты сгорания топлива. В результате озон вступает в реакции со многими веществами, и его концентрация может и уменьшаться, и увеличиваться в зависимости от конкретных условий. Наблюдающееся в Антарктиде понижение концентрации озона (так называемые озонные дыры) вполне может быть связано с антропогенным воздействием на верхнюю атмосферу. Осознав эту опасность, многие страны заключают сейчас соглашения о запрещении использования ряда химических веществ, потенциально опасных для озоносферы.

И вообще нам, дорогой читатель, нельзя особенно рассчитывать на то, что если какого-то вещества в окружающем нас пространстве содержится крайне мало, то оно не играет для нас существенной роли. Среда, в которой мы обитаем, атмосфера,— это слой вещества, создающий давление всего 1 кг/см^2 . Десять миллиграммов углекислого газа из каждого килограмма этого вещества, взаимодействуя с солнечным теплом и светом, непрерывно поддерживают жизнь на Земле, 300 мкг озона защищают эту жизнь от губительного ультрафиолета, одна миллионная доля микрограмма электронов дает человечеству возможность общаться по радио. Так что, воистину, мал золотник, да дорог.

По всей видимости, хотя поиски внеземных цивилизаций продолжаются, жизнь существует только на Земле. Если мы не хотим просто плыть по течению — куда кривая выведет, то обязаны задуматься и попытаться понять характер взаимодействия всех звеньев системы Солнце — Земля, включая все ее физические, химические и биологические процессы. В настоящее время научная общественность многих стран готовится к проведению в 90-х годах нашего века грандиозной по своим масштабам международной программы, исследовательского проекта «Геосфера — биосфера, глобальные изменения». За 10—20 лет мы должны выяснить, как влияют процессы в космической плазме на все живое, и понять, можно ли и нужно ли регулировать это влияние. При этом в центре внимания, конечно, будут нижняя атмосфера («рабочее тело» глобальной тепловой машины), океаны (резервуары тепла) и биосфера (глобальный регулятор).

В науке так всегда и бывает. Сначала изучают какие-либо явления по отдельности, а потом оказывается, что они между собой тесно связаны. Именно это и происходит в солнечно-земной физике. Вот, скажем, ионо-

сфера — «волшебное зеркало планеты». Само слово «ионосфера» появилось в научном обиходе только в 1922 г., когда английский ученый Уотсон поместил статью об этой области верхней атмосферы в Британской энциклопедии. И определение было дано следующее: «Ионосфера — часть верхней атмосферы, свойства которой существенны для распространения радиоволн». Конечно, определение далеко не строгое; это и привело к тому, что пространственные границы ионосферы разные исследователи указывают по-разному. Тут ведь надо еще определить, что значит существенны? Для радиоволн какого диапазона, каких длин волн? Но как бы то ни было, вышло так, что долгое время ионосфера изучалась главным образом только как плазма в магнитном поле Земли, как специфическая среда для распространения радиоволн, по существу, без учета общих свойств атмосферы.

А в то же время классическая метеорология, изучая погоду и климат, сознательно ограничивалась исследованием только нижних слоев атмосферы — тропосферы и стратосферы. Но ведь для метеорологии главной проблемой был и остается прогноз состояния приземной атмосферы, то есть в конечном счете управление ее поведением. А если так, то какие основания ограничивать себя только нижней частью атмосферы? С другой стороны, исследователи космоса столкнулись с тем, что важные закономерности в вариациях поведения ионосферы и даже в распространении радиоволн очень трудно — а то и невозможно — объяснить, если рассматривать ионосферу в отрыве от нижележащих атмосферных слоев.

Поэтому в наше время и внутренние законы развития науки, и — самое главное — потребности практики обусловили интерес метеорологов ко все более высоким слоям атмосферы и даже к магнитосфере и межпланетной среде. Во многих странах, в том числе и в СССР, в ведении именно метеорологических организаций находятся службы Солнца, ионосферы и магнитосферы, диагностики и прогноза радиационной обстановки в космосе, магнитосферных и ионосферных возмущений для нужд практической космонавтики, радиосвязи, энергетики, медицины и т. п. Я уже не говорю о проблеме Солнце — погода, которая сейчас вызывает горячие дискуссии и в научной среде, и среди самой широкой публики. С другой стороны, сейчас очень возросла за-

интересованность исследователей околоземного космического пространства в изучении нижних слоев атмосферы.

Вот этим взаимным проникновением интересов и обусловлен частично тот факт, что книга о солнечно-земной физике выходит в гидрометеорологическом издательстве. О чем все-таки она? Об основах этой науки, о методах и результатах исследования ближнего космического пространства, о международном сотрудничестве ученых в этой области, о нерешенных проблемах и загадочных явлениях, гипотезах и предположениях. Мне кажется, тем и привлекает наука пытливых и любознательных, что она всегда оставляет место для поиска новых фактов и законов. Недаром физики шутят: «Если в результате честной работы стало ясно, что сделать предстоит гораздо больше, чем сделано, значит, выполнена научная работа». Так что не бойтесь удивляться — природа бесконечно сложна, неисчерпаема и преподносит нам немало сюрпризов.

А вот написать о том, что интересно автору, так, чтобы это было интересно и читателю, очень трудно. В-первых, все-таки физика. Значит, описание физических законов должно идти на языке математики. Но я сознательно отказываюсь от громоздких математических формул. Альберт Эйнштейн писал: «Книги по физике изобилуют сложными математическими формулами. Однако в основе любой физической теории лежат не формулы, а идеи...» Чтобы понять те идеи, которые лежат в основе солнечно-земной физики, достаточно обычной школьной подготовки. Но чтобы не закрыть эту книгу на первой же странице, нужен непременно интерес к самой проблеме, желание разобраться, мобилизовать свои знания и опыт, пойти чуть дальше в познании окружающего мира. И если задача автора — попытаться рассказать, объяснить, то задача читателя — попытаться понять.

Во-вторых, читатели научно-популярных книг очень разные. Одно дело — специалисты в каких-то смежных областях естествознания, стремящиеся расширить кругозор и видящие в научно-популярной книге путеводитель, который можно использовать как основу для дальнейшего более детального знакомства с проблемой, и совсем другое — молодые люди, скажем старшие школьники, только намечающие свой путь в жизни, выбирающие специальность, чувствующие в себе творческие возможности. Да мало ли еще имеется категорий

читателей... И для каждой необходимо найти свой стиль изложения, свой язык. То требуется строгость и информативность, то чуть ли не детективный сюжет.

К сожалению, на мой взгляд, многие популярные книги не имеют адреса. Специалистам они малоинтересны, а неспециалистам недоступны для понимания, поскольку просто-напросто пересказывают научные монографии с их формулами, графиками и т. п.

Я же старался представить себе читателя, плохо знакомого с предметом, проблемами и терминологией солнечно-земной физики. Я считал, что он, может быть, достаточно образован, но совсем в другой сфере и с этой книги начнет знакомство с той областью знаний, которая его заинтересовала по отрывочным сведениям, почерпнутым с помощью средств массовой информации. Значит, мне необходимо пробудить у такого человека уважение к моему делу, раскрыть его значение для человечества, передать ему частицу своей любви, не поступаясь при этом ни научной достоверностью, ни серьезностью предмета, хотя какие-то упрощения, увы, неизбежны.

Насколько это удалось — судить не мне. Я просто последовал совету мудрого человека, советского физика, академика Льва Андреевича Арцимовича, который говорил, что в предисловии к книге автор должен сочетать чистосердечное признание недостатков своего труда с доказательством их абсолютной неизбежности.

Я благодарен моим коллегам, критически обсуждавшим содержание этой книги, и признателен за молчаливую помощь тем авторам, чьи имена приведены в списке рекомендуемой литературы.



От земного воздуха — к космической плазме

Атмосфера не может не интересоваться нас: она воздействует на нас; она ограничивает наши стремления; она служит причиной трагедий; она дарит нам грандиозные зрелища. Атмосферу просто нельзя игнорировать — это то, что нас постоянно окружает. Мы любопытны и хотим знать все «как» и «почему» атмосферных процессов. Мы практичны и хотим контролировать или по крайней мере найти полезное применение тем колоссальным силам, которые наблюдаем. Кроме того, нас волнует искусство, поэзия, философия и религия; мы испытываем благоговение перед явлениями, которые затрагивают все наши чувства, постоянно напоминают о приблизительности наших познаний, уязвимости нашей жизни и призрачности стремлений, о бесконечной сложности Природы и чистой красоте окружающего нас Мира. Поэтому удивительно, что изучение атмосферы должно было стать одним из древнейших интеллектуальных занятий...

Р. Уиттен, И. Поппов

Сколько у Земли сфер?

Атмосфера Земли, особенно верхняя, давно занимала умы исследователей. Перечитайте эпиграф к этой главе и вы поймете, что загадки воздушного океана, в котором мы с вами «плаваем», никогда не перестанут нас интересовать. Если бы не было атмосферы, Земля была бы мертвой — ни облаков, ни дождя или снега, ни одного звука в гнетущей тишине, палящий солнечный зной на освещенной Солнцем стороне Земли и ледяной холод космического пространства на ночной, абсолютно черное небо, а на поверхности огромные и мелкие воронки от падающих метеоритов.

Не правда ли, очень похоже на тот пейзаж,

который космонавты обнаружили на Луне? Верно, ведь у Луны нет атмосферы.

Воздух окружает нас повсюду — на дне глубоких шахт и на вершинах высочайших гор, на полюсах и на экваторе, на суше и на море. На первый взгляд, это невидимая и невесомая среда. На самом деле воздух представляет собой смесь многих химических веществ в газообразном состоянии, смесь многих элементов. Часть из них содержится в воздухе в большом количестве, часть — в очень незначительном, одни очень химически активны, то есть быстро вступают во взаимодействие с другими веществами, другие же абсолютно инертны. Есть элементы, которые в большой концентрации смертельны, а есть и такие, без которых жизнь вообще невозможна. И что поразительно — состав атмосферного воздуха почти повсюду одинаков.

Если не считать водяного пара, который присутствует главным образом в приземном слое в переменных количествах в зависимости от погоды (вспомните, когда диктор читает по радио сводку погоды, он обязательно упоминает о влажности воздуха), то воздух состоит на 78% из азота. Всему живому на Земле — и растениям, и животным, и человеку — необходимо присутствие этого элемента, который химически весьма мало активен и вступает в соединение с другими веществами лишь при особых условиях. Почти 21% воздуха составляет кислород, который в отличие от азота высокоактивен. Он необходим для дыхания, поскольку обеспечивает «сгорание» пищи в живом организме. На долю углекислого газа, аргона, неона, криптона, ксенона, гелия, радона и чрезвычайно малого количества других газов, образующихся главным образом в результате деятельности человека, остается всего 1%.

Три основных газа — азот, кислород и двуокись углерода — участвуют в бесконечном круговороте веществ в природе. Зеленые растения поглощают углекислый газ из воздуха и с помощью почти чудодейственного процесса, называемого фотосинтезом, высвобождают кислород. Вся растительность земного шара за год использует около 550 млрд. т углекислого газа и снабжает нас кислородом в количестве примерно 400 млрд. т. Когда растения гниют или сгорают, когда дышат животные и люди, когда извергаются вулканы и испаряются минеральные воды, углекислый газ вновь поступает в воздух. Можно рассчитать, сколько времени понадобится

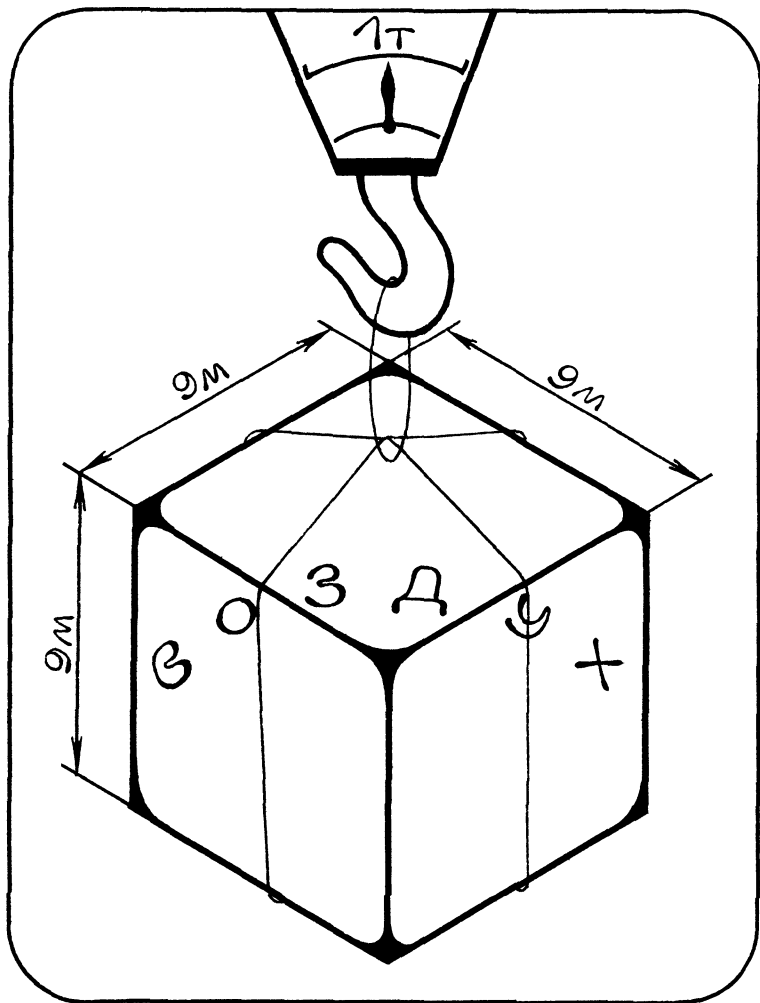
каждому газу для совершения одного полного цикла. Получаются любопытные цифры — углекислому газу в среднем требуется от одного года до трех лет, кислороду — три тысячи лет, а азоту — сто миллионов лет!

Атмосфера простирается на сотни километров, причем плотность воздуха с высотой постепенно уменьшается, он, как говорят, становится более разреженным. Половина всей атмосферы заключена в слое толщиной 6 км, то есть в том слое, в котором формируется и большая часть облаков, а в слое толщиной 30 км содержится уже 99% атмосферы. Кстати, представление о воздухе как о чем-то невесомом не очень правильно. Если куб, каждая сторона которого равна 9 м, наполнить воздухом, то его масса составит целую тонну. Вся атмосфера нашей планеты весит около 5 000 000 млрд. т. Если весь этот воздух сильно сжать и довести его плотность до плотности стали, то он образует вокруг всей Земли броню толщиной 12,5 м. На каждый квадратный сантиметр земной поверхности воздух, как известно, давит с силой 1 кг, то есть каждому из нас приходится всю жизнь «носить» на плечах около 500 кг. Мы не чувствуем этот «богатырский» вес просто потому, что все ткани нашего тела насыщены воздухом, давление которого равно атмосферному давлению снаружи.

Попробуем мысленно совершить путешествие в верхние слои атмосферы, хотя бы на вертикально стартовой ракете. Вырвавшись со дна воздушного океана, мы пройдем слой облаков, оставив их далеко внизу. Привычный голубой цвет неба постепенно исчезнет, и мы увидим космическую черноту. На фоне черного бархата небосклона звезды будут выглядеть яркими точками, горящими ровным, немерцающим светом, а Солнце — ослепительным четко очерченным диском без ореола.

С расстояния в несколько земных радиусов наша планета кажется гладким шаром, освещенным далеким Солнцем. Если смотреть со стороны северного полушария, то можно заметить, что Земля вращается вокруг своей оси против часовой стрелки, делая полный оборот за 23 ч 56 мин, и в том же направлении обращается вокруг Солнца по орбите, близкой к круговой, делая оборот за год. Ось вращения наклонена к плоскости земной орбиты под углом $23^{\circ}77'$.

Земля окружена почти прозрачной воздушной оболочкой, придающей планете голубой оттенок. Свойства атмосферы с высотой меняются, и различные ее слои



Воздух — материя вполне весомая!

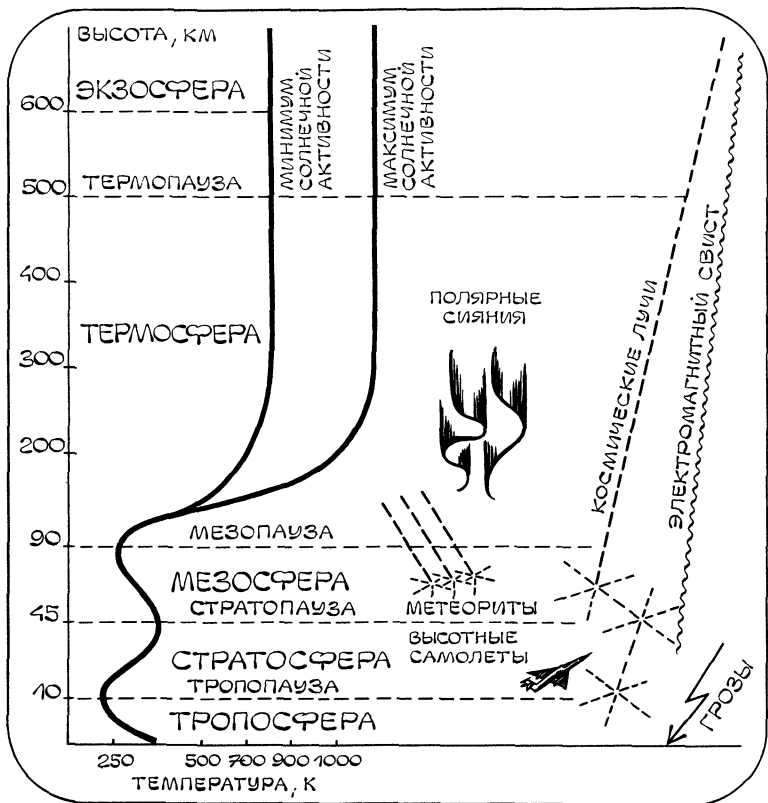
называются по-разному, хотя каких-то барьеров между ними нет. Каждый слой — это определенная «сфера». Так сколько же над Землей сфер? Ответить на такой вопрос непросто — все зависит от того, какое свойство атмосферы взять за основу. Посмотрим, как меняется такая важная характеристика, как плотность. Она плавно и очень быстро уменьшается. Уже на высоте 14 км плотность атмосферы примерно в 8 раз меньше, чем на уров-

не моря. А на высоте 100 км она составляет всего одну миллионную долю плотности на уровне моря. Это уже, как говорят физики, проводящие лабораторные исследования, «высокий вакуум». А еще выше вакуум становится таким высоким, что никакие самые лучшие земные насосы не могут его воспроизвести в земных условиях. Например, один 1 км³ воздуха на высоте 170 км весит около 60 г, а этот же объем на уровне моря — 1 млн 250 тыс. т! Если на уровне моря молекула воздуха не может пробежать и нескольких миллионных долей сантиметра, чтобы не столкнуться с другой молекулой, то длина свободного пробега на высоте 100 км достигает 1 м, а на высоте 300 км — 10 км! И как это ни трудно себе представить, столь разреженный воздух играет огромную роль в нашей повседневной жизни — роль «тента», защищающего от смертоносных излучений, роль грандиозной лаборатории, где сама природа проводит интереснейшие эксперименты, роль той среды, которая очень важна для радиосвязи, высотных полетов, запуска ракет и искусственных спутников Земли.

Другое важнейшее свойство атмосферы — ее температура. Одна из общепринятых систем классификации атмосферных оболочек, сфер, окружающих Землю, основана именно на распределении температуры. Первая и самая нижняя оболочка, которая называется тропосферой, простирается от уровня моря до высоты около 12 км. В дальнейшем мы будем опускать слово «около», так как границы между «сферами» меняются в зависимости от сезона, географической широты и многих других условий.

По мере подъема в тропосфере температура будет понижаться, пока не достигнет примерно —55 °С. Это и есть верхняя граница тропосферы — точка перегиба на температурной кривой, — и называется она тропопаузой. Любая точка земной поверхности лежит в пределах тропосферы, высочайшие горные вершины планеты почти достигают тропопаузы. Тропосфера содержит почти три четверти всей массы атмосферы и играет ведущую роль в формировании погоды.

Миновав тропопаузу, мы попадаем в стратосферу. Здесь температура монотонно возрастает до самой стратопаузы на высоте 50—60 км. На этой высоте она достигнет приблизительно 10—20 °С. В стратосфере наблюдаются сильные ветры, скорость которых может достигать нескольких сотен километров в час. Именно здесь



Распределение температуры в атмосфере и классификация основных атмосферных слоев.

образуется и содержится в больших количествах озон — неустойчивый газ, молекулы которого состоят из трех атомов кислорода (O_3). Этот газ поглощает большую часть ультрафиолетовых солнечных лучей, оставляя их в безопасном для нас количестве — ровно столько, сколько нужно для приятного загара! Поглощение энергии ультрафиолетового излучения и обеспечивает высокую по сравнению с тропосферой температуру стратосферы.

В следующем слое, мезосфере, простирающемся до высоты 80 км, температура меняется очень резко. В мезопause она составляет от -75 до -90 °С. Здесь в окружающей темноте можно заметить яркие полосы: это сгорают метеоры, влетающие с огромной скоростью в атмосферу из космического пространства.

Выше мезопаузы начинается термосфера. Основной ее особенностью является повышение температуры нейтральных частиц с высотой, а затем неизменность температуры — изотермия. Но здесь уже само понятие температуры перестает соответствовать нашему житейскому представлению о ней. Ведь в обычных условиях, у земной поверхности, мы измеряем температуру как степень нагретости тела. А что такое температура с точки зрения строгой физики? Это мера энергии тех частиц молекул, из которых состоит любое тело (или газ). Чем быстрее движется частица, тем выше ее температура. При соударениях с другими частицами наша частица обменивается с ними энергией: с одной стороны, отдает свою энергию тем, которые движутся медленнее, а с другой — получает ее от тех, которые движутся быстрее. В результате, если частиц много, они не могут приобрести слишком большую энергию.

А вот в термосфере частицы газа могут проходить большие расстояния, не сталкиваясь с другими частицами. При этом они приобретают весьма большую энергию, и их так называемая кинетическая температура может достигать сотен градусов. Если бы мы, покинув нашу воображаемую ракету, оказались в термосфере, то из-за очень высокой разреженности окружающего газа были бы не в состоянии ни почувствовать его высокую температуру, ни вообще ощутить его присутствие. Если бы не Земля, то одна сторона нашего тела, освещенная ярким солнечным светом, ощущала бы нестерпимый жар, а другая, погруженная в полную темноту, — ледяной холод. В термосфере обнаружены ураганные воздушные течения с типичными скоростями порядка 360 км/ч, однако непосредственно их почувствовать, опять-таки из-за чрезвычайно малой плотности газа, мы бы почти не смогли. Их обнаруживают с помощью чувствительных приборов и сложных методов, о которых речь пойдет дальше.

Выше термосферы, начиная с высот 600—800 км, лежит так называемая экзосфера. Это область крайне разреженной материи, высоких скоростей газовых частиц и, следовательно, высоких температур. Состоит она главным образом из гелия, водорода и легких газов. Из этой области частицы газа, набрав космическую скорость более 11,2 км/с и преодолев силу земного притяжения, уносятся в мировое пространство, чтобы начать свое бесконечное путешествие по космосу.

Таким образом, исследовав вертикальный профиль температуры, мы установили, пять «сфер»: тропо-, страто-, мезо-, термо- и экзосферу.

Но можно разделить газовую оболочку Земли на «сферы» и по-другому. Например, до высоты примерно 100 км воздух хорошо перемешан — практически однороден, и всю эту область называют гомосферой (гомогенный — однородный). А вот выше этого уровня «дружба» между различными атмосферными газами кончается, каждый движется сам по себе, легкие газы быстрее устремляются вверх, а тяжелые — отстают. И все, что выше 100 км, уже называют гетеросферой (от греческого «гетеро», что соответствует русскому «разно...»). Кстати, сам уровень 100 км, где наблюдаются быстрые, хаотические, или, иными словами, турбулентные, движения, часто называют турбопаузой. Слой озона, например, который образуется в стратосфере, можно назвать озоносферой. Слой атмосферы, где скорость ветра велика и составляет десятки метров в секунду, некоторые исследователи называют динасферой (от слова «динамика»). Существуют и другие сферы.

И вот, наконец, мы подходим к той оболочке, которая нас интересовала с самого начала, — к ионосфере. Начиная с высоты 50—60 км над поверхностью Земли и на несколько земных радиусов простирается та часть воздушного покрывала нашей планеты, которая названа ионосферой — сферой ионов.

Космические пришельцы

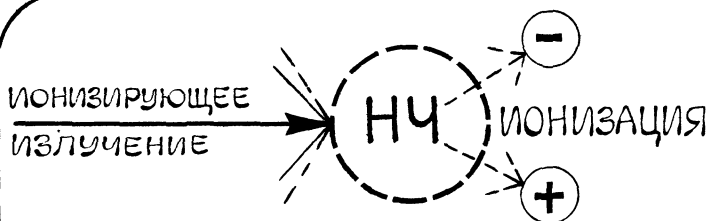
Виновниками превращения земного воздуха в космическую плазму являются «космические пришельцы» — солнечная радиация, излучение из космического пространства, сгорающие в атмосфере Земли метеориты. Они, эти «пришельцы», превращают воздух — изолятор — в плазму — проводник электрического тока. Проводник тока потому, что в плазме содержатся свободные, не связанные с тяжелыми атомами, электроны. Если в таком газе создать разность потенциалов, электрическое напряжение, то электроны придут в движение, а их движение это и есть электрический ток. Ионы, конечно, тоже будут двигаться под действием этого напряжения, но они в тысячи раз тяжелее и, следовательно, в тысячи раз неповоротливее, ленивее. Наличие свободных электронов придает ионосфере совершенно иные свойства по

сравнению со свойствами воздуха, который окружает нас здесь, на Земле, наделяет ее могучей властью над радиоволнами.

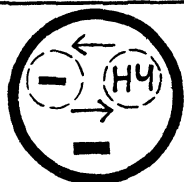
Чтобы разбить нейтральные атомы на ионы и электроны, надо, естественно, затратить определенную энергию. Самой большой энергией ионизирующего излучения обладает солнечный свет. Солнце — мощный генератор электромагнитных колебаний. Видимый нами обычный солнечный свет — это электромагнитные колебания с определенной длиной волны. Солнечное тепло, ощущаемое нами, — тоже электромагнитные волны, но длина этих волн побольше, чем у света. В физике существует такой закон — чем меньше длина волны (а значит, чем больше частота колебаний), тем выше энергия излучения. Вся совокупность волн, излучаемых источником, называется спектром. Так вот, в спектре Солнца имеется, кроме тепла и света, очень энергичное коротковолновое излучение — рентгеновское и ультрафиолетовое. Встречая на своем пути молекулу газа, это излучение в состоянии разрушить ее, взорвать. Сначала молекула, как это имеет место у кислорода или азота, распадется на отдельные атомы, затем атомы, поглощая энергию ионизирующего излучения, становятся неустойчивыми или, как говорят, «возбужденными». Они перенасыщены внутренней энергией и готовы к распаду. И, наконец, впитав еще некоторую энергию или просто столкнувшись с соседом, они распадаются на ионы и электроны. Произошел процесс ионизации.

А дальше? Все частицы находятся в непрерывном движении, и может случиться так, что электрон и положительный ион окажутся рядом, а то и просто столкнутся (помните ли вы из курса физики, что разноименные заряды притягиваются?), и тогда блуждающий электрон займет место электрона, когда-то потерянного встречным ионом, и перед нами вновь нейтральная частица! В отличие от процесса ионизации или фотоионизации, такой процесс воссоединения противоположно заряженных частиц называют нейтрализацией или рекомбинацией.

Встретиться в толпе частиц могут и два иона — положительный (у него не хватает электронов) и отрицательный (у него имеются лишние электроны). Тогда произойдет вежливый обмен зарядами, и вместо двух ионов дальше полетят две нейтральные частицы. Сущест-



РЕКОМБИНАЦИЯ



ПРИЛИПАНИЕ

НЧ НЕЙТРАЛЬНАЯ ЧАСТИЦА

⊖ ИОН ОТРИЦАТЕЛЬНЫЙ

⊕ ИОН ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЙ

⊖ ЭЛЕКТРОН

«Превращения» частиц в верхней атмосфере.

вует и множество других вариантов «встреч и расставаний», но важно одно — если ионизирующее излучение не прекращается, то при определенных условиях может установиться своеобразное подвижное равновесие, баланс: сколько заряженных частиц каждую секунду будет появляться, столько же будет исчезать в результате нейтрализации. И тогда наблюдатель (если он умеет как-то фиксировать и считать электроны) заметит, что в каком-то месте количество заряженных частиц не

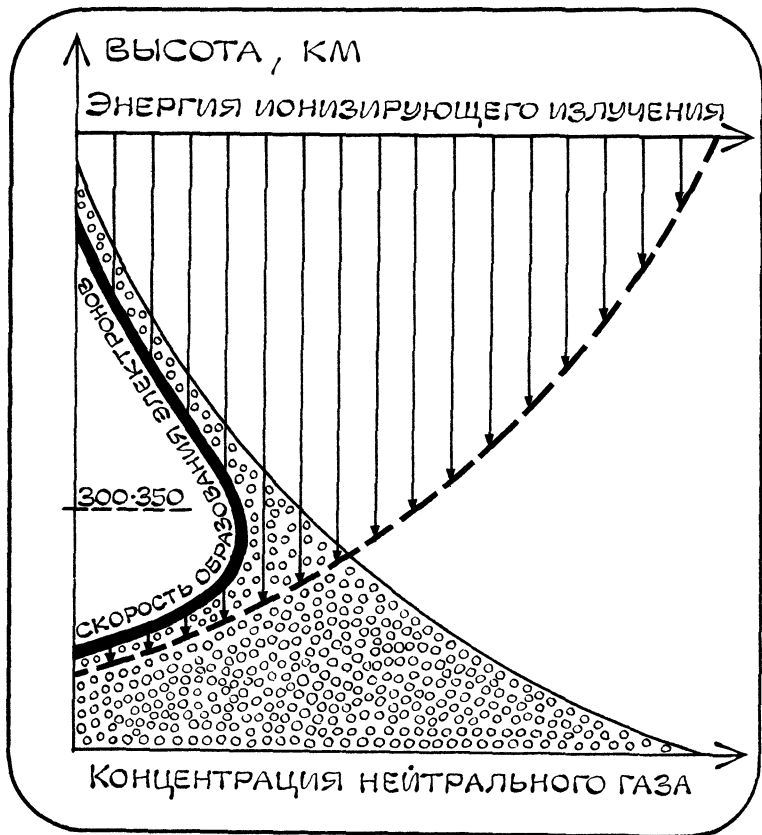
меняется во времени, остается постоянным. Если же источник ионизации «выключить», то через некоторое время заряженные частицы исчезнут, рекомбинируют. Время же это зависит от того, как часто частицы будут сталкиваться: в густой толпе (высокая плотность газа) — часто, в редкой толпе (разреженный газ) — редко; то есть в нижних (плотных) слоях атмосферы рекомбинация идет гораздо быстрее, чем в верхних.

Энергия ионизации поступает сверху, и по мере того, как ее приходится затрачивать на превращение воздуха в плазму, она уменьшается. Чем ближе к Земле, чем плотнее становится воздух, тем меньше эта энергия. Поэтому чем ближе к Земле, тем меньше становится доля заряженных частиц по отношению к частицам, оставшимся нейтральными. Казалось бы, поскольку далеко от Земли солнечное ионизирующее излучение ничем еще не ослаблено, здесь и должно быть самое большое количество электронов и ионов.

Однако надо учесть то обстоятельство, что в самых верхних слоях степень разрежения очень велика, самих частиц очень мало и солнечному излучению не за что «зацепиться», образовать много заряженных частиц нельзя, просто не из чего, так как исходного материала не хватает. Вот и получается — внизу много частиц, но не хватает энергии, а сверху много энергии, но не хватает частиц. Значит, максимум ионообразования где-то посредине, где воздух еще не столь разрежен и куда ионизирующее излучение доходит еще не слишком ослабленным.

Эксперимент показал, что так оно и есть — главный максимум ионизации в ионосфере находится на высоте 300—350 км и здесь концентрация свободных электронов (то есть количество электронов в 1 см^3 воздуха) может достигать нескольких миллионов. И выше, и ниже этого главного максимума концентрация электронов плавно убывает: вниз — быстрее, вверх — медленнее.

Ясно, что на большом расстоянии (до 20 тыс. км) свойства атмосферы сильно изменяются. Поэтому ионосферу принято делить на несколько слоев, или областей. Каждый слой — это небольшой (по сравнению с главным) максимум в распределении электронной концентрации. Почему их несколько, как они образуются? Да потому что, во-первых, воздух состоит не из одного газа, а из смеси разных химических элементов. И чтобы ионизиро-



Концентрация газа с ростом высоты падает, а энергия ионизирующего излучения растет. Значит, на какой-то высоте должен наблюдаться максимум скорости образования свободных электронов (ионосферный слой).

Для ионизации атомов кислорода, нужно одно количество энергии, а атом азота — другое. Относительное количество разных газов с высотой тоже меняется. Во-вторых, как мы уже говорили, Солнце излучает энергию не на одной частоте, а дает целый спектр. Излучение разной частоты и поглощается в атмосфере по-разному: одно проникает только в самые верхние слои, другое же почти достигает нижней границы ионосферы. И, наконец, в-третьих, коротковолновое излучение Солнца — не единственный источник ионизации.

Кроме лучистой энергии, Солнце выбрасывает в пространство огромное количество материальных частиц, так называемых корпускул. Это, видимо, смесь электронов, протонов, ионизированных атомов различных элементов, входящих в состав раскаленной солнечной атмосферы.

«Обстрел» Земли солнечными корпускулами — дополнительный источник ионизации. Корпускулы летят с высокой скоростью: чем больше их скорость, тем больше они несут энергии. И когда такая «пуля» попадает в нейтральный атом нашей атмосферы, он «взрывается», распадаясь на ион и электрон.

Среди всевозможных излучений, пронизывающих атмосферу, есть и вестники далеких миров, идущие к нам поистине из глубин Вселенной. Это обладающая большой проникающей силой радиация внеземного происхождения — космические лучи. Чтобы изучить космические лучи и их роль в ионизации атмосферы, их способность проникать сквозь различные материалы, исследователи изобрели остроумнейшие приборы — детекторы и счетчики частиц, специальные камеры и ловушки. Ученые поднимали эти приборы на аэростатах и самолетах, опускали в глубокие ледниковые трещины, пещеры и шахты, погружали в глубины океанов. И сейчас это во многом еще загадочное излучение исследуется с помощью геофизических ракет, искусственных спутников Земли, ракет-зондов, уходящих к Марсу, Венере, Юпитеру.

Выяснено, что первичные космические лучи представляют собой поток атомных ядер различных элементов: около 83% ядер самого легкого элемента — водорода, то есть протонов, около 16% ядер гелия и только около 1% ядер других, более тяжелых, элементов — азота, кислорода, углерода и даже некоторых металлов. Число таких первичных частиц невелико — на 1 см² поверхности приходится в среднем только одна-две частицы в секунду.

Зато скорость этих частиц (а значит, и энергия) фантастически велика, близка к скорости света, которая в вакууме составляет 300 тыс. км/с! Огромное расстояние от Земли до Солнца (150 млн. км) такие частицы способны преодолеть всего за 10 минут!

Когда такие «снаряды» проникают в многокилометровую толщу земной атмосферы, они дробят ядра атмосферных газов, передают им свою энергию и при

этом разрушаются сами. В результате таких атомных взрывов возникают новые элементарные частицы, которые разлетаются во все стороны с большими скоростями и, в свою очередь, становятся причиной подобных же взрывов. Одна единственная первичная частица с большой энергией способна вызвать целый «ливень» протонов, нейтронов, электронов, позитронов, мезонов и других видов элементарных частиц. Многие из них долетают до поверхности, а некоторые даже проникают в Землю. Отрывая от нейтральных атомов электроны, космические лучи увеличивают общую ионизацию атмосферы. Конечно, поскольку, согласно измерениям, число первичных частиц, попадающих в атмосферу Земли, невелико, то и суммарная энергия, которую они несут, тоже невелика, несмотря на колоссальную энергию отдельных частиц. Расчеты показывают, что их ионизирующая способность в миллионы раз меньше той, которой обладает ультрафиолетовое излучение Солнца. И все же в образовании самых нижних слоев ионосферы, куда солнечное ионизирующее излучение проникает с трудом, космические лучи играют важную роль.

Ну, а видели вы когда-нибудь «падающие звезды»? В звездную безлунную ночь вспыхивает яркая точка, прочерчивает по небосводу огненную прямую и бесследно исчезает. Это, разумеется, не звезды падают — просто в нашу атмосферу из межпланетного пространства влетают так называемые метеорные тела, или просто метеоры. Они имеют различные размеры и массу, но большинство их составляют очень мелкие частицы диаметром в доли миллиметра и массой в сотые доли грамма. Как и все тела в Солнечной системе, метеоры вращаются по замкнутым орбитам вокруг Солнца. Скорость каждого из них относительно Земли зависит от направления их полета — ведь сама Земля вращается вокруг Солнца со скоростью около 30 км/с. Если метеор «догоняет» Землю, его относительная скорость меньше, если же летит ей навстречу, то его скорость и скорость Земли как бы складываются. Десятки миллиардов метеоров влетают за сутки в атмосферу, причем скорость их составляет от 12 до 72 км/с (то есть летят они быстрее пули). В атмосфере метеоры, проникая во все более плотные слои воздуха, раскаляются и испаряются.

Атомы испаряющегося метеорного тела (в состав его могут входить многие элементы, чаще всего металлы) сталкиваются с атомами атмосферных газов и вызы-

вают свечение. Именно это свечение мы и видим как вспышку и огненный след. Обычно метеоры сгорают на высотах от 80 до 120 км — эту область атмосферы часто даже называют метеорной зоной. Метеоры сгорают не только ночью, но и днем, просто при ярком солнечном свете мы их не видим. Полет метеора сопровождается не только свечением. Атомы испаряющегося метеора и частицы окружающего воздуха ионизируются. Промчавшийся метеор оставляет за собой длинную и узкую «колонну» ионизированного газа. Например, пылинка массой в десятитысячную долю грамма способна создать на пути в 1 см около 100 млрд. свободных электронов. Сильные ветры, господствующие в метеорной зоне, быстро «растаскивают» эту область повышенной ионизации, интенсивно идет также процесс рекомбинации, и потому метеорные следы существуют лишь доли секунды. Однако, поскольку метеоров много, некоторый вклад в образование ионосферных слоев они все же делают.

Штрихи к портрету

Процессы ионизации и нейтрализации, физико-химические превращения в ионосфере, образование «слоеного пирога» ионосферных максимумов, изменение свойств ионосферы в пространстве и во времени изучает специальная наука — аэрномия.

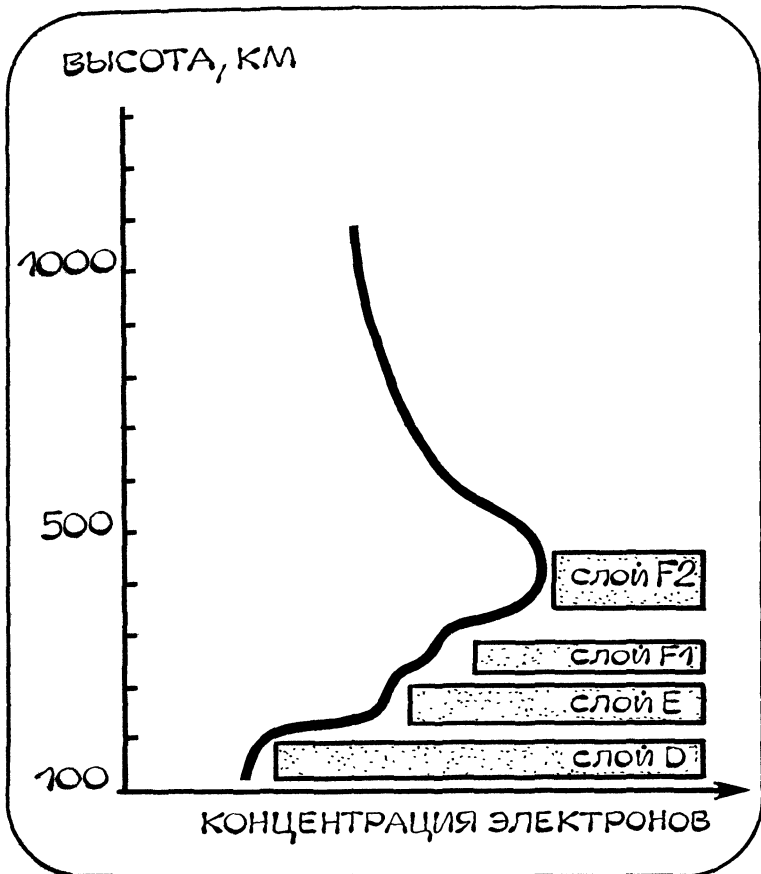
Эта наука использует самые различные методы, чтобы понять и объяснить ионосферные процессы, чтобы дать обоснованный прогноз явлений в ионосфере. В самом деле, ведь если, как мы видели, «жизнь» ионосферы зависит от Солнца, то смена времен года, чередование дня и ночи, изменения в самом Солнце — все это обязательно приведет к изменениям воздействия ионизирующего излучения на воздушный океан, к изменениям в состоянии ионосферы. Ну, а если в одну и ту же минуту окинуть мысленным взором всю нашу планету — от Арктики до Антарктики, от Аляски через Атлантику, Европу, Азию и Тихий Океан до Японии, — станет ясно, что условия воздействия Солнца на атмосферу существенно различаются. И не только потому, что на севере, скажем, стоит полярная ночь, а в Антарктиде — полярный день, в Европе — полдень, а на Дальнем Востоке — полночь, в Сибири — суровая зима, а в Австралии — жаркое лето. Дело еще и в том, что наша планета, подобно гигантскому магниту, обладает магнитным полем.

Мы живем на этом огромном магните и, хотя непосредственно этого и не ощущаем, очень сильно зависим от его поведения. В глубокой древности люди научились пользоваться магнитной стрелкой, покоящейся на острие или подвешенной на нити,— компасом. Магнитная стрелка под действием магнитного поля Земли устанавливается в определенном положении, приблизительно в направлении север — юг. Магнитный компас — старейший из навигационных приборов — не потерял своего значения и в настоящее время.

Как мы увидим, магнитное поле Земли оказывает влияние на многие явления, происходящие в околоземном пространстве. Оно «сортирует» потоки космических частиц, образуя для них своеобразные магнитные ловушки, ставит магнитный барьер на пути солнечных корпускул, заставляя их поток обтекать Землю. Магнитное поле сильнее на полюсах и слабее на экваторе, его действие на заряженные частицы, ионы и электроны заметно даже на огромных расстояниях от Земли, составляющих десятки и сотни тысяч километров. С магнетизмом Земли связаны полярные сияния — свечение газа в полярной ионосфере под воздействием потоков заряженных частиц. В общем ионосферная плазма находится в магнитном поле Земли, и поле это управляет движением ионов и электронов. В то же время само движение электронов и ионов есть, по существу, электрический ток. А электрический ток, как известно, сам обладает магнитным полем. Поле тока взаимодействует с основным геомагнитным полем и вызывает его вариации: то усиливает его, то ослабляет.

Итак, ионосфера не находится везде в одинаковом состоянии. Она всегда меняется и в пространстве, и во времени. Например, на высоте 300 км плотность изменяется ото дня к ночи в 3—4 раза, а на высоте 600 км — в 10 раз. Чтобы нарисовать хотя бы приблизительно похожий «портрет» ионосферы, потребовалось провести миллионы кропотливых измерений, придумать для этого специальные приборы и способы этих измерений, организовать слаженную работу сотен геофизических обсерваторий в полном смысле слова «на земле, в небесах и на море», проделать сложные вычисления.

Как же в общих чертах выглядит ионосфера? Ниже всего находится слой, который назван латинской буквой *D*. Расположен этот слой ионосферы на высоте 50—60 км над Землей и простирается до 90 км. И вот



Распределение электронной концентрации — портрет ионосферы.

парадокс — слой *D* ближе всего к нам, а изучен хуже всех остальных ионосферных слоев. Когда заходит речь о слое *D*, всегда приходится говорить: «Загадки, проблемы...» Он лежит в глубине ионосферы, ионизирующая радиация приходит сюда сильно ослабленной, так как значительная часть ее уже затрачена на ионизацию более высоких слоев. И оставшейся энергии, по всем расчетам, не хватает для ионизации основных газовых составляющих. Но, к счастью, есть небольшие примеси других газов, например окиси азота. Для ионизации окиси азота энергии солнечного ультрафиолетового

излучения хватает. В самой нижней части области D , как я уже упоминал, существенный вклад в ионизацию вносит космическое излучение.

На высотах слоя D плотность атмосферы еще сравнительно велика, поэтому частицы часто сталкиваются друг с другом и электроны с ионами быстро рекомбинируют. Да и мало их, электронов и ионов, по сравнению с огромным количеством нейтральных частиц. Самое большое количество свободных электронов (около 1000 в 1 см^3) обнаружено на высоте примерно 80 км. А нейтральных молекул в том же самом кубическом сантиметре — миллион миллиардов (это единица с пятнадцатью нулями, или же, на языке математики и физики, десять в пятнадцатой степени — 10^{15}). Вот и смотрите: электронов 10^3 , а нейтралов 10^{15} . Значит, на каждый электрон приходится 10^{12} (тысяча миллиардов) нейтральных частиц. Казалось бы, о чем тут говорить — электронов так мало, просто ничтожное количество. Но и его оказывается вполне достаточно, чтобы влиять на распространение радиоволн. Слой D очень сильно поглощает энергию электромагнитных колебаний, особенно днем. Ночью же, когда солнечного излучения нет, электронов становится совсем мало и ослабление радиосигналов существенно уменьшается.

Почему мы говорим, что слой D изучен хуже всех? Здесь надо понять, как вообще можно экспериментально изучать ионосферу, как узнавать, сколько в ней электронов, сколько и каких ионов, какие происходят в ней химические реакции?

Источники информации

Прежде всего существуют радиометоды. Те самые радиоволны, которые отражаются и поглощаются ионосферой, несут в себе информацию о той области, через которую они прошли или от которой отразились. В дальнейшем мы расскажем об этом подробнее, а пока можно сказать, например, что, измеряя время между моментом излучения радиоволны и моментом ее приема, легко определить высоту отражения, то есть высоту ионосферного слоя. Частота отраженной радиоволны несет информацию о концентрации свободных электронов. Если электронов мало, отражаются только длинные волны; но чем больше электронов в единице объема, тем более короткие волны способна отражать ионосфера.

Если мы точно знаем, какую энергию волны мы послали в ионосферу, и способны измерить ослабление принятого сигнала по сравнению с излученным, то можем определить температуру ионосферы, узнать, как часто сталкиваются между собой частицы ионосферной плазмы. Если мы будем записывать с помощью какого-либо регистрирующего прибора (самописца, магнитофона и т. п.), как меняется во времени уровень принимаемого сигнала, то сможем получить информацию об «ионосферных облаках», сгущениях и разрежениях плазмы, находящихся в непрерывном движении.

На высотах ионосферы так же, как и у Земли, существует система ветров. Скорости ионосферных ветров по земным масштабам — ураганные, иногда несколько сот метров в секунду. И радиометоды позволяют эти скорости измерить, так как фиксируют в нескольких точках на Земле, расположенных на определенном расстоянии друг от друга, свойства отраженной от ионосферы или прошедшей сквозь нее радиоволны. Отраженной — это ясно, но что значит прошедшей сквозь нее? А дело в том, что многие участки нашего звездного неба являются источником радиоизлучения. Иногда источник радиоизлучения совпадает с местоположением какой-либо видимой звезды или созвездия (например, созвездий Лебедь или Кассиопея), а иногда его нельзя отождествить ни с каким видимым объектом. «Радиозвезды» и космическое радиоизлучение, поступающее из глубин галактики, являются для нас, наблюдателей на Земле, инструментом для изучения ионосферы.

Радиоволны из космоса проходят всю толщу ионосферы, и их энергия в этом слое поглощается. А как сильно поглощается — это уже зависит от состояния ионосферы, от концентрации свободных электронов, от частоты соударений, от температуры. Имеются даже специальные приборы, измеряющие уровень космического радиошума или степень прозрачности ионосферы для космического радиоизлучения, — риометры. Чаще всего они используются в полярных обсерваториях и на дрейфующих станциях.

Сразу после второй мировой войны исследователи ионосферы взяли на вооружение новое средство — ракеты. Идея применения ракет для изучения атмосферы и небесных тел принадлежит основоположнику космонавтики К. Э. Циолковскому. Грозное современное оружие — ракеты — может служить и научным инструмен-

том. Сейчас существует целое семейство геофизических ракет различных типов, осуществлены десятки тысяч запусков на экваторе и на полярных островах, на суше и на море, со специальных кораблей-ракетоносцев. Малые геофизические ракеты обычно применяются для исследования атмосферы ниже 100 км. Большие ракеты поднимаются на несколько сот километров, исследуют ионосферу. Специальные ракеты поднимаются на высоту более 1000 км. Например, в октябре 1976 г. ученые из социалистических стран успешно осуществили в СССР запуск геофизической ракеты «Вертикаль» на высоту 1512 км!

Верхние слои атмосферы в непосредственной близости от ракеты изучают с помощью приборов, установленных прямо на борту. Здесь находятся счетчики космических частиц; магнитометры для измерения магнитного поля Земли; приборы, регистрирующие встречи с метеорными частицами; приборы для измерения интенсивности и спектрального состава солнечного ультрафиолетового и рентгеновского излучения; термометры и чувствительные манометры; специальные камеры для отбора проб воздуха на различных высотах; радиопередатчики для ионосферных измерений; зонды и ловушки заряженных частиц и другое научное оборудование. По существу, в головном отсеке таких ракет находится целая лаборатория.

Для определения скорости и направления ветра, температуры и других характеристик атмосферы из ракеты можно на определенной высоте выбросить облако легко ионизируемого газа, например натрия или бария. Это облако под действием солнечного излучения начинает светиться, и его очень хорошо видно, особенно на фоне сумеречного или рассветного неба. Движение такого облака под действием ветра, расплывание его под действием физико-химических процессов можно проследить с помощью специальной системы фото-теодолитов.

До высоты 90 км можно применить еще один остроумный способ. Через определенные промежутки времени (то есть на нескольких последовательных высотах вдоль траектории ракеты) взрываются выбрасываемые из ракеты гранаты. Каждый взрыв порождает звуковую волну. Измерив время, которое затрачивает эта волна, чтобы добежать до нескольких расположенных на поверхности Земли чувствительных микрофонных дат-

чиков, и зная высоту взрыва гранаты, можно определить скорость и траекторию волны. А дальше вступают в силу законы экспериментальной физики. Ученых еще задолго до начала исследования верхней ионосферы интересовали закономерности распространения звука в воздухе. В лабораториях ставились опыты, чтобы установить, как зависит скорость звука от свойств воздуха. Были получены экспериментально и объяснены теоретически формулы, по которым, зная скорость звуковой волны, можно рассчитать температуру, давление и плотность воздуха. Вот эти формулы и используются на последнем этапе ракетно-гранатных экспериментов.

Конечно, ракетные эксперименты — крайне сложное и дорогостоящее мероприятие. Приборы должны быть очень точными и миниатюрными, поскольку масса приборного отсека должна быть небольшой. И работать они должны, не мешая друг другу. Во время запуска, когда ракета приобретает начальное ускорение, приборы испытывают колоссальные перегрузки, и надо конструировать аппаратуру так, чтобы не расплющились и не повредились сложнейшие схемы. Все измерения необходимо проводить за считанные минуты, пока ракета находится в ионосфере. И не только проводить измерения, но и передавать данные на Землю. Значит, данные измерений надо зашифровать в специальные радиосигналы, передать их с помощью радиопередатчика, поймать на Земле, расшифровать. Необходимо еще учесть, что приборы должны быть рассчитаны на огромный диапазон изменений свойств окружающего газа. Они начинают свой путь при давлении воздуха в одну атмосферу, а через несколько минут оказываются на высоте, где давление в миллиарды раз меньше. А вспомните, как меняется с высотой температура!

Имеется и еще одна трудность. Ракета, ее корпус, детали приборов, попадая в верхнюю атмосферу, то есть в высокий вакуум, сами выделяют газы, «загрязняя» окружающий воздух. И тогда, например, приборы будут показывать наличие атомов железа или меди, которых на самом деле в естественных условиях вовсе нет. Учитывая это обстоятельство, измерительную аппаратуру иногда размещают не в самой ракете, а в специальном контейнере, который сперва находится внутри ракеты, а затем отделяется и совершает полет самостоятельно. Кроме измерительных приборов, в одном из отсеков контейнера находятся баллоны для взятия проб

воздуха на разных высотах. Несколько долей миллиграмма газов, доставленных из ионосферы, представляют очень большой интерес для исследователей. Из баллонов предварительно самым тщательным образом откачивается насосами весь имеющийся воздух. Чем меньше останется там молекул земного воздуха, тем меньше будет ошибка будущих измерений. Во время полета контейнера специальные клапаны на мгновение открываются и автоматически закрываются. Затем в лабораториях, уже на Земле, ампулу с пробой воздуха исследуют физическими и химическими методами и определяют состав пробы. Правда, в высоких слоях атмосферы много нестойких частиц, которые существуют очень недолго. Пока ампула с газом, даже герметически закрытая, попадет в лабораторию для исследования, химический состав газа, ионный его состав могут сильно измениться. А ведь контейнеры, спускаемые на парашютах, приходилось разыскивать и в степях, и в тайге, и в заполярной тундре!

В общем ракета успевает только быстро «заглянуть» в ионосферу. А нам нужны длительные наблюдения. Ракета «прокалывает» ионосферу по вертикали в одной точке, а нам необходимо исследовать все воздушное покрывало планеты. Сделать это можно только с помощью искусственных спутников Земли (ИСЗ), о которых ученые мечтали давно. И вот 4 октября 1957 г. эта мечта осуществилась — с советского космодрома стартовал первый в мире искусственный спутник Земли. Первое небесное тело, созданное в лаборатории руками человека, весило немного — всего 83,6 кг. Но уже через месяц на орбиту был выведен второй спутник массой более полутонны — 508,3 кг. В самой удаленной от Земли точке своей орбиты второй ИСЗ находился на высоте 1671 км! Запуск искусственных спутников Земли положил начало грандиозному научному эксперименту, в котором объектом изучения стала вся планета с ее атмосферой — околоземное космическое пространство. Третий советский спутник поднял в космос уже около тонны научной аппаратуры. Этот спутник сделал более 10 тыс. оборотов вокруг Земли и просуществовал на орбите почти два года. Аппаратура на орбите работала по командам специального электронного программного устройства, которое находилось на борту, включало и выключало приборы в заданное время.

Для измерения концентрации ионов в ионосферу на третьем спутнике впервые подняли ионные ловушки. Это очень остроумные приборы, внешне похожие на детскую погремушку, только не пластмассовую, а металлическую. Внутри шарообразной сетчатой оболочки, в центре шара, находился маленький металлический шарик — собиратель частиц, коллектор. Этот коллектор был заряжен отрицательно от батареи. Значит, он притягивал положительные частицы, залетающие в шар-ловушку, и выталкивал отрицательные. Чем больше положительных ионов попадало на коллектор, тем сильнее был ток в чувствительной схеме, присоединенной к ловушке. Так измерялась концентрация ионов.

Химический состав ионосферного газа определяли роботы-химики: специальные приборы — магнитные и радиочастотные масс-спектрометры. Они умели сортировать заряженные частицы в соответствии с относительной атомной массой и определять их количественное соотношение. Как работает такой «сепаратор» частиц? Идея состоит в том, что частицы разной массы под воздействием одной и той же силы приобретают разную скорость и движутся по-разному. Представьте себе, что вы толкаете одновременно чугунный и пластмассовый шарики...

Заряженные частицы, влетающие в прибор, заставляют проходить через магнитное или электрическое поле. Такое поле создается в самом приборе, то есть там находятся либо отклоняющий магнит, либо электроды — система сеток, на которые подается электрический потенциал. Отклоняясь по-разному под действием магнитного поля (в зависимости от массы), частицы попадают в разные места прибора и там регистрируются. Подавая на сетки разное по величине напряжение, частицы одного сорта можно ускорить и направить к собирающему электроду — коллектору, а частицы другого сорта затормозить и вообще не пропустить.

В наше время спутники — уже не экзотика, а обычный инструмент геофизика. Исследовательских спутников запущено уже несколько тысяч. У нас, в СССР, есть многочисленная серия спутников «Космос». На них возложены, в частности, и задачи по регулярному изучению ионосферы. Здесь применяются и прямые методы, и радиометоды — наблюдения за радиосигналами, излучаемыми бортовым передатчиком спутника, — и радиозондирование ионосферы с борта спутника. Чтобы исключить воз-

можные ошибки, на одном и том же спутнике часто ставились ионные ловушки различных конструкций — сферические, полусферические, плоские, а также цилиндрические зонды, которые, кроме концентрации, способны измерять и электронную температуру. А температуру ионов измеряли с помощью ловушек особого типа, внешне напоминающих пчелиные многоячеистые соты.

Интересно, что плоские ловушки с успехом могут использоваться для решения сложной технической проблемы — определения ориентации спутника в пространстве, необходимого для правильного истолкования показаний приборов. Дело в том, что поток электронов, попадающих в плоскую ловушку, сильно зависит от ее положения относительно траектории спутника. Сравнение токов, которые зарегистрированы в восьми плоских ловушках, установленных на поверхности спутника, позволяет рассчитать его ориентацию.

Вообще ИСЗ располагают тем же арсеналом приборов, что и геофизические ракеты: для исследования ионизирующих излучений, для изучения окружающей среды, для измерения электромагнитных полей в космосе. А кроме того, сейчас ИСЗ стали мощным инструментом в руках геодезистов, географов, геологов, метеорологов, биологов, медиков и т. д. Но это уже тема отдельного разговора.

Для прямых измерений плотности верхней атмосферы на спутниках устанавливаются блоки ионизационных манометров. Ионизационный манометр — это стеклянная колба, на входе которой укреплен цилиндрическая сетка. Внутри сетки по оси этого цилиндра натянута тонкая проволока, которая служит коллектором — собирателем положительных ионов. Снаружи сетки на той же ножке укреплен нагреваемый катод из вольфрама. Электроны от раскаленного катода летят к положительно заряженной сетке, пролетают между ее редкими витками, но отталкиваются отрицательно заряженным коллектором. Подобное устройство заставляет, таким образом, горячие электроны колебаться внутри объема колбы со значительными скоростями. На определенной высоте манометр вскрывается и колба заполняется окружающим аппарат атмосферным газом. «Рабочие» электроны, совершая колебания около витков сетки, сталкиваются с атомами и молекулами газа, попавшего в полость манометра, и ионизируют их. Образующиеся при этом положительные ионы попадают на коллектор,

и в цепи коллектора возникает электрический ток. Чем больше плотность исследуемого газа, тем больше ионов и, следовательно, тем сильнее ток. Силу тока можно легко измерить, данные по системам телеметрии передать на Землю и плотность рассчитать.

Ракетно-космическая техника, вызванная к жизни потребностями обороны, сразу же, с первых дней своего рождения, действительно стала ценным инструментом для широкого исследования ближнего космического пространства. Полученные с ее помощью сведения о верхних слоях воздушного океана оказались крайне важными для совершенствования самой космической техники. Знание свойств верхней атмосферы, прежде всего плотности, необходимо для баллистических расчетов при выведении космических аппаратов на расчетные орбиты и прогнозирования времени их существования, при расчетах систем ориентации и стабилизации космических аппаратов. Особенно важно учитывать влияние вариаций плотности атмосферы на орбиты геофизических и навигационных искусственных спутников Земли, когда требуется обеспечить очень высокую точность расчетов, а также при создании космических объектов с системами прецизионной ориентации, например астрономических платформ с телескопами для наблюдений за небесными телами с орбиты спутника Земли, за пределами атмосферы. Не меньшее значение имеют знание и прогноз изменений свойств атмосферы для обеспечения стыковки космических кораблей на орбите и решения задач управляемого полета.

Космические корабли, возвращаясь на Землю, врываются в атмосферу со второй космической скоростью (свыше 11 км/с). Чтобы погасить эту скорость за счет торможения в атмосфере и осуществить прямой или планирующий спуск, благополучную посадку, надо знать характер колебаний плотности атмосферы. Даже небольшие отклонения на высотах, соответствующих так называемому коридору входа, приводят к значительному изменению расчетных траекторий, а также к сильнейшим перегрузкам, нагреву и даже разрушению корабля.

Орбиты космических кораблей обычно проходят на высотах термосферы. Здесь отчетливо проявляются колебания плотности ото дня к ночи. Максимум и минимум приходятся соответственно примерно на 14—16 и 4—6 ч местного времени. Диапазон колебаний может достигать на высоте 200 км 60—70%, а на высоте

300 км — даже более 200%, то есть может изменяться в два раза! Наиболее резко суточные вариации плотности проявляются в низких широтах, вблизи тропиков, экватора.

Солнечная активность и магнитные бури также оказывают существенное воздействие на плотность термосферы. В годы минимума солнечной активности средняя плотность уменьшалась в два раза на высоте 200 км и в три с половиной раза на высоте 300 км (по сравнению с периодом максимума солнечной активности, например в 1958 г.). Геомагнитные бури тоже влияют на вариации плотности атмосферы. Даже относительно слабые геомагнитные возмущения оказывают глобальное воздействие на температуру и плотность верхней атмосферы, во время же сильных магнитных бурь температура в зонах полярных сияний может превышать 3000 К, а плотность на высоте 300 км увеличивается в несколько раз сильнее, чем в низких широтах.

Температура ионосферы также сильно меняется и в зависимости от времени суток, и в зависимости от солнечной активности. Естественно, в дневное время и при большой активности Солнца температура повышается. Скажем, на верхней границе термосферы перепад температур от минимальной (ночные условия, минимум солнечной активности) до максимальной (дневные условия, максимум) может составить 2000 К! При этом средняя плотность на высотах 500—600 км может изменяться в сотни раз. Такие вариации плотности и температуры, конечно же, необходимо учитывать при расчете орбит конструкторам космических кораблей и баллистикам.

Итак, наземные радиометры, приборы на ракетах, аппаратура на ИСЗ — вот три основных источника научной информации об ионосфере. Есть ли еще какие-нибудь способы получить сведения об этой таинственной области? Да, есть. И некоторые из них сравнительно просты. Это, например, исследование полярных сияний.

Холодные зори

С глубокой древности известно такое чудесное явление, как полярные сияния. Римский философ Луций Сенека, живший 19 веков тому назад, так рассказал об этом потомкам:

«...Временами на небе можно видеть сияния; иногда не меняющиеся, иногда полные движения. Некоторые из них выглядят

как пустота, когда под светящейся короной свечение отсутствует и образуется как бы овальный вход в пещеру, другие — как бочки, когда видно большое закругленное пламя, перемещающееся с места на место или горящее неподвижно, или — как бездна, когда небеса, кажется, открываются, чтобы извергнуть пламя, которое до этого скрывалось в его глубине... Среди них примечательны те, которые имеют вид огня на небе. Иногда они стоят высоко, сияя среди звезд, иногда так низко, что могут быть приняты за далеко горящую усадьбу или город...

В северных регионах — на Аляске, в Скандинавии, на Кольском полуострове, в Гренландии и Северной Канаде, на Таймыре и Чукотке полярные сияния пылают очень часто. Северная заря, *Aurora Borealis*, — так назвал это явление 300 лет тому назад французский мыслитель Поль Гассенди. Это величественное зрелище, которое потрясает даже бывалых, ко всему привычных людей.

Вот описание известного полярного исследователя Карла Вайпрехта, наблюдавшего сияние на Земле Франца-Иосифа:

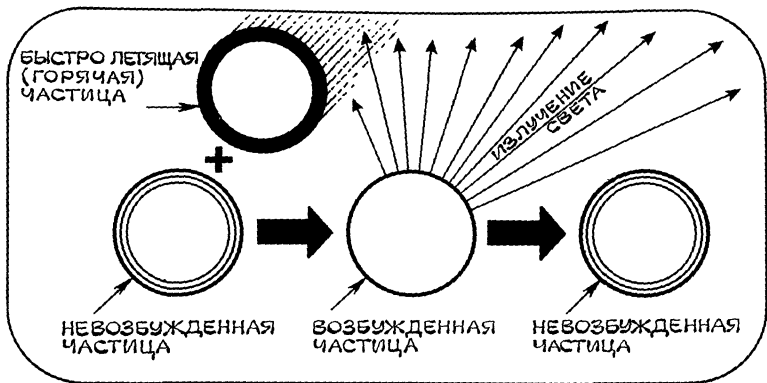
«...На юге, вблизи горизонта, появляется едва заметная дуга. Вдруг она быстро поднимается и раскидывается к востоку и к западу, начинает внезапно светиться и выбрасывать лучи света. Некоторые из них достигают зенита.

Короткое время все как будто остается постоянным, но затем внезапно оживает. Волны света пробегают с громадной скоростью с востока на запад, нижний их край окрашивается в темно-красный и зеленый цвета и колеблется вверх и вниз. Лучи двигаются более быстро, они становятся все короче, поднимаются кверху и приближаются к магнитному зениту. Все выглядит так, как будто лучи соревнуются, кто первый достигнет зенита.

Но вот он достигнут, и лучи разбегаются во все стороны — к северу, югу, востоку и западу. Идут ли лучи сверху вниз или снизу вверх? Кто может это различить? Из центра льется море пламени. Какое это море, красное, белое или зеленое? Кто может сказать? Здесь все три цвета в одно и то же время. Лучи почти достигают горизонта, все небо объято пламенем.

Природа показывает нам фейерверк, который превосходит все возможности воображения. Невольно мы прислушиваемся: кажется, что такой спектакль обязательно должен сопровождаться звуками. Но ни звука — стоит ничем не прерываемая тишина... Еще раз становится светло на льду, а затем все явление исчезает с такой же непостижимой быстротой, с какой оно возникло, и мрачная ночь снова раскинула свое темное покрывало. Это было сияние во всем его блеске... Никакой карандаш не может запечатлеть его, нет красок, чтобы изобразить его, не существует слова, чтобы описать его во всем его величии...»

Замечательно точное и поэтичное описание. Да, красок нет, но у нас есть теперь цветное кино. Фотографировать сияния начали в начале века. Сейчас фотографирование сияний производится специальными «каме-



Свечение атмосферы.

рами всего неба», которые снимают не отдельные участки, а весь небосвод. Фотографии полярных сияний, сделанные одновременно из двух пунктов, позволяют определить высоту, на которой они возникают.

Как показали измерения, нижняя граница полярных сияний располагается обычно на высоте 95—110 км, и чем ярче, сильнее сияние, тем ниже эта граница опускается. Верхний же край сияний чаще всего удален на 150—200 км от Земли, однако может достигать 400—600 км, а то и подниматься до 1000—1100 км.

Ясно, что это геофизическое явление происходит в ионосфере. Ну, а что же это за процесс, чем вызывается? Хорошо было древним — они просто считали сияния «небесными знаменами», предвещающими войны, эпидемии, голод. Викинги видели в полярных сияниях прекрасных девушек в сверкающих сталью доспехах, валькирий, паривших над полями сражений в поисках очередной жертвы. Американские индейцы считали полярные сияния отблесками костров, на которых северные колдуны поджаривали своих пленников. Нас, увы, такие объяснения устраивают мало.

Первые попытки научного объяснения происхождения полярного сияния сделал Михайло Васильевич Ломоносов более 200 лет назад. В большой работе «Слово о явлениях воздушных, от электрической силы происходящих» М. В. Ломоносов высказал глубокую мысль, что полярное сияние порождается электрическими силами.

Теперь мы точно знаем, что это так. Какие электрические силы? Да все те же процессы ионизации и рекомбинации, о которых мы уже говорили. Солнечные корпускулы или потоки заряженных частиц, влетая в земную атмосферу, вызывают ионизацию, возбуждают нейтральные частицы, заставляют их светиться. Основным «возбудителем» такого свечения являются быстрые энергичные электроны. Это, как говорят физики, экспериментальный факт, установленный с помощью ракет и искусственных спутников Земли.

Корпускулы движутся с разными скоростями: одни — быстрее, другие — медленнее. Чем быстрее частица, тем глубже она проникает в атмосферу, тем ярче свечение, ею вызываемое. Способность разреженных газов светиться под действием электрически заряженных частиц используется для изучения самих этих газов. Существуют приборы — спектрометры, которые исследуют спектры светящихся газов. Спектры сияний изучаются как в видимой части, так и в невидимых ультрафиолетовых и инфракрасных лучах. Спектры эти состоят из отдельных линий и полос: это указывает на то, что они излучаются как атомами, так и молекулами газов, образующих атмосферу.

Спектры сияний дают нам возможность судить о газовом составе атмосферы и его распределении с высотой. Они позволяют также оценить температуру верхних слоев атмосферы.

Спектры показали, что сияния возникают в основном в результате излучения нейтральных и ионизованных атомов и молекул кислорода и азота, то есть основных газовых составляющих атмосферы. Атомарный кислород, например, находясь в состоянии некоторого возбуждения, излучает яркую зеленую линию. При другой степени возбуждения атомарный кислород светится красным светом. В средних и низких широтах обычно и наблюдаются красные сияния.

Состав спектра сияний и относительная яркость отдельных линий и полос сильно меняются в зависимости от их формы, высоты, широты местности, где они наблюдаются. Исследователи установили, что наряду с молекулярным азотом и кислородом в верхних слоях атмосферы в большом количестве содержатся атомарный азот и кислород, причем чем выше, тем их относительная концентрация больше. Распад молекул на атомы происходит тоже под действием ионизирующих излу-

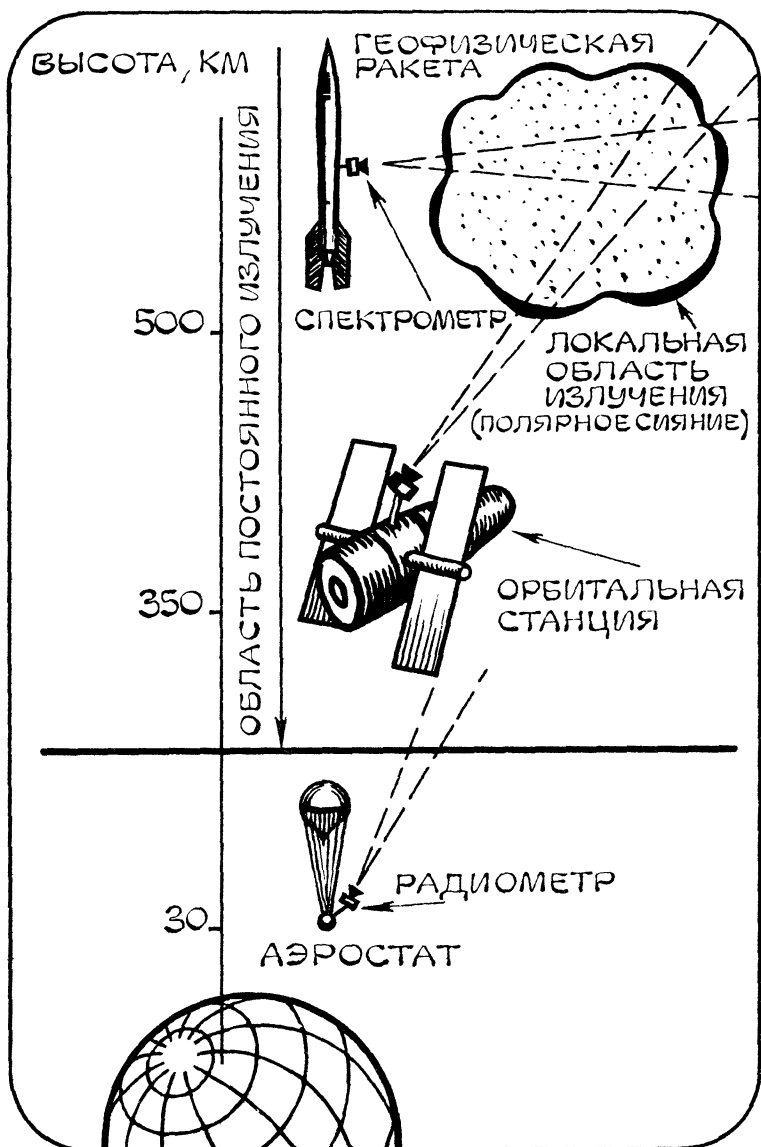
чений. А в самых верхних слоях обнаружено наличие водорода и гелия.

Спектр может дать сведения не только о существовании, скажем, протонов, но и о том, как они движутся: куда и с какой скоростью. Есть такое физическое явление — эффект Доплера. Если стоять у железнодорожного полотна и слушать, как звучит гудок тепловоза, который сначала приближается к нам, а потом удаляется, то можно заметить, что в тот момент, когда состав проносится мимо, тон гудка резко меняется с высокого на низкий. И дело тут не в том, что как-то меняется работа самого гудка. Сирена посылает все время звук одной частоты, то есть производит одно и то же число звуковых колебаний в секунду. Но когда поезд мчится к нам, он как бы подгоняет звуковую волну и до нас доходит большее число звуковых колебаний в секунду, чем посылает сама сирена, — мы слышим более высокий тон. А когда поезд быстро удаляется от нас, он увлекает волну за собой и мы улавливаем уже меньшее число колебаний в секунду — воспринимаем более низкий тон. И чем быстрее движется поезд, тем заметнее изменения тона гудка.

Эффект изменения частоты колебаний, если источник колебаний движется, это и есть эффект Доплера. Он существует и в звуковых колебаниях, и в электромагнитных, то есть для светового излучения, ультрафиолетового, инфракрасного, радиоволн. Если измерить, насколько меняется частота, то можно определить направление и скорость движения источника колебаний.

В спектрах эффект Доплера проявляется в том, что спектральные линии расширяются и смещаются по сравнению со спектрами неподвижных атомов и молекул. В сияниях обнаружены частицы, движущиеся к Земле со скоростью несколько тысяч километров в секунду. Длинные лучи сияний, простирающиеся на сотни километров и имеющие в поперечнике всего несколько сотен метров, дуги и ленты толщиной опять-таки не более сотни метров — все это говорит о том, что источником ионизации могут быть только заряженные частицы больших энергий, движущиеся по спирали вокруг магнитных силовых линий.

За полярными сияниями в настоящее время пристально следят ученые-геофизики. Десятки станций в Арктике и Антарктике производят в полярные ночи непрерывные съемки сияний. Фотографические наблюдения полярных сияний дополняются круглосуточными на-



Приборы исследуют атмосферные эмиссии.

блюдениями с помощью радиолокаторов, позволяющих обнаруживать ионизированные области при любой погоде и в любое время суток. Работают десятки высокочувствительных спектрографов. В средних широтах тысячи метеорологических постов не только проводят стандартные метеорологические наблюдения, но и фиксируют случаи появления сияний и их характеристики. То же самое делают вахтенные на судах, пересекающих Северную Атлантику и южную часть Индийского океана, штурманы самолетов, курсирующих между Европой и Америкой.

Большой комплекс таких исследований проводится на геофизических ракетах и искусственных спутниках Земли. Здесь уже не косвенно, а непосредственно, в тех областях, где появляются сияния, измеряется энергия и состав тех частиц, которые их вызывают. Первые наблюдения сияний из космоса осуществил экипаж советского космического корабля «Восход» (В. М. Комаров, К. П. Феокистов, Б. Б. Егоров).

Современная техника позволяет прямо со спутника увидеть и получить изображение всей зоны полярных сияний в глобальном масштабе. Как правило, это несимметричный овал вокруг геомагнитного полюса. И он, этот овал, «дышит», сужаясь и расширяясь, смещаясь то к полюсу, то к экватору. Это «дыхание» и смещение отражают изменчивость физических процессов, вызывающих полярные сияния. Часто в научной литературе вместо «зона сияний» говорят «овал сияний», поскольку расположены они вокруг полюсов в виде сравнительно узких полос, центрированных около широты примерно 67° как в северном, так и в южном полушарии.

Составление карт видимости и интенсивности полярных сияний необходимо для решения многих научных и практических задач. Во-первых, это дает сведения об ионосфере, во-вторых, на высотах полярных сияний уже сейчас проходят маршруты реактивных самолетов. Через зону сияний проходит и радиосвязь с межпланетными кораблями. Данные наблюдений полярных сияний важны для многих смежных наук — электродинамики, спектроскопии, атомной физики, химии и т. д. Для нас же имеет значение то, что дополнительная ионизация, возникающая при полярных сияниях, приводит иногда к образованию в нижней части ионосферы плотных ионизированных слоев, благодаря которым сигналы даже очень маломощных передатчиков неожиданно могут быть приняты

на огромных расстояниях. Но, с другой стороны, полярные сияния часто сопровождаются длительными нарушениями радиосвязи на всех частотах. Самыми уязвимыми в этом смысле являются зоны, где сияния наиболее интенсивны и возникают чаще всего. Поэтому, чтобы наметить обходные пути для радиосвязи между пунктами, находящимися вблизи опасной зоны, очень важно точно знать местоположение зоны сияний.

Конечно, полярные сияния могут дать ценную информацию об ионосфере, но, увы, на большей части нашей планеты они наблюдаются крайне редко. Но существует явление, родственное полярным сияниям,— это светящееся ночное небо, которое можно наблюдать в любом месте, если нет облачности.

В ясную погоду с наступлением ночи перед нами открывается великолепная картина звездного неба. Тысячи звезд мерцают на ночном небосклоне. Фактически их гораздо больше, чем видно невооруженным глазом. От каждого светила идет слабый свет, но, хотя звезд много, общая яркость звездного неба невелика. Ученые всегда стремятся все измерить, и вот, когда астрономы получили в свое распоряжение достаточно мощные инструменты, чтобы составлять подробнейший каталог всех видимых звезд, планет, туманностей, оказалось, что в безлунную ночь яркость небосвода в два раза больше, чем можно было ожидать.

Откуда все же этот дополнительный свет? Удалось установить, что светится сама атмосфера. Днем обнаружить этот слабый свет с поверхности Земли невозможно. Но ночью, имея чувствительные фотометры, измеряющие яркость того участка небосвода, куда направляется объектив, можно убедиться, что свечение неба наблюдается на всем земном шаре. Кроме того, существуют спектрографы, разлагающие видимый свет в спектр, в лучи разного цвета. Изучая спектр свечения, который является как бы паспортом светящегося вещества, геофизик устанавливает элементы, входящие в его состав, узнает, в каком состоянии находятся атомы и молекулы — нейтральном или ионизированном. По ширине и смещению спектральных линий он определяет температуру и движение частиц.

Направляя объектив спектрографа в ночное небо, исследователь получает данные о верхних слоях атмосферы. Конечно, расшифровать сложные спектры очень нелегко. Сначала надо получить в лаборатории модели

природных спектров, то есть изучить различные смеси газов, их спектры, а уж потом можно сравнивать эти спектры со спектрами тех газов, которые мы реально наблюдаем в природе.

Иногда проходят десятки лет, прежде чем удастся раскрыть тайну свечения, возникающего в космических глубинах. Так, например, 100 лет назад физики обнаружили в спектре ночного неба яркую зеленую линию. Ни в одном из лабораторных спектров такой линии не было. Предположили даже, что это обнаружен неизвестный на Земле газ, и дали ему название — «геокороний». Но оказалось, что зеленая линия излучается атомами кислорода, которых в приземном воздухе нет, а на высотах 100 км и более — очень много. Таким образом, было сделано открытие, которое затем ракеты и спутники блестяще подтвердили.

Исследования показали, что молекулярный спектр верхней атмосферы создается в основном свечением молекул азота (N_2), кислорода (O_2 и O) и гидроксила (OH). Но многие полосы спектра до сих пор не расшифрованы. Какие сложные вещества скрываются за ними, нам еще предстоит узнать.

Свечение ночного неба опять-таки обусловлено процессами ионизации, возбуждения частиц и рекомбинаций. Ионизирующее излучение Солнца днем непрерывно возбуждает частицы (отодвигает электроны с более близких к ядру орбит на дальние), разбивает их на пары — молекулы и атомы, а затем атомы — на ионы и электроны. Во всех этих процессах частицы поглощают, запасают и аккумулируют энергию Солнца. Ночью же, когда электроны возвращаются обратно на более близкие к ядру орбиты, когда атомы объединяются в молекулы, а ионы с электронами — в нейтральные частицы, все эти процессы сопровождаются выделением энергии, мгновенными вспышками света. И таких вспышек миллиарды и миллиарды, они-то и создают непрерывное свечение неба. Полное количество энергии, которое могло бы таким путем высвободиться из ионосферы, оценивается в 40 млн. кВт-ч.

Этот причудливый «слоеный пирог»

Теперь, когда мы познакомились с основными экспериментальными методами изучения верхней ат-

мосферы, можно вернуться к вопросу о том, почему область D чаще всего называют таинственной. Причин тому несколько. Во-первых, химические процессы в ней гораздо сложнее, чем в более высоких областях ионосферы. Именно здесь огромную роль играют отрицательные ионы, то есть тяжелые частицы с отрицательным зарядом. Положительные же ионы здесь — не просто атомы кислорода или азота, потерявшие электрон, а сложные ионы-связки с участием многих молекул водяного пара. Вот поэтому циклы химических реакций, приводящих к образованию слоя D , очень запутаны и многообразны. А самое главное — очень сложны и трудны измерения свойств слоя D . Поскольку электронов здесь сравнительно мало, от слоя D отражаются только радиоволны длиной в сотни метров. Для того чтобы изучать такие волны, необходимо создавать громоздкие и дорогостоящие передатчики и антенные системы.

Приборы на ракетах, например масс-спектрометры, начинают работать только в очень разреженной среде на высоте около 100 км. Чтобы они действовали в слое D , надо дополнить их специально откачивающими воздух системами. Это, естественно, и конструкцию усложняет, и массу аппаратуры увеличивает. А ведь на счету каждый грамм полезной нагрузки!

Что касается искусственных спутников Земли, то их орбиты обычно проходят не ниже 150 км над Землей. Слой D практически остается вне зоны досягаемости для ионных ловушек, зондов и других приборов, установленных на борту спутника. Вот и получается, что, хотя слой D всего ближе к нам, знаем мы о нем меньше всего.

Область D — самая низкая область ионосферы. А что же выше? Высоты от 90 до 140 км относят к области E . Здесь плотность воздуха в сотни раз меньше, чем в слое D , а концентрация свободных электронов днем достигает нескольких сотен тысяч в одном кубическом сантиметре. В полдень, когда солнечное излучение особенно эффективно, их может быть даже 100 тыс (10^5). Кстати, почему этот слой называется E ? Вышло так, что он был открыт первым. Обнаружен он был по отраженной радиоволне, а электрический вектор в электромагнитной волне в физике обозначается буквой « E ». Вот и назвал руководитель экспериментальной группы в Кембриджском университете Эдуард Эпплтон этот слой слоем E . Когда стало ясно, что есть и другие слои, ниже

и выше слоя E , их стали называть соответствующими буквами латинского алфавита, идущими до и после буквы «Е».

Свободные электроны образуются на высотах слоя E под воздействием мягкого рентгеновского излучения Солнца. Ракетные измерения с помощью масс-спектрометров показывают, что основными положительными ионами являются молекулярный кислород (O_2^+) и окись азота (NO^+). Ночью концентрация электронов невелика, примерно $100\text{--}1000\text{ см}^{-3}$, но уже около 6 ч местного времени она возрастает в 10 раз, к 12 ч — еще в 10 раз, а затем плавно уменьшается к вечеру и в 18 ч достигает того же уровня, какой был в 6 ч.

Если бы мы двигались вдоль какого-нибудь меридиана, то обнаружили бы наибольшую концентрацию электронов в районе экватора. Эта концентрация плавно уменьшается по направлению к Северному и Южному полюсу.

Слой E имеет одну интересную особенность. Иногда в этой области вдруг появляются участки толщиной 2—3 км и длиной в десятки и сотни километров. Для них характерно то, что концентрация свободных электронов здесь намного больше, чем в обычном слое E . Этот дополнительный слой ионизации называют «случайный слой E » или, более научно, «спорадический слой E » и обозначают E_s . Чаще всего слой E_s появляется на высоте около 110 км в высоких широтах — ночью, а в экваториальных — днем; движется он со скоростью 150—250 км/ч.

Чем обусловлено появление слоя E_s , до сих пор пока точно не известно. В Арктических районах этот слой скорее всего связан с вторжением в земную атмосферу потоков частиц высоких энергий, с полярными сияниями и магнитными бурями. В средних широтах характеристики слоя E_s , видимо, зависят от количества метеорного вещества, сгорающего в атмосфере на высотах, близких к высотам E_s . Возможно, определенную роль в образовании этого слоя играют и сильные грозы. Сравнительно недавно появились данные о том, что спорадический слой возникает в результате вихревых движений, порождаемых ветрами в ионосфере.

Поднявшись выше области E , мы попадаем в обширную область F , которая распадается иногда (чаще всего летним днем) на две: $F1$ и $F2$. Слой $F1$ занимает интервал высот 140—200 км. Вблизи нижней границы

слоя преобладающими ионами остаются O_2^+ и NO^+ , но дальше молекулярных ионов становится все меньше, а атомных — все больше, и у верхней границы основным ионом становится атомарный кислород O^+ . Максимум концентрации свободных электронов обычно приходится на высоту 170—180 км, составляя от 250 тыс. до 400 тыс. $см^{-3}$.

Слой $F2$ ионизирован сильнее всех остальных. Здесь находится главный максимум ионосферы, выше которого электронная концентрация начинает уже уменьшаться. На высоте слоя $F2$ атмосфера настолько разрежена, что, покинув пределы ионизированного атома, электрон может блуждать в одиночестве целые сутки и даже более. В результате электронная концентрация в слое всегда держится на высоком уровне. Даже ночью концентрация свободных электронов превышает 100 тыс. $см^{-3}$, а днем, при солнечном освещении, может достигать нескольких миллионов. Максимум ионизации «плавает» по высоте примерно от 300 км зимой до 400 км летом.

Основными ионами в области $F2$ являются атомарные азот и кислород (N^+ , O^+) с сильным преобладанием O^+ . Выше максимума слоя $F2$ содержание ионов кислорода быстро уменьшается, и в самой внешней части ионосферы доминируют уже ионы водорода, которые, видимо, образуются не только за счет прямой фотоионизации атомов водорода солнечным излучением, но и за счет обмена зарядами между нейтральным водородом и заряженным кислородом. Во внешней ионосфере важную роль играют также ионы гелия.

Привести все имеющиеся для области $F2$ данные в систему чрезвычайно трудно. Поведение слоя $F2$, распределение его характеристик в пространстве и во времени до сих пор еще ставят исследователей в тупик. Слой $F2$ не подчиняется выводам простой теории, с которыми согласуется, скажем, поведение нижележащего слоя E . Если считать согласие с теорией нормой, то слой $F2$ состоит из сплошных аномалий. Вот, например, ясно, что летом ионизирующее излучение Солнца усиливается — больше рождается ионов и электронов каждую секунду. Казалось бы, и электронная концентрация летом должна быть выше. Но в слое $F2$ все как раз наоборот — концентрация электронов выше зимой. Это сезонная аномалия. В полдень, когда опять-таки радиация Солнца наиболее эффективна для ионизации, в суточном ходе

электронной концентрации в области $F2$ наблюдается не максимум, а минимум, наибольшая электронная концентрация (максимум на кривой суточного хода) в слое $F2$ отмечается не один раз в сутки (как, скажем, в слое E), а два раза. Это так называемая суточная аномалия. И, наконец, существует географическая аномалия, проявляющаяся в том, что вблизи экватора отмечается минимум электронной концентрации, хотя должен бы наблюдаться максимум. Максимум и наблюдается, но вовсе не там, где ожидался, а по обе стороны от экватора.

В общем ясно, что распределение концентрации свободных электронов в главном максимуме ионосферы даже приблизительно не соответствует простой теории. В чем же дело? Этот вопрос часто встает перед исследователями. И авторы детективных романов могут только позавидовать искусству анализа и изобретательности исследователей космоса, которые на основе лишь косвенных данных могут представить себе события, происходящие в очень удаленных от наблюдателя областях.

Сейчас уже ясно, что образование слоя $F2$ зависит не только от мощности потока ионизирующего излучения. Значительную роль играют здесь ветры и электрические поля.

Ветры в ионосфере

Ветры в ионосфере — это одна из самых увлекательных и загадочных проблем ионосферной физики. Атмосфера, как мы уже говорили, непрерывно находится в движении, огромные массы воздуха переносятся на дальние расстояния. В тропосфере, особенно в приземном слое, существует множество различных ветров — как регулярных, таких, как пассаты, муссоны, горнодолинные, так и местных, дующих по прихоти погоды. Характер ветра определяется распределением давления в атмосфере, а как известно, давление, плотность и температура любого газа, в том числе и воздуха, тесно связаны между собой. Если атмосфера в двух областях будет нагрета неодинаково, то и давление там будет разное, а воздух будет перетекать из области высокого давления в область низкого давления. Его движение и есть ветер.

Температура и давление в приземном слое зависят не только от притока солнечного тепла, но и от сте-

пени переизлучения этого тепла земной поверхностью. Ясно, что равнины и горы, лесные массивы и поверхность моря будут переизлучать солнечное тепло по-разному.

Эти и еще многие другие факторы, которые изучает специальная наука — метеорология, — определяют причудливую и сложную картину ветрового режима в нижней атмосфере, в приземном ее слое.

Непрерывность движения воздуха — необходимое свойство природы. Воздух на любых высотах очень редко находится в состоянии покоя. В одних районах земного шара преобладают южные ветры, в других же — северные, а иногда восточные или западные. Существует как вертикальный, так и горизонтальный перенос воздуха. Как правило, горизонтальный перенос характеризуется гораздо более высокими скоростями.

Основная причина возникновения всех воздушных течений на нашей планете — неравномерный ее нагрев солнечным излучением. В области между экватором и 30—35° северной и южной широты Земля получает избыточное количество солнечной энергии, но у полюсов ее не хватает. Механизм, с помощью которого поддерживается равновесие между приходом и расходом солнечной энергии, это и есть движение воздуха, или, как говорят, циркуляция атмосферы. Если бы циркуляции не было, температура в умеренных и высоких широтах непрерывно понижалась бы, а в низких — повышалась бы. И в Арктике, и в Антарктике было бы значительно холоднее, чем сейчас, а в экваториальных областях — еще более жарко.

Ветер над всей нашей планетой можно считать одним из блоков той тепловой машины, которую представляет система Земля — атмосфера. Энергию эта машина черпает от Солнца. Энергия ветра огромна — ведь атмосфера весит миллиарды миллиардов тонн и эту массу надо заставить двигаться. Но это лишь энергия движения. Энергия, переносимая воздушными течениями в виде тепла, вообще выражается колоссальными цифрами — на площадь величиной всего 4 км² за сутки поступает солнечная энергия, равная энергии взрыва атомной бомбы, сброшенной в 1945 г. на Хиросиму.

Теплый воздух легче холодного, он стремится подняться вверх, а на его место приходит более холодный и плотный. Над теплым океаном и дышащими жаром джунглями подымается поток нагретого воздуха. Когда

же он достигает стратосферы и охлаждается, дальнейшему его подъему мешает слой уже имеющегося здесь теплого воздуха. А опуститься обратно ему не дают новые восходящие потоки. Поэтому воздух в более высоких слоях атмосферы начинает двигаться горизонтально и к полюсам. А ниже, у земной поверхности, холодный воздух от полюсов должен двигаться к экватору, чтобы пополнить фонтан бьющего вверх теплого воздуха. Вот и получается первая ячейка циркуляции — замкнутый поток от полюса к экватору: нагретый воздух перемещается вверх, потом, охлаждаясь, — к полюсу, после этого снова — вниз и затем — к экватору.

Но есть еще один могучий регулятор воздушных течений — вращение Земли вокруг собственной оси. Воздух в атмосфере из-за наличия сил трения между поверхностью Земли с ее горами, лесами, строениями и воздухом, а также между частицами воздуха вращается вместе с нашей планетой до значительных высот. Вспомните при этом, что существует очень большое различие скоростей, с которыми движутся разные участки земной поверхности при вращении Земли вокруг своей оси. За одно и то же время жители Новой Земли «проедут» по кругу несколько сотен километров, а обитатели Центральной Африки — несколько тысяч. На экваторе скорость вращения Земли — 1600 км/ч! Если бы не силы трения между Землей и воздухом, то тут был бы постоянный ураган!

Вращение Земли вносит изменения в направления воздушных течений, причем этот эффект (отклоняющая сила Кориолиса) играет большую роль на всех высотах — от тропосферы до верхней ионосферы. Именно поэтому чисто южные или чисто северные ветры появляются крайне редко. Воздух, движущийся к полюсам, в начале своего пути обладает «экваториальной» скоростью. Продвигаясь к Южному или Северному полюсу, он попадает в районы со все меньшей и меньшей скоростью вращения и потому как бы стремится обогнать проносящуюся под ним Землю, то есть поворачивает на восток. Воздух, движущийся к экватору, наоборот, попадает в районы со все большими и большими скоростями. Поэтому он «отстает» и отклоняется по мере приближения к экватору на запад. В районах от 30° северной и южной широты до экватора в приземном слое всегда преобладают восточные ветры. Это

пассаты. В эпоху парусного флота их называли торговыми ветрами. Это самые устойчивые из всех известных на земном шаре атмосферных течений и по силе, и по направлению.

Циркуляция в полярных областях имеет свои особенности. Здесь преобладает восточный перенос. А вот между 30 и 60° северной и южной широты находится так называемая умеренная зона, где теплые и холодные воздушные массы постоянно сменяют друг друга. В общем летние ветры в приземных слоях северного полушария направлены с юго-запада, являясь частью гигантской ячейки циркуляции, в которой происходит подъем воздуха над экватором, а зимние — с северо-запада в результате медленного опускания воздуха над Северным полюсом. На основную систему циркуляции накладываются различные возмущающие факторы. Ячейки в системе циркуляции в зависимости от сезона сокращаются или расширяются то в одном, то в другом полушарии.

Над горными хребтами воздух поднимается, над снежными равнинами выхолаживается, над пустынями нагревается, над океанами увлажняется. Над Тихим и Атлантическим океанами возникают огромные горизонтальные воздушные вихри. Вихревое движение над океанами распространяется все дальше и дальше от центра вращения, куда сверху непрерывно поступают новые потоки воздуха. Время от времени порции воздуха на периферии вихря отрываются от него, приводя к потеплению или похолоданию в зависимости от того, откуда этот воздух приходит.

Суша и море нагреваются и охлаждаются по-разному, в зависимости от сезона. Летом ветер направлен с моря на сушу, а зимой — с суши на море. Эти ветры называют муссонами, и носят они сезонный характер. В прибрежной полосе морей и больших озер существует похожее явление, но не при смене сезонов, а только при смене дня и ночи. Эти ветры называют бризами. Бризы днем направлены с моря на побережье, а ночью — с побережья на море. Другим примером ветров, меняющих свое направление на противоположное в течение суток, являются горно-долинные. Ночью холодный тяжелый воздух стекает вниз по горным склонам. Днем он прогревается, расширяется и поднимается вверх по склонам. Это и есть так называемый горно-долинный ветер.

В верхней атмосфере также имеются системы ветров, столь же изменчивые и имеющие такую же сложную структуру, как и некоторые системы приземных ветров. Это струйные течения. Скорость их достигает сотен километров в час. Хотя известно, что струйные течения оказывают большое влияние на погодные процессы на всем земном шаре, причины их образования до сих пор точно не установлены. О том, как ведет себя ветер на больших высотах, до недавнего времени люди вообще ничего не знали. А все потому, что если измерить силу и направление ветра у Земли довольно просто (всем известны такие приборы, как флюгер или анемометр), то с высотой производить эти измерения становится все труднее. До 1960 г. мы имели подробное представление о ветрах, то есть проводили синоптический анализ ветрового поля, только до высоты примерно 30 км. Приборы запускались в атмосферу с помощью надувных шаров-зондов. В то время появлялись даже гипотезы об отсутствии в верхней атмосфере динамических процессов. Более того, уже открытые наукой ионосферные слои долго изучались именно в предположении, что никакого движения воздуха в ионосфере нет!

Настоящую революцию во взглядах совершили ракетные и радиофизические методы изучения движений в верхней атмосфере. Сразу же были обнаружены сильные горизонтальные ветры со скоростями в сотни километров в час. Сейчас нам уже ясно, что существует область стратосферной циркуляции до высоты примерно 80 км и область ионосферной циркуляции выше 80 км. Как мы уже говорили, ветер измеряют, помещая на ракете специальные датчики или выбрасывая из нее на заданной высоте искусственные облака (например, натриевые или бариевые). Широко применяется ракетно-гранатный метод (до высот примерно 90 км), основанный на использовании законов зависимости скорости распространения звука в атмосфере от температурно-ветровых характеристик атмосферы.

В настоящее время экономически развитые страны организовали специальную ракетную метеорологическую сеть, разработали дешевые малые ракеты и датчики к ним. В качестве таких датчиков используются, например, нарезанная металлическая фольга или тонкие посеребренные стеклянные нити. Выброшенное из ракеты облако медленно оседает на землю и одновременно «тащится» ветром. Специальные радиолокаторы улавливают отра-

женный от этой «цели» сигнал и определяют скорость и направление движения, а следовательно, скорость и направление ветра.

Информацию о ветре в слое 80—100 км дает оптическое и радиолокационное прослеживание движения метеорных следов. Для этого фотографируют метеорный след из двух-трех разнесенных пунктов. И из фотографий видно, что метеорные следы перемещаются, их сносит ветром. Иногда даже след разделяется на две части, причем движутся они в разные стороны. Это говорит о том, что метеорное тело прошло через такое место, где ветры имеют разное направление. Радиолокатор определяет скорость метеорного следа по разности частот излучаемого и отраженного от ионизированного метеорного следа радиоимпульса. Разность эта тем больше, чем быстрее движется след под действием воздушного потока, то есть чем сильнее ветер. А разность частот возникает в результате эффекта Доплера, о котором мы уже говорили.

Ну, а как наблюдать и измерять ветер выше метеорной зоны? Здесь на помощь приходят «ионосферные облака», неоднородности в распределении концентрации свободных электронов и ионов, область сгущения и разрежения в ионосферной плазме протяженностью от нескольких сотен метров до десятков километров. Ионосферные неоднородности, по крайней мере в нижней ионосфере, дрейфуют со скоростью ветра, то есть движутся в том же направлении и с той же скоростью, что и окружающие их нейтральные частицы. И такие неоднородности в ионосфере имеются всегда. Надо сказать, что причины их образования еще только выясняются. Здесь, конечно, определенную роль играют и турбулентность в самой ионосфере, и различные волновые возмущения, приходящие снизу, от более плотных слоев атмосферы, и специфические особенности поведения плазмы в магнитных и электрических полях, пронизывающих ионосферу.

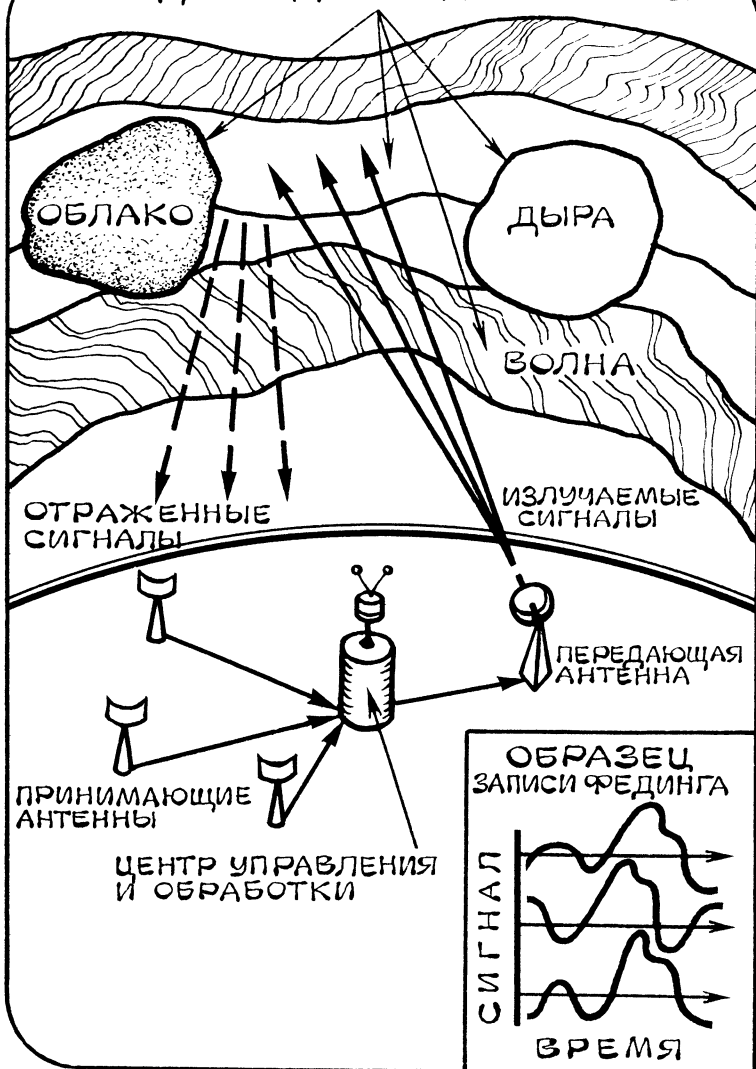
Для нас важен тот факт, что такие неоднородности находятся в непрерывном движении (хаотическом и упорядоченном), а это позволяет нам изучать ионосферные ветры. Измерение движения ионосферных неоднородностей можно производить, используя те же радиоволны. Можно излучать радиоволны с Земли и затем принимать отраженные от неоднородностей ионосферы сигналы, а можно просто принимать излучение какой-нибудь

«радиозвезды», прошедшее через «ионосферные облака». Если принимать сигнал в одной точке, то сила его будет меняться во времени. Если радиосигнал преобразовать в звук, как это делается в обычном радиоприемнике, звук будет то громче, то тише, будет «замирать». Это явление «замираний», аналогичное мерцанию звезд. Замечали ли вы когда-нибудь, глядя на ночное небо, что светящаяся точка звезды в глубине неба мигает и чуть-чуть дрожит? Кажется, что звезда колеблется и меняет яркость и цвет. На самом деле мерцание вызывается преломлением световых лучей в атмосфере. А расположение воздушных слоев, их свойства (плотность, температура, характеристики ветра, влажность и т. п.) непрерывно изменяются. В результате глаз улавливает то больше, то меньше света, и это воспринимается как изменение яркости звезды.

Мерцания «радиозвезд» и замирания отраженного от ионосферы сигнала вызваны наличием неоднородностей и ветров в ионосфере. Наиболее простой метод определить, «куда ветер дует», — это принять радиосигнал не в одной, а в нескольких точках на Земле, например в вершинах прямоугольного треугольника. Катеты такого треугольника удобно расположить по странам света: один в направлении север — юг, а другой — в направлении запад — восток. Чем больше треугольник, тем более крупные неоднородности можно изучить.

Приемные антенны подключают к трем радиоприемникам, а иногда специальный электронный коммутатор с большой частотой (десятки раз в секунду) по очереди подключает их к одному приемнику. Принятые сигналы записываются на магнитофон либо, для наглядности, на киноплёнку или ленту самописца. Возникают три кривые (волнистые линии) — для каждой антенны своя. Они и показывают, как меняется сила сигналов во времени. Если внимательно посмотреть, то можно заметить, что кривые очень похожи, но сдвинуты во времени относительно друг друга. Спрашивается почему? А просто неоднородности прошли над системой приемных антенн так, что сигнал усилился (или ослабился) сначала на одной антенне, затем на другой, потом на третьей. Этот временной сдвиг надо измерить, а зная, как и на каком расстоянии друг от друга расположены антенны, легко рассчитать скорость и направление движения ионосферных облаков.

НЕОДНОРОДНОСТИ АТМОСФЕРЫ



Передатчик облучает ионосферу, а отраженный сигнал регистрируется тремя разнесенными в пространстве антеннами. Записи «замираний» подобны, но сдвинуты по времени. Измеряя сдвиг, можно рассчитать скорость ионосферного ветра.

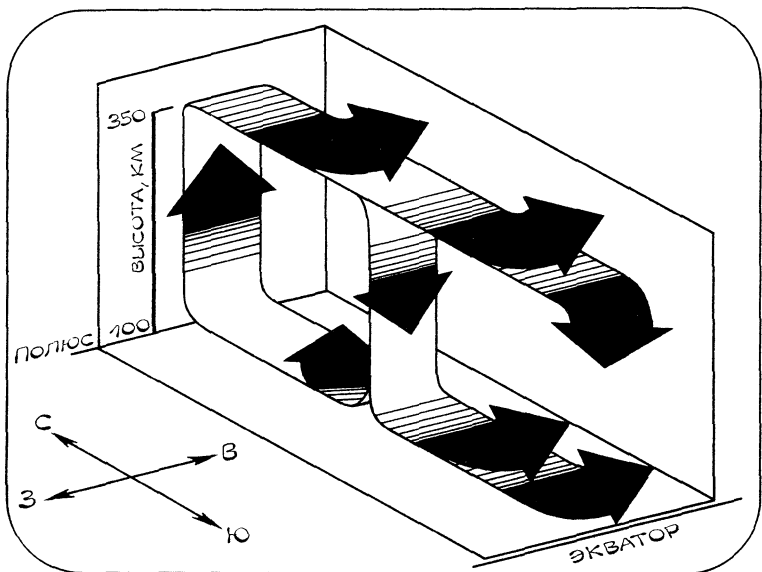
Такие измерения проводятся и в слое D , и в слое E , и в области F ионосферы. Мы уже знаем, что неоднородности движутся со скоростью реактивных самолетов. Сопоставляя данные измерений, производившихся одновременно в самых разных точках земного шара, можно получить представление о характере общей циркуляции атмосферы на ионосферных уровнях.

Есть здесь, правда, одна сложность: неоднородности электронной и ионной концентраций движутся со скоростями нейтрального ветра только в области не выше 130—140 км, то есть там, где плотность газа еще достаточно велика, чтобы нейтральные частицы, сталкиваясь с заряженными, увлекали ионы за собой. А выше, в области F , неоднородности, хотя и связаны с ветром, но движутся уже самостоятельно. Поэтому, чтобы оценить силу ветра, приходится, измерив дрейф неоднородностей, прибегать к решению сложных физических уравнений.

По существу, у нас пока практически нет экспериментального метода прямых измерений скорости ветра выше 200 км. Некоторую усредненную за очень большой период (иногда это несколько месяцев, а то и лет) информацию о вращении атмосферы на этих высотах дают только наблюдения за торможением спутников. Дело в том, что ветер, если он направлен навстречу спутнику, тормозит его. Это торможение невелико, но, действуя на каждом витке, понемногу заставляет спутник менять наклон орбиты, а это изменение уже можно измерить и путем расчетов оценить скорость зонального ветра (меридиональный ветер не оказывает существенного влияния на изменение орбиты).

Эти данные, а также теоретические расчеты показывают, что в области $F2$ ветер направлен с дневной (освещенной Солнцем) стороны планеты на ночную через полюс. На ночной стороне скорость ветра достигает 200—300 м/с, на дневной же ветер тормозится из-за наличия большого количества заряженных частиц (нейтральные частицы, сталкиваясь с ними, теряют свою энергию) и скорость его уже составляет только 50—100 м/с.

Самое важное то, что система ионосферных ветров позволяет объяснить многие аномалии в поведении слоя $F2$ — полуденный минимум электронной концентрации, вариации с широтой, сезонные аномалии. Например, сейчас уже стало ясно, что ветры порождают вертикаль-

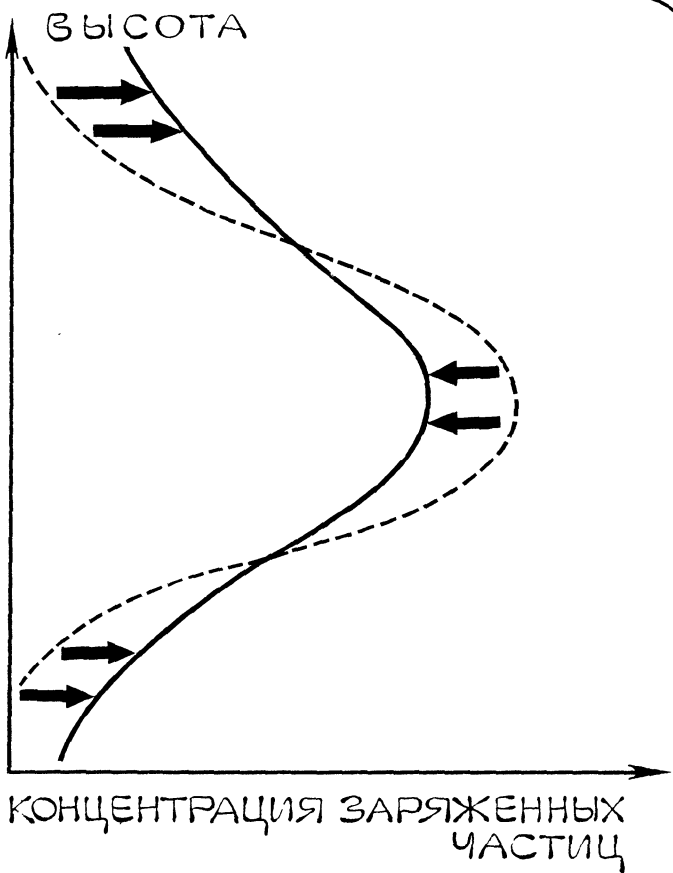


Характер общей циркуляции атмосферы на ионосферных уровнях.
Зима северного полушария.

ные движения ионов и электронов: ночью — вверх, днем — вниз. Значит, в околополуденные часы ионизированные частицы устремляются из максимума области $F2$ вниз — вот и получается «провал» в суточном ходе. Ночью же электроны текут вверх и, хотя ионизирующего излучения Солнца нет, количество заряженных частиц в области $F2$ остается достаточно большим.

Заряженная компонента ионосферной плазмы переносится не только ветрами. Здесь существует еще один важный физический процесс — диффузия в гравитационном поле, то есть в поле тяжести Земли. Электроны и ионы, обладая собственной массой, оседают по направлению к Земле. Ионы значительно тяжелее электронов, но намного опередить их им не удастся, так как разноименные заряды притягиваются. Вот и путешествуют ионы и электроны почти как одно целое — такая диффузия называется амбиполярной. Скорость переноса, или диффузии, зависит как от концентрации частиц, так и от их температуры.

Но вот что интересно, диффузионные и фотохимические процессы (образование ионов и электронов



→ ДИФфуЗИЯ

— СЛОЙ, ОБРАЗОВАННЫЙ ФОТОХИМИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

--- РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

Фотохимия и диффузия формируют профиль электронной концентрации в области F2.

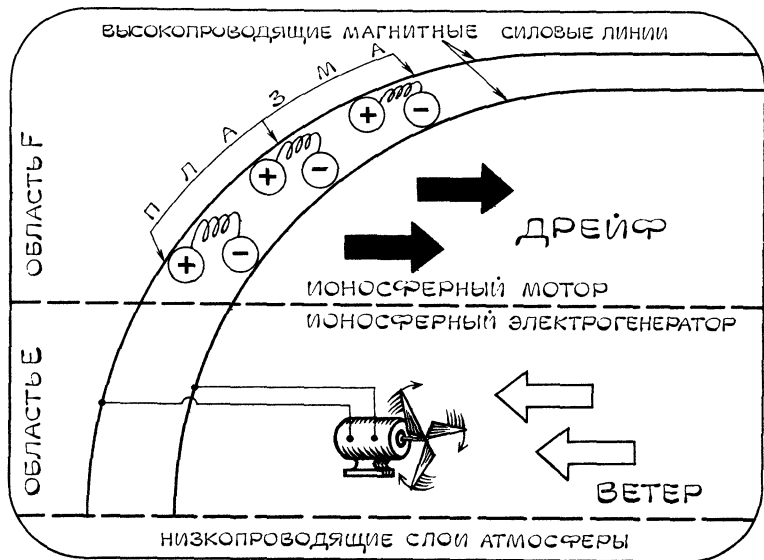
под действием солнечного излучения) конкурируют между собой, то есть действуют в противоположных направлениях. Диффузия приводит к тому, что концентрация свободных электронов с ростом высоты падает, а фотохимические процессы — к тому, что она растет. Главный максимум ионосферы меняет свое положение в зависимости от того, какой процесс побеждает в этой борьбе. Да и количество электронов в максимуме тоже от этого зависит. Днем побеждает фотохимия — максимум электронной концентрации смещается вверх. Ночью берет реванш диффузия — максимум опускается ближе к Земле, да и сама ионосфера на высотах слоя F_2 поддерживается за счет нисходящего диффузионного потока.

Ионосферная динамомашина

Какие же еще силы перемещают ионы и электроны в ионосфере? Естественно, раз эти частицы обладают электрическим зарядом, на них должны оказывать влияние электрические и магнитные поля. Ионы и электроны приходят в движение под действием электрического поля, траектория же этого движения определяется полем магнитным. Ионосферу пронизывают силовые линии огромного магнита — нашей планеты. Ну, а откуда берется электрическое поле, откуда появляется электродвижущая сила, электрический потенциал?

Оказывается, в ионосфере имеется мощная электростанция. Имеется и сложная система «кабелей», по которым течет электрический ток. Конечно, проводов в обычном понимании этого слова в верхней атмосфере нет. Но ведь что такое электрический ток? Это движение свободных электрических зарядов. Значит, движение ионов и электронов и есть, с физической точки зрения, ток! Мы уже говорили, что в нижней ионосфере сильные ветры увлекают за собой ионы и электроны, создавая тем самым электрические токи.

Мощным «генератором» токов является область E ионосферы. Этот генератор действует по принципу обычной динамомашины. Что является главным в динамомашине? Во-первых, постоянный магнит. Такой магнит у нас есть. Как мы уже говорили, это сама наша планета. Во-вторых, ротор, который вращается в магнитном поле. В обмотке ротора, в проводах, заложенных в его пазах, при пересечении ими магнитного поля наводится

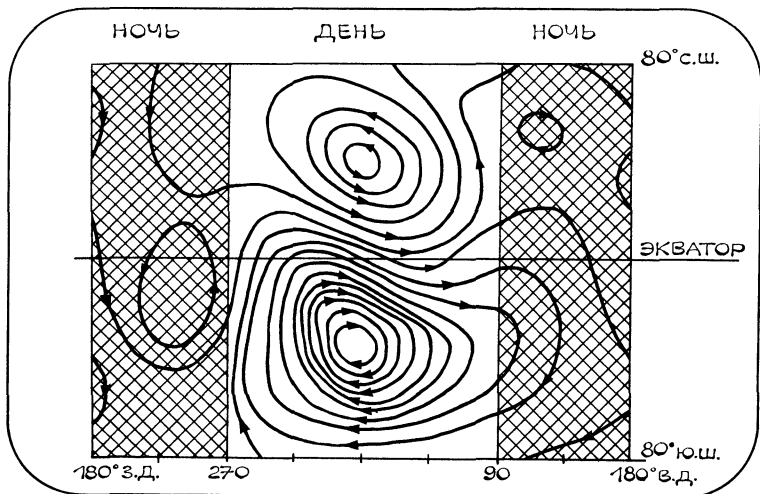


Ионосферная «динамомашина». Постоянный магнит — геомагнитное поле. Ротор — приливное движение ионизированного воздуха.

Провода — силовые линии геомагнитного поля. Мотор — слой F ионосферы.

по индукции электродвижущая сила. Есть у нас и ротор — движущийся в геомагнитном поле ионизированный воздух. А что самое интересное, есть не только генератор, но и мотор — потребитель энергии. Это область F. Она соединена с областью E «проводами» — магнитными силовыми линиями. Вдоль этих линий заряженным частицам перемещаться легче всего: они не испытывают отклонения от направления своего движения так же, как если бы ток шел по металлическому проводу. И напряжение «атмосферного динамо», передается в область F, а здесь ионизированный газ приходит в движение, начинает работать «ионосферный мотор».

Токи в ионосфере достигают иногда очень большой силы. Днем, когда ионов и электронов в ионосфере становится больше, электрическая проводимость воздуха увеличивается. То же самое происходит при переходе от зимы к лету. Значит, ионосферные токи летним днем сильнее. Например, ток, протекающий в области между экватором и средними широтами (примерно 50°), может достигать 50 тыс. А. В районах же, прилегающих к полюсам, особенно во время бурной деятельности Солнца,



Токи в ионосфере.

ток достигает 500 тыс. А, а то и более! Хорошо известно, что всякий ток имеет свое магнитное поле. Вспомните, как на уроках физики к проводнику с током подносили магнитную стрелку, а она поворачивалась — значит, на нее воздействовало магнитное поле тока. Магнитное поле ионосферных токов накладывается на основное геомагнитное поле, и если бы мы измерили напряженность магнитного поля каким-нибудь прибором, то заметили бы изменение этой величины во времени — так называемые магнитные вариации. Кстати, гипотеза об электрических токах в атмосфере и о наличии электропроводной области в верхней атмосфере появилась в конце прошлого века именно на базе наблюдений геомагнитных вариаций.

Эти вариации были не случайными, а закономерными, регулярными, и зависели от чередования дня и ночи, смены времен года и т. п. Почему так? Вывод мог быть только один — по-видимому, столь же регулярно ведут себя и воздушные течения в ионосфере. И тут вспомнили о таком интересном физическом явлении, как приливы. Лучшее всего оно известно морякам и жителям побережий. Очень регулярно, всегда в одно и то же время суток, вода вдруг начинает отступать от берега все дальше и дальше. На многие километры обнажается

морское дно. Продолжается это «отступление» 6 ч. Затем начинается прилив и тоже длится 6 ч. Высота приливных волн иногда достигает десятков метров. И так каждые сутки — два прилива, два отлива.

Что является причиной отлива? Уже очень давно установлено, что это притяжение Луны и Солнца. Казалось бы, масса Луны ничтожна по сравнению с огромной массой Солнца. Но зато Луна рядом, а Солнце удалено на 150 млн. км. Поэтому лунные приливы в океане примерно в 2,5 раза сильнее солнечных.

В воздушном океане, так же как и в водном, тоже существуют приливы. И здесь приливные волны регулярно оббегают земной шар, порождая приливный ветер. Перемещение газа происходит и по горизонтали, и по вертикали. Скорость приливного ветра в верхней атмосфере намного больше, чем у Земли, так как плотность воздуха с высотой быстро уменьшается. И вот что важно — прилив вызывается не только притяжением Луны и Солнца, но и периодическим нагреванием и охлаждением ионосферного газа при вращении Земли вокруг своей оси. Освещенная Солнцем сторона нагревается, а неосвещенная — охлаждается. Тепловой прилив играет главную роль в ионосфере, он намного сильнее гравитационного лунного. Волна атмосферного давления движется вслед за нашим светилом с востока на запад и обегает весь земной шар за сутки. Естественно, периодическое расширение и сжатие атмосферы не может не вызывать воздушных течений, ветров.

Атмосферные приливы, которые играют такую важную роль в ионосферной плазме,— это только один из нескольких видов атмосферных волн, распространяющихся от нижней атмосферы вверх, в космическую плазму. Такие волны называют внутренними. И распространяются они так, что чем дальше от источника волн, тем больше их амплитуда, тем сильнее раскачивается частица воздуха в поле такой волны. Почему? Ведь обычно чем дальше от источника, тем слабее волна. Вспомните хотя бы, как расходятся круги по воде от брошенного камня! А потому, что плотность воздуха с высотой, как мы уже говорили, падает быстро, энергия же волн — медленно.

Внутренние волны имеют разный период — от нескольких минут до многих суток. Условия распространения короткопериодных волн зависят от гравитации, от поля тяжести. Поэтому их так и называют — внутренние

гравитационные волны или сокращенно ВГВ. Периоды их примерно от 5 мин до 2 ч. Следующий класс волн, для которых существенны уже вращение и шарообразность Земли, — это знакомые нам атмосферные приливы. Их периоды — солнечные сутки (24 ч) или лунные сутки, а также гармоника — половина периода (12 ч), четверть (6 ч) и т. д. Внутренние волны с периодами больше суток называют планетарными, так как их масштаб в пространстве сравним с длиной окружности всей планеты. Планетарные волны не только распространяются вверх, но и обтекают земной шар вдоль параллели; по существу, это крупномасштабные погодные системы.

Внутренние атмосферные волны — планетарные, приливные, ВГВ — несут из плотных слоев атмосферы в разреженную космическую плазму огромную энергию. И если достигают плазмы и там наконец затухают, то отдают ей эту энергию. Я сказал, если... А что мешает? Да тропосферные и стратосферные ветры. Они эту энергию могут либо отразить, либо вовсе не пропустить, поглотить ее и за счет этого ослабиться или усилиться. Да, да, ветер может стать сильнее или слабее под действием идущих снизу волн. Все зависит от его изначальной скорости и направления — с востока на запад или с запада на восток. Словом, ветровые системы — это фильтр, через который внутренние волны просачиваются, пробиваются в космос, хотя иногда и не доходят до него.

Но если уж дошли, то могут менять весь ионизационно-рекомбинационный цикл в области D ионосферы, вызывать здесь дополнительное поглощение радиоволн, приводить к образованию спорадического слоя E , искажать форму метеорных следов, генерировать ионосферные волны — возмущения и неоднородности в слое F . Почему мы так считаем? Да потому, что все эти явления, наблюдаемые в космической плазме, происходят во многих случаях после ураганов, гроз, шквалов, циклонов и т. п. Существует даже термин такой — «метеорологический контроль ионосферы». Контроль не в смысле проверки, а в смысле управления, воздействия на ионосферу (вспомните хотя бы выражение «контрольный пакет акций»).

Весьма заманчиво было бы провести направленные эксперименты, чтобы посмотреть, как будет вести себя ионосфера после какого-нибудь сильного взрыва, который наверняка должен стать источником механических волн — инфразвука, ВГВ. Так, в промышленных

целях неоднократно производятся мощные взрывы, например на «вскрыше» горных пород. Такие взрывы иногда использовались и в научных целях. При этом сеть наземных станций следила за состоянием атмосферы, ионосферы, геомагнитного поля, а над местом взрыва в соответствующий момент времени проходил спутник с чувствительной аппаратурой на борту. В результате было точно установлено, что внутренние атмосферные волны, рождающиеся у поверхности, достигают слоя космической плазмы, окружающего планету, «встряхивают» его, вызывают характерные изменения в электрических и магнитных полях, в распределении заряженных частиц, порождают в нем различные волны. Если бы удалось создать геофизические «портреты» наземных взрывов различного типа, то это открыло бы возможность, контролируя состояние космической плазмы, решать задачу обнаружения места и времени прохождения таких «возмутителей спокойствия».

Но вернемся к проблемам динамики ионосферы. Приливные ветры в области E являются источником электрических токов, потенциал передается по силовым линиям в область $F2$, а уже здесь заряженные частицы попадают под воздействие электрического и магнитного полей, диффузии, нейтрального ветра. Вместе с ионизирующим излучением Солнца эти процессы и создают все «аномалии» в области $F2$.

Мы еще очень мало знаем о ветрах в ионосфере, об электрических полях. Их очень сложно измерить, особенно электрические поля. А любые расчеты остаются гипотезой до тех пор, пока не представится возможность «потрогать» явления, измерить физические величины. Первые удачные эксперименты по измерению электрического поля в ионосфере были проведены с помощью ракет. На ракету помещали специальный прибор — магнитометр. Данные измерений по радио передавались на Землю. Одновременно система слежения все время выдавала координаты ракеты, сообщала ее высоту. Ученые считали, что если бы токов в ионосфере не было, то магнитное поле Земли убывало бы с высотой постепенно, без скачков. Просмотрев же данные измерений, исследователи обнаружили, что стоило ракете и при подъеме, и при спуске пересечь область 95—105 км, как плавный теоретически вычисленный ход уменьшения поля с высотой начинал резко нарушаться.

Такой «скачок» в профиле магнитного поля неопровержимо свидетельствовал о том, что на высотах 95—105 км действительно текут токи и их магнитное поле добавляется к основному геомагнитному полю. По величине скачка можно рассчитать силу тока и напряженность электрического поля. Конечно, для этого надо знать состояние ионосферы в месте ракетного запуска и концентрацию заряженных частиц.

Очень часто в этой книге мы употребляем слово «эксперимент». Но в солнечно-земной физике термин «эксперимент» нередко заменяется словом «наблюдение». Это объясняется тем, что здесь невозможно изменить ход событий по желанию экспериментатора, но место, время и способ наблюдения все же можно выбирать так, чтобы получить ответ на заданный природе вопрос.

Однако в космической плазме можно проводить и активные эксперименты, создавая искусственные возмущения и наблюдая их развитие, эволюцию, исчезновение и цепочку геофизических явлений, связанных с вмешательством в естественные природные процессы. Воздействовать на космическую плазму можно либо направленным мощным излучением, либо «впрыскиванием» в нее какого-либо вещества. Излучать можно или лазером, или мощным радиопередатчиком, а производить инъекцию — с использованием химически нейтральных веществ (например, воды) или той же плазмы. Пучок плазмы заданного состава можно предварительно на борту ракеты или спутника разогнать до нужной скорости с помощью специального ускорителя частиц.

Токи и поля в ионосфере особенно сильны в полярных районах. На ракетных полигонах в Скандинавии запускают ракеты, которые выбрасывают в ионосферу пары бария, легко ионизируемого щелочного металла. При этом образуются и нейтральное, и ионное облака. Одно из них светится зеленым светом, а другое — голубым. Облака эти начинают перемещаться по-разному. Ведь на нейтральные частицы в основном влияет ветер, а на заряженные — электрическое поле. Движение этих светящихся облаков фотографируется с Земли камерами с цветными фильтрами. По скорости и направлению перемещения облаков, которые тщательно измеряют, рассчитывают ветер, электрические поля и другие интересные физиков характеристики. Например, эти эксперименты дают информацию о механизмах плазмен-

ных неустойчивостей, приводящих к тому, что бариевые облака постепенно распадаются на своеобразные полосы — «страты». Понимание этих механизмов необходимо для разработки теории образования и движения ионосферных неоднородностей.

Химические выбросы в верхнюю атмосферу и ионосферу широко используются для измерения высотного профиля ветра и ионосферной электропроводимости в контролируемых условиях. А выброс пучков ускоренных частиц в ионосферу и изучение связанных с этим эффектов — это просто лакомое блюдо для специалистов по физике плазмы. В такой небесной «лаборатории» можно проверять многие теоретические прогнозы по взаимодействию волн, частиц, полей. Иногда в некоторых задачах, в том числе и прикладных, ионосферу в каком-то месте необходимо на время уничтожить. Что ж, современная техника это позволяет. Достаточно ведра воды (вылитого в космосе), чтобы рекомбинация «съела» заряженные частицы и в ионосфере образовалась огромная «дыра». Конечно, она довольно быстро затянется под действием и ионизирующих излучений, и процессов переноса. Наконец, активные эксперименты дали и продолжают давать ценную информацию о некоторых ожидаемых последствиях ядерных взрывов в космосе. Конечно, все мы надеемся, что у человечества хватит коллективного разума запретить такие испытания, но наука в любом случае просто обязана предвидеть отрицательные последствия.

Итак, мы теперь знаем кое-что об атмосфере, о газовом «покрывале» нашей планеты. И, конечно, читатель давно заметил, что, описывая сложную жизнь самой верхней «сферы», ионосферной плазмы, мы постоянно вынуждены обращаться к Солнцу. Только изучая и наблюдая Солнце, можно понять и предсказать физические явления в верхней атмосфере. С другой стороны, наблюдая и изучая ионосферу, можно много узнать о важнейших физических явлениях, протекающих на Солнце.

Теперь обратимся к нашей собственной звезде, к ближайшему соседу, которому мы обязаны жизнью, — к Солнцу.

Хорошо иметь собственную звезду...



Вы сочинили и напечатали в своем умном сочинении..., что будто бы на самом величайшем светиле, на Солнце, есть черные пятнушки. Этого не может быть, потому что этого не может быть никогда. Как Вы могли видеть на Солнце пятна, если на Солнце нельзя глядеть простыми человеческими глазами, и для чего на нем пятна, если и без них можно обойтись?..

А П Чехов

Желтый карлик

Солнце... Могучий Гелиос... Центральная звезда нашей планетной системы — единственная звезда, поверхность которой можно непосредственно наблюдать с Земли. Действительно, это ближайшая к нам звезда. Если свет других звезд, распространяющийся с фантастической скоростью, — 300 тыс. км/с идет до Земли долгие годы, то расстояние от Земли до Солнца (около 150 млн. км) он пробегает всего за 8 мин и 19 с. А путешествие до следующей ближайшей к нам звезды, до «альфы Центавра», он совершает за четыре с четвертью года.

Так вот, можно считать, что Солнце — наша собственная звезда.

И все же расстояние Земли от Солнца крайне велико — так велико, что на Землю попадает только совершенно ничтожная часть (около одной двухмиллиардной доли) того огромного потока энергии, которую Солнце в виде света и тепла излучает в окружающее пространство.

«Рядовая звезда в системе Млечного пути, обычный желтый карлик» — такова научная классификация нашего светила, сухая и бесстрастная. Но диаметр этого «карлика», диаметр огромного раскаленного газового шара (1390 тыс. км) в 109 раз больше поперечника Земли. Масса Солнца в 333 тыс. раз больше земной, а объем — в 1300 тыс. раз больше.

Солнце вращается вокруг своей оси в том же направлении, в котором движутся по своим орбитам окружающие его планеты, включая и нашу Землю. Поэтому мысленно мы можем наметить ось вращения Солнца, а на его поверхности, как на глобусе, провести экватор, параллели и меридианы. Меридиан, проходящий через центр видимого диска Солнца, принято называть центральным.

Газовый шар Солнца, сохраняющий свою форму под действием его собственного гравитационного поля, состоит в основном из двух химических элементов: водорода (85%) и гелия (13%). В этом водородно-гелиевом газе все остальные элементы (кислород, азот, магний, кремний, натрий, алюминий, углерод, железо и др.) присутствуют лишь в качестве примесей. Мы, к сожалению, пока что очень мало знаем о деталях внутреннего строения Солнца. Центральную часть светила мы наблюдать не можем, так как солнечные газы непрозрачны.

Если у науки нет экспериментальных данных, то приходится прибегать к теоретическим расчетам. Масса солнечного газа настолько велика, что плотность и давление, а следовательно, температура достаточны для протекания ядерных реакций. Согласно теории, температура газов в самом центре Солнца достигает 20 млн. К, а давление — 10 млрд. атм. В этих условиях любой химический элемент должен перейти в так называемое плазменное состояние. Здесь непрерывно происходят мощные термоядерные (термоядерный синтез водородных атомов и превращение их в более тяжелые элементы) реакции, сопровождающиеся колоссальным выделением энергии. Эта энергия и поддерживает уже очень долго излучение Солнца на современном уровне.

С точки зрения физики, Солнце — не что иное, как колоссальный природный ядерный реактор, удаленный от Земли на сравнительно безопасное расстояние. Этот реактор миллиарды лет перерабатывает в энергию свое собственное вещество. Каждую секунду 4 млн. т солнечного вещества рассеивается в пространстве в виде теплового (или, как говорят физики, инфракрасного), светового, ультрафиолетового, радиоволнового, рентгеновского излучения, гамма-лучей и, наконец, потоков электрически заряженных и нейтральных частиц различных энергий.

И все-таки, несмотря на такой огромный расход вещества, согласно геологическим и палеонтологическим данным, по крайней мере в течение нескольких миллиардов лет Солнце светило практически так же ярко, как и сейчас. А поскольку масса Солнца оценивается в $2 \cdot 10^{27}$ т, то жизнь Солнца как самосветящегося тела обеспечена на многие миллиарды лет.

Что же известно людям — обитателям небольшой планеты Земля, третьей по счету от центрального светила, о строении своей звезды? Если Солнце — газовый шар, то почему его края не размыты? Почему даже в очень мощные, большие телескопы Солнце кажется диском с резко очерченными краями?

Дело в том, что существует сравнительно тонкий, 100—300 км (по сравнению с радиусом Солнца в 700 тыс. км это, конечно, «тонкий»), непрозрачный внешний слой, отделяющий недра Солнца от обширной солнечной атмосферы. Оказывается, что в основном весь свет и все тепло, которые излучаются Солнцем в окружающее пространство, выходят из этого слоя, который называется фотосферой.

Энергия, высвобождаемая при ядерных реакциях, не вся прямо переходит в тепло, излучаемое в космическое пространство. Из глубины Солнца энергия должна проделать путь к его поверхности в форме жесткого и мягкого рентгеновского и ультрафиолетового излучения. В конечном итоге эта радиация поглощается в верхних слоях, а нагретый газ расширяется и поднимается. Эти внешние области называются конвективным слоем и простираются на расстояние порядка четверти солнечного радиуса ниже фотосферы.

Из слоев, расположенных непосредственно под фотосферой, идет сильное излучение раскаленных газов, но оно не выходит наружу, а полностью поглощается

фотосферой. Поэтому температура фотосферы в среднем составляет около 6000 К. И эта температура повышается с глубиной, по направлению к центру Солнца. Напомним, что фотосферный слой — это газ, и, значит, вещество находится в непрерывном движении.

Если рассматривать Солнце в телескоп, то можно заметить, что поверхность фотосферы неоднородна и состоит из отдельных «зерен» — гранул. Картина грануляции все время меняется — появится блестящее зерно, отделенное от соседних зерен темным пространством, а через несколько минут исчезнет. А потом на его месте образуется новая гранула и так до бесконечности.

Одним из способов изучения Солнца, причем очень эффективным, является спектральный анализ. Он не только дает возможность определять химический состав светящегося газа, но и позволяет оценивать движение этого газа. Мы уже говорили об эффекте Доплера и связанном с ним уширении и смещении спектральных линий. Так вот, применение спектрального анализа непосредственно показывает, что «зернистая» поверхность фотосферы объясняется наличием восходящих и нисходящих токов. Нагретый газ (светлые гранулы) поднимается из глубин Солнца и, охладившись, опускается обратно. Температура темных промежутков на 350—400 К ниже средней температуры фотосферы. Разность температур и создает впечатление ячеистости. Диаметр гранул — в среднем около 700 км. Таким образом, фотосфера Солнца все время перемешивается, как кипящая вода в кастрюле. Такое явление в физике называют конвекцией.

Конвективный слой на Солнце начинается с глубины около 100 тыс. км, и фотосфера — это его верхняя граница. Движения ионизированного газа в конвективной зоне закручивают и переплетают силовые линии генерируемого внутри Солнца магнитного поля, которое заморожено в плазму, сжимая и сближая силовые линии, образуя тем самым сильные локальные поля.

Мы уже говорили, что огромный солнечный шар медленно вращается вокруг собственной оси. Лучше всего это вращение изучено для фотосферы. Но вращается Солнце не как твердое тело. Если бы оно было твердым телом, все его точки имели бы одинаковую угловую скорость, а значит, совершали бы полный оборот за одно и то же время. Между тем, экваториальные области Солнца вращаются быстрее всего и совершают

полный оборот за 25 суток. Чем ближе к полюсам (солнечным полюсам!), тем медленнее вращается фотосфера; например, уже на широте 30° (одна треть расстояния от экватора до полюса) период вращения составляет 26,3 суток. Вблизи полюса это уже месяц. В среднем полный оборот Солнце совершает за 27 земных суток.

Над фотосферой располагается следующая оболочка Солнца — хромосфера. Такое название она получила за свой розоватый цвет, заметный во время полных солнечных затмений. Помните, что такое затмение? Если Солнце, Луна и Земля окажутся на одной линии, то для земного наблюдателя Луна полностью закроет диск Солнца. И тогда вокруг черного диска можно будет заметить розовый (или оранжево-красный) ободок — это и есть хромосфера. В сильный телескоп видно, что она состоит из огромных языков пламени, причудливо извивающихся и переплетающихся. И пламя это простирается вверх на 10—15 тыс. км.

Хромосферу можно считать частью солнечной атмосферы. Это гораздо более разреженная область, чем расположенная внизу фотосфера. И нагрета она сильнее — правда, очень неравномерно. В одной части хромосферы газ может быть нагрет всего до 7—10 тыс. К, а в другой — может встретиться вкрапление температурой 30 тыс. К. Но в целом температура повышается с высотой.

Выше хромосферы находится самый внешний пояс солнечного вещества с очень красивым и звучным названием — «солнечная корона». Во время затмения серебристый лучистый ореол окружает заслоненное Луной Солнце. Корональные лучи от солнечной поверхности тянутся иногда на миллионы километров.

Корона целиком состоит из ионизированной плазмы, находящиеся здесь газы разрежены в миллионы раз сильнее, чем в хромосфере и фотосфере, зато температура короны — миллионы градусов! Строение короны очень сложное, структуры очень изменчивы. Лучи и опахала солнечной короны то сжимаются, то широко расправляются. Конечно, физики хотят изучить и описать эту интереснейшую область. И тут дается полная воля фантазии и образному мышлению. «Лучи», «опахала», «корональные хлысты», «кусты», «серпы», «луковицы», «пузыри», «бомбы», «полярные щеточки», «шея», «горловина» — вот такими терминами изобилуют статьи и книги по физике солнечной короны. А как вам нравятся

такие строгие термины, как «модель подметающей юбки», «структура типа пшеничное поле» и «дикообраз»? Но именно так описываются сложные явления в солнечной атмосфере, бесконечно изменчивой, подчас неуловимой.

И хромосфера, и корона являются мощными источниками радиоизлучения. Радиоволны уходят в мировое пространство и, конечно, достигают Земли, где улавливаются специальными радиотелескопами. Сквозь земную ионосферу проникают радиоволны длиной от нескольких миллиметров до 15—30 м. Остальные либо поглощаются в земной атмосфере, либо отражаются от нее.

В отличие от земной ионосферы, солнечная корона образована ионами и электронами, которые стремительно уносятся прочь от Солнца. Поверхность Солнца непрерывно испускает поток частиц, который ученые образно называли солнечным ветром. Солнечный ветер направлен во все стороны от Солнца и наполняет заряженными частицами все околосолнечное пространство, всю нашу планетную систему. Его можно рассматривать как часть непрерывно расширяющейся солнечной короны. Наша планета тоже попадает в этот поток, он обтекает ее, взаимодействуя с магнитным полем Земли, с ионосферой и нижележащей атмосферой. Без преувеличения можно сказать, что мы живем в короне Солнца. Вот теперь становится еще более очевидно, что все процессы на Земле должны быть теснейшим образом связаны с жизнью «желтого карлика».

Стаи солнечных птиц

Какова же эта жизнь? Протекает ли она спокойно и стабильно или же полна неожиданностей? Постоянная эта звезда или переменная? Оказывается, и то, и другое. Если судить по световому и тепловому излучению, то нет сомнений, что Солнце — звезда постоянная. Изменение светимости не превышает 2%. Количество тепловой энергии, излучаемой в единицу времени Солнцем, тоже отличается удивительным постоянством. Вот уже несколько десятков лет измеряется полное количество излучения, приходящего за 1 мин на площадку 1 см², перпендикулярную солнечным лучам и помещенную за пределами земной атмосферы (при среднем расстоянии от Земли до Солнца).

Это количество излучения так и называется — солнечная постоянная и составляет 1353 Вт/м^2 . За все эти годы ее значение колебалось лишь в пределах ошибок измерений не более чем на 1%. Конечно, сами измерения производятся на Земле, а значения, которые могли бы получиться на верхней границе атмосферы, вычисляются путем введения поправок на поглощение и рассеяние радиации в земной атмосфере. Состояние атмосферы постоянно меняется, меняются и поправки. А вот солнечная постоянная так и остается постоянной.

Полный поток энергии, излучаемой Солнцем, составляет $3,86 \cdot 10^{20} \text{ Дж/с}$. Земля ежегодно получает $751 \cdot 10^{15} \text{ кВт-ч}$ солнечной энергии. Много это или мало? Энергия, вырабатываемая всеми электростанциями мира, и отдаленно не приближается к этим цифрам. И то, что тепловое излучение Солнца постоянно, — большая удача для человечества. Увеличение солнечной постоянной хотя бы на 10% превратило бы нашу планету в пустыню, а такое же уменьшение заставило бы ее покрыться толстым слоем вечного льда.

Ну, а если о Солнце судить по ультрафиолетовому, рентгеновскому, гамма-излучению или по мощности радиоизлучения? Вот тогда приходится делать четкий вывод о том, что Солнце — звезда переменная. Интенсивность корпускулярного излучения Солнца, то есть плотность и скорость частиц солнечного ветра, тоже колеблется.

Физики говорят: «Меняется солнечная активность». Но где лежит граница между солнечной активностью и тем, что исследователи Солнца привыкли называть «спокойным» Солнцем? И является ли эта граница стабильной? Известный советский исследователь Солнца Юрий Иванович Витинский дает такое определение солнечной активности: «Обычно солнечной активностью называют целый комплекс различных явлений, происходящих в атмосфере Солнца, которые охватывают сравнительно большие области поперечником не менее нескольких тысяч километров и отличаются весьма значительными изменениями физических характеристик соответствующих слоев солнечной атмосферы».

Что же это за явления? Фотосфера, хромосфера и корона — основные, неизменно окружающие Солнце оболочки, составляющие его атмосферу. Эти оболочки и являются местом развития тех процессов, которые в совокупности именуются солнечной активностью.

Раньше всего были замечены такие проявления солнечной активности, как солнечные пятна. Упоминания о них встречаются в древних китайских летописях уже в 300 г. до нашей эры, в которых говорится о «стаях птиц», появляющихся на диске светила. В русской Никоновой летописи 1371 г. есть такая запись: «Того же лета бысть знамение в Солнце, места черны по Солнцу, аки гвозди...»

Только в 1610 г., когда великий Галилео Галилей направил на Солнце изобретенную им подзорную трубу, стало ясно, что пятна на нем — не тень, отбрасываемая какими-то телами, например планетами, а реальные образования. Галилей впервые заметил, что пятно, возникнув на восточном краю солнечного диска, постоянно перемещается слева направо к западному краю. Некоторые пятна, исчезнув из виду, снова появляются с другого края через 27 земных суток. Такие наблюдения, кстати, и являются доказательством того, что светило вращается вокруг собственной оси с периодом 27 суток.

Научные споры о том, что собой представляют солнечные пятна, продолжались многие десятилетия. Были сделаны предположения, что это тень планет — ближайших спутников Солнца. Галилей опроверг эти предположения, полагая, что пятна — это облака, плавающие в атмосфере Солнца. Считалось, что эти облака образуются после извержения солнечных вулканов; пятна принимали за вершины гор, поднявшихся над твердым солнечным ядром. Допускалось, что пятна — это отверстия в облаках, сквозь которые виднеется центральное ядро Солнца. Многие считали, что в атмосфере Солнца развиваются гигантские вихри, а пятна — просто видимые вершины этих внутрисолнечных вихрей.

Шло время, совершенствовалась техника астрономических наблюдений и измерений. И теперь мы знаем, что кажущиеся с расстояния 150 млн. км очень маленькими солнечные пятна на самом деле — колоссальные воронки в фотосфере. В среднем диаметр рядового солнечного пятна 10—15 тыс. км, что вполне сравнимо с размерами нашей планеты, а иногда даже появляются гиганты диаметром 200 тыс. км и более. Например, площадь пятна, наблюдавшегося в апреле 1947 г., составляла в максимуме его развития около 16 млрд. км². Вот такие-то пятна и видны, «аки гвозди», без всякого телескопа.

При внимательном рассмотрении фотосферы в мощный телескоп на краях солнечного диска почти всегда видны светлые неправильной формы пятнышки (это помимо гранул, о которых мы уже говорили). Человеческое воображение всегда стремится отождествить незнакомый объект с чем-то уже виденным, известным. Вот и эти солнечные образования сравнивают с яркими облачками, прожилками, яркими точками, узелками и т. п. В науке их называют факелами. Они усеивают всю фотосферу, в центре же солнечного диска, который для земного наблюдателя имеет наибольшую яркость, факелы не просматриваются. В отличие от гранул, факелы относительно устойчивы и существуют, почти не меняясь, недели и даже месяцы.

Факелы расположены в верхнем слое фотосферы и, видимо, горячее ее на 200—300 К. Каждый фотосферный факел непрерывно переходит в расположенный над ним, то есть в хромосфере, хромосферный факел, или, как его называют специалисты, флоккул. В области флоккул температура на всех уровнях выше, чем в обычных, «невозмущенных», условиях.

В отдельных линиях спектра (например, в той его части, которая соответствует излучению водорода или кальция) флоккулы излучают гораздо больше энергии, чем остальная хромосфера. Поэтому на фотоснимках, сделанных через специальный фильтр, пропускающий только соответствующее (водородное или кальциевое) излучение, флоккулы выйдут как яркие площадки на темном фоне остальной части диска.

Почему вдруг мы заговорили о факелах и флоккулах? Потому что солнечные пятна, как правило, возникают там, где до этого наблюдались интенсивные факелы. Вначале солнечное пятно — это крошечная пора, маленькая черненькая точка чуть больше темных промежутков между гранулами. Затем гранулы как бы расступаются, несколько пор сливается в одну и рождается пятно. Обычно оно не одиноко: где-то рядом появляются другие — рождается группа пятен, которые меняют свою форму, перемещаются. Особенно заметны эти быстрые движения в группе «новорожденных» пятен.

Время жизни таких темных образований самое различное: одни исчезают через несколько часов, другие же живут десятки суток. Замечено, что среднее время жизни группы пятен — полторы-две недели. Измерения показали, что основание каждого пятна расположено где-то

под фотосферой (по-видимому, не очень глубоко) и каждое пятно имеет свое продолжение в хромосфере. Структура каждого достаточно большого пятна такова: в центре находится ядро, наиболее темная часть пятна, а само ядро окружено более светлой частью — полутенью.

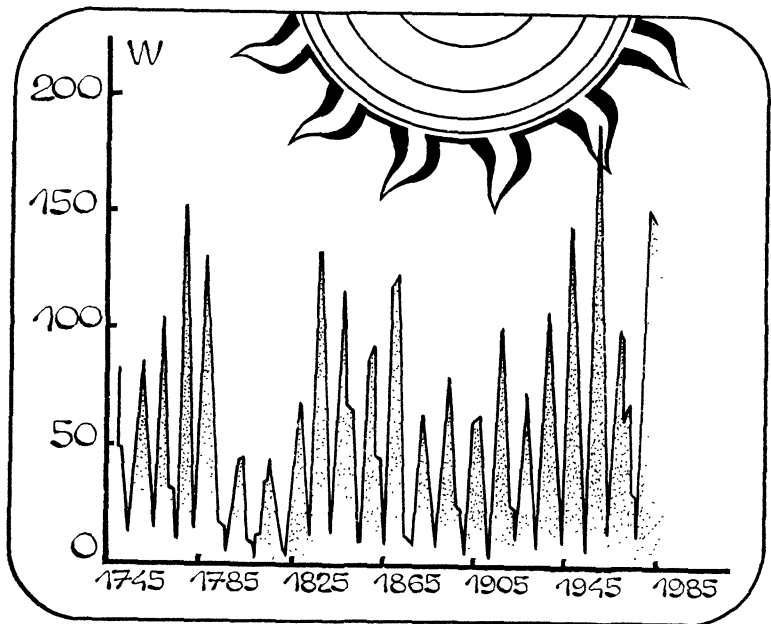
Солнечные пятна кажутся темными лишь по контрасту с соседствующей с ними яркой фотосферой. В действительности их температура очень высока — около 4500 К. Это примерно на 1500 К меньше, чем средняя температура фотосферы. Если бы рядовое солнечное пятно поместить на ночное небо, то оно сияло бы в 100 раз ярче полной Луны.

Многолетние наблюдения дали обширную информацию о солнечных пятнах. Если поначалу считали, что появление пятен — полностью дело случая, то теперь мы знаем, что в поведении солнечных пятен имеются свои закономерности. Причины этих закономерностей, или, как говорят физики, механизм явления, далеко не ясны, но сами закономерности известны.

Во-первых, существуют области, где пятна появляются чаще всего, но их совсем не бывает у полюсов Солнца и на экваторе. Зато в симметрично расположенных относительно экватора широтных поясах от 5 до 35—40° северной и южной широты пятна очень «любят» появляться. Астрономы присвоили этим областям гордое название «королевские зоны».

Во-вторых, еще в 1775 г. была высказана мысль, что существует определенная периодичность солнечных пятен. Эта гипотеза многим тогда показалась дерзкой и необоснованной. Потребовались десятилетия тщательных регистраций пятен, измерений занимаемой ими площади, чтобы с математической точностью установить, что максимальное число солнечных пятен наблюдается на солнечном диске примерно один раз в 11 лет. Через 5—6 лет после этого число и площадь пятен уменьшаются до минимума. В иные дни и недели в такие периоды Солнце абсолютно безупречно — ни пятнышка!

Знаменитый 11-летний цикл солнечной активности был открыт в середине прошлого века. Официальное его открытие связывают с именами немецкого астронома-любителя Генриха Швабе и сотрудника Цюрихской астрономической обсерватории Рудольфа Вольфа. Вот уже более 100 лет наука находит все новые подтверждения реальности и огромной значимости этого ритма в



Изменение числа Вольфа (W) с 1745 по 1985 г.
Закон Швабе — Вольфа.

солнечной деятельности для жизни на нашей планете. Если уж быть точным, то надо сказать, что 11 лет — это средняя цифра, на самом деле промежуток времени между годами максимума солнечной активности колеблется от 7 до 17 лет.

Рудольф Вольф стал основателем Службы Солнца. Цюрихская обсерватория вот уже 130 лет собирает поступающие из десятков солнечных обсерваторий в разных точках нашей планеты данные наблюдений за пятнами и по ним рассчитывает ежедневный индекс солнечной активности — так называемое число Вольфа. Числом Вольфа называется число видимых в данный момент на Солнце пятен, сложенное с удесятеренным числом групп этих пятен.

Вот теперь, пожалуй, нам не обойтись без простой формулы. Обозначим число Вольфа буквой W , число пятен буквой f , а число групп буквой g . Тогда $W = f + 10g$. Допустим, что сегодня, взглянув на Солнце, мы увидели две группы пятен: в одной два пятна, а в другой — три. Тогда число Вольфа на сегодня будет 25.

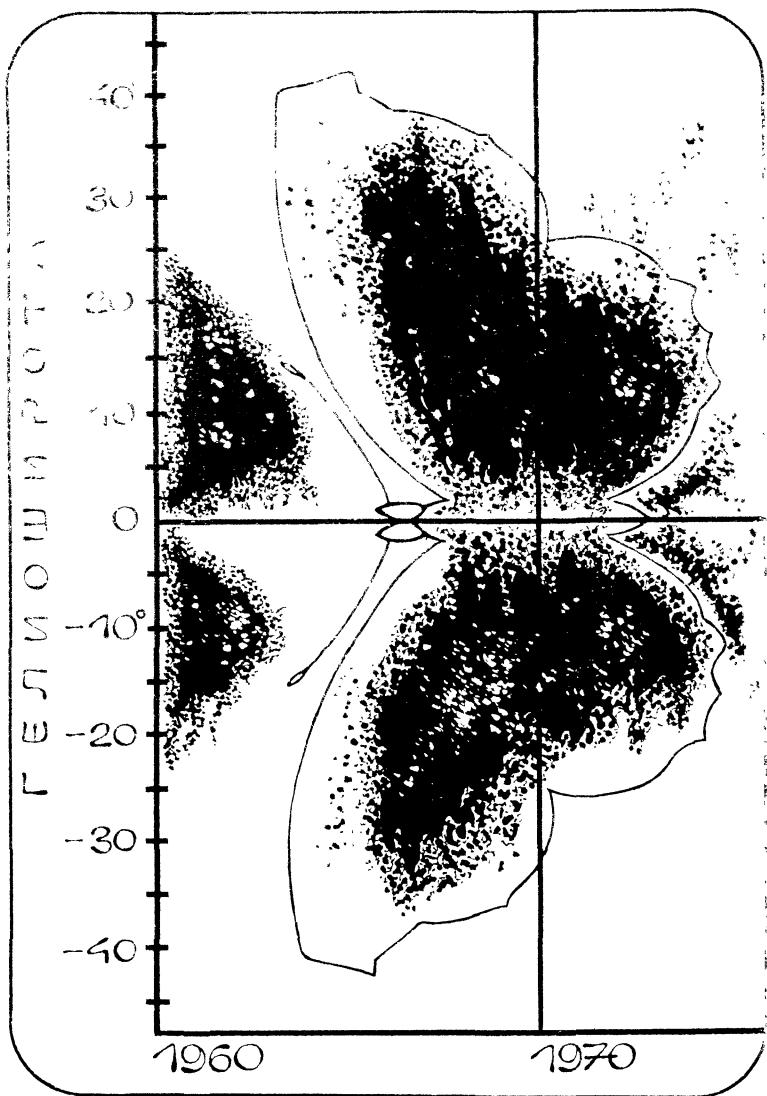


Диаграмма «бабочек». Закон Шпёра.

Регулярные данные о Солнце поступают начиная примерно с 1755 г. Вот и условились считать цикл, начавшийся в 1755 г., первым. Ясно, что сейчас начался уже 22-й цикл. Числа Вольфа можно подсчитать для каждого месяца года (в среднем, конечно). Если попытаться представить себе, как изменяется среднегодовое число Вольфа от одного максимума до другого, то можно получить кривую, изображенную на рисунке. Это и есть графическое изображение закона Швабе — Вольфа о периодических вариациях числа солнечных пятен.

Интересно, что после каждого минимума солнечной активности, когда начинается новое очередное увеличение чисел Вольфа, пятна появляются у верхней границы «королевских зон», сравнительно далеко по обе стороны от солнечного экватора. Затем с каждым годом они «сползают» все ближе к экватору. И в конце очередного цикла они наблюдаются только вблизи экватора. Этот закон, открытый астрономом Шпёером и носящий его имя, тоже лучше представить в графической форме. Возьмем горизонтальную прямую, которая будет означать солнечный экватор. Вверх и вниз от нее по вертикальной оси откладываются широты от 40 до -40° , то есть в пределах «королевских зон». Будем наносить на график точки, отмечающие места (широты) появления пятен. Для каждого пятна свои точки. Ничего, что частично эти точки будут перекрываться. В итоге получится любопытная картина — будто на нитку нанизаны бабочки. Надо сказать, что среднюю продолжительность 11-летнего цикла можно определить гораздо точнее по изменению широты солнечных пятен, чем по вариациям числа Вольфа. Поэтому закон Шпёера наряду с законом Швабе — Вольфа относится к основным законам солнечной цикличности.

Частицы и поля

В начале нашего века было сделано замечательное открытие — обнаружены магнитные поля солнечных пятен. Американский астроном Джордж Хейл, изучая спектр достигающего нас света из области пятна, установил, что солнечные пятна обладают мощным магнитным полем. Напряженность этого поля зависит от площади пятна и для крупных пятен в 6—8 тыс. раз превышает напряженность земного магнитного поля. Два пятна, образующих группу, имеют противоположную поляр-

ность. Такая группа похожа на выступающие наружу торцы погруженного в глубины Солнца подковообразного магнита.

Наиболее сильное поле наблюдается в самом центре пятна, в полутени оно слабее, в окрестности пятен быстро убывает, а вдали от них лишь немного сильнее магнитного поля Земли. Существование магнитного поля солнечных пятен, несомненно, связано с электрическими токами. Огромные вихри движущейся плазмы — это и есть электрический ток. По расчетам астрофизиков, чтобы создать магнитное поле, наблюдаемое в больших пятнах, необходимо иметь ток силой 1000 млрд. А!

С тех пор как современная техника позволила астрономам создать оптикоэлектронный прибор — чувствительный солнечной магнитограф, — магнитные поля солнечных пятен находятся под строгим контролем многих обсерваторий. В СССР измерения магнитных полей на Солнце проводятся и под Москвой, и в Ленинграде, и в Крыму, и на Кавказе, и в Восточной Сибири, и на Дальнем Востоке. Магнитограф заставил ученых по-новому взглянуть на солнечный диск. Пытаясь разгадать тайну солнечного магнетизма, ученые внимательно изучают магнитные карты Солнца. На этой карте есть высокие горы (участки с повышенной напряженностью магнитного поля), магнитные острова и глубокие пропасти. По магнитным картам следим мы теперь за рождением и жизнью пятен.

Мы знаем, что там, где существует магнитное поле, оно тормозит выход горячих ионизированных газов из солнечных глубин на поверхность, а следовательно, в этом месте фотосфера будет менее нагретой. Вот и появляется черная оспина на ослепительном диске. Но магнитное поле пятна не ограничивается фотосферой, оно проникает все выше — в хромосферу и корону. Под воздействием этого поля сильно меняются свойства всех ярусов солнечной атмосферы. Поэтому пятно и фотосферные факелы становятся центром, над которым и вокруг которого развивается бурная деятельность Солнца. Существует даже научный термин «активная область». Факелы и флоккулы проявляют те же вариации в цикле солнечной активности, что и пятна. В годы максимума активности Солнца площадь факелов максимальна, а в годы минимума — минимальна. Более того, развитие каждой группы пятен с момента ее рождения до момента исчезновения сопровождается развитием связанного с нею фа-

кела. А сильное магнитное поле существует на месте исчезнувшего пятна иногда очень долго.

Между напряженностью магнитного поля, причудливой вязью магнитных силовых линий и движением солнечной плазмы существует самая тесная взаимосвязь. С одной стороны, магнитное поле управляет движением плазмы, «разрешая» и облегчая движение электронов и ионов вдоль силовых линий, «запрещая» и затрудняя движение поперек поля. С другой стороны, магнитные силовые линии «вморожены» в плазму. Это значит, что куда бы ни попал в своем стремительном движении поток солнечной плазмы, он приносит с собой магнитное поле Солнца.

Любое движение силовых линий повторяется движением ионизированных газовых частиц. Огромная масса газа в миллионы тонн может внезапно вознестись на сотни тысяч километров вверх, а затем стремительно рухнуть вниз. Так могучая сила магнитного поля создает над хромосферой газовые образования, которые называются протуберанцами.

Это величественное зрелище тоже относится к проявлениям солнечной активности. В результате многочисленных исследований была создана классификация протуберанцев, основанная на изучении их форм, движений, спектров и связи с другими видами солнечной активности.

Чаще всего наблюдаются относительно устойчивые образования, называемые спокойными протуберанцами. На диске Солнца они кажутся длинными темными полосами неправильной формы — волокнами. Некоторые типы протуберанцев тесно связаны с группами солнечных пятен и являются одним из элементов активной области. Любопытно, что у этих протуберанцев движение плазмы чаще всего направлено вниз, а не вверх от Солнца. Образование их похоже на рождение облаков в земной атмосфере и происходит в области короны. Протуберанцы — относительно холодные, но значительно более плотные (в среднем в 100 раз) газовые облака по сравнению с короной, внутри которой они образуются. И существовать они могут в течение нескольких оборотов Солнца.

Самое впечатляющее зрелище — эруптивные (взрывные) протуберанцы. Над Солнцем взлетает, непрерывно распухая, чудовищное облако плазмы. Огненная струя может подняться на высоту более 1 млн. км

и затем быстро рассеяться в межпланетном пространстве. Над краем диска Солнца некоторое время может существовать огромная сверкающая дуга или петля. В эруптивных протуберанцах газы расширяются и удаляются от Солнца со скоростями, в тысячи раз превышающими скорости артиллерийского снаряда. Являясь одной из форм солнечной активности, протуберанцы подчиняются 11-летнему циклу. Их больше всего в годы максимума числа солнечных пятен и меньше всего в годы минимума.

В периоды солнечных максимумов резко изменяется вообще вся корона Солнца. Сплюснутая и сжатая в годы минимума, она расправляется, принимает округлую форму, протяженность ее на всех гелиографических широтах становится примерно одинаковой. Понижается активность — корона вновь сжестится, станет уже, особенно в районах полюсов. Концентрация плазмы в областях короны, располагающихся над центрами активности, намного выше, чем в спокойных областях. Иногда, если скорость огненных языков, вырывающихся из Солнца в космос, превышает 620 км/с, они вообще отрываются от Солнца и навсегда улетают в межпланетное пространство.

В активных областях силовые линии появляются изнутри и возвращаются туда же, образуя арки, занимающие небольшую часть поверхности Солнца. В других местах постепенная эволюция магнитного поля образует так называемые корональные дыры. Силовые линии в них незамкнуты и простираются дальше орбиты Земли, что способствует ускорению потока замагниченной плазмы. Поток проходит Землю со скоростями до 800 км/ч (почти 3 млн. км/ч!). Такие высокоскоростные потоки солнечного ветра играют особую роль в генерации на Земле магнитных возмущений.

Мы знаем сейчас, что общее солнечное магнитное поле, простирающееся по крайней мере до Сатурна, меняет свою полярность каждые 22 года. Причины этого процесса — пока еще тайна.

Взрывы на Солнце

Самым интересным и сложным явлением, разыгрывающимся в солнечной атмосфере, можно считать хромосферные вспышки, или просто солнечные вспышки. Долгое время о них не знали ничего. И только тогда, когда астрофизики-солнечники создали спектральную

технику, они были обнаружены и стало ясно, что хромосферные вспышки порождают мощные потоки излучений, которые настигают Землю на ее орбите, пролегающей вокруг Солнца, вызывают яркие полярные сияния, нарушают нормальное состояние ионосферы и земного магнитного поля, «обрывают» линии радиосвязи и, может быть, влияют на погоду и самочувствие людей.

Вспышки чаще всего наблюдаются в лучах красной спектральной линии водорода. Ведь водорода в солнечной атмосфере больше всего, да и линия эта в спектре самая яркая. На спектрогелиограммах вспышка видна как внезапное и резкое увеличение яркости части солнечного диска.

Как правило, хромосферную вспышку обнаруживают там, где наблюдались яркие флоккулы, и притом такие, внутри которых находились солнечные пятна. Имеются веские основания полагать, что возникновение вспышек каким-то образом связано с солнечными пятнами и прежде всего с их магнитными полями. В самом деле, вспышки чаще всего появляются в центре групп пятен и тем чаще, чем сложнее конфигурация самих пятен и их магнитных полей.

За несколько минут высвобождается огромное количество энергии, происходит настоящий взрыв колоссальной мощности. Мощность вспышек оценивается по специальной шкале (обычно трехбалльной) исходя из яркости вспышки и площади, которую она занимает. Наибольший балл — тройка — приписывается наиболее ярким вспышкам, занимающим достаточно большую площадь на видимом диске Солнца (около одной тысячной доли площади всего диска). Исключительно яркие вспышки имеют балл 3^+ . Если вспышки балла 1 видны на Солнце в среднем около 15 мин, балла 2 — около 30 мин, то весьма редкие вспышки балла 3^+ продолжаются иногда 2—3 ч. При этом выделяется столько же энергии, сколько при одновременном взрыве десятков тысяч водородных бомб.

Надо честно признать, что, несмотря на исключительную важность решения проблемы природы хромосферных вспышек и особенно нахождения способов предсказания их появления, продолжительности и мощности, мы еще очень мало знаем об этом интереснейшем явлении.

В общих чертах нам известно, что при вспышке резко повышаются температура и плотность вещества в

хромосфере (в сотни тысяч раз по сравнению с окружающей спокойной оболочкой). Но откуда берется та невероятно могучая сила, которая разом охватывает огромную массу раскаленного газа (а вспышка-троечница может занять более 3 млрд. км²!) и стремительно ее сжимает? Возможно, виновато магнитное давление, сталкивающее несущиеся навстречу друг другу массы газа над солнечными пятнами с разной магнитной полярностью. При этой «катастрофе» рождается взрывная волна, энергия магнитного поля переходит в тепло и излучение, за считанные секунды температура сжатой плазмы достигает многих миллионов градусов! И тогда может начаться термоядерная реакция, «горючим» для которой служит водород, при этом, конечно, выделяется колоссальная энергия!

Каков бы ни был механизм хромосферной вспышки, для нас первостепенную важность имеют ее неизменные следствия.

Во-первых, резко увеличивается мощность солнечного рентгеновского излучения.

Во-вторых, еще более заметно растет поток радиоволн — гигантский солнечный «передатчик» посылает в мировое пространство свой голос, усиленный в миллионы раз.

В-третьих, солнечная вспышка выстреливает в пространство стремительный поток корпускул — ионов различных элементов, ядер водорода и гелия, электронов, обладающих скоростями, близкими к скорости света. Это так называемые солнечные космические лучи, которые во время самых сильных, или, как их часто называют, протонных, вспышек регистрируются на Земле.

Кроме частиц высоких и сверхвысоких энергий, из области вспышек выбрасываются корпускулы, обладающие значительно меньшими энергиями, скорости их — несколько тысяч километров в секунду. За сутки-двое они достигнут Земли, а за большие сроки — и еще более удаленных планет. Как правило, одновременно с большой вспышкой из соседних с ней областей Солнца выбрасываются один или несколько протуберанцев исключительно высокой яркости, скорости и большой протяженности. Чаще всего такие протуберанцы не возвращаются на Солнце.

Далекое солнечное взрывы потрясают и нашу планету, может слегка измениться даже скорость ее вращения вокруг собственной оси. Межпланетное простран-

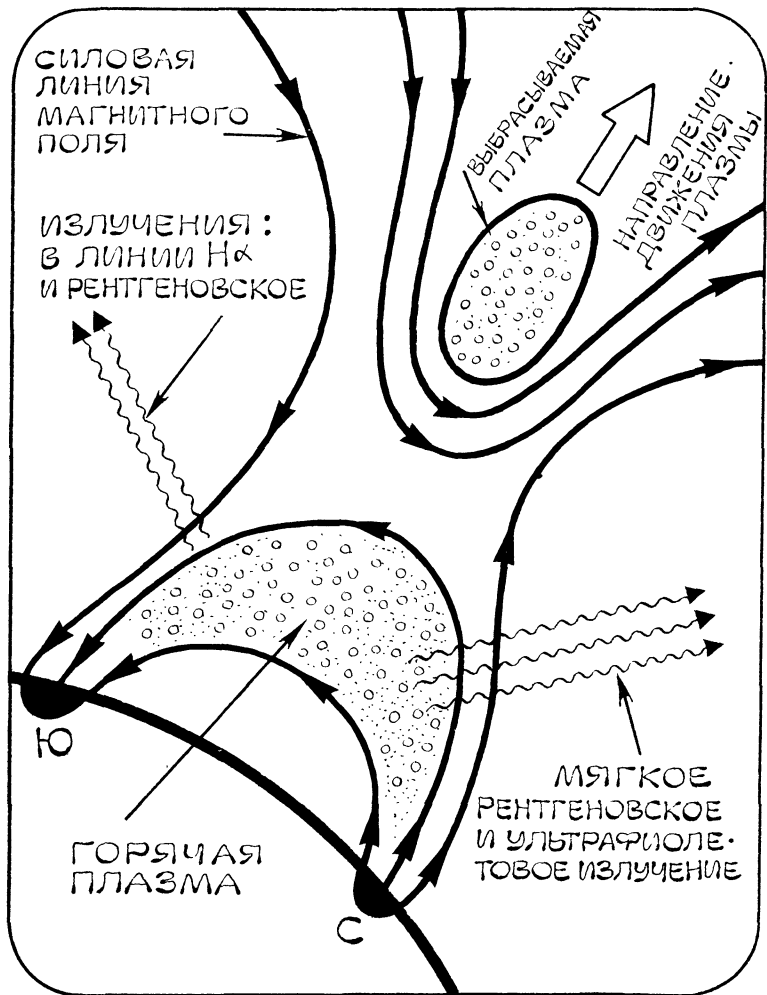


Схема солнечной вспышки.

ство заполняется жесткой всепроникающей радиацией. Нас от нее защищает атмосфера, а как быть космонавтам и пилотам сверхзвуковых машин, забирающихся в стратосферу? Надо сказать, что от самых мощных вспышек эффективной защиты пока нет. Никакая толстая обшивка не спасет от потока радиации, от смертоносных космических лучей. Выход один — если обстановка на Солнце грозит сильной вспышкой, надо отдавать команду на

посадку космического корабля на Землю. Теперь ясно, как важно иметь «солнечный патруль» — проводить непрерывное слежение за состоянием нашего светила, уметь измерять солнечное излучение во всех его диапазонах, понимать взаимосвязь солнечных процессов, оценивать степень радиационной опасности. В любом случае в будущих межпланетных кораблях надо будет создавать «аварийные отсеки», где можно будет укрыться от потока солнечной плазмы.

Хромосферные вспышки интересуют ученых не только из-за необходимости предсказания «погоды» в космосе и всей цепи геофизических явлений, связанных со вспышкой. Они могут дать ключ к овладению тайной управляемого термоядерного синтеза. Ведь физики-атомщики стремятся решить проблему нехватки энергетических ресурсов в современном мире, создав искусственное Солнце. Может быть, наша собственная звезда подскажет, как заставить работать на человека те реакции, которые бушуют в ее недрах миллиарды лет.

А пока мы накапливаем факты, терпеливо собираем данные, сопоставляем явления, ищем предвестники грозных вспышек. Уже известно, что чем круче «горы» и глубже «пропасти» на магнитной карте Солнца, чем причудливее конфигурация группы пятен, чем быстрее меняется обстановка, тем вероятнее и мощнее будущий хромосферный взрыв. Иногда удавалось за несколько дней предсказать вспышку. Это уже важный результат.

Радиоголос Солнца

Солнце испускает радиоволны трех типов: постоянное фоновое радиоизлучение, вызываемое хаотическим, или тепловым, излучением в хромосфере и короне; медленно меняющееся во времени радиоизлучение в диапазоне длин волн от 3 до 60 см, связанное с пятнами и флоккулами; спорадическое избыточное излучение, главным образом на метровых волнах, связанное с активными областями. Вот это-то избыточное радиоизлучение и представляет наибольший интерес для солнечно-земной физики.

С активными областями и солнечными вспышками тесно связаны так называемые радиовспышки и шумовые бури. Их непосредственный источник — в короне Солнца. Шумовые бури, связанные с крупными солнечными пятнами, длятся часами, иногда сутками. Радио-

всплески, связанные со вспышками, продолжаются всего 5—10 мин, они очень интенсивны: в 100, а иногда и в 1000 раз превышают уровень фонового радиоизлучения. Частота излучения иногда медленно меняется — похоже, что источник радиоизлучения движется через корону. Но гораздо чаще это изменение частоты происходит быстро. Скорее всего, такие радиовспышки связаны с плазменными колебаниями, возникающими на начальной стадии развития хромосферной вспышки. Примерно через полчаса после того, как вспышку зафиксируют оптические телескопы, радиотелескопы отмечают устойчивое непрерывное излучение, которое может длиться несколько часов, постепенно ослабевая.

Радиовсплески солнечного радиоизлучения различного типа, для которых радиоастрономы придумали подробную классификацию, стали источником информации о процессах внутри солнечной атмосферы, средством патрулирования солнечной активности. Чтобы наблюдать с Земли Солнце в оптическом диапазоне, необходимы хорошие погодные условия, отсутствие облачности, высокая прозрачность и стабильность атмосферы. А радиоастрономические наблюдения не зависят от капризов погоды, их можно вести регулярно, почти непрерывно, каждый день.

Поэтому на нашей планете построена сеть радиотелескопов — чувствительных радиоприемников с хитроумными антенными системами. Методы наблюдения космического радиоизлучения сами по себе — это целая наука. Главное — создать очень узкую диаграмму направленности антенны, чтобы радиолуч мог скользить по диску Солнца, ощупывая его спокойные и активные области.

Антенны радиотелескопов — это и огромные параболоиды, и чаши, и сотни небольших антенн, стоящих по кругу или образующих кресты и решетки. Технических решений много, а цель одна — обеспечить надежный прием «радиоголоса» нашего светила, обеспечить солнечный патруль.

Совместными усилиями ученых всего мира за Солнцем установлен тщательный контроль. Только в нашей стране в этой работе участвует около двух десятков обсерваторий. Вахта ведется круглосуточно — по мере того как Земля поворачивается вокруг своей оси, все новые дежурные телескопы приступают к работе. На шарах-зондах, на ракетах и спутниках поднимаются приборы для съемки Солнца, для детектирования излучений,

не пропускаемых земной атмосферой. Антенны радиотелескопов «вслушиваются» в радиоголос Солнца.

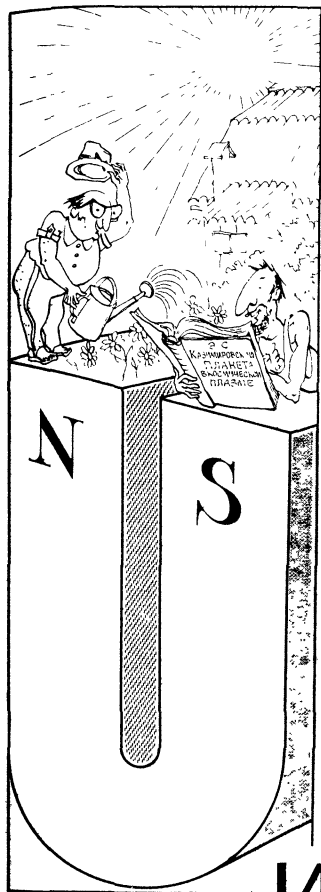
Длительно существующие в космическом пространстве орбитальные обсерватории типа нашего «Салюта» или американской небесной лаборатории «Скайлэб», корабли-зонды, уходящие к далеким планетам — Венере и Марсу, — дали ценнейшую информацию о заполняющем межпланетное пространство солнечном магнитном поле, о характеристиках солнечного ветра.

Мы живем внутри Солнца, в короне собственной звезды. За пределами Солнечной системы — межзвездный газ. Система Солнце — Земля физически расположена внутри гелиосферы — гигантского пузыря в межзвездном газе. Этот пузырь образуется радиальным сверхзвуковым потоком плазмы от Солнца при его взаимодействии с межзвездной средой. Все потоки заряженных частиц, идущих от Солнца, из глубин галактики, из планетного пространства, испытывают на себе действие гелиосферы. Поэтому изучать гелиосферу можно, используя галактические космические лучи как зонд. Космические лучи изучаются и с Земли, и из космоса. Детекторы, то есть приемники космических лучей, счетчики частиц высоких энергий, системы регистрации интенсивности их потоков размещаются на борту космических аппаратов, на высоких горах, на поверхности Земли и в глубоких шахтах.

В намагниченной межпланетной среде непрерывно распространяются различного типа плазменные волны, создаваемые неоднородностями магнитного поля Солнца и неравномерностью истечения вещества. Межпланетную среду можно себе представить состоящей из отдельных облаков плазмы с замороженными в них магнитными полями. Такие магнитные неоднородности вызывают колебания интенсивности потока космических лучей, приходящих к нашим детекторам, поскольку они рассеиваются этими облаками и сносятся солнечным ветром прочь от Солнца.

На расстоянии 100—200 астрономических единиц от Солнца давление солнечного ветра сравнивается с давлением межзвездной среды. Это, собственно говоря, самые внешние границы нашего «дома» — Солнечной системы. Солнечная система движется относительно межзвездного газа со скоростью около 20 км/с, то есть как бы обдувается «межзвездным ветром».

А нам пора вернуться на Землю.



Магнитная стрелка, непреодолимо влекомая к северу, подобна мужу, который блюдет законы.

Козьма Прутков

Что мы знаем...

И так, несмотря на столь значительное расстояние (150 млн. км), мы оказываемся гораздо «ближе» к Солнцу, чем кажется на первый взгляд. Кстати, это связано не только с тем, что непрерывно расширяющаяся солнечная корона простирается до орбиты Земли и дальше. Огромные по сравнению с Землей размеры самого нашего светила тоже имеют немаловажное значение.

Если расстояние от Солнца до Земли оценивать не километрами, а принимать за единицу поперечный размер Солнца, то получится весьма скромная цифра — всего 107!

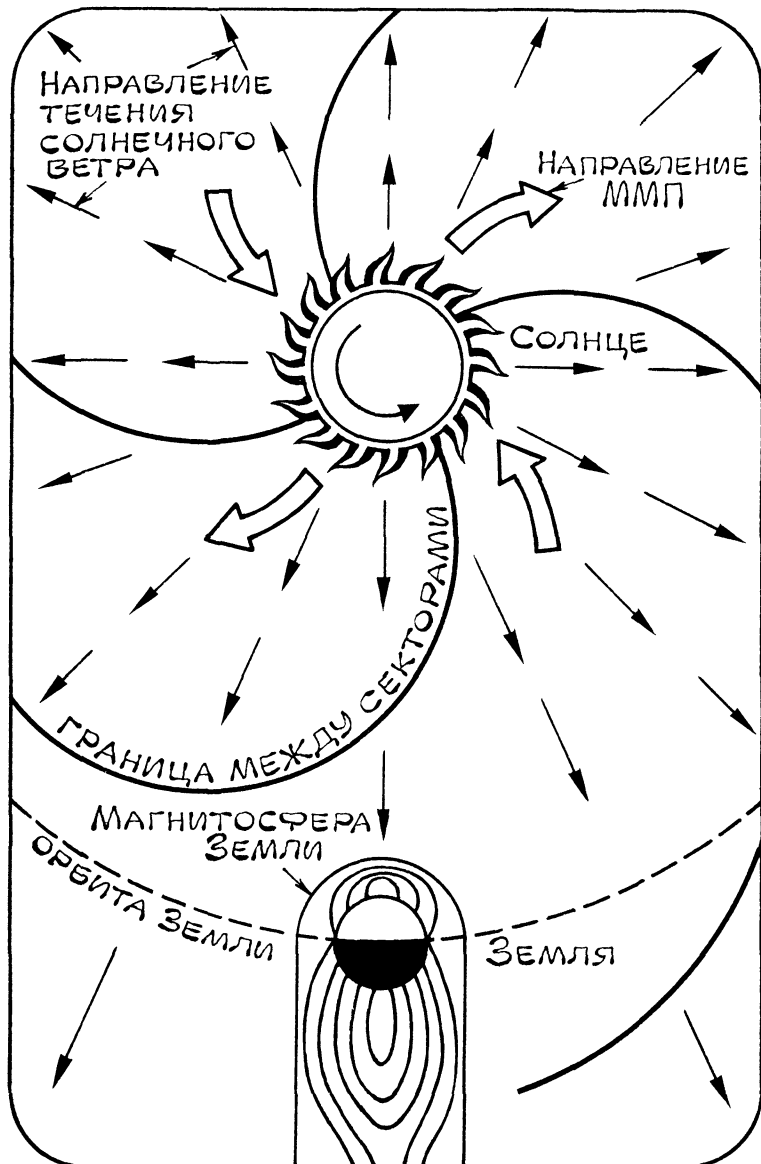
Поток солнечного ветра настигает нашу планету, мирно движущуюся по своей околосолнечной орбите. Космические корабли дали нам возможность измерить его «силу». Такие наблюдения в течение 104 суток проводились, например, на американском космическом корабле «Маринер-2», летевшем к далекой Венере. В период спокойного Солнца в межпланетном пространстве вблизи орбиты Земли наблюдалось всего около пяти протонов в 1 см^3 . Движение этих частиц было направлено от Солнца и имело среднюю скорость около 500 км/с. Во время солнечных возмущений концентрация повышалась до 100 протонов в единице объема, а скорость достигала 1500 км/с!

Мы уже говорили, что магнитное поле и потоки солнечной плазмы неразрывно связаны. Солнечный ветер несет с собой и магнитное поле, вмороженное в плазму. Силовые линии этого поля (правда, довольно слабого) имеют вид вытянутых от Солнца волокон. При этом, поскольку один их конец «прикреплен» к Солнцу, а другой «свободен», то вращение Солнца вокруг своей оси приводит к их закручиванию. Таким образом, силовые линии приобретают вид раскручивающихся спиралей.

Космические ракеты и искусственные спутники Земли установили, что межпланетное магнитное поле, во-первых, существует, а во-вторых, имеет сложную структуру. Оно как бы разделено на несколько секторов. Как правило, их четыре. В двух из них магнитное поле направлено к Солнцу, а в двух — от Солнца. Открытие секторной структуры межпланетного поля произошло совсем недавно, и к этому интереснейшему явлению приковано внимание геофизиков. Оказывается, пересечение Землей границы сектора немедленно отдается эхом и в магнитном поле Земли, и в верхней атмосфере, и во всем околоземном космическом пространстве.

Но давайте по порядку. Итак, мы живем на огромном магните и, хотя непосредственно этого не чувствуем, во многом от него зависим. Магнитное поле Земли — вот первое, что встречает накатывающийся на Землю поток солнечной плазмы. И наблюдающиеся на Земле магнитные бури, полярные сияния, ионосферные возмущения — это проявления сложного взаимодействия солнечного ветра и геомагнитного поля.

Рассмотрим немного подробнее, что нам известно о магнетизме нашей собственной планеты. Человек очень давно заметил, что существуют магнитные материалы.



Солнечный ветер уносит магнитное поле Солнца. Оно имеет спиральную структуру, потому что Солнце вращается. Направление поля в соседних секторах противоположное — то к Солнцу, то от Солнца.

Магнитная стрелка, указывающая направление на север, упоминается уже в древнейших китайских легендах, повествующих о сражениях, происходивших 4 тыс. лет назад. Замечательное свойство магнитной стрелки было известно индейцам, арабам, грекам.

Естественный встречающийся в природе магнит — это минерал черного или коричневого цвета, магнитный железняк. Он образуется в процессе окисления железа при высокой температуре и встречается в таких породах, как базальт, диабаз, гранит. Иногда магнетит попадает в виде огромных залежей. У нас в стране есть гора Магнитная на Южном Урале, целиком состоящая из магнетита. Здесь прекрасная железная руда содержит до 70% железа. Существуют огромные залежи магнетита, создающие так называемые локальные магнитные аномалии, то есть сильные отклонения напряженности и направления земного магнитного поля от нормы.

Примером такого удивительного явления служит сильнейшая в мире Курская магнитная аномалия, представляющая собой два подземных железорудных хребта, расположенных почти параллельно друг другу и простирающихся на сотни километров. Напряженность аномального магнитного поля Курской магнитной аномалии в два-три раза превышает напряженность магнитного поля Земли. Стрелка компаса здесь вместо севера может показывать и на запад, и на восток, а иногда даже и на юг. Интересно, что существуют и такие железные руды, которые магнитную стрелку не притягивают, а отталкивают. В местах таких аномалий магнитное поле Земли не усиливается, а ослабляется. Такая «странная» аномалия расположена, например, в междуречье сибирских рек Ангары и Илима. И эта удивительная загадка природы никем пока еще не разгадана.

Кроме сильных локальных магнитных аномалий существуют более крупные региональные аномалии и весьма обширные по площади мировые аномалии. Самые большие мировые магнитные аномалии находятся в Восточной Сибири, Северной Америке и Южной Атлантике.

Впервые идея о том, что наша планета представляет собой «большой магнит», была сформулирована английским врачом и физиком Уильямом Гильбертом в 1600 г. Его книга «О магните, магнитных телах и о великом магните — Земле» имеет торжественное посвящение: «Я препоручаю основания науки о магните — новый род философии — только вам, истинные философы,

благородные мужи!» Через двести с лишним лет великий Карл Гаусс (кстати, член Российской академии наук), не делая каких-либо предположений относительно причин земного магнетизма, вывел фундаментальное уравнение, позволяющее определить величину магнитного поля Земли в любом месте земной поверхности.

В настоящее время благодаря усилиям многих ученых, инженеров, наблюдателей, которые создали большую сеть магнитных обсерваторий, изобрели тонкие приборы, магнитометры, произвели многолетние измерения на всех материках и океанах, послали магнитометры в космос, люди знают основные особенности геомагнитного поля.

Магнитное поле земного шара практически совпадает с полем, которое создал бы магнит в виде стержня, если его мысленно поместить вблизи центра Земли. При этом его надо расположить на 436 км от центра в сторону Тихого океана и наклонить на 12° к оси вращения Земли. Силовые линии такого гигантского магнита выходят из Северного магнитного полюса, расположенного в южном географическом полушарии, и, пронизав десятки тысяч километров околоземного космического пространства, входят в Южный магнитный полюс в северном полушарии. Один геомагнитный полюс находится на Канадском Арктическом архипелаге, на покрытом вечными льдами острове Элсмир (81° с. ш. и $84,7^\circ$ з. д.), а другой — на ледяном континенте Антарктиды, на Земле Уилкса (75° ю. ш. и $120,4^\circ$ в. д.).

Если бы магнитное поле Земли было совершенно однородным, то на полюсах свободно вращающаяся вокруг своего центра тяжести магнитная стрелка устанавливалась бы вертикально. Но в дело вмешиваются мировые магнитные аномалии, и поэтому указанные нами геомагнитные полюса и те точки, где поле вертикально к земной поверхности, не совпадают. Более того, эти точки блуждают. В январе 1986 г. на австралийском научно-исследовательском судне провели измерения магнитного поля Земли с высокой точностью и установили, что за последние десятилетия Южный магнитный полюс «вышел в море», покинув Восточную Антарктиду и оказавшись в крайней южной области Индийского океана, в точке с координатами $65,2^\circ$ ю. ш. и $139,1^\circ$ в. д.

Анализ магнитного поля показал, что его можно разделить на внутреннее, создаваемое источниками

внутри планеты, и внешнее, связанное с токами в ионосфере, с межпланетным магнитным полем и т. д. На долю внутреннего поля приходится 99% интенсивности, а на долю внешнего — всего 1%, но именно этот процент больше всего интересует исследователей проблемы Солнце—Земля. Внутреннее поле почти постоянно, оно испытывает вариации с периодом в 100 лет и более, а вот внешнее поле испытывает быстрые непрерывные изменения.

Внутреннее поле принято условно делить на поле однородного намагничивания и поле магнитных аномалий. На долю первого приходится 85% интенсивности, поэтому обычно (особенно на больших расстояниях от Земли) принимают, что геомагнитное поле подобно полю однородно намагниченного шара.

Напряженность магнитного поля измеряют в специальных единицах — эрстедах (по имени выдающегося датского физика Х. К. Эрстеда, открывшего в 1820 г. существование магнитного поля вокруг проводника с электрическим током). В современных физических лабораториях удается получить сильнеешие магнитные поля в десятки тысяч эрстед ($1 \text{ Э} = 79,5775 \text{ А/м}$). По сравнению с напряженностью таких полей напряженность геомагнитного поля сравнительно невелика: на магнитных полюсах земного шара — от 0,6 до 0,7 Э, на магнитном экваторе — от 0,3 до 0,4 Э. При оценке переменного геомагнитного поля используют даже стотысячные доли эрстеда — гаммы. Изменение магнитного поля на несколько сот гамм — это уже сильная магнитная буря, охватывающая всю планету. Хотя магнитное поле Земли и невелико, но общий магнитный момент Земли колоссален (из-за громадного объема планеты) и равен $8,9 \cdot 10^{25}$ электромагнитных единиц.

Изучение постоянного или внутреннего геомагнитного поля жизненно важно для таких областей человеческой деятельности, как поиски полезных ископаемых, изучение геологического строения планеты, мореплавание и т. д. Именно поэтому существует сеть магнитных обсерваторий, оснащенных хитроумными приборами, иногда настолько чувствительными, что они способны обнаружить присутствие швейной иглы на расстоянии 1 м от прибора.

На Земле в настоящее время работает более 150 крупных магнитных обсерваторий, в нашей стране их более 20, самая западная — под Львовом, самая

восточная — на Чукотке. Чтобы составить магнитные карты всей планеты, этого, конечно, недостаточно. Поэтому магнитологи работают в основном в экспедиционных условиях во всех уголках земного шара. Сейчас почти все области нашей планеты обеспечены данными геомагнитной съемки. Так, абсолютные магнитные измерения производятся в 300 тыс. пунктах.

Всему миру известна героическая экспедиция 30-х годов, когда четверка отважных — И. Д. Папанин, Е. К. Федоров, П. П. Ширшов и Э. Т. Кренкель — впервые осуществила геофизические исследования в центре Арктики. Е. К. Федоров (впоследствии академик и известный общественный деятель) проводил тогда магнитные наблюдения. Сейчас на дрейфующих ледовых станциях ежегодно работают геофизики всех специальностей. В Антарктике магнитные измерения производятся регулярно, несмотря на ураганные ветры и сверхнизкие температуры, достигающие иногда -70°C .

Морскую магнитную съемку осуществляют специальные исследовательские суда. Так же как и здания магнитных обсерваторий, их надо строить из немагнитных материалов — дерева, бронзы, латуни, стали специальных сортов. Пятнадцать лет плавала по морям и океанам первая советская немагнитная шхуна «Заря». Этот трехмачтовый парусник был оснащен новейшей магнитоизмерительной аппаратурой; 500 тыс. км было пройдено шхуной в Атлантическом, Индийском и Тихом океанах — 500 тыс. км непрерывных измерений!

Специалисты сконструировали и аэромагнитометр, непрерывно измеряющий магнитное поле Земли с самолета. Только так можно произвести магнитную съемку в необозримых пространствах тайги и тундры, в горных цепях, оперативно получить данные над океанскими просторами. Современные аэромагнитометры с помощью электронно-вычислительных машин дают возможность строить подробные и точные магнитные карты.

Но вершиной современной техники магнитной съемки, конечно, являются спутниковые измерения. Искусственный спутник, скажем, известной серии «Космос» успевает сделать полный оборот вокруг земного шара всего за полтора часа. Значит, измерения проводятся в 100 раз быстрее, чем на самолете, и в 2000 раз быстрее, чем со шхуны «Заря». Спутник «Космос-21», например, с 20 января по 22 марта 1970 г. охватил изме-

рениями 94% поверхности земного шара (спутник был выведен на полярную орбиту с наклоном 71° и летал в ионосфере на высотах 280—507 км).

К сожалению, получая огромный выигрыш в скорости измерений, мы существенно проигрываем в возможности детально узнать строение магнитного поля. На высотах ионосферы геомагнитное поле совсем не такое по структуре и величине, как на земной поверхности. Все аномалии, связанные с особенностями геологического строения, быстро затухают с высотой. Поэтому спутниковые измерения отнюдь не заменили другие способы магнитных съемок, а просто дополнили их ценными сведениями о структуре поля в околоземном космическом пространстве.

...и чего не знаем

Да, структуру постоянного геомагнитного поля мы знаем и умеем получать о нем достоверную информацию. Но знаем ли мы, откуда берется внутреннее поле, что вообще порождает магнитные поля космических тел, в том числе планеты Земля? Если отвечать лаконично, то надо просто сказать: «Не знаем!» И не знаем прежде всего потому, что, проникнув в глубины ближнего и даже дальнего космического пространства, человек практически до сих пор не может проникнуть в глубины собственной планеты.

Самые глубокие скважины пробурены на 6—8 км. Это всего лишь восьмисотая доля радиуса Земли. Так, если представить себе Землю в виде глобуса, то в этом случае внутреннее строение планеты мы смогли бы непосредственно «прощупать» только на толщину бумаги, оклеивающей этот самый глобус. Основную информацию о внутреннем строении Земли дает нам изучение сейсмических волн при землетрясении. Ученые даже сравнивают мощные землетрясения с прожектором, освещающим земные недра.

По имеющимся представлениям, внутри Земли имеется ядро радиусом примерно 3500 км, состоящее из расплавленных металлов. Ядро характеризуется высокой температурой (4000—5000 °C) и обладает электропроводностью. Внутри жидкого ядра, по сейсмическим данным, существует твердое субядро радиусом 1300 км.

Ядро Земли окружает мощная оболочка, или мантия, с внешним радиусом примерно 6300 км. Эта оболочка покрыта тонким и твердым слоем толщиной от 50 до 70 км — земной корой. Земная кора состоит в основном из кристаллических пород, и ее строение отличается очень большой неоднородностью. Горы, долины, разломы, выступы — вот что в совокупности составляет верхнюю, соприкасающуюся с атмосферой границу земной коры.

За последние полтора столетия было выдвинуто немало всевозможных гипотез о происхождении земного магнетизма. Они рождались и умирали, как всякие научные гипотезы, не выдержав напора новых экспериментальных фактов. Ведь гипотеза только тогда становится теорией, законом, когда она в состоянии логично объяснить все известные факты и предсказать еще неизвестные. Но такой прогноз должен быть подтвержден экспериментом. Правда, и сейчас есть еще, так сказать, ученые, которые придерживаются принципа: «Не сбивайте меня новыми фактами, я уже все решил!» Но этот принцип не имеет ничего общего с научным подходом к изучению любых явлений.

Серьезно обсуждаются две гипотезы. Одна — так называемая ферромагнитная, а другая — электромагнитная, или динамогипотеза. Ферромагнитная допускает, что геомагнитное поле создается высокомагнитными породами и железом внутри Земли. Возможно, конечно, но здесь есть одна существенная трудность. Дело в том, что многочисленные данные показывают, что по мере удаления от поверхности в глубины Земли ее температура непрерывно повышается. По мнению геофизиков, уже на глубине 30 км температура должна достигать 900—1000 °С. Исследуя свойства магнитов, физики уже давно обнаружили, что при такой высокой температуре магнитные свойства вещества исчезают. Значит, надо предположить, что вся магнитная масса сосредоточена в тонком слое толщиной менее 30 км и состоять этот слой должен из чистого магнетита. А вот это уж совсем неправдоподобно.

Динамогипотеза предлагает наличие механизма, подобного тому, что существует в динамомашинах, вырабатывающих электрический ток. Пусть в какой-то момент имелось слабое магнитное поле. Земля вращается, вращается и жидкое металлическое ядро, и в этом электропроводящем ядре при пересечении им силовых линий

возникает электрический ток. Из-за разности температур движения в ядре могут носить характер конвекции (помните, теплый воздух поднимается вверх, а холодный — вниз) в виде отдельных замкнутых вихрей. Каждый такой вихрь — виток с током — имеет свое магнитное поле. И это магнитное поле будет усиливать первоначальное магнитное поле ядра. Такой процесс самовозбуждения будет продолжаться до тех пор, пока не установится равновесие, при котором неизбежные потери энергии будут сбалансированы энергией вихревых движений. Магнитная гидродинамическая гипотеза в принципе объясняет очень многие закономерности геомагнитного поля. Но и здесь есть пока одна трудность: непонятно, откуда взялось первоначальное, пусть даже слабое, магнитное поле. Да и сколь велика электропроводность ядра? А вот это тоже никто непосредственно не определял.

Современная геофизика пока ничего лучшего предложить не может. Но тем интереснее проводить исследования. Вспомним снова выдающегося физика и математика Анри Пуанкаре: «Догадка предшествует доказательству. Нужно ли указывать, что именно так были сделаны все великие открытия?» Открытия впереди.

Наблюдая за изменениями напряженности магнитного поля во времени, сразу же можно заметить, что эти изменения бывают регулярные — повторяющиеся от суток к суткам — и нерегулярные — резкие, быстрые, неупорядоченные. Первые относят к спокойным суточным вариациям, а вторые — к магнитным возмущениям.

Чувствительная магнитная стрелка никогда не бывает абсолютно неподвижной — она всегда движется то в одну, то в другую сторону. В утренние часы северный конец стрелки движется к востоку, достигает наибольшего отклонения примерно к 8 ч, возвращается обратно, проходит направление на север, днем достигает наибольшего отклонения на запад и так совершает ритмичные колебания с периодом в одни солнечные сутки (24 ч). Величина колебаний (амплитуда) достигает в средних широтах 15—20 угловых минут. Обычно магнитометры измеряют и регистрируют отдельные компоненты напряженности магнитного поля — горизонтальную и вертикальную проекции полного вектора, а также магнитное склонение, то есть угол между географическим меридианом (линией, соединяющей вдоль земной поверхности Северный и Южный географические

полюса) и магнитным меридианом (такой же линией, соединяющей полюса магнитные).

Магнитограммы (так называют магнитные кардиограммы планеты) — основа наших экспериментальных знаний о земном магнетизме. Спокойные суточные вариации выглядят на магнитограммах как плавные кривые. Чаще всего они наблюдаются в годы минимума солнечной активности. Важной характеристикой и даже мерой «магнитной активности» нашей планеты является разность между наибольшими и наименьшими значениями какой-либо (чаще горизонтальной) компоненты поля земного магнита в суточных вариациях. Ее называют амплитудой. Амплитуда суточных вариаций в годы максимума солнечной активности в полтора-два раза больше, чем в годы минимума. Кроме того, магнитное поле меняется летом сильнее, чем зимой, а днем — сильнее, чем ночью.

Нет сомнения, что спокойные суточные вариации обязаны своим происхождением электрическим токам в ионосфере, возникающим под действием воздушных приливов. Концентрация заряженных частиц (а следовательно, и электропроводимость), скорость и направление ветров, как мы знаем, зависят и от времени суток, и от широты, и от сезона, и от солнечной активности. От этих же факторов будет зависеть и сила тока в ионосфере. Естественно, такая зависимость немедленно найдет свое отражение в геомагнитных вариациях. Специальная динамотеория, о которой мы уже упоминали, когда говорили об ионосфере, с успехом объясняет и прогнозирует особенности спокойных суточных вариаций.

Магнитные штормы

Время от времени магнитная стрелка начинает вести себя совершенно необычно — дергается, мечется из стороны в сторону. Такое необычное поведение продолжается несколько часов, а иногда и несколько суток! Магнитограммы в этот период имеют причудливый зигзагообразный вид. Это магнитные бури, часто охватывающие одновременно всю планету. В районах же Арктики и Антарктики, где чаще всего наблюдаются полярные сияния, магнитные бури наиболее сильны и вообще магнитное поле редко бывает спокойным.

Магнитная буря обычно начинается с того, что напряженность магнитного поля резко — или постепенно — увеличивается (начальная фаза), затем магнитное поле становится намного слабее, чем обычно (главная фаза), потом в течение долгого времени идет восстановительный процесс — возвращение к нормальному значению.

Тесная связь магнитных бурь с активностью Солнца была обнаружена уже давно. Сначала заметили, что магнитные бури, особенно сильные, «любят» повторяться каждые 27 дней, иногда два-три раза, с поразительной пунктуальностью. А ведь это как раз соответствует тому времени, которое затрачивает Солнце на полный оборот вокруг своей оси. Затем обнаружилось, что после того, как активная область (скажем, группа пятен) проходит через центральный меридиан Солнца, через сутки-двое на Земле, как правило, начинается магнитное возмущение. А уж мощные хромосферные вспышки рождают такие гигантские магнитные бури, которые вызывают не только бешеную пляску компасных стрелок, но и повреждения линий электропередачи, нарушение телеграфной связи, взрывы высоковольтных трансформаторов.

Магнитные бури всегда сопровождаются полярными сияниями. Во время сильных магнитных бурь сияния наблюдались в Южном Крыму и даже в Африке! В земной коре, металлических предметах, в нефти и газопроводах, системах связи под воздействием электромагнитной индукции наводятся сильные и беспорядочно меняющиеся электрические токи. Эти токи вызывают аварии и помехи в системах телеграфно-телефонной связи.

Существенные изменения происходят и в состоянии ионосферы. Ионосферные и магнитные возмущения — близнецы. В зонах максимальной частоты полярных сияний ионосферные и магнитные бури наступают почти одновременно. А в средних и высоких широтах — на несколько часов позже; такое впечатление, что возмущение в ионосфере движется от приполюсных зон к экватору.

Мы уже говорили о полном прекращении коротковолновой связи на всей освещенной стороне планеты через 8,3 мин после хромосферных вспышек. Это происходит за счет резкого усиления рентгеновского излучения Солнца, сильной ионизации ионосферного слоя *D*

и поглощения в нем энергии электромагнитных колебаний, радиоволн. Спустя 30—40 ч начинает разрушаться слой F_2 — он расширяется, концентрация электронов в нем падает, максимум ионизации смещается вверх, слой становится диффузным, меняется его температура и состав.

Что же, по современным представлениям, рождает ионосферно-магнитные бури и полярные сияния? Общий их виновник — Солнце — был «пойман за руку» давно. Но как же все-таки оно это делает?

Разработкой единой и непротиворечивой теории магнитных возмущений занимались и занимаются многие ученые. И работа эта далеко не закончена. Специалисты говорят, что за все сто с лишним лет, как регистрируют магнитные бури, не было и двух в точности похожих друг на друга! Можно, конечно, говорить об общих закономерностях, которые выявляются на основе статистического анализа данных мировой сети геомагнитных обсерваторий.

Имеются ценнейшие данные измерения магнитного поля, полученные при полетах советских космических ракет к Луне, на космических станциях «Электрон», «Протон», «Прогноз», орбитальных обсерваториях «Салют». Большой вклад в изучение магнитных возмущений внесли американские спутники серии «Эксплорер», прекрасно оснащенные космические станции. Американские «Эксплореры» и советские «Электроны» удачно дополняли друг друга. Одни исследовали приэкваториальную область, другие же — более высокие широты.

Вернемся теперь к началу этой главы. Пусть магнитное поле Земли первым встретило поток солнечной плазмы. Поток «давит» на геомагнитное поле, а упругие магнитные силовые линии нашей планеты стремятся не пропустить «врага», не допустить частицы солнечного ветра к поверхности Земли. И сверхзвуковой поток плазмы начинает обтекать Землю, смыкаясь далеко за ней, на ночной стороне. Но в своем движении он «сжимает» магнитное поле Земли на дневной стороне, напряженность магнитного поля возрастает. Вот и объяснение начальной фазы магнитной бури. Чем выше активность Солнца, тем выше энергия частиц солнечного ветра. Следовательно, такие частицы сильнее «сожмут» геомагнитное поле, «линия фронта» ближе подойдет к Земле, пик на магнитограмме будет выше.

Магнитная бутылка

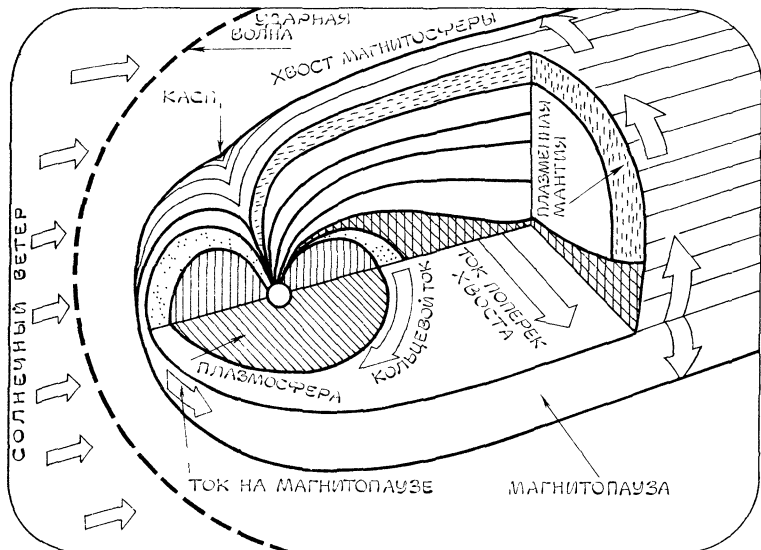
Теоретическое рассмотрение взаимодействия солнечного ветра — движущейся со сверхзвуковой скоростью плазмы — с магнитным полем однородно намагниченного шара привело к совершенно неожиданным и непривычным результатам. Оказывается, геомагнитное поле на больших расстояниях существенно отличается от того поля, которое ранее представляли себе люди. Это вовсе не то симметричное, безгранично распространяющееся во все стороны и убывающее по величине обратно пропорционально расстоянию, возведенному в третью степень, поле, которое характерно для однородно намагниченной сферы.

Геомагнитное поле, по теории, должно быть сосредоточено внутри определенной области — своеобразной полости внутри потока солнечной плазмы. Ее форма определяется из условия равенства магнитного давления внутри полости внешнему давлению солнечного ветра на ее «стенки». Область эта была названа магнитосферой. Вот еще одна «сфера» Земли, на этот раз действительно самая внешняя. За ее границами уже «нет ничего земного», там истинное межпланетное пространство.

Магнитосфера похожа на бутылку или колбу, обращенную дном к Солнцу. Внутри этой магнитной бутылки на расстоянии 10—12 земных радиусов находится Земля. За ней — на ночной стороне — длинное и узкое горлышко или, как его часто называют, хвост магнитосферы. Как далеко уходит в пространство этот хвост, открыта или закрыта магнитная бутылка (то есть замыкаются ли на ночной стороне геомагнитные силовые линии или происходит их пересоединение с силовыми линиями межпланетного магнитного поля), пока точно неизвестно. Во всяком случае, ни один из космических аппаратов, пересекавших хвост магнитосферы, не обнаружил в этом «горлышке» пробки. Может быть открытый хвост магнитосферы простирается на несколько десятков астрономических единиц*.

Во время сильных магнитных бурь граница магнитосферы с дневной стороны приближается к Земле на 4—6 земных радиусов.

* За астрономическую единицу принимается расстояние от Земли до Солнца.



Общая схема магнитосферы.

Конечно, это только схема. На самом деле строение магнитосферы гораздо сложнее. Резкой границы между солнечным ветром и магнитосферой нет. За фронтом ударной волны, возникающей при сверхзвуковом обтекании, имеется обширная переходная область, которая образована частицами солнечного ветра, отраженными от магнитосферы. Если в магнитосфере, с одной стороны, и в плазме солнечного ветра — с другой, поле относительно устойчиво и регулярно, то внутри переходной области поле непрерывно меняется и по интенсивности, и по направлению из-за многочисленных завихрений.

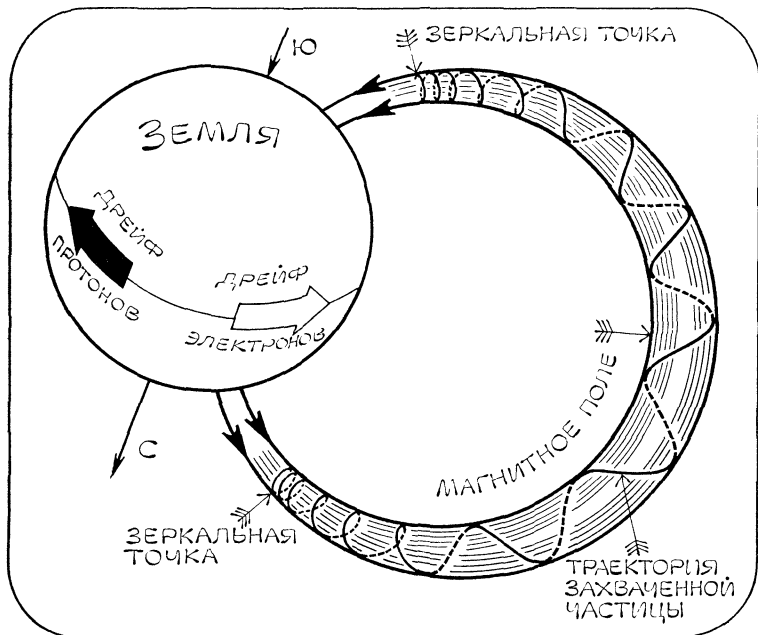
Конфигурация и другие характеристики магнитосферы зависят от свойств солнечного ветра, взаимодействующего с ней, от его состава, концентрации тяжелых и легких частиц, от скорости образующих его частиц, наличия или отсутствия в нем магнитного поля, величины и направления такого поля, а также от того, является ли поток солнечной плазмы турбулентным или спокойным (ламинарным), однороден ли солнечный ветер или порывист. Разные предположения приводят к созданию разных моделей.

Особый интерес представляют так называемые нейтральные точки в магнитосфере, расположенные с утренней и вечерней стороны Земли. Силовые линии геомагнитного поля как бы расходятся здесь — одни замыкаются с дневной стороны, а другие уходят в хвост магнитосферы. В районе нейтральных точек находятся своеобразные «щели» в магнитосфере. Эти области часто называют английским словом «касп» (cusp), что означает воронкообразную структуру, через которую вдоль силовых линий возможно непосредственное проникновение плазмы солнечного ветра вплоть до верхней атмосферы. Проекция этих областей на поверхность Земли почти совпадает с зоной полярных сияний, с «овалом сияний» вокруг геомагнитных полюсов. Пока армада солнечных частиц обтекает Землю, часть «пришельцев» просачивается в магнитосферу и захватывается силовыми линиями геомагнитного поля. Какое-то число частиц, видимо, может попасть в магнитосферу и через ее открытый хвост.

Для заряженных частиц, протонов и электронов магнитосфера становится огромной ловушкой. Как ведут себя частицы-пленники? Это зависит от того, с какой скоростью и под каким углом к геомагнитному полю, то есть к силовой линии, частица влетела в магнитосферу. Неумолимые законы электродинамики заставляют частицу участвовать сразу в трех видах движения. Ее траектория описывается очень сложной системой уравнений, куда входят десятки переменных. Схематически эту пляску частиц внутри магнитной ловушки можно себе представить следующим образом.

Каждая заряженная частица, попадающая в магнитное поле под каким-то углом к силовой линии, обязана перемещаться вдоль этой силовой линии, вращаясь вокруг нее по спирали, как бы «наматываясь» на силовую линию. Радиус такой спирали тем больше, чем тяжелее частица. Протон — ядро водорода — в 1840 раз тяжелее электрона, во столько же раз будет для него больше и радиус витка спирали. В то же время чем сильнее напряженность магнитного поля, тем уже петля, «навиваемая» частицей на силовую линию.

Магнитное поле растет по мере приближения к полюсам. Следовательно, на концах силовой линии, ближе к Земле, радиус спирали уменьшается, а в районе экватора, где силовая линия пролегает далеко от Земли, увеличивается. Когда частица вращается по спирали



По спирали вокруг силовой линии, из полушария в полушарие между зеркальными точками и вдоль широты вокруг Земли — таков сложный путь заряженной частицы, ставшей «пленницей» магнитосферы.

вокруг силовой линии, угол между направлением ее движения и силовой линией постоянно изменяется — по мере приближения к Земле он постепенно увеличивается и, наконец, становится равным 90° , то есть частица движется под прямым углом к геомагнитному полю. И вот тут наступает «отражение» — частица меняет направление своего поступательного движения и, все так же вращаясь по спирали, спешит обратно в другое полушарие.

Бесчисленное множество раз пролетает частица по огромной дуге от одной «зеркальной точки» до другой, секунды нужны ей, чтобы попасть из одного полушария в другое. При этом надо иметь в виду, что протоны и электроны, имея противоположные по знаку заряды, наматываются на силовую линию в разных направлениях.

Вращение по спирали и возвратно-поступательное движение между зеркальными точками вдоль магнитного меридиана — это два вида движения. А было обещано

три. Третий вид — постоянное смещение, дрейф вокруг Земли вдоль магнитных параллелей. Почему? Дело в том, что, как мы уже говорили, напряженность поля с высотой убывает. Когда частица, навиваясь на силовую линию, взлетает по дуге вверх, ее траектория более пологая, а когда спускается к зеркальным точкам, — более крутая.

Из-за неоднородности геомагнитного поля на каждом маршруте частице приходится несколько смещаться перпендикулярно полю: протоны «ползут» с востока на запад, а электроны — с запада на восток. Этот процесс создает вокруг нашей планеты гигантский кольцевой ток, токовый слой, оболочку. А всякий ток должен обладать собственным магнитным полем.

Магнитное поле кольцевого тока, который мы только что описали, направлено противоположно горизонтальной составляющей геомагнитного поля. Значит, сложение этих полей должно привести к уменьшению напряженности общего поля. Позвольте, но ведь именно это мы и наблюдаем в период главной фазы магнитной бури!

Но почему же буря, раз начавшись, не продолжается вечно? Почему ток затухает? Да потому, что движение заряженных частиц внутри магнитосферы происходит не в абсолютной пустоте, здесь рассеяны во множестве атомы и молекулы различных газов и число их быстро возрастает по мере приближения к Земле.

Зеркальные точки находятся в полярной ионосфере на высотах области E . Сталкиваясь здесь с частицами воздуха, захваченные частицы теряют энергию, отдают свой заряд нейтральным частицам, гибнут и выпадают из общего хоровода. Идет время, ряды «пленных» реддеют, уменьшается сила кольцевого тока и его магнитное поле. А магнитное поле Земли возвращается к начальному значению, и буря затухает.

Пленники магнитосферы

«Высыпание» энергичных частиц в полярную ионосферу не происходит бесследно. Небосвод озаряют «холодные зори» полярных сияний, ионосфера, получая дополнительную энергию, разогревается. Меняется температурный режим, а следовательно, образуется система ветров. Ветры? Значит, будет меняться состав ионосферы, волна возмущения покатится из зон сияний

в умеренные широты. Изменится состояние ионосферы — изменятся и условия распространения радиоволн. Короче говоря, приводится в движение целая цепочка геофизических явлений.

А с чего все началось? Со встречи потока солнечной плазмы с геомагнитным полем. Или еще раньше — с солнечной активности.

Солнечная энергия, которая передается через межпланетную среду и связана с «пульсирующими» потоками частиц солнечного ветра, прорывающихся в земную магнитосферу, и вариациями интенсивности и знака межпланетного магнитного поля, большей частью попадает в высокие широты, в авроральные зоны. Эта энергия достигает даже ионосферы. При прямом вторжении электронов и протонов в атмосферу во время полярных сияний и солнечных вспышек образуется тепло.

Электрические токи, текущие в ионосфере, тоже вызывают ее нагрев (вспомните, как нагревается спираль в электроплитке при прохождении по ней электрического тока). Наконец, быстро движущиеся тяжелые ионы постоянно сталкиваются с нейтральными частицами и передают им свою энергию — дополнительный механический импульс.

Во время геомагнитных возмущений выпадающие частицы и электрические токи переносят настолько большое количество энергии в высокоширотную область, что в результате полностью меняется глобальная картина ветров в термосфере, или система общей циркуляции. На ночной стороне устанавливаются сильные ветры, направленные к экватору. В полярной ионосфере генерируются атмосферные волны, которые тоже несут энергию к экватору.

Электрические поля существуют на всех высотах в атмосфере и тоже дают существенный вклад в энергетический бюджет термосферы. Особенно велико количество этой энергии в области магнитосферной полярной щели (или каспа), где сильные электрические поля существуют постоянно.

Электрические поля с больших высот могут просачиваться даже на уровни стратосферы и вызывать перераспределение глобального атмосферного электрического потенциала. С другой стороны, атмосферные электрические поля, связанные с грозами, влияют на поля и токи в ионосфере. Это просачивание электрических

полей вниз и вверх — один из механизмов взаимодействия процессов в верхней и нижней атмосфере.

Надо понять, что магнитосфера как часть космической плазмы, конечно, составляет с ионосферой единую систему. Концентрация электронов выше максимума области F сначала довольно быстро убывает, но по мере того, как начинают преобладать легкие ионы (протоны и в небольшом количестве ионы гелия), этот процесс постепенно замедляется. В среднем в низких и средних широтах уже на высоте 1000 км электронов в 100 раз меньше, чем в главном максимуме ионизации, а на высоте одного радиуса Земли — в 1000 раз меньше. Точно установить, где кончается внешняя ионосфера и начинается магнитосфера, невозможно. Вдоль магнитных силовых линий электроны перекачиваются из одного полушария в другое, из магнитосферы — в ионосферу и обратно.

Во время полярных сияний могучие потоки энергичных электронов и ионов из магнитосферы вторгаются в полярную ионосферу и вызывают значительную ионизацию, правда, неоднородную, клочковатую. Суточное вращение Земли вместе с геомагнитным полем увлекает за собой и магнитосферную плазму вплоть до высот 15—30 тыс. км. А если посмотреть выше, то можно заметить, что эта плазма уже перестает участвовать во вращении Земли, она «отрывается» и движется от хвоста магнитосферы к дневной стороне.

Такое движение поперек геомагнитного поля по аналогии с движением неравномерно нагретой жидкости или газа называли магнитосферной конвекцией. Магнитосферная конвекция обусловлена тем, что в магнитосфере, обтекаемой солнечным ветром, возникает крупномасштабное электрическое поле.

Электрическое поле магнитосферы передается в полярную ионосферу, в область F по крайней мере, и здесь тоже вызывает конвекцию плазмы, почти горизонтальный перенос ионов поперек магнитного поля. В обычных условиях плазма в полярной шапке проносится от дневного полярного каспа до ночной части овала полярных сияний примерно за час. За столь короткое время заряженные частицы не успеют исчезнуть в процессах рекомбинации, и получается, что над полностью неосвещенной полярной шапкой глубокой зимней полярной ночью тянется «язык» повышенной кон-

центрации ионов и электронов. Именно это обстоятельство позволяет поддерживать коротковолновую радиосвязь с полярными станциями даже в условиях длинной полярной ночи, когда обычные источники образования ионосферы «выключены».

Итак, плазма в магнитосфере утекает от хвоста к лобовой поверхности — магнитопаузе. В результате концентрация частиц в этой области становится в десятки раз меньше, чем во внутренней зоне, которая вращается вместе с Землей и ее атмосферой. В эту внутреннюю зону магнитосферное электрическое поле почти не проникает, и плазма там может накапливаться в течение многих суток. Область резкого спада концентрации плазмы в магнитосфере называют плазмопаузой.

Плазмопауза ограничивает внутреннюю область магнитосферы, заполненную сравнительно плотной плазмой — более 100 см^{-3} . Легкие ионы вдоль силовых линий «испаряются» из полярной ионосферы, и этот восходящий поток легких ионов (водород и гелий) часто называют полярным ветром.

В возмущенных условиях и более тяжелые ионы кислорода, азота, оксида азота поднимаются в магнитосферу и уносятся в ее шлейф. Эксперименты подтвердили, что ионосферные «пажи» — ионы, несущие шлейф «принцессы» — магнитосферы, обнаруживаются даже в районе орбиты Луны. Значит, действительно, плазма ионосферы и плазма магнитосферы обмениваются частицами и, по существу, неразделимы.

Это особенно хорошо видно для полярной ионосферы. Представим себе цепочку приборов, расположенных вдоль меридиана и одновременно измеряющих электронную концентрацию в области F ионосферы. Проследив, как меняется электронная концентрация от средних широт к полюсу, мы могли бы увидеть, что полярная ионосфера отделена от среднеширотной ионосферы своего рода «провалом», «канавой», то есть областью малых значений электронной концентрации. Провал имеет форму не замкнутого с утренней стороны кольца вокруг полюса и существует почти круглые сутки, его нет только начиная с утренних часов и до полудня. Все его свойства — глубина, ширина, протяженность по долготе, движение к полюсу или экватору — тесно связаны с процессами в магнитосфере, с положением плазмопаузы, с высыпанием частиц, с электрическими полями и токами.

Теоретические представления и расчеты о самом факте существования магнитосферы, о ее границах и поведении, о захваченных магнитным полем частицах и их траекториях — все это, разумеется, требует экспериментальной проверки. Под словом «эксперимент» физики часто подразумевают эксперимент в лаборатории.

Уильям Гильберт свои опыты по магнетизму проводил с маленьким шаром, выточенным из магнетита. Он ласково назвал этот шарик «террелла» (от латинского Земля). Позднее замечательный экспериментатор, норвежский физик Кристиан Биркеланд снова обратился к игрушечной Земле — террелле, но уже в виде сферического электромагнита. Модель помещалась в большую вакуумную камеру и облучалась потоком электронов. Чтобы можно было видеть, где электроны попадают на поверхность терреллы, ее поверхность покрыли специальным фосфоресцирующим веществом, способным светиться под действием заряженных частиц. Биркеланд наблюдал и свечение в виде спиралей вокруг магнитных полюсов, и огибание терреллы электронами несколько раз перед тем, как они «выпадали» на ее поверхность, и даже перемещение частиц от полюса к полюсу.

Опыты Биркеланда, которые потом повторялись многими учеными с использованием более совершенной техники, стимулировали теоретические расчеты траекторий отдельных электрически заряженных частиц, внедряющихся в магнитное поле Земли. Соотечественник Биркеланда Карл Штермер многие годы потратил на вычисление этих орбит. Среди них были весьма сложные, в том числе и круговые, лежащие в плоскости магнитного экватора. Именно этот кольцевой ток, текущий с запада на восток, стал считаться основной причиной возникновения магнитной бури в навсегда вошедшей в историю науки теории магнитных бурь и полярных сияний Биркеланда — Штермера. Пусть потом эта теория умерла, не выдержав натиска новых фактов и физических соображений, идеи, лежащие в ее основе, были правильными. А когда советские и американские ученые открыли пояса радиации, окружающие Землю внутри магнитосферы, то оказалось, что частицы высоких энергий, частицы солнечных космических лучей, движутся именно по штермеровским траекториям, рассчитанным «на кончике пера» полвека тому назад.

Современная теория магнитных бурь и полярных сияний связана с именами английских ученых С. Чепмена и В. Ферраро, американского физика С. Ф. Зингера, японца С. И. Акасофу, советских физиков Я. И. Фельдштейна, М. И. Пудовкина, Е. А. Пономарева и многих других исследователей, по кирпичику складывающих величественное здание человеческих знаний.

Алерт!

Можно, конечно, продолжать лабораторные эксперименты, используя разные конфигурации магнитного поля, различные по составу и энергии потоки плазмы, применяя большие вакуумные камеры и все более остроумные системы регистрации и обработки данных измерений. Во многих лабораториях мира такие опыты ведутся.

Но ведь можно сделать лабораторией всю нашу планету! Для этого нужно, чтобы вся сеть наземных обсерваторий работала по единым международным программе и методике. Нужно, чтобы космические аппараты запускались по единому плану в заранее назначенное время в те точки космического пространства, которые ученые считают наиболее важными для разгадки тайн солнечно-земных связей.

Ясно, что для понимания физических и химических процессов, контролирующих сложное поведение солнечно-земного пространства, необходимы хорошо спланированные и организованные эксперименты. Солнечно-земные исследования носят поистине глобальный характер, и здесь научное сотрудничество на национальной и интернациональной основе абсолютно необходимо.

Начало эффективного международного сотрудничества можно отнести ко времени проведения Первого Международного полярного года, когда более 100 лет тому назад несколько государств предприняли объединенные усилия для исследования погодных условий в Арктике. Это научное мероприятие способствовало развитию международного сотрудничества в глобальном масштабе. Почти 50 лет спустя, в период 1932-33 г., когда в представлениях о верхней атмосфере уже произошла революция, был проведен Второй Международный полярный год.

После второй мировой войны стала быстро совершенствоваться ракетная техника, которую можно было применить для исследования верхней атмосферы. Ракеты же проложили путь к использованию космических аппаратов. А ведь еще в конце прошлого века для измерений в атмосфере применялись обыкновенные воздушные змеи!

И здесь мы вплотную придвинулись к проблеме изучения и практического использования космического пространства.

По решению Международного совета научных союзов и правительств ряда стран 1 июля 1957 г. началось крупнейшее научное предприятие, какого еще не знала история науки,— Международный геофизический год (МГГ). В нем приняли участие десятки государств, в том числе наша страна. Около 30 тыс. ученых по заранее согласованному плану 18 месяцев проводили обширные исследования во всей толще атмосферы, на суше, в морях и океанах, в космосе. В первый же год проведения МГГ было запущено 116 исследовательских ракет!

Чтобы изучить весь комплекс геофизических процессов, ученые выбрали период максимума солнечной активности. Надо сказать, что Солнце не поскупилось и отметило МГГ мощными магнитными бурями, полярными сияниями, ионосферными возмущениями и т. д. Геофизики всех стран получили богатейший материал, позволивший глубже проникнуть в сущность сложного комплекса солнечно-земных связей. Выдающимся событием явился в тот период запуск в СССР первого искусственного спутника Земли (4 октября 1957 г.), а позже — запуск спутников в США.

Подводя итоги МГГ, руководитель советских исследований академик И. П. Бардин писал участникам работ:

«С последним ударом часов в полночь 31 декабря окончился период наблюдений по программе Международного геофизического года — это славная полоса в жизни науки, когда ученые 65 стран впервые в истории объединили свои усилия для исследования планеты в целом. Это наступление на тайны природы велось советскими учеными в едином строю с коллегами всех стран, и сегодня мы можем с гордостью сказать, что отечественная наука, как ей и подобает, занимала во время МГГ одно из ведущих мест. В самых отдаленных уголках планеты трудятся наши метеорологи и магнитологи, астрономы и ионосферисты, гравиметристы и гляциологи, океанографы и сейсмологи, специалисты по полярным сияниям и космическим лучам.

Благодаря их повседневному будничному труду, благодаря их упорству, а временами и героизму наука получила в свое распоряжение бесценный свод фактов о жизни Земли».

Однако чем глубже ученые зарывались в горы материалов МГГ, тем яснее становилось, что необходим так называемый контрольный эксперимент. В самом деле, если есть информация о каком-нибудь явлении в условиях необычных (а период МГГ был необычным — то были годы максимума солнечной активности, притом совершенно необыкновенного по своей интенсивности), то, чтобы уверенно судить об эффекте, надо посмотреть, как выглядит явление в условиях обычных (в нашем случае при спокойном Солнце, в условиях минимума солнечной активности).

Следовательно, программу МГГ надо было повторить в годы минимума — 1964 и 1965. Такое решение было принято Международным геофизическим комитетом, поддержано Организацией Объединенных Наций, и начался новый эксперимент — Международный год спокойного Солнца (МГСС). Все ведущие в научном и техническом отношении государства, а также многие развивающиеся страны подняли у себя флаг науки о Земле и Солнце.

К этому времени был накоплен ценный опыт МГГ по научно-организационным проблемам, существенных успехов достигло научное приборостроение, окрепла ракетно-космическая техника. Как всегда, большое внимание уделялось полярным областям, особенно ледяному Антарктическому континенту. Там появилось более десятка научных поселков (бойкие журналисты немедленно объявили, что Антарктида занимает первое место среди всех частей света по процентной численности населения с высшим образованием).

В Токио, Москве, Париже и Вашингтоне были организованы центры международной «Службы мировых дней», центры оповещения и прогнозов. Мировые дни — это такие периоды, когда геофизики всех стран по специальному сигналу с большей частотой и интенсивностью, чем обычно, проводят измерения и наблюдения. Сигнал этот подается тогда, когда происходит солнечная вспышка или ожидается магнитная буря, предстоит солнечное затмение или наблюдается внезапное повышение температуры в стратосфере.

Информация от солнечных и геофизических обсерваторий поступает в региональные центры, а оттуда —

в Главный прогностический центр в Вашингтоне. Этот центр, посоветовавшись с экспертами из всех регионов, объявляет научную тревогу — «Геоалерт!». Вот как красочно описывали этот процесс авторы книги «Внимание! Солнце спокойно»:

«Австралийский астроном, встретив восход, обнаружил, что на Солнце, кажется, начинается вспышка. Солнце «шествует» на запад, и астрономы разных стран настороженно задают ему вопросы. Телеграммы обо всем замеченном слетаются по телетайпной сети специальной Службы оповещений в региональные центры, а оттуда — в Мировой прогностический центр МГСС под Вашингтоном. Вот сигналы из Иркутска, а вот из Дели... Вспышка ширится. Вот подтверждение из обсерватории Кейптаун, а вот из Сакраменто-Пик, Нью-Мексико...

Алерт! Научная тревога! — проносится по телетайпной сети из Вашингтона. Первыми о ней узнают центры огромных регионов, на которые разделена наша планета, а среди них наш Евразийский центр под Москвой. У него есть два подцентра — один в Праге, другой в Иркутске. Из региональных центров известие доходит, наконец, до всех станций и обсерваторий, рассыпанных по всем континентам Земли.

Алерт! И, подчиняясь всемирному сигналу, гигантская труба Крымской астрофизической обсерватории запечатлевает на киноплёнку сверкающий диск Солнца. Алерт! И в перуанских Кордильерах специалист по ионосфере с особым вниманием принимает к экрану своего прибора. Алерт! И якутский исследователь космических лучей спешит вовремя запустить в хмурое арктическое небо шар-пилот со счетчиками частиц, летящих к нам из Вселенной. Алерт! И станции полярных сияний в Арктике и Антарктиде переводят свои фотографические камеры на убыстренный режим съемки.

Так «нервная система» МГСС, опутывающая нашу планету, приводит в действие всю огромную армию исследователей на двух тысячах станций».

Программы МГГ и МГСС стали значительным шагом вперед в деле экспериментальной проверки физических идей, лежащих в основе солнечно-земной физики. Они обогатили науку крупными открытиями в области исследования околоземного космического пространства.

Космическая ракета «Луна-1», автоматическая межпланетная станция «Луна-2», американские ракеты «Пионер-1» и «Пионер-2», спутники «Эксплорер-6» и «Эксплорер-8», советские «Электрон-2» и «Электрон-4» и многие другие космические аппараты произвели прямые измерения магнитного поля на расстояниях от двух земных радиусов до нескольких десятков радиусов Земли. Граница магнитосферы была «нащупана» непосредственно в космосе. Стало ясно, что во время возмущений она действительно ближе к Земле. Обнаружен был и «хвост» магнитосферы.

Очень впечатляющим было открытие постоянно существующих вокруг нашей планеты радиационных зон или поясов. Эти зоны заполнены высокоэнергичными частицами в таких количествах, что это становится уже опасным не только для космонавтов, но и для материалов, используемых на космических аппаратах. Под действием такой жесткой радиации выходят из строя, например, полупроводниковые солнечные батареи, вырабатывающие электроэнергию для всей научной аппаратуры и системы жизнеобеспечения корабля, разрушаются органические материалы, используемые для «просветления» оптики.

Радиационные пояса были открыты независимо американскими и советскими физиками в процессе изучения космических лучей с помощью счетчиков частиц, помещенных на искусственные спутники Земли. Оказалось, что громадные области околоземного пространства — почти вся магнитосфера Земли — заполнены заряженными частицами разных энергий, захваченными и прочно удерживаемыми геомагнитным полем. Существуют две кольцевые зоны (или два пояса) радиации — внутренняя, расположенная ближе к Земле на расстоянии 7—12 тыс. км от ее центра, и внешняя, расположенная на расстоянии 15—20 тыс. км.

Нижняя кромка внутреннего радиационного пояса в западном полушарии проходит всего в 500 км над поверхностью Земли. Пояс проходит над Центральной и Южной Америкой, Африкой, Южной Азией, Австралией и Океанией. И как ни странно, местоположение этой зоны очень мало зависит от солнечной и магнитной активности.

Внешняя зона в поперечном разрезе — не кольцо, а два полумесяца, упирающихся «рогами» в зоны полярных сияний. Поэтому на экваторе нижняя граница этой зоны расположена высоко — около 12 тыс. км от поверхности планеты, а в Арктике и Антарктике — очень низко, на высотах 250—500 км. И состав, и энергия, и концентрация частиц во внешней зоне, в отличие от внутренней, очень чувствительны к капризам «солнечной и магнитной» погоды.

Частицы в радиационных поясах должны перемещаться по тем законам, которые мы описали при рассмотрении магнитных бурь: по спирали вокруг силовых линий, вдоль магнитных меридианов между зеркальными точками и вокруг планеты вдоль магнитных параллелей.

лей. Точки земной поверхности, лежащие на одной магнитной силовой линии, называют сопряженными. Ясно, что геофизические явления, происходящие в таких точках, должны быть тесно связаны. Это в теории. А на практике?

В один из безоблачных августовских дней 1958 г. над маленьким коралловым атоллom — островком Джонстон в Тихом океане — поднялось грозное облако ядерного взрыва. Американцы взорвали атомную бомбу на высоте около 70 км. Секретнейшее испытание. И вдруг в южном полушарии в 3,5 тыс. км от острова Джонстон, в районе островов Самоа, в тропическом небе вспыхнуло яркое полярное сияние! Архипелаг Самоа и остров Джонстон — сопряженные области. Заряженные частицы, рожденные атомным взрывом, устремились вдоль силовой линии в противоположное полушарие и вызвали сияние, полностью подтвердив теорию.

Атомные взрывы в атмосфере создают искусственные зоны радиации, которые живут годами! Это подтвердили спутниковые измерения после операции «Аргус» (три взрыва в Южной Атлантике на высоте 480 км) и «Старфиш» («Морская звезда») в Тихом океане. Так, атомные взрывы в атмосфере (ныне, правда, уже запрещенные) не только отравляли атмосферу и создавали опасность для жизни и здоровья людей на Земле и в космосе, но и искажали естественную картину состояния магнитосферы, мешали науке.

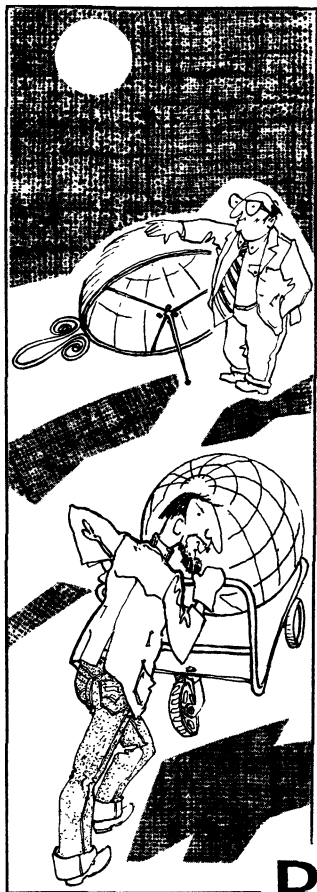
Радиационные зоны во многом еще останутся загадочной областью. Тайна проникновения и, главное, мощного ускорения заряженных частиц пока полностью не раскрыта. И теоретики, и экспериментаторы упорно работают над этими проблемами. Не так давно проводился, например, советско-французский эксперимент АРАКС. В этом эксперименте возбуждалось искусственное полярное сияние над поселком Согра в Архангельской области. Электроны пришли сюда из южного полушария от пучка частиц небольшого исследовательского ускорителя, поднятого в ионосферу геофизической ракетой над французским островом Кергелен в Индийском океане, близ Антарктики.

В 1976—1979 гг. были проведены международные исследования магнитосферы, в 1979—1981 гг. организован Год солнечного максимума, в 1982—1985 гг. осуществлена Международная программа исследования средней атмосферы, а с 1990 г. стартует гигантский

проект STEP (Solar-Terrestrial Energy Program) — исследования переноса энергии в системе Солнце—Земля.

Теперь уже солнечно-земная физика имеет своего покровителя среди международных научных организаций — Специальный комитет по солнечно-земной физике, планирующий, организующий авторитетный орган. Кроме того, физика Солнца, магнитосферы и ионосферы находится в зоне активной деятельности Международного астрономического союза, Международного союза геодезии и геофизики, Международного научного радиосоюза, Комитета по космическим исследованиям и многих других международных ассоциаций и сообществ.

Обмен данными, их совместный анализ, симпозиумы, конференции и семинары, обмен визитами ученых из различных стран — это повседневный рабочий ритм солнечно-земной физики. И здесь мирное сосуществование государств — насущная необходимость ее развития. Солнечно-земная физика, ее лидеры и рядовые исследователи активно способствуют международному деловому сотрудничеству. И нет сомнений, что скоро мы будем свидетелями еще многих удивительных открытий.



Признаюсь, я испытываю при всяком для меня новом применении радио священный ужас и восхищение перед этим сказочным изобретением...

Эльза Триоле

Путешествия в эфире

В

от уж чем сейчас никого не удивишь, так это радиосвязью!

Любой школьник бойко расскажет, что с помощью радиоволн люди разговаривают, находясь за тысячи километров друг от друга, смотрят в Москве или Иркутске прямые телевизионные репортажи из Америки, видят, что происходит на Луне, прощупывают поверхность Венеры и Марса.

Человек научился создавать электромагнитные колебания (радиоволны), зашифровывать информацию (звук или изображение) таким образом, что она просто становится особенностью самих радиоволн, заставляя радиоволны переносить эту информацию в желаемом

направлении и на необходимое расстояние. В нужном месте специальный прибор улавливает радиоволны и извлекает зашифрованную в них полезную информацию. Так, в принципе, работает любая радиолиния. Она всегда состоит из трех главных элементов — радиопередатчика, радиоприемника и находящейся между ними среды распространения волн.

Роль радиопередатчика понятна — в нем, собственно говоря, и рождается радиоволна. Сердцем любого передатчика является «колебательный контур» — радиотехническое устройство, которое создает быстрое периодическое изменение во времени силы электрического тока, протекающего в элементах контура. Поскольку электрический ток обладает магнитным полем, столь же быстро меняется и само магнитное поле. Можно сказать, что радиопередатчик перерабатывает подводимую к нему электрическую энергию постоянного или переменного тока в энергию незатухающих электромагнитных колебаний.

Устройство для излучения радиоволн в пространство называется передающей антенной. Если антенна излучает равномерно во все стороны, она называется ненаправленной. Но чаще всего в практике радиосвязи применяются такие антенны, которые почти всю энергию излучают внутри узкого конуса, ось которого имеет определенную направленность.

Незатухающие электромагнитные колебания, вырабатываемые радиопередатчиком, естественно, имеют определенную частоту (число колебаний в секунду) и жестко связанную с частотой длину волны. Это значит, чем выше частота, тем меньше длина волны, тем волна «короче». Скорость радиоволн в пустоте равна 300 тыс. км/с. Частота радиоволн измеряется в особых единицах — герцах (в честь физика Генриха Герца). Одно колебание в секунду равно 1 Гц.

Электромагнитные колебания могут иметь очень высокую частоту, например свет — это тоже высокочастотные электромагнитные колебания. Радиоволнами называют только такие электромагнитные волны, частота которых меньше чем $3 \cdot 10^5$ млн. Гц, а следовательно, длина волны больше 1 мм.

Радисты разделили радиоволны на отдельные участки или диапазоны. Впоследствии выяснилось, что условия путешествия радиоволн в пространстве очень различны для волн разной длины. Первый диапазон —

это сверхдлинные волны, волны-гиганты, длиной свыше 10 000 м.

Следующий диапазон — просто длинные волны, от 10 000 до 1000 м. Длинные волны — настоящие ветераны радиосвязи. Именно они применялись на заре радиотехники. Да и сейчас на длинных волнах передают радиовещательные программы, метеорологические сводки, сигналы для ориентировки судов. Частота таких волн от 30 до 300 кГц.

Третий диапазон образуют средние волны. Их длина составляет от 1000 до 100 м, а частота — от 300 кГц до 3 МГц.

Четвертый диапазон получил название коротких волн. В нем сгруппированы волны длиной от 100 до 10 м.

Последний диапазон — ультракороткие волны, или сокращенно УКВ. Сюда входят волны длиной меньше 10 м — метровые, дециметровые, сантиметровые, миллиметровые. Ясно, что частота этих волн превышает 30 млн. колебаний в секунду, то есть 30 МГц, поэтому их часто называют еще колебаниями СВЧ — сверхвысокочастотными. Именно УКВ широко применяются для передач телевизионных программ, в радиолокации, радиоастрономии, космической радиосвязи.

Незатухающая волна, рождающаяся в генераторе радиопередатчика, выполняет роль «извозчика», она должна переносить информацию. Такое у нее и название в радиотехнике — «несущая». Вся информация «грузится» на несущую волну в особом блоке передатчика — модуляторе. Модулятор преобразует звук или изображение в электромагнитные колебания (как правило, низкой частоты) и накладывает их на несущую частоту. Именно такая «промодулированная» волна излучается антенной в пространство.

В месте приема происходит обратный процесс. Приемная антенна «извлекает» из пространства промодулированную радиоволну, преобразует энергию радиоволн в энергию электромагнитных колебаний приемного колебательного контура. Этот контур находится в радиоприемнике. Здесь же радиоприемник выделяет из принятых колебаний те, которые возбуждаются нужным нам радиопередатчиком, усиливает и демодулирует их, то есть отделяет модулирующие колебания низкой частоты от высокочастотных несущих колебаний. Модулирующие колебания после их усиления подаются на воспроизво-

дящее устройство — телефон, громкоговоритель, экран телевизора и т. п.

Таким образом, цепочка радиосвязи выглядит так: звук (изображение) — микрофон (телевизионная камера) — радиопередатчик — среда распространения — радиоприемник — телефон (телевизор) — звук (изображение). Скорость радиоволн настолько велика, что они способны за одну секунду семь раз обогнуть земной шар. Радиотехника развивается очень стремительно, быстро совершенствуются средства передачи и радиоприема, колоссально возрастают технические возможности быстрой и качественной передачи огромного количества самой разнообразной информации.

Однако существует такое звено, которое техническим усовершенствованиям не поддается и живет своей собственной, почти не подвластной нам жизнью. В то же время именно оно во многом определяет качество радиосвязи. И это звено — среда распространения, то есть почва, вода, атмосфера или космическое пространство. Специальная отрасль науки — распространение радиоволн — изучает влияние характеристик внешней среды на условия радиоприема.

Практически перед инженером, проектирующим радиолинию, всегда стоит вопрос, как обеспечить качественную передачу заданного объема информации между корреспондентами (один из них может находиться в подземной шахте, а другой — в районе Венеры или Марса) с заданной скоростью и надежностью. Прежде всего надо понять, в какой среде будут распространяться радиоволны, чтобы правильно выбрать диапазон рабочих волн. А для этого надо знать законы распространения волн.

В первые годы возникновения радиосвязи предпочтение отдавали длинным волнам. Считалось, что радиоволны распространяются, так же как и свет, то есть по законам оптики. А свет распространяется прямолинейно, и если световой луч способен обогнуть какой-либо предмет, расположенный на его пути, то только в том случае, когда размеры предмета сравнимы с длиной волны.

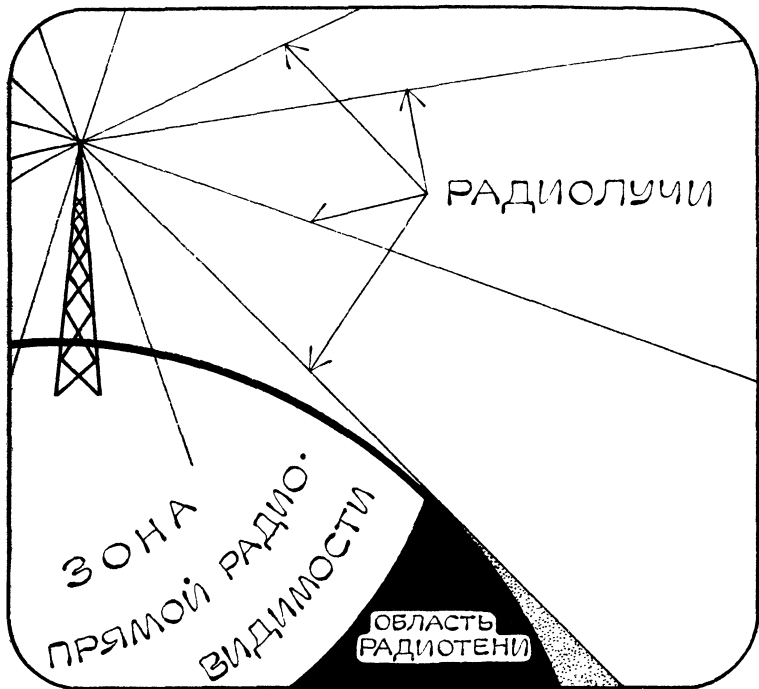
Желая осуществить дальнюю радиосвязь вдоль криволинейной поверхности Земли, радисты стремились к тому, чтобы волне было легче огибать эту поверхность, и применяли длинные волны. Но стоил и стоит такой вид связи очень дорого — приходилось строить огромные

громоздкие антенные системы (законы радиотехники таковы, что размеры антенны тоже определяются длиной волны) и мощные передатчики, занимающие целые здания и потребляющие значительное количество электроэнергии. И, конечно, нет ничего удивительного, что длинноволновых радиостанций сначала было очень мало.

Кроме того, очень скоро было обнаружено, что радиосвязь на длинных волнах не всегда возможна. Ведь путь радиоволн от передатчика до приемника часто бывает и длинным, и сложным. Волна идет над морем и над степью, над заснеженной тундрой и раскаленной пустыней, над горами и тайгой. Все эти участки подстилающей земной поверхности обладают различными электрическими свойствами и каждый по-своему влияет на распространение радиоволны.

Главную роль здесь играет поглощение энергии радиоволн за счет возникающих в подстилающей поверхности электрических токов. Бегущую над Землей вдоль ее поверхности волну так и называют — земной, поверхностной. При большом удалении от передатчика сила электромагнитного поля может ослабеть настолько, что волна затухает, и тогда приемная антенна не сможет ничего принять. Чем меньше длина волны, тем быстрее затухает поверхностная волна с увеличением дальности. Поэтому на короткие волны «серьезные» связисты сначала и внимания-то не обращали. Этот диапазон оставили для развлечения радиолюбителей, которые сами строили маломощные радиостанции с небольшими антеннами (волны-то короткие!) и устанавливали радиосвязь друг с другом.

Год 1901. Начало нашего века. Человечество еще не пришло в себя от изумления — только в 1895 г. изобретен способ передавать сигналы на расстояние без проводов. Это сделали русский физик Александр Степанович Попов и молодой итальянский инженер-изобретатель Гульельмо Маркони. В обиход входят новые, непривычные для слуха слова — «радио», «беспроволочный телеграф»... И вот Маркони задумывает смелый опыт — пытается осуществить радиосвязь не на какой-нибудь десяток километров, а на гигантские расстояния между континентами. Передатчик установлен в Англии, на полуострове Корнуолл. Приемное устройство — за тысячи километров, в Северной Америке, на полуострове Ньюфаундленд (красивое, кстати, название — в переводе с английского оно звучит как «Вновь найденная земля»).



Так представляли себе распространение радиоволн в XIX в.

С точки зрения теоретиков это был эксперимент, обреченный на неудачу. Не могли радиоволны через тысячи километров Атлантического океана обогнуть выпуклость земного шара, волна непременно должна была затухнуть.

Таков был приговор строгой физической теории. Но, как это часто бывает, эксперимент с этим обстоятельством не посчитался. Радиосвязь на длинной радиотрассе через просторы Атлантики была осуществлена. И сила сигнала во много раз превышала расчетную! Пришлось ученым срочно искать объяснение этому «чуду». Но объяснение могло быть только одно — распространяясь не только в стороны, но и вверх, радиоволны встретили на своем пути какое-то препятствие, экран, отразились от него и попали вновь на Землю на огромном расстоянии от радиопередатчика. Что же это за экран, что это за зеркало вокруг нашей планеты, от которого радиоволны отражаются, как солнечный зайчик от зеркальца? Где оно находится? Как образуется? Всегда

ли существует? На эти и еще тысячи вопросов предстояло получить ответ.

Итак, прежде всего где? Ясно было, что на достаточно большой высоте — более 100 км над поверхностью Земли. Но что там? Атмосфера, воздух или что-то другое? Может быть, какое-то особое вещество, способное отражать радиоволны?

Волшебное зеркало

Уже через год после поразительного эксперимента Маркони американский инженер-электрик Артур Кеннели и английский физик Оливер Хевисайд независимо друг от друга предположили, что дальнейшее распространение радиоволн объясняется тем, что Землю окружает электропроводящий ионизированный слой, способный отражать радиоволны. Интересно, что авторитетный научный журнал в то время не принял к печати статью на эту тему, объявив саму идею существования такого слоя «вздорной». Но, как сказал древнеримский оратор и мыслитель Марк Туллий Цицерон, «время устраняет предрассудки и утверждает законы природы». Загадочная область прочно завоевала права гражданства под названием «слой Хевисайда». Теоретики ее предсказали, а экспериментаторы стали ее искать.

Идея была, но в нее мало кто верил. Новые представления, тем более столь радикально меняющие наши взгляды на проблему, далеко не сразу становятся общепринятыми. Долгое время гипотезы о наличии в верхней атмосфере электропроводящего слоя, способного отражать радиоволны, считались недоказуемыми.

Коренной перелом наступил тогда, когда стало известно, что коротковолновики-радиолюбители бьют все рекорды дальней связи. Радиолюбительские передачи с западных берегов Шотландии принимались в Соединенных Штатах Америки, а уже в 1922 г. радиолюбители установили двустороннюю уверенную связь между Европой и Америкой. Специалисты были потрясены. Самодельные слабенькие передатчики оказались более дальнедействующими, чем мощные длинноволновые официальные радиостанции с крупногабаритными антеннами, мачтами и башнями!

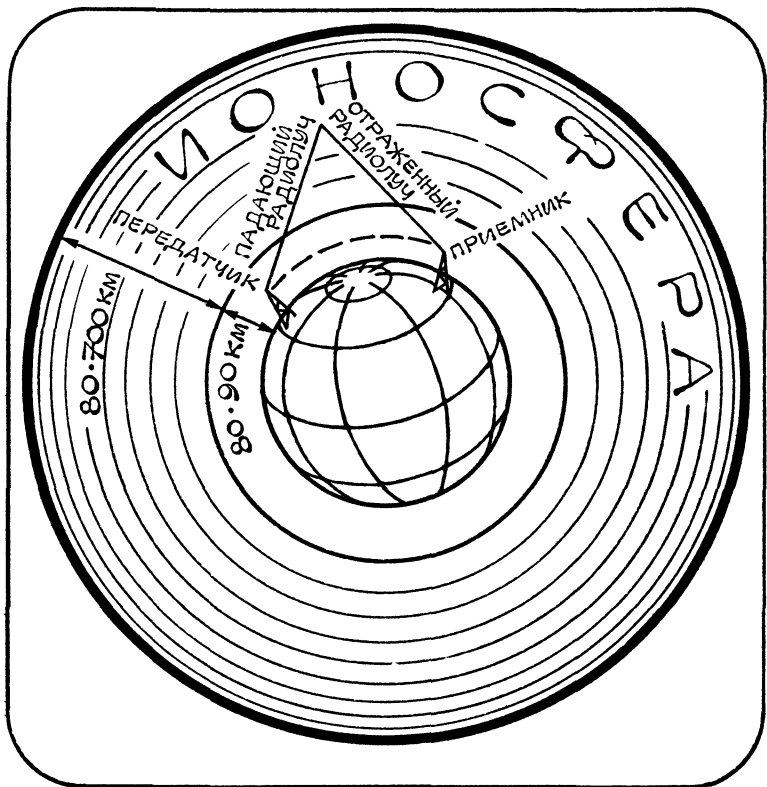
Вскоре служебные радиостанции стали регулярно применять короткие волны для дальней связи. В 1925 г. ионосфера — «волшебное зеркало планеты» — была

открыта экспериментально. Группа английских радиофизиков в одной из лабораторий Кембриджского университета сконструировала приемные антенны, которые не только принимали сигналы удаленных радиостанций, но и позволяли определить направление прихода радиоволн. Передатчик был расположен на севере Англии, а приемник — на юге. Расстояние между ними было около 400 км. Когда посмотрели, откуда приходит к приемнику радиосигнал, то оказалось, что волна принимается не с севера, а сверху! Так, 1925 год стал «годом рождения» ионосферы.

Конечно, первые шаги в исследованиях ионосферы, как, впрочем, и в любых исследованиях, не обходились без ошибок, и серьезных, и курьезных. Современник и помощник сэра Эдуарда Эпплтона, получившего впоследствии Нобелевскую премию по физике за исследования в области ионосферного распространения радиоволн, Дж. Ратклифф (один из лидеров современной физики ионосферы) вспоминает:

«Пытаясь узнать, чем определяется отражение радиоволны от ионосферы — электронами или тяжелыми ионами, мы измеряли поляризацию отраженной волны (то есть направление вращения электрического вектора волны. — Э. С. К.). Я помогал Эпплтону в этих измерениях, и в первом наброске нашей статьи об этих результатах мы написали, что и теория, и эксперимент показывают, что входящая волна должна иметь правую круговую поляризацию (то есть вектор вращается по часовой стрелке, если смотреть вдоль по направлению распространения волны. — Э. С. К.). Я хорошо помню, в какой ужас я пришел, когда обнаружил свою ошибку в интерпретации данных измерений, которые ясно указывали, что поляризация должна быть левой, а не правой. Мое письмо Эпплтону об этой ошибке пересеклось с его письмом ко мне, где он писал о том, что тоже сделал ошибку в знаке при выводе теоретического уравнения, так что поляризация должна быть левой. Итак, эксперимент все-таки совпал с теорией. Можно сказать, что все ученые делают ошибки, но лучшие из них ошибаются дважды и так, чтобы одна ошибка компенсировала другую...»

Способность ионосферы менять направление радиоволн — это бесценный подарок природы человечеству. Замечательный советский специалист в области распространения радиоволн академик А. Н. Щукин написал: «Можно сказать без преувеличения, что не будь отражения и преломления радиоволн в верхних слоях атмосферы, роль радио как средства связи сократилась бы на 90—95%». Теперь, рассчитывая радиолинию, инженер должен искать в ионосфере подходящие «точки отражения», чтобы излученный радиосигнал, отразив-



Радиоволна приходит к приемнику двумя путями: вдоль земной поверхности и отражаясь от ионосферы.

шись один или несколько раз от ионосферы, попал в зону радиоприема.

Неоднородная ионосферная плазма, да еще находящаяся в магнитном поле Земли, оказалась весьма не простой средой для распространения электромагнитных колебаний. Радиоволны испытывают в такой среде ее сильное воздействие. Это совсем не похоже на простое прямолинейное распространение в вакууме без каких-либо искажений, где затухание волны происходит только за счет того, что растет расстояние от источника колебаний, и энергия радиоволны распространяется по все большему объему.

При распространении в ионосфере часть энергии волны тратится еще и на то, чтобы «раскачать», заставить

ритмично колебаться ионы и электроны. Во время таких колебаний заряженные частицы, конечно, сталкиваются друг с другом, а также с нейтральными частицами и отдают им энергию, заимствованную из поля волны. В результате само электромагнитное поле становится слабее. Такой процесс называется «поглощение радиоволн в ионосфере». Степень поглощения зависит от трех факторов: концентрации частиц, частоты соударений и частоты волны. Ясно, что чем больше концентрация и частота соударений, тем сильнее поглощается радиоволна. А как связана с поглощением частота самой волны? Если частота высока, значит, электроны и ионы «подталкиваются» волной очень часто. Электрон еще не успел растратить сообщенный ему запас энергии от предыдущего «толчка», а уже получает новый. Поглощение энергии высокочастотного колебания поэтому будет много меньше, чем энергии низкочастотного. Другими словами, длинные волны затухают в ионосфере гораздо сильнее, чем короткие.

Сюрпризы «радиопогоды»...

А чем определяются условия отражения радиоволн в ионосфере? Ведь мы теперь знаем, что плазменная оболочка нашей планеты простирается на сотни километров и электронная концентрация сложным образом меняется с высотой: то растет, то падает, образуя максимумы и минимумы ионизации на различных высотах. Где, на какой высоте отразится радиоволна? Ведь от этого зависит и ответ на вопрос: куда она придет на земной поверхности — в ту точку, где расположен приемный радиоцентр, или за тысячу километров от него, где принять посланную информацию вовсе некому?

Условия отражения радиоволн в ионосфере в принципе тоже определяются тремя факторами: длиной волны (или частотой радиоволны), электронной концентрацией и углом падения радиоволн на ионосферу. В большинстве случаев технические возможности связанных радиопередающих центров не позволяют менять в больших пределах направленность излучения, то есть угол падения радиолуча на ионосферу. В таком случае все определится соотношением между электронной концентрацией и частотой радиоволны. Чем выше электронная концентрация, тем более короткие радиоволны способны отражать ионосферное зеркало.

Долгий опыт применения коротких волн для дальней связи давно дал возможность узнать, что днем нужно работать на более короткой волне, чем ночью. Это простое правило применяется во всем мире. И теперь нам ясно, почему существует такая закономерность. Ведь днем электронная концентрация в ионосфере максимальна за счет ионизирующего действия Солнца. В дневные часы связь на больших расстояниях ведется на метровых волнах длиной 15—20 м (20—15 МГц). Ночью, когда концентрация электронов резко падает, дневные волны уже не попадают к корреспонденту, и надо в два-три раза изменить длину волны, перейти к ночным волнам — 30—45 м (10—7,5 МГц). Именно для таких волн ночная ионосфера обеспечивает надежную работу линий радиосвязи.

Поскольку электронная концентрация в ионосфере меняется не только со временем суток, но и с высотой, радиоволны разных диапазонов, естественно, будут отражаться от различных атмосферных слоев. Например, сверхдлинные и длинные волны отражаются от самых «бедных электронами» ионосферных слоев — от слоя *D* и нижней кромки слоя *E*. Волна бежит между Землей и ионосферой, отражаясь то от Земли, то от ионосферы. Получается своеобразный «волновод», и волна пробегает огромные расстояния, почти не затухая.

Слой *D* и слой *E* — самые «спокойные» из всех ионосферных слоев, их в меньшей степени, чем область *F*, затрагивают изменения солнечной и магнитной активности. Но во время солнечной вспышки под действием жесткого рентгеновского излучения количество электронов в слое *D* резко возрастает, и из-за сильного поглощения вся коротковолновая связь на освещенной стороне нашей планеты прекращается. Прекращение радиосвязи может длиться примерно от нескольких минут до часа. Главные особенности этих явлений выяснили в 30-х годах нашего столетия немецкие радиофизики Мёгель и Деллинджер, и поэтому в литературе внезапные ионосферные возмущения иногда называют эффектом Мёгеля — Деллинджера.

Для радистов-коротковолновиков эффект Деллинджера — довольно неприятная вещь, особенно на загруженных и важных радиотрассах. Сигналы исчезают столь внезапно, что, кажется, вышла из строя радиоаппаратура. На первых порах инженеры начинали срочно

разбирать приемники и искать причину аварии. А виновато, как мы сейчас точно знаем, Солнце. Вернее, вспышки на Солнце. О самих вспышках мы еще будем говорить подробнее. А сейчас важно сказать, что невидимые радиополосы на Земле всегда рвутся примерно через 8 мин после того, как на Солнце появляются яркие полосы и запятые — внешние проявления колоссальных взрывов в недрах нашего светила.

Во время вспышки в космическое пространство выбрасывается мощный поток жесткого рентгеновского излучения. Это излучение проникает в нижний ярус ионосферы, слой *D*, вызывает там бурную ионизацию газовых частиц. В пять, десять раз увеличивается концентрация свободных электронов в нижней кромке ионосферы. А она играет роль поглощающей среды для всех волн, которые через нее проходят. Радиосигналы теряют в слое *D* всю свою энергию и уже не возвращаются к Земле, связи нет! И только потом, когда ионизация медленно возвращается к норме, начинает восстанавливаться и радиосвязь.

Для длинных волн даже эффект Деллинджера не страшен — наоборот, зеркало слоя *D* становится для них еще более «добротным», условия прохождения улучшаются. Поэтому длинноволновые линии радиосвязи, хоть и дорогостоящие, сложные по устройству и в эксплуатации, наиболее устойчивые и надежные. Их часто используют как резерв на случай нарушения работы коротковолновых линий.

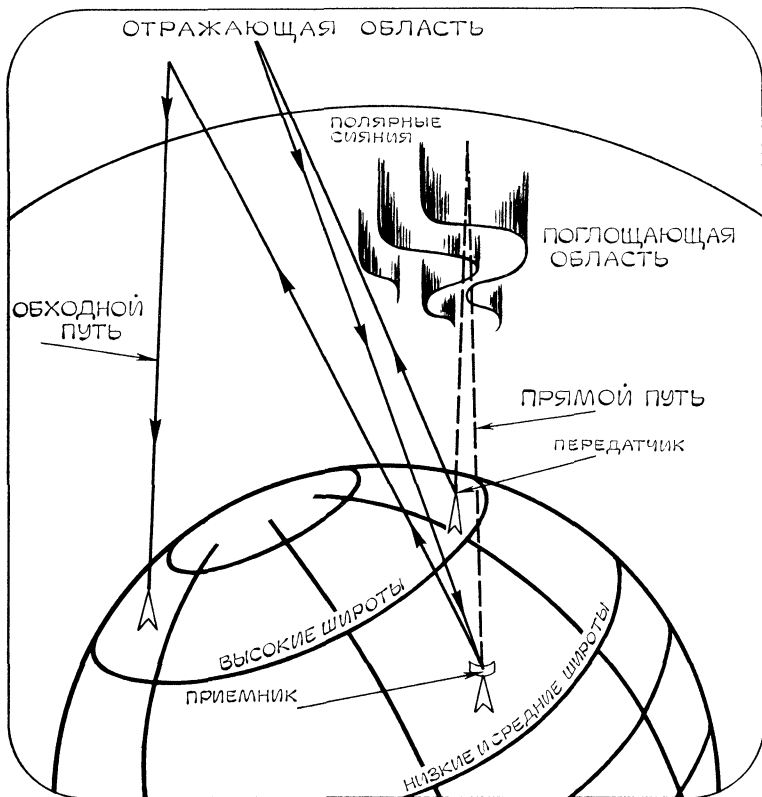
Средние волны распространяются и поверхностной, и пространственной — отраженной от ионосферы — волной. Они сильно поглощаются и почвой, и ионосферой, особенно днем. Если вы слушаете средневолновую вещательную станцию днем, это значит, что она удалена от вас не больше чем на несколько сот километров. К вам приходит поверхностная волна. Все попытки принять в дневное время дальнюю средневолновую станцию обычно бывают безуспешными. А вот ночью в том же диапазоне можно принять не только местные станции, но и удаленные на 4—5 тыс. км. Это приходит ионосферная волна, отраженная от слоя *E* или нижней части области *F*. А поглощающее действие нижележащего слоя *D* ночью незначительно. Вот и делает радиоволна «большой скачок».

Больше всего пригодны для многократных отражений от ионосферы и дальней радиосвязи все-таки

короткие волны. Дело в том, что благодаря высокой частоте они и поглощаются слабее, и забираются высоко в глубь ионосферы, до высоты слоя F_2 , туда, где концентрация электронов достаточно высока. А раз точка отражения высоко, то, направив радиолуч на ионосферу под небольшим углом к горизонту, можно заставить его сделать «прыжок» сразу на 3—4 тыс. км. Вернувшись из космоса, радиоволна отражается от земной поверхности и вновь уходит в ионосферу! За доли секунды она может оббежать весь земной шар и даже попасть в то же место, откуда антенны радиопередатчика отправили ее в кругосветное путешествие.

Кстати, если к месту приема одновременно приходят радиоволна, отраженная от ионосферы один раз, и радиоволна той же частоты, но отраженная от радиозеркала несколько раз, то для радиосвязи в этом нет ничего хорошего. Кругосветное «эхо» мешает, искажает передаваемую информацию, удваивает сигналы. И телеграфная точка (буква «е») превращается в две точки (буква «и»), изображение «двоится», а музыку слушать и вовсе невозможно. И вот приходится конструировать специальные узконаправленные антенны, чтобы избежать нежелательного явления, а то и менять длину волны в надежде, что на другой частоте кругосветного эха не будет.

Вообще связь на коротких волнах полностью контролируется и определяется состоянием ионосферы. Все изменения «волшебного зеркала» — вариации высоты и толщины ионосферных слоев, возрастание и уменьшение электронной концентрации, образование ионосферных облаков-неоднородностей, усиление и ослабление ионосферных ветров — все это немедленно отражается на качестве радиосвязи. А от чего зависит состояние ионосферы? В первую очередь — от солнечной активности. Вот почему во время магнитных бурь и полярных сияний прерывается радиосвязь, особенно в высоких широтах. Ведь в полярную ионосферу вплоть до самых нижних ее слоев «высыпаются» высокоэнергичные частицы из радиационных поясов, нагревая ионосферу, меняя ее свойства. После хромосферной вспышки, когда через несколько часов самые быстрые солнечные протоны достигают Земли, в полярных шапках планеты (Арктике и Антарктиде) короткие и средние волны сильно поглощаются, особенно в том полушарии, где в это время полярное лето. Через сутки-двое после солнечной вспыш-



Радиосвязь на трассах, проходящих вблизи зоны максимума повторяемости полярных сияний, часто приходится вести «обходным путем».

ки происходит «вспышка поглощения» радиоволн в зоне полярных сияний.

Если радиотрасса проходит внутри или даже вблизи таких областей поглощения и точка отражения приходится на «особо опасные» места, то во время сильных ионосферных возмущений условия распространения радиоволн становятся крайне неблагоприятными. Ни мощный передатчик, ни чувствительный первоклассный приемник положения не спасают. Приходится часто идти «обходным путем» — через несколько последовательных радиолиний, проходящих в «безопасных» широтах.

Существуют регулярно действующие факторы, влияющие на состояние ионосферы: смена дня и ночи, смена сезонов года, цикличность солнечной активности, изменения по широте и т. п. Столь же регулярно надо менять и рабочую длину волны, если мы хотим обеспечить радиосвязь между заданными точками. Поэтому надо непрерывно следить за состоянием ионосферы точно так же, как это делают метеорологи, следя за состоянием нижней атмосферы, за элементами погоды. И если синоптики составляют прогноз погоды, то для связистов нужен «радиопрогноз» — прогноз условий радиосвязи — долгосрочный (скажем, на месяц вперед), рассчитанный для спокойного состояния ионосферы, и краткосрочный, с учетом внезапных проявлений солнечной активности. Мы еще вернемся к тому, как составляется прогноз «радиопогоды», но несколько позже.

А пока попытаемся представить себе, что же произойдет, если мы будем излучать под постоянным углом волны все большей частоты? Чем выше частота, тем больше должна быть электронная концентрация в точке отражения, не так ли? Значит, поскольку концентрация электронов растет с высотой, точка отражения будет подниматься все выше и выше. Вот она достигла области главного максимума ионосферы, где концентрация электронов наиболее велика. А дальше? Частота радиоволны, по нашему условию, растет, а электронной концентрации уже не хватает, чтобы заставить волну отразиться — ведь выше главного максимума концентрация электронов, как мы знаем, падает.

Что же будет с радиоволной? Радиолуч «пробьет» ионосферу и уйдет в межпланетное пространство. Именно это и происходит в диапазоне УКВ: сантиметровые и миллиметровые волны от ионосферы обычно не отражаются, поэтому наземная радиосвязь на этих волнах возможна обычно только в пределах прямой видимости.

Ультракороткие радиоволны применяют в телевидении и радиолокации. Это также наиболее удобный диапазон для связи между Землей и космическими кораблями. И только иногда, когда концентрация электронов аномально велика (например, образуется мощный спорадический слой), возможно отражение УКВ от ионосферы и сверхдальнее распространение радиоволн этого диапазона. При высоте отражения 100—110 км прием телевизионных программ возможен на расстояниях 1000—2500 км.

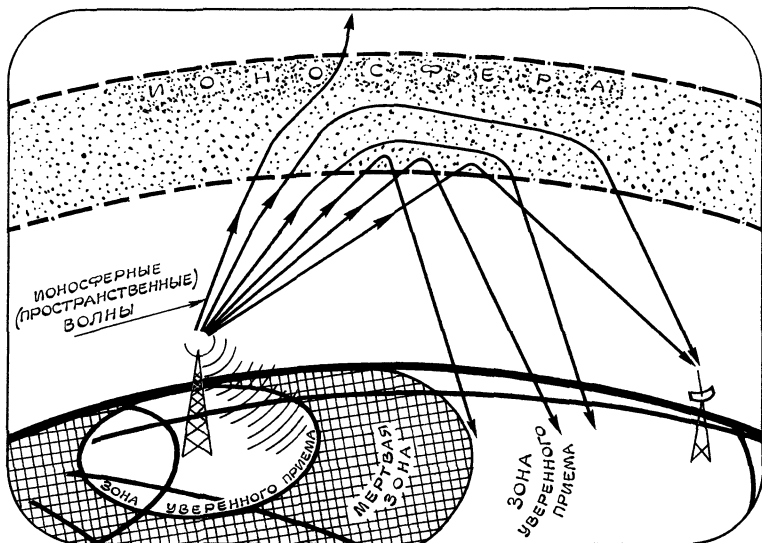
Стоит появиться сильному спорадическому слою, как в распространении радиоволн начинаются всякого рода «чудеса». Например, без всяких ретрансляторов и станций «Орбита» удается наблюдать телевизионные передачи далеко за пределами района их прямой видимости. Где-нибудь в Горьком или Одессе на экранах телевизоров появляются дикторы шведского или французского телевидения. Благодарить за это надо капризный слой E_s , «умеющий» отражать метровые радиоволны, на которых работают телевизионные станции. Правда, иногда и в более низких атмосферных слоях, в стратосфере, тоже создаются условия для сверхдальнего распространения УКВ.

Важной особенностью ионосферного распространения радиоволн является то, что связь между передатчиком и приемником может осуществляться не на любом расстоянии, а только там, где радиоволна возвращается на Землю после отражения. Вокруг передатчика будут образовываться круговые (если радиоволны излучаются равномерно во все стороны) зоны — чередующиеся зоны «слышимости» и «молчания».

Нужно так рассчитывать радиотрассу, чтобы ваш корреспондент находился в зоне уверенного приема. Но провести такой расчет не очень просто, потому что зона приема «кочует» — то приближается, то удаляется от передатчика. Причин такого непостоянства две: во-первых, меняется состояние ионосферы, во-вторых, радиоволны могут распространяться в ионосфере по-разному, отражаясь от разных ионосферных слоев. И в каждом случае будут свои зоны слышимости и молчания. Чтобы знать их расположение, опять-таки необходимо следить за состоянием ионосферы вдоль трассы.

Разные траектории распространения радиоволн приводят к возникновению еще одного явления — замиранию или федингу радиосигналов. Что же такое замирание? Возможно, слушая радиопередачи на коротких волнах, вы замечали, что звук все время меняет громкость и иногда очень резко. Впечатление, что его источник то пропадает, то вновь возникает. Может быть меняются мощность передатчика или чувствительность приемника? Ни то, ни другое. Это «дышит» ионосфера.

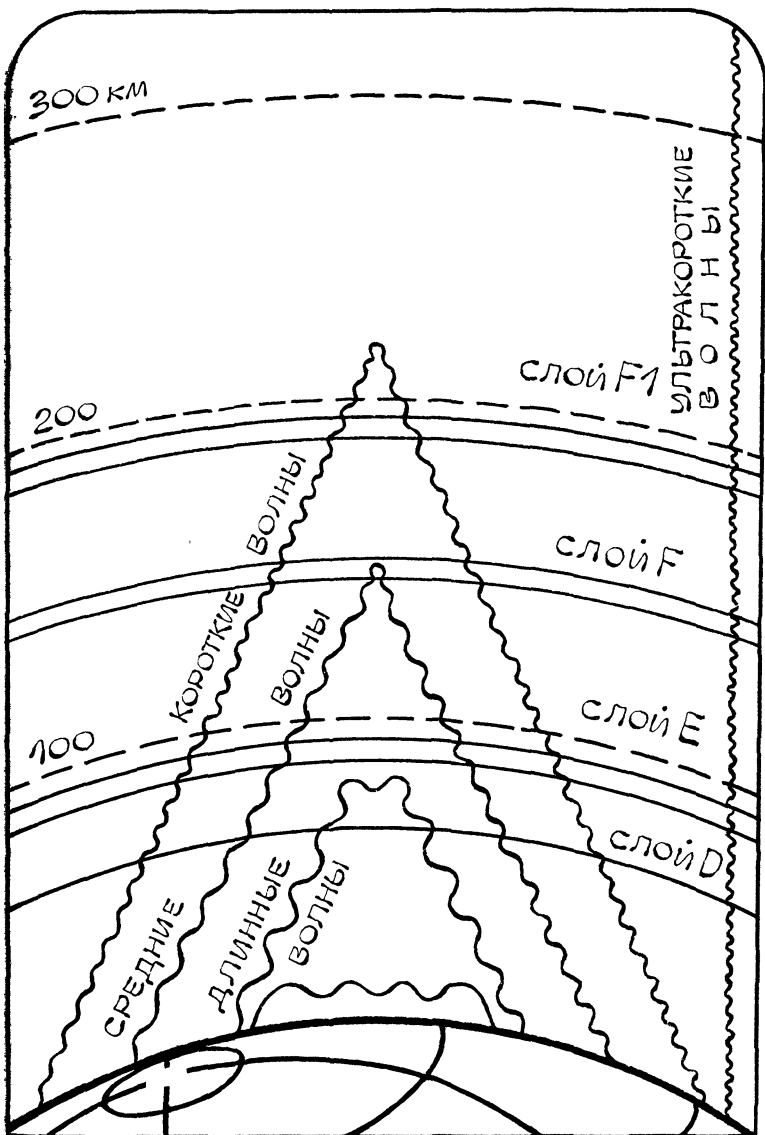
В физике рассматривается такое явление, как «сложение колебаний», или интерференция. Если в одну точку приходят колебания одной частоты, то они могут



Так образуются «зоны молчания».

либо усиливать, либо ослаблять или даже полностью уничтожать друг друга в зависимости от того, какова разница во времени их прихода в данную точку. Если колебания приходят одновременно, или, как говорят, в фазе, то происходит усиление сигнала. Если разница во времени прихода составляет половину периода колебаний и амплитуды колебаний одинаковы, то волны полностью «погасят» друг друга, так как они пришли в противофазе. Естественно, возможны промежуточные ситуации, когда интерференция приводит к очень сложной картине — к беспорядочным, почти случайным изменениям силы результирующего сигнала.

Когда в точку приема приходят радиолучи, по-разному прошедшие свой сложный путь в ионосфере, а значит, затратившие на это путешествие разное время, то интерференция этих лучей и вызывает замирания. Многолучевость — не единственная причина замираний. Такой же эффект может вызвать наличие в ионосфере своеобразных «облаков» ионизации, непрерывно движущихся под действием ионосферных ветров. Радиозеркало в этом случае — уже практически не зеркало, а скорее матовое стекло. Подходит к нему один луч, а уходит от него целый пучок рассеянных шероховатой поверхностью лучей. Отражение, конечно, имеется и в



Различные способы распространения радиоволн при отражении от ионосферы.

этом случае, но не зеркальное. В приемник попадают опять-таки волны с разной фазой, и электродвижущая сила в приемной антенне за какую-нибудь долю секунды может измениться в тысячи раз.

С точки зрения науки фединг — явление полезное, поскольку дает нам возможность исследовать неоднородную структуру и динамику ионосферы, то есть ветры, волновые возмущения и т. п. Но с точки зрения практики радиосвязи — это чрезвычайно вредное явление, с последствиями которого надо беспощадно бороться. Действительно, при радиотелеграфной передаче замирания приводят к пропаданию отдельных знаков и даже слов, «смазыванию» изображений и тому подобным искажениям информации.

...и как с ними бороться

Как же бороться с замираниями? Управлять состоянием ионосферы мы пока почти не умеем. Но проведенные исследования характера замираний на радиотрассах различной протяженности и ориентации в различных диапазонах радиоволн позволили найти некоторые радиотехнические способы ослабить их влияние на радиоприем.

Способ первый. Радиоприемники снабжаются системой автоматической регулировки усиления сигнала. Обычно усилитель сигналов работает в режиме, рассчитанном на какой-то средний уровень напряженности электромагнитного поля в месте приема. Система регулировки действует так, что в случае увеличения этой напряженности усиление в приемнике тут же падает, а в случае уменьшения — мгновенно возрастает. В результате на выходе радиоприемника (скажем, в громкоговорителе) уровень сигнала будет все время выравниваться. Допустим, интенсивность сигнала в антенне возросла в 1000 раз. При хорошей системе регулировки громкость возрастает всего в несколько раз.

Способ второй. Это прием одного и того же сигнала на несколько антенн, подключенных к одному приемнику, но расположенных на значительном расстоянии друг от друга. На каждую антенну приходят разные лучи, и в каждой антенне сила сигнала будет меняться по-разному. Если посланный радиосигнал не будет принят из-за эффекта замираний первой антенной, его «поймает» вторая или третья. В следующий момент

ситуация может измениться на обратную. Но в каждый момент времени найдется по крайней мере одна антенна, которая обеспечит уверенный прием. Значит, цель достигнута. Способ этот широко применяется на важных линиях связи.

Волшебное «радиозеркало» может преподнести еще и не такие сюрпризы связистам. Случается, например, так, что, тщательным образом настроив приемник на определенную волну, можно услышать две станции сразу, хотя ведут они передачу на совершенно различных волнах. И слиты эти сигналы настолько «прочно», что никакими радиотехническими средствами избавиться от мешающей станции невозможно. А кому же понравится, если важное сообщение будет «промодулировано» звуками рок-н-ролла, а фототелеграфное изображение карты погоды — «смазано» портретом голливудской красавицы?

В чем тут дело? Эффект этот был обнаружен еще в 30-х годах нашего столетия и получил строгое научное название «перекрестная модуляция». Причина явления — взаимодействие радиоволн в ионосфере. Мощная радиоволна не только испытывает на себе влияние ионосферы (поглощение, преломление и т. д.), но и сама влияет на ионосферу. Она может нагреть ионосферу, изменить распределение заряженных частиц в пространстве, создать зоны повышенного и пониженного поглощения — короче говоря, оставить «след» в ионосфере. И если в ту область ионосферы, где «хозяйничает» мощная радиоволна, излучаемая одной станцией, попадает «мимоходом» волна другой радиостанции, то интенсивность ее сигналов будет меняться под влиянием поля первой волны. В результате мощная радиостанция «отпечатывает» свою программу на волне другой станции.

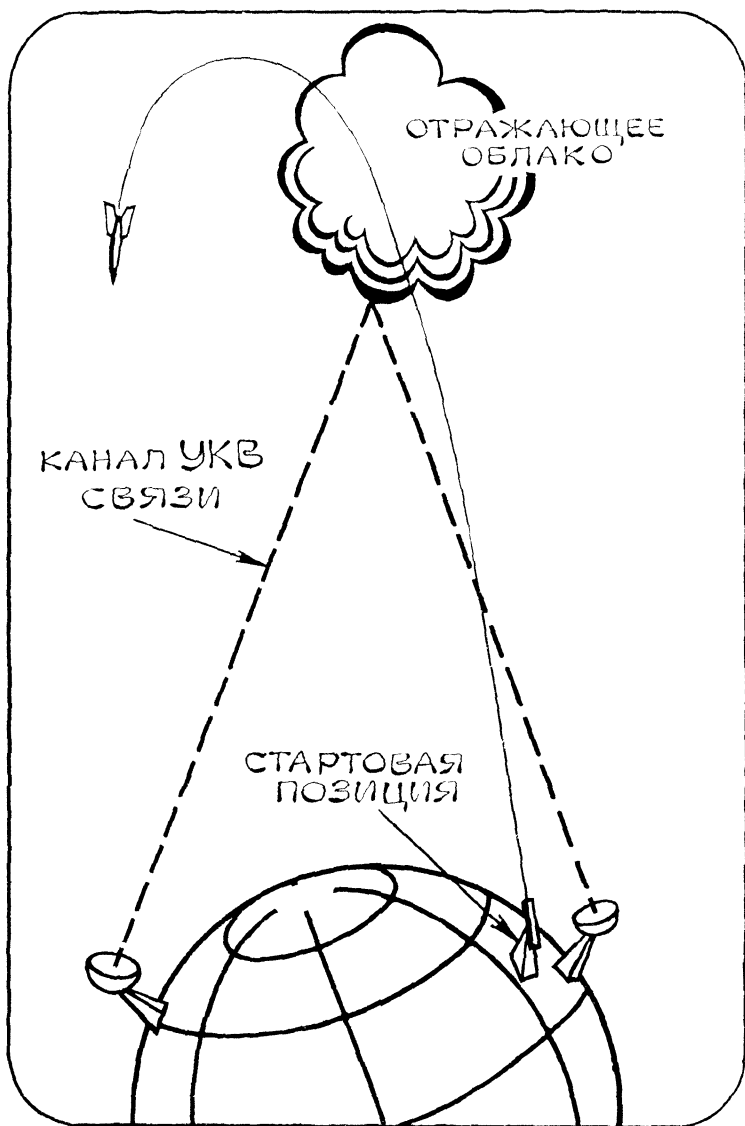
Связисты ищут способы борьбы с кросс-модуляцией, применяя специальные антенны с «прижатыми» к Земле диаграммами направленности излучения, а также подбирая время работы радиостанций и их длины волн так, чтобы избежать взаимных помех. Ученые, исследующие ионосферу, используют воздействие мощных радиоволн на ионосферу как очень эффективный инструмент для изучения ионосферной плазмы. Оказывается, нагревая ионосферу излучением мощного радиопередатчика, можно создать в ней искусственные неоднородности, облака, сделать радиозеркало «шероховатым» и изме-

нить условия распространения радиоволн, отражающихся от этой области ионосферы. Это уже элемент «управления» средой, что открывает большие перспективы самых разнообразных практических применений.

В настоящее время радиофизики очень увлекаются экспериментами по нагреву ионосферы. Таким путем создается «решетка» неоднородностей с заданными свойствами, искусственная ионосферная турбулентность, открываются широкие возможности эксперимента в области физики плазмы и распространения радиоволн в космической плазме. Установки для воздействия на ионосферу мощным радиоизлучением, или, как их принято называть, «нагревные стенды», появились вблизи ракетных полигонов, стартовых площадок космических кораблей, мощных радаров некогерентного рассеяния. Они имеются сейчас и в Арктике, и на средних широтах, и вблизи экватора. Очень перспективны активные эксперименты не только в ионосфере, но и в магнитосфере. Они должны помочь разобраться в том, как исчезают частицы из магнитосферы, и глубоко проникнуть в процессы взаимодействия магнитосфера — атмосфера.

Раз мы заговорили об искусственном воздействии человека на ионосферу, то надо сказать, что мы сейчас обладаем техническими возможностями создать искусственную ионосферу с очень большой плотностью свободных электронов и даже использовать ее для радиосвязи. Конечно, эта ионосфера не будет иметь глобальных масштабов. Ее горизонтальные размеры — несколько сот метров, может быть, километры, не больше. Время жизни такой ионосферы — минуты, максимум часы. Но зато ее можно сделать в нужном месте, на нужной высоте, используя для отражения — раз электронная концентрация велика — диапазон УКВ. В этом диапазоне радиоволн информацию можно передавать в тысячи раз быстрее и в десятки тысяч раз большем объеме, чем в диапазоне, скажем, длинных волн.

Чтобы создать искусственную ионосферу, достаточно взорвать в реальной ионосфере небольшую стальную канистру, наполненную цезием в смеси с натрием и алюминием. Можно также выбросить в ионосферу несколько килограмм окиси азота или чрезвычайно активного щелочного металла, калия. Доставить эти вещества на высоту 100—120 км может геофизическая ракета. В любом случае в ионосфере возникает сферическое облако ионизированного газа диаметром в сотни метров.



Для связи на больших расстояниях в диапазоне УКВ можно использовать «искусственную ионосферу».

Оно будет быстро расширяться и, если будут созданы соответствующие условия, просуществует от нескольких десятков минут до нескольких часов. За это время можно передать на метровых и сантиметровых волнах огромное количество информации. Конечно, передающие и приемные антенны на концах радиотрассы должны быть заранее направлены в точку отражения, где планируется создать ионизированное облако.

Сгоревшие в нижней ионосфере метеоры тоже создают протяженный ионизированный след. Нельзя ли его использовать для связи? Ведь луч радиолокатора отражается от метеорного следа, что дает возможность измерить его перемещение под действием ионосферного ветра. В принципе, конечно, можно. Но есть и свои трудности. Метеоры появляются совершенно случайно, ионизированные следы существуют всего несколько секунд, быстро рассеиваются под действием сильных ветров в метеорной зоне. Казалось бы, невозможно строить системы связи на столь зыбкой основе.

Но тут на выручку приходит закон больших чисел. Метеорная ионизация продолжается мгновения, но зато метеорных тел много — за сутки их проходит десятки миллиардов. Можно сказать, что наша планета находится под непрерывным метеорным ливнем, который не прекращается ни днем, ни ночью, ни зимой, ни летом, ни в Арктике, ни в пустыне Сахаре. Наблюдения показали, что радиолокаторы каждую минуту регистрируют в среднем два-три долгоживущих (около секунды) метеорных следа, созданных случайными метеорами. В периоды интенсивных метеорных потоков, когда орбита Земли проходит сквозь сравнительно плотный поток метеорного вещества (например, в августе), ионизированных следов становится значительно больше. Три — пять секунд в течение каждой минуты — это не так уж мало для современных быстродействующих систем связи, передающих несколько тысяч слов в минуту.

Задача состоит в том, чтобы метеорное радиозеркало появилось точно в том месте, которое обеспечит такое отражение сигнала, посланного передатчиком, что радиолуч попадет в приемную антенну. Расстояние между антеннами — тысячи километров, а их размеры — несколько метров. И точность прицеливания должна быть высокой. А метеор — не ракета, его не пошлешь в расчетную точку. Значит, надо создать «следающую»

систему, которая будет непрерывно контролировать интересующую нас область ионосферы, и «ждать милости от природы» — не появится ли там ионизированный след в нужном месте и с нужной электронной плотностью.

Линия связи постоянно находится наготове. И передатчик, и приемник готовы к работе, включены и настроены. Но для передачи сообщений она пока разомкнута. Как только в нужной точке появляется метеор, создающий сильно ионизированный след, он как бы замыкает всю систему, посылаемые передатчиком радиоволны отражаются, как солнечный луч от зеркала, резко возрастает мощность принимаемого сигнала, следящая система «выдает команду»: «Начать передачу». А информация уже давно накоплена, записана на магнитофон, закодирована специальным шифром. С огромной скоростью «выстреливается» она в эфир и столь же быстро записывается накопителем устройством в приемном пункте. Упала ионизация следа — другая команда: «Прекратить передачу». И давно уже исчез метеорный след, а в аппаратном зале приемного радиоцентра еще долго стучат телетайпы, расшифровывая «сжатую» информацию и преобразуя ее в обычный вид.

Включение и выключение аппаратуры происходит несколько раз в минуту, сообщения передаются отдельными порциями — то малыми, то большими, но для корреспондентов это незаметно. Связь действует непрерывно в обе стороны, как будто оба пункта соединены проводами.

Метеорная радиосвязь на УКВ очень перспективна. У нее много преимуществ: не требуются мощные передатчики, антенны имеют несложное устройство, связь устойчива, так как распространение УКВ почти не зависит от изменчивости ионосферы. На одной и той же волне, с одной и той же антенной можно работать в любое время года, в любое время суток. Особенно ценен такой вид связи в полярных широтах, где коротковолновая радиосвязь в периоды магнитно-ионосферных возмущений выходит из строя.

Не раз, говоря о расчетах радиолиний, мы подчеркивали необходимость исследования и постоянного контроля состояния ионосферы. Но как это сделать, каким инструментом измерить концентрацию электронов и ионов, частоту соударений и температуру, размеры ионосферных неоднородностей и скорость ветра?

В первой главе, где описывались основные свойства ионосферы, мы уже говорили о прямых методах изучения ионосферной плазмы с помощью приборов, устанавливаемых на геофизических ракетах и искусственных спутниках Земли. У этих методов имеются не только свои неоценимые достоинства, но и свои ограничения и недостатки.

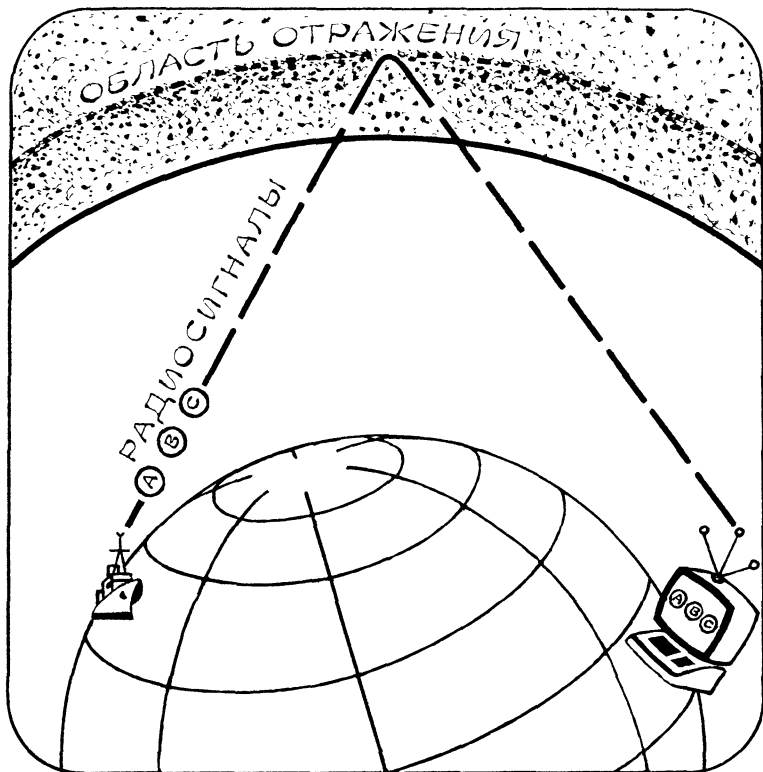
До настоящего времени подавляющее большинство экспериментальных данных об ионосфере получено радиометодами. Те самые радиоволны, которые отражаются и поглощаются ионосферой, несут в себе информацию о той области, через которую они прошли или от которой отразились.

Самым распространенным инструментом исследования ионосферы стал радиолокатор специального назначения, или, как его часто называют, ионосферная станция (ионозонд). Именно этот прибор позволил нам задолго до запуска человека и приборов в космос, «дотянуться» до верхней атмосферы, заглянуть внутрь «волшебного зеркала», узнать, как оно устроено, понять основы управляющих им физических процессов.

Ионосферная станция, как и всякий радиолокатор, состоит из следующих основных частей: радиопередатчика, передающей антенны, приемной антенны, радиоприемника, регистратора. Задача обычного радиолокатора — обнаружить цель (скажем, самолет), измерить расстояние до нее и скорость ее перемещения.

Для ионосферной станции «целью» является ионизированный слой. А основная задача состоит в измерении распределения количества свободных электронов с высотой, получении вертикального профиля электронной концентрации.

Передатчик станции излучает радиоволны непрерывно, а в виде коротких импульсов. Длительность таких импульсов — не более 100 мкс, то есть одной десятитысячной доли секунды. А частота повторения импульсов — 50 Гц. Это значит, что каждую секунду передатчик включается и выключается 50 раз. Время между импульсами, когда передатчик молчит, во много раз больше, чем время излучения. Это нужно для того, чтобы дать возможность излученному импульсу дойти до «цели» и, отразившись от нее, вернуться в радиоприемник, установленный здесь же, возле передатчика.



Ионозонд «прощупывает» ионосферу импульсами на переменной частоте.

Передающая антенна станции сконструирована так, что излучение идет прямо в зенит, вертикально вверх. Передатчик посылает вверх одну за другой короткие «очереди» радиоволн, а приемник, подключенный к антенне, во время паузы улавливает радиосигналы, вернувшиеся после отражения от ионосферы. Отметив время старта и финиша волн, побывавших в «космическом рейсе», можно подсчитать высоту расположения отражающего ионосферного слоя. Ведь скорость распространения радиоволн в воздухе близка к скорости света (300 тыс. км/с). Поэтому, если время между посланным и вернувшимся импульсом равно, скажем, 0,001 с, значит, путь туда и обратно составляет 300 км, то есть высота

отражающего слоя 150 км. На самом деле, строго говоря, часть пути радиоимпульс проходит не в воздухе, а в самой ионосферной плазме, где его скорость меньше. Не считаясь с этим обстоятельством, мы несколько завышали результат. Однако имеются специальные способы расчета необходимых поправок и точной оценки высоты отражения.

Итак, приняв отраженный сигнал, мы зафиксировали сам факт наличия ионосферного слоя (обнаружили «цель») и подсчитали по времени между моментом излучения и моментом приема высоту ионосферы. А сколько там электронов? Теоретический расчет показывает, что электронная концентрация в области отражения (N) и частота вертикально падающей на эту область радиоволны (f) связаны очень простым соотношением: $f^2 \simeq 80,8N$. Эта простая формула говорит нам, что, зная частоту (в кГц) отраженной радиоволны, мы сразу можем подсчитать количество электронов в 1 см^3 ионосферной плазмы, именно в том месте, откуда отразилась радиоволна. К примеру, пусть частота отраженной радиоволны — 10 тыс. кГц. Тогда концентрация электронов в области отражения будет равна

$$\frac{10\,000 \cdot 10\,000}{80,8} \approx 1,2 \cdot 10^6,$$

то есть примерно $1,2 \text{ млн см}^{-3}$. Особенность ионосферной станции состоит в том, что облучение ионосферы ведется не на одной какой-то фиксированной, постоянной частоте, а длина волны все время меняется. За одну минуту пробегается большой диапазон от длины волны 600 м (частота 500 кГц) до 15 м (частота 20 тыс. кГц). Для чего это делается? Мы уже знаем, что чем короче волна, тем глубже она проникает в ионосферу, отражаясь от все более богатых электронами слоев. Меняя длину волны, мы можем убедиться, что длинные волны отражаются от нижних слоев ионосферы (частоте 500 кГц соответствует концентрация примерно 2500 см^{-3} и высота отражения около 100 км), а короткие волны — от ее верхних слоев.

Всякий раз, постепенно уменьшая длину волны, оператор убеждается, что на какой-то частоте отражение исчезает. Что это значит? Видимо, мы «нащупали» то место, где находится в данный момент максимум электронной концентрации. Для более коротких волн, чем та, на которой отражение наблюдалось последний раз,

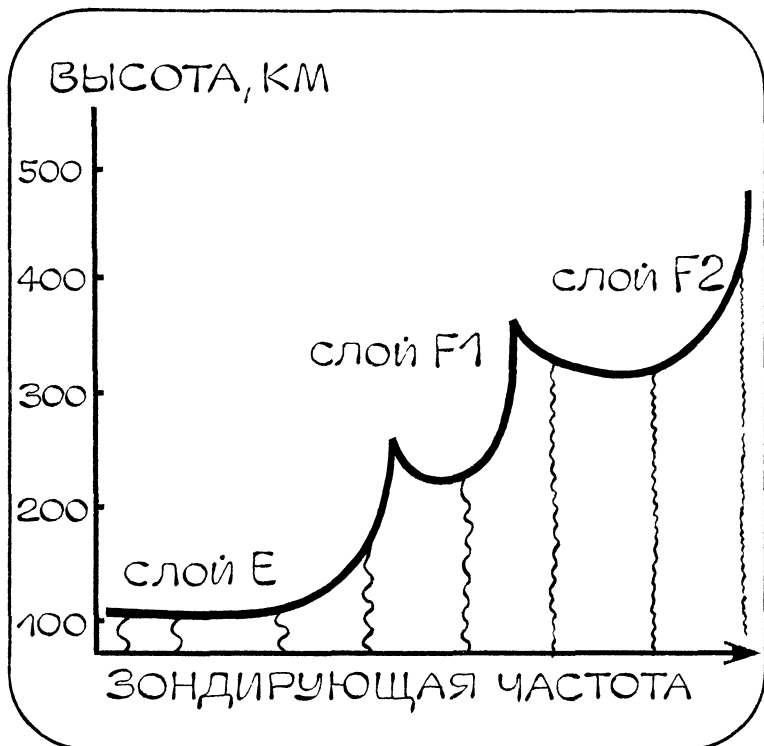
электронов для отражения уже не хватает. Эти волны пронизывают ионосферу насквозь и уходят в космос навсегда. Такая частота называется критической.

Итак, измеряются-то характеристики радиоволны (частота и временная задержка), а рассчитываются уже характеристики ионосферы (электронная концентрация и высота, ей соответствующая). Посылаемая вверх радиоволна — это вопрос, заданный нами природе, а волна, возвращенная из заоблачных высей, — ответ на наш вопрос!

На экране регистратора ионосферной станции электронный луч рисует характерную кривую зависимости высоты отражения от частоты радиоволны. Она так и называется — высотно-частотная характеристика, или «ионограмма». Вы видите ионограмму на рисунке. По горизонтальной оси отложена частота «зондирования» ионосферы, по вертикальной оси — высота отражения. По ионограмме можно определить положение основных ионосферных слоев и рассчитать вертикальный профиль электронной концентрации.

В современных ионозондах с помощью «умной электроники» ионограмму получают на экране электронно-лучевой трубки вместе с координатной сеткой, как на телевизионном экране. Экран трубки обладает длительным послесвечением, а изображение можно наблюдать непосредственно и фотографировать кинокамерой.

Вид конкретной ионограммы зависит, во-первых, от координат места наблюдения, а во-вторых — от конструкции ионозонда. На ионограммах часто видны не только отражения радиоволн от ионосферных слоев, но и более сложные радиосигналы. Если мощность передатчика достаточно велика, а диапазон «высотной развертки» рассчитан на несколько тысяч километров, то можно наблюдать многократные отражения радиоволны от ионосферы. Наличие неоднородностей в ионосфере тоже немедленно проявляется на ионограммах в виде характерных размытых или «диффузных» радиоотражений. Короче говоря, опытный оператор может получить много интереснейшей информации, внимательно рассматривая своеобразный портрет ионосферы — ионограмму. Существует специальная международная инструкция по обработке и интерпретации ионограмм, переведенная на основные языки мира, публикуются атласы ионограмм, полученных мировой сетью станций.



Идеализированная ионограмма — высотно-частотная характеристика ионосферы.

Кстати, позвольте вспомнить еще один забавный эпизод из истории физики ионосферы. По международной инструкции, предписывающей стандартные правила обработки ионограмм и заполнения соответствующих таблиц для международного обмена данными, если по какой-либо причине сеанс наблюдений не состоялся, то в соответствующей графе таблицы ставится индекс «С», третья буква латинского алфавита. Почему именно С? Современные обработчики этого и не знают. А дело в том, что первые ионозонды появились в Англии, и антенные сооружения были построены на лугу, где паслись коровы. И иногда они рвали отяжки, крепящие антенную мачту. Работа ионозонда нарушалась, и оператор в качестве причины аварии ставил в аппаратный журнал слово «корова» (по-английски «cow») или просто первую

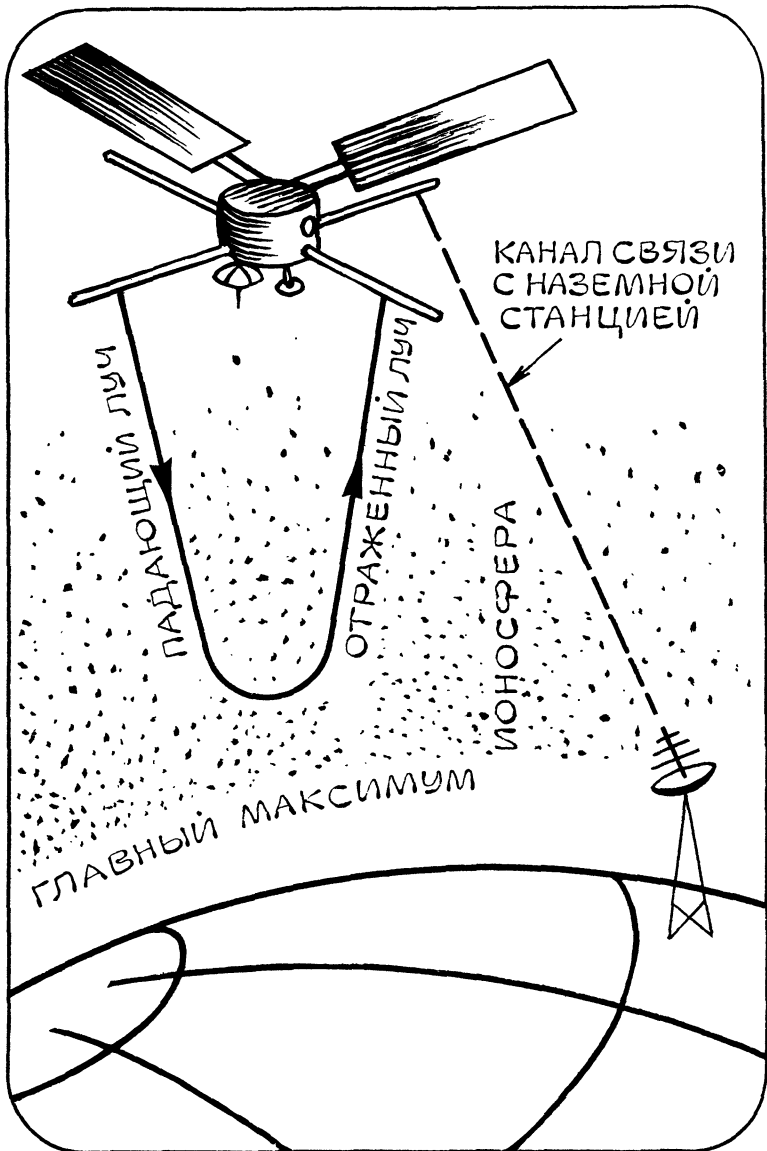
букву этого слова — «С». Вот так эта буква и стала обычным символом отсутствия данных измерений из-за отказа аппаратуры.

В периоды организации активных научных исследований в области солнечно-земной физики около 300 ионосферных станций, разбросанных по всем континентам, тщательно изучали радиозеркало планеты. Днем и ночью, каждые 15 минут, одновременно из сотен мест — от Северного полюса до ледяной Антарктиды — в космос устремляются радиоволны, прощупывающие ионосферу. Советские ионосферные обсерватории работают на побережье Ледовитого океана и в Туркмении, в Прибалтике и на Камчатке, на Урале и в Антарктиде. Данные измерений с наземных станций, исследовательских судов и спутников по специальным линиям связи стекаются в прогностические центры, где их внимательно изучают и составляют прогноз условий радиосвязи, который нужен и связистам, и морякам, и летчикам, и космонавтам. Располагая данными об ионосфере, можно не только составлять расписание рабочих частот на радиотрассах, но и на научной основе проектировать передатчики, антенны различных типов для приема и передачи.

Один крупный американский ученый как-то подсчитал, что благодаря сведениям, накопленным в результате исследования ионосферы, во всем мире сэкономлено несколько сот миллионов долларов. Трудно, конечно, сказать, насколько точна эта цифра, да и научные достижения не так-то просто измерить деньгами. Но несомненно, что систематическое изучение свойств верхней атмосферы даст и уже дает очень много и науке, и практике.

Ионозонд на Земле, к сожалению, может исследовать только ту часть ионосферы, которая расположена ниже главного максимума, то есть до высоты 300—350 км. Получить радиоотражения с больших высот для обычной ионосферной станции невозможно. А как исследовать верхнюю часть ионосферы? Как только появились искусственные спутники Земли, появилась и мысль об установке на борту спутника ионосферной станции, ионозонда. Конечно, орбита такого спутника должна проходить много выше главного максимума ионосферы.

Антенная система будет направлять зондирующие радиоимпульсы вертикально вниз. Ионосферный «эхолот» будет измерять «глубину» ионосферы вдоль всей



Ионозонд на спутнике зондирует ионосферу «сверху».

орбиты спутника. Меняя длину волны, точно так же как и на Земле, можно получать высокочастотную характеристику, ионограмму, и рассчитывать профиль электронной концентрации в интервале высот от главного максимума ионосферы до высоты самого спутника. Надо также создать специальное запоминающее устройство, которое накапливало бы информацию, а в те моменты, когда спутник пролетает над наземной станцией слежения, «сбрасывало» бы ее на Землю. При этом для связи должны, естественно, использоваться радиоволны УКВ диапазона, для которых ионосфера прозрачна.

20 сентября 1962 г. американская ракета-носитель вывела на круговую орбиту спутник канадского производства с ласковым названием «Алуэтт» («Жаворонок»). Высота орбиты составляла около 1000 км, а угол наклона орбиты к плоскости экватора — $80,5^\circ$. На борту спутника был установлен ионозонд, и основной целью запуска было измерение электронной концентрации в ионосфере на высотах от 300 до 1000 км. Четырнадцать пунктов наземной телеметрической сети слежения «передавали» спутник друг другу во время полета. Они были расположены на территории Канады, США, Южной Америки, Австралии и в других областях. «Алуэтт» зондировал ионосферу каждые 18 с, то есть каждые 125 км пути, в диапазоне частот 1600—11 500 кГц. Оригинально был решен технический вопрос об антеннах. Ведь длина антенны для успешной ее работы должна составлять десятки километров. Антенны были сделаны из свернутой и намотанной на барабан, размещенный внутри спутника, тонкой стальной ленты. После выведения спутника на орбиту по специальной команде ленты распрямлялись и получались две антенны длиной 46 и 23 м!

«Алуэтт» дал громадное количество интереснейшей информации о поведении ионосферы выше главного максимума. Во время его полета специально работали в учащенном режиме наземные ионозонды, особенно расположенные вдоль проекции орбиты спутника на Землю. Сопоставление их данных с данными спутникового ионозонда представило исследователям уникальную возможность «увидеть» сразу обе части ионосферы — выше и ниже главного максимума, что существенно продвинуло изучение многих физических процессов в ионосфере.

Малогабаритная ионосферная станция для вертикального импульсного зондирования ионосферы была

размещена и на борту советского искусственного спутника Земли «Космос-381».

Штатным, как принято говорить, инструментом на борту многих спутников серии «Космос» является специальная радиостанция «Маяк», которая позволяет оценить электронное содержание в столбе от поверхности Земли до спутника и даже в области прохождения спутника. Бортовой передатчик на высоколетящем спутнике излучает на двух-трех частотах. Частота излучения задается с очень большой стабильностью. Наземные же многоканальные приемники — сложные, узкополосные, помехоустойчивые устройства — принимают излучение со спутника и сравнивают фазу сигнала на разных частотах. Разность частот регистрируется с точностью до малой доли герца.

Диагноз...

Если бы радиоволны распространялись в абсолютной пустоте, то одновременно излучаемые волны одновременно приходили бы и в точку приема. Однако на пути радиоволн находится ионосферная плазма, а она воздействует на волны разной частоты по-разному. Поэтому разность фаз прошедших через ионосферу колебаний, если она измеряется точно и непрерывно вдоль орбиты спутника, дает информацию о свойствах ионосферы. А чтобы оценить неоднородную структуру ионосферы, надо одновременно с фазой измерять интенсивность принимаемых сигналов, замирания сигналов, о которых мы уже говорили. Изучая записи замираний, можно оценить масштаб неоднородностей (от 500 м до 150 км), градиенты (перепады) электронной концентрации, спектр неоднородностей. Часто неоднородности мелкого масштаба находятся в ограниченных областях ионосферы с горизонтальными размерами от нескольких десятков до нескольких сотен километров.

Следует сказать, что виды и формы «плазменных облаков» не менее разнообразны и причудливы, чем виды обычных облаков в тропосфере. Кто из нас, следя за проплывающими в летнем небе облаками, не поражался их бесконечному разнообразию? Конечно, в ионосфере неоднородности нельзя увидеть, но их форму можно представить, рассчитать по характеристикам радиосигналов, которые этими неоднородностями отражаются, рассеиваются, преломляются. И тогда появля-

ются на страницах научных монографий «портреты» ионосферных неоднородностей — волнистые поверхности типа шиферной крыши, линзы, плавающие эллипсоиды, «пузыри», поднимающиеся над экватором, как пузырьки в стакане с минеральной водой, волокна, перья и т. п. Одни неоднородности вытянуты вдоль силовых линий геомагнитного поля, другие — поперек поля, одни образуются под действием чисто внутренних процессов в ионосфере, другие — под действием магнитосферы или, наоборот, в результате воздействия снизу — от тропосферы с ее грозами, ураганами, циклонами, извержениями вулканов или землетрясениями. Есть неоднородности, существующие постоянно, а есть — живущие доли секунды.

Своеобразным зондом для исследования космической плазмы служат сверхдлинные радиоволны с длиной волны от нескольких до сотен километров. Их «специальность» — самые нижние слои ионосферы и очень удаленные области приземного космоса, расположенные на расстоянии нескольких земных радиусов. Сверхдлинные волны распространяются между Землей и нижней границей ионосферы, как в гигантском волноводе. Все его пространство заполнено электромагнитным полем, а свойства этого поля, его изменения во времени и в пространстве определяются свойствами стенок волновода, подстилающей поверхности (это пустыни, леса, горы, океаны) и области D ионосферы.

Для сверхдлинных волн магнитные силовые линии являются как бы направляющими, вдоль которых движутся радиосигналы. Проникнув в ионосферу, например в северном полушарии, эти сигналы удаляются вдоль силовой линии в магнитосферу на расстояние 3—4 земных радиусов, а потом по этой же силовой линии опять устремляются к Земле — в зеркальную, или, как иногда говорят, магнитосопряженную точку, но уже в южном полушарии. Сверхдлинноволновые сигналы для зондирования ближнего космоса излучаются специальными передатчиками, которые строятся в тщательно выбранных местах — в зонах полярных сияний, полярных шапках, вблизи экватора. Такие установки с гигантскими антеннами имеются и в Арктике, и в Антарктиде. Но источниками таких же сигналов могут быть самые естественные явления, например молниевые разряды или же построенные человеком линии электропередачи. Прием этих сигналов на Земле и на спутниках дал возможность

получить уникальную информацию о взаимодействии потоков заряженных частиц, вторгающихся в магнитосферу и ионосферу, о полях и волнах в космической плазме. Если воспринимать эти преобразованные в радиоприемниках сигналы на слух, то они имеют в наушниках характерное звучание — существуют даже такие научные термины, как «шипения», «свисты», «хоры». Хитроумная аппаратура анализирует спектральный состав сложных сигналов, чтобы дать исследователям возможность судить о физических процессах в тех глубинах плазмы, через которые они пробивались на пути от передатчика к приемнику.

Измерить электронную концентрацию и температуру одновременно во всей толще ионосферы примерно от 150 до нескольких тысяч километров, в принципе, можно, применяя радиолокаторы огромной мощности, работающие в диапазоне метровых и сантиметровых волн. Идея таких измерений возникла в конце 50-х годов, когда на вооружении появились радары, излучающие импульсы мощностью в миллионы ватт.

Физическая основа метода такова. Каждый электрон, когда на него падает электромагнитная волна, некоторую часть энергии этой волны рассеивает во все стороны, в том числе и в направлении, откуда пришла падающая на него волна. Доля рассеянной энергии ничтожно мала по сравнению с энергией, приходящей к электрону волны, поэтому этот эффект рассматривался в физике чисто теоретически или в приложении только к лабораторным опытам. По имени известного английского физика Дж. Дж. Томсона само явление названо томсоновским рассеянием или — более научно — некогерентным рассеянием. Слово «некогерентный» означает, что каждый электрон рассеивает энергию самостоятельно, беспорядочно в отличие, скажем, от зеркального отражения радиоволн, когда энергия отражается от плазменного объема «когерентно» и все заряженные частицы действуют согласованно, одновременно.

При некогерентном рассеянии от многих электронов энергия, рассеянная каждым из них, просто складывается. Из лабораторных измерений давно известно, сколько энергии рассеивает один электрон (это величина, определяемая зарядом электрона, его массой и углом между падающей и рассеянной волной). Поэтому если бы удалось как-нибудь измерить энергию, рассеянную некоторым объемом ионосферной плазмы, то осталось

бы только разделить измеренную величину на ту, которую мы знаем из лабораторных измерений, и тогда сразу же можно было бы определить количество электронов в ионосфере, то есть электронную концентрацию.

Вот радиолокатор и измеряет величину радиосигнала, рассеянного от каждого интервала высот, и счетно-решающее устройство сразу «выдает» вертикальный профиль электронной концентрации. Исследуется не только величина, но и спектр рассеянного сигнала. Чем быстрее движутся заряженные частицы, чем выше их температура, тем шире спектр (помните, мы уже обсуждали эффект Доплера и связанное с ним уширение спектральных линий). В спектре рассеянного радиосигнала содержится информация о температуре электронов и ионов, частоте соударений заряженных частиц, ионном составе, электрических токах в ионосфере и о многих других важных характеристиках ионосферной плазмы.

Особая ценность метода некогерентного рассеяния заключается еще и в том, что многие характеристики можно измерить почти одновременно в большом интервале высот. Это равносильно запуску хорошо оснащенной геофизической ракеты. Но ведь ракеты — это мгновенный «прокол» ионосферы, а радиоизмерения можно вести в течение длительного времени, изучая поведение ионосферы в зависимости от других геофизических факторов. Именно такая возможность делает метод уникальным.

Аппаратура для исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн представляет собой дорогой и сложный радиотехнический комплекс. Ведь радар должен обладать такой мощностью передатчика и такой чувствительностью приемника, чтобы, образно говоря, локатор мог «видеть» на высоте 300 км пятикопеечную монету. Это точное сравнение, ибо суммарная энергия, рассеиваемая ионосферой на этой высоте, примерно равна энергии волны, отраженной от кусочка металла размером с пятак.

Во всем мире пока, к сожалению, существует не более десятка установок, ведущих регулярную научно-исследовательскую работу этим методом. Первое, что бросается в глаза, — огромные антенны, необходимые для того, чтобы сфокусировать колоссальную энергию излучения в очень узкий пучок. Антенна может представлять собой решетку из тысяч небольших антенн, как, например, на станции Джикамарка, расположенной в

Перу вблизи магнитного экватора, или сферическое зеркало диаметром 300 м, оборудованное прямо в естественной карстовой впадине в горах Пуэрто-Рико.

Во Франции, например, для зондирования ионосферы используются разнесенные на 300 км передающая и приемная антенны. Передатчик излучает энергию непрерывно вертикально вверх, а управляемая по наклону приемная антенна «улавливает» сигналы, рассеянные ионосферой, последовательно прощупывая различные высоты. В качестве приемной антенны используются антенны крупнейшего радиотелескопа — вертикальное параболическое зеркало размерами 35×300 м и плоское наклонное зеркало 200×40 м. Такая «двухпозиционная» система особенно эффективна для изучения нижней атмосферы, где свободных электронов в тысячу раз меньше, чем в области F_2 , и рассеянный сигнал совсем слабый.

Недавно в Скандинавии, в зоне полярных сияний, вошла в строй мощная установка некогерентного рассеяния. Уже получены уникальные данные об электрических полях и ионосферных ветрах, связанных с магнитными бурями. Имеются все основания полагать, что комплексные измерения с помощью ракет, искусственных спутников Земли и метода некогерентного рассеяния дадут нам возможность увеличить бесценный свод знаний об удивительном радиозеркале нашей планеты.

Радиоволны используются как инструмент для изучения ионосферы в десятках различных радиометодов. Я же, боясь утомить своего терпеливого читателя их последовательным описанием, рассказал только о наиболее распространенных методах и одном «экзотическом» — вертикальном импульсном радиозондировании — «Маяках» и о некогерентном рассеянии. На самом деле ученые используют любую возможность, чтобы по прохождению радиоволн узнать что-нибудь новое о капризах ионосферы. В космос летают уже сотни космических аппаратов. И на борту каждого из них обязательно установлены исследовательские радиопередатчики, которые работают в диапазоне волн, пронизывающих ионосферу. Антенны в центрах по управлению полетами, кроме служебной и связной информации, принимают сигналы, несущие сведения об электронном содержании в районе орбиты спутника, ионосферных неоднородностях, поглощении радиоволн и т. п.

А иногда специалисты по физике ионосферы надевают скафандр космонавта. В составе одного из экипажей американской орбитальной обсерватории «Скай-лэб» («Небесная лаборатория») в космосе побывал, например, известный ученый Оуэнс Гарриотт, а космонавт Георгий Михайлович Гречко — доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией в Институте физики атмосферы АН СССР.

Контролируется с исследовательскими целями и работа наземных радиолиний, организуются экспериментальные радиотрассы. И если ученые стараются понять механизм наблюдаемых явлений, то потребители ждать не могут и не хотят. Каждый день задается настойчивый вопрос: «Какая завтра радиопогода?» Это, конечно, закономерно.

...и прогноз

Любая область перспективных исследований должна нести на себе некое бремя сегодняшних проблем, вносить вклад в решение насущных задач науки, техники, народного хозяйства. Ну, а радиосвязь — один из важнейших прикладных аспектов использования тех характеристик ионосферной плазмы, которые можно получить, применяя описанные в этой книге методы ионосферных измерений. Связь на коротких волнах до настоящего времени является основным видом магистральной радиосвязи на больших (несколько тысяч километров) расстояниях. В радиовещании, загоризонтной радиолокации, а также при осуществлении связи с морскими судами, самолетами, низколетящими спутниками и космическими кораблями также используется ионосферное распространение коротких радиоволн.

Основой прогноза условий радиосвязи является прогноз состояния ионосферы. И здесь надо понять, что изучить ионосферу только путем экспериментов, сколько бы их ни было, нельзя. Какой бы эффективный ракетный пуск мы ни осуществляли, какой бы дорогостоящий и сложный эксперимент ни провели — они дадут информацию о состоянии ионосферы для конкретного набора влияющих на нее факторов. А таких факторов слишком много, чтобы путем экспериментов перебрать все мыслимые их комбинации. Это просто-напросто невозможно. Значит, надо открыть законы

изменения состояния ионосферы, построить физико-математические модели ее поведения. Но сказать, что эта задача учеными полностью решена, увы, пока еще нельзя.

Прогноз ионосферных характеристик пока в основном ведется на основе длительных рядов наблюдений мировой сетью ионосферных станций. Эти наблюдения позволяют, например, найти эмпирическую зависимость критических частот регулярных ионосферных слоев E , $F1$, $F2$ от координат места наблюдения, времени суток, сезона и уровня солнечной активности. Эмпирической в физике называют закономерность, найденную из опыта, из эксперимента, но не объясняемую полностью физической теорией. С поступлением новых данных эмпирические зависимости непрерывно уточняются.

Распространение коротких волн на большие расстояния происходит, как правило, скачками, путем последовательных отражений от «стенок» волновода Земля — ионосфера. Условия радиосвязи в конечном итоге определяются силой сигнала, напряженностью электромагнитного поля в месте приема. Для того чтобы предсказать эту величину, необходимо знать траекторию распространения радиосвязи между передатчиком и приемником (расстояние скачка, углы прихода) и степень поглощения радиоволн на трассе. Кроме того, при расчете необходимо учитывать замирания, которые вызываются как интерференцией в точке приема многих лучей, испытавших различное число отражений от ионосферы, так и наличием ионосферных неоднородностей.

С какими же характеристиками ионосферной плазмы связаны конкретные характеристики радиосвязи? Важнейший вопрос для связиста: на каких частотах вести работу, какие применять длины волн? Обычно работают не на одной частоте, а в диапазоне частот — от максимально применимой частоты (МПЧ) до наименьшей применимой частоты (НПЧ). Максимально применимая частота — это наибольшая частота радиоволны, способной отразиться от ионосферы при заданном расстоянии; она определяется критической частотой отражающего слоя ионосферы, то есть электронной концентрацией в максимуме слоя.

Значит, чтобы рассчитать МПЧ, надо получить высотнo-частотную характеристику в точке отражения, то есть иметь в этом месте ионосферную станцию.

Частота радиосвязи, ограничивающая диапазон рабочих частот снизу — НПЧ — зависит от степени поглощения радиоволн в ионосфере.

Расстояние скачка — существенная характеристика радиосвязи — зависит не только от направленности излучения и рабочей частоты, но и от высоты отражающего ионосферного слоя.

Итак, три фактора — высота слоя, концентрация свободных электронов и степень поглощения — определяют условия радиосвязи, и именно их надо прогнозировать. И такие прогнозы составляются, как правило, на месяц вперед; конечно, для спокойного, обычного состояния ионосферы.

Но спокойное состояние ионосферы в любой момент может нарушить «главный дирижер» геофизических явлений — Солнце. Поэтому прогностические центры непрерывно получают сведения о солнечной активности, магнитных бурях, интенсивности космических лучей. Анализируя эти данные вместе с поступающей каждые несколько часов информацией от сети ионосферных станций, специалисты составляют краткосрочный радиопрогноз — на пятидневку, на сутки и даже на несколько часов вперед. Это дает возможность вовремя изменить режим работы на радиолинии (изменить частоту, увеличить мощность, сменить антенну и т. д.), чтобы обеспечить бесперебойную связь и в неблагоприятных условиях, в периоды ионосферных возмущений.

Да, радиопрогноз, это, разумеется, хорошо, но вот беда — иногда он не оправдывается. По прогнозу все «спокойно», а связи нет... А есть ли какой-нибудь способ перед тем, как начать сеанс радиосвязи, точно узнать, правильно ли выбраны радиосредства, будет ли связь успешной? Фантастика? Нет, такое средство было найдено.

Способ заранее «прострелить» радиотрассу, чтобы определить наиболее благоприятные условия связи, называется «возвратно-наклонное зондирование ионосферы». Исследователи ионосферного распространения радиоволн заметили, что радиоволны после отражения от ионосферы и затем от Земли могут вернуться по тому же пути обратно, к тому месту, где они начали свое путешествие. Место встречи радиоволн с Землей становится как бы ретранслятором, источником вторичного излучения в обратном направлении. Сильно ослаб-

ленная, такая «обратная волна» может быть зарегистрирована на передающей станции.

Это очень важный факт. А важен он, поскольку говорит о том, что сигнал дошел до корреспондента — значит, на той волне и в том направлении, которые выбрал оператор, можно начинать радиопередачу. А если сигнал не вернулся? Надо изменить рабочую частоту или угол излучения и подобрать и то, и другое таким образом, чтобы обратный сигнал был.

Практически поступают так: «простреливают» заданную трассу на нескольких частотах, а затем меняют ту, на которой радиосвязь пойдет лучше всего. Такой способ является существенным подспорьем радиопрогнозу, особенно когда состояние ионосферы быстро меняется.

Короткие волны, отразившись от ионосферы, быстро уходят за горизонт, но если они оттуда возвращаются, значит можно «увидеть» с их помощью, что происходит там, за горизонтом? Обычный радиолокатор «видит» цель на сравнительно небольших расстояниях. Если самолет летит на высоте 10 тыс. м, то обнаружить его можно на расстоянии примерно 400 км. Если он снизится до 100 м, дальность обнаружения еще меньше — 50 км. А тут появляется возможность загоризонтной радиолокации на расстоянии нескольких тысяч километров! Радиоимпульсы радара, отраженные ионосферой, достигают удаленного объекта, а отразившись от него, они благодаря той же ионосфере вернуться к передатчику. Поскольку радиолуч претерпевает при этом как минимум трехкратное отражение, возвращающийся сигнал очень слаб. Но это уже дело техники — принять, усилить, расшифровать.

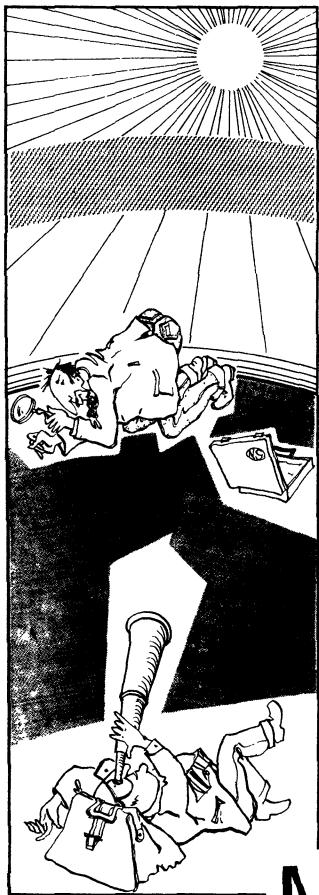
Так «волшебное зеркало планеты» дает нам возможность «заглянуть» в самые удаленные и труднодоступные уголки земного шара.

Много проблем у связистов возникает из-за наличия так называемого поглощения в полярной шапке, когда под действием вторгающихся в ионосферу солнечных протонов интенсивный рост ионизации охватывает обе полярные шапки — от полюсов до зоны полярных сияний, — причем продолжается это явление несколько дней. В эти периоды коротковолновая связь в высоких широтах серьезно нарушается, а иногда становится просто невозможной в течение длительного времени.

Когда появились спутники, специально предназначенные для радиосвязи и работающие на частотах далеко за пределами того диапазона, на который в основном действует ионосфера, то сперва показалось, что многие проблемы ионосферного распространения радиоволн утратили свою былую значимость. Но этот вывод оказался весьма преждевременным. Я уж не говорю о колоссальной стоимости и сложности систем запуска спутников и их эксплуатации, что делает в ряде случаев невозможным или попросту экономически нецелесообразным использование таких систем. Я не хочу рассматривать проблему уязвимости спутниковой связи с точки зрения обороны. Просто некоторые области Земли, в частности полярные, практически недоступны для связи с помощью геостационарных спутников, а мелко-масштабные неоднородности в ионосфере вызывают сильнейшие искажения сигналов спутниковой связи даже на очень высоких и сверхвысоких частотах в диапазоне нескольких гигагерц, то есть нескольких миллиардов колебаний в секунду.

Таким образом, ясно, что и диагноз, и прогноз ионосферы очень рано списывать в архив устаревших научных проблем. Они нужны и ученым, и практикам. Международные научные организации эти задачи признают и актуальными, и достойными внимания будущих поколений исследователей.

Проблемы, загадки, гипотезы



Ты все пытаешься постигнуть
тайны света,

Загадки бытия... К чему, мой
друг, все это?

Ночей и дней часы беспечно
проводи —

Там все устроено без тво-
его совета.

Омар Хайям

Мы живем сейчас в удивительное время. Время стремительное, спрессовывающее года в секунды, фантастически быстро меняющее облик планеты, технологию, каждый день приносящее ошеломляющие открытия и раскрывающее захватывающие дух перспективы. И в своем неудержимом движении научно-техническая революция увлекает за собой все — мы даже сами иногда не замечаем, как начинаем мыслить и говорить по-другому, в унисон с космическим веком. Говорить... Да, меняется сам язык — чудесное средство общения, взаимопонимания, а в науке — один из способов передачи информации.

Язык науки, на первый взгляд сухой и бесстрастный, в эпоху НТР все больше проникает в живую, яркую, эмоциональную разговорную речь. И, конечно, это процесс взаимный, строгие термины современной науки вдруг приобретают неожиданную образность, метафоричность, звучат то ласково (например, «очарование» элементарных частиц в атомной физике), то сурово («ядерная зима» в докладах экспертов о возможных катастрофических последствиях ядерной войны).

Давно закончился бессмысленный спор «физиков» и «лириков», давно стало ясно, что математика и поэзия намного ближе друг к другу, чем кажется, что ученому для описания своих идей и результатов необходимо все богатство, все краски и оттенки родного языка. Вспомним древних астрономов. Какие звучные и красивые имена дали они на века созвездиям и планетам! И в этой книге встречались обороты и термины, относящиеся скорее к «разговорному жанру», чем к высокой науке. Но без участия воображения все наши сведения о природе ограничились бы классификацией фактов. Есть такие области науки, которые являются общечеловеческими не только по результатам, но и по методам, способам, средствам получения новых знаний.

К проблеме Солнце — Земля это относится полностью. Ограниченный объем книги, да и цель, которую мы себе поставили — дать только общее представление об ионосфере и основах солнечно-земной физики, — не позволили рассказать о многих интересных, хотя и мало еще разработанных, задачах и явлениях.

Что является причиной солнечной активности вообще и ее вариаций в частности? Влияют ли солнечная активность и другие космические факторы на биологическую сферу, на процессы жизни, на живую природу? Связана ли электромагнитная солнечная деятельность с погодой и климатом на нашей планете? Имеются ли магнитное поле и ионосфера у других планет солнечной системы? Нельзя ли использовать на Земле огромную энергию ионосферных процессов?

Эти и многие другие вопросы находятся сейчас на стадии исследования, вызывают бурные научные дискуссии и, естественно, большой интерес у самых широких кругов читателей. Поэтому стоит сказать о них несколько слов.

О причинах солнечной активности, то есть возникновения пятен, вспышек, протуберанцев и т. д., досто-

верных данных практически нет. Здесь исследователи пока продолжают накопление экспериментальных данных, пытаются выстроить их в какую-нибудь стройную систему, найти хотя бы надежные эмпирические закономерности. Если это удастся, то можно будет сопоставить их с прогнозом теоретиков и какую-либо из имеющихся гипотез признать теорией.

Так, одна из интереснейших гипотез о причинах солнечной активности и особенно периодичности в ее проявлениях пытается объяснить это явление приливами в атмосфере Солнца. Приливы эти в принципе могут вызываться воздействием на солнечную атмосферу поля тяготения планет Солнечной системы — Юпитера, Земли, Венеры, Марса, Меркурия. Некоторые исследователи нашли в периодических изменениях солнечной активности периоды обращения некоторых планет. Можно считать, что Солнце является чутким прибором, отзывающимся на все изменения силы тяготения вследствие перемещения планет в пространстве. Что же это получается? Не Солнце — Земля, а Земля — Солнце? Здесь есть над чем поразмыслить...

Солнечно-земная физика не только пользуется результатами других научных дисциплин, но и вносит в них свой вклад. Прежде всего, конечно, космические исследования играют заметную роль в фундаментальной физике плазмы. А в астрофизике? Ведь свойства плазмы в системе Солнце — Земля служат как бы мостиком от экспериментов в ограниченной по объему лабораторной плазме к генераторам плазмы космического масштаба, частицам сверхвысоких энергий. Система Солнце—Земля и для будущих поколений будет долго оставаться единственной астрофизической системой во Вселенной, доступной для прямых измерений. Если удастся понять, как работает эта система, то можно будет получить полезную информацию для понимания природы солнечно-планетных связей и для других звездных систем.

Сравнительное изучение таких характеристик планет, как их магнитосфера, ионосфера и атмосфера, очень полезно и важно для восприятия Солнечной системы как единого целого. Иногда изучение других планет заставляет по-новому взглянуть на солнечно-земные связи.

О магнетизме других планет имеется достоверная информация, полученная с помощью космических

аппаратов. Луна, по-видимому, обладает слабым магнитным полем. Но судя по намагниченности лунных пород на Луне в принципе могут быть сильные магнитные аномалии.

Несколько планет обладает достаточно сильными собственными магнитными полями, чтобы затормозить солнечный ветер и образовать магнитосферы выше ионосфер. Это Меркурий, Земля, Юпитер, Сатурн, а может быть, и Марс. У Меркурия магнитосфера почти аналогична магнитосфере Земли, но большую часть ее объема занимает сама гигантская твердая планета. Более того, на Меркурии нет собственной атмосферы и радиационных поясов.

Магнитосфера планеты-гиганта Юпитера несколько отличается по форме от земной. В отличие от земной магнитосферы, для которой основным источником частиц является солнечный ветер, источником захваченных частиц в магнитосфере Юпитера является ионосфера самого Юпитера и тороидальная область с тяжелыми ионами и электронами, окружающая эту планету вблизи орбиты его спутника Ио.

Космические аппараты «Пионер-11» и недавно «Вояджер-1» и «Вояджер-2» обнаружили, что магнитосфера Сатурна больше похожа на земную, чем магнитосфера Юпитера. Интересно, что знаменитые кольца Сатурна сильно влияют на захваченные частицы и, следовательно, на магнитосферные возмущения. Советские и американские автоматические станции серии «Венера» и «Маринер», космические ракеты-зонды, посланные к Марсу, показали, что общепланетарное магнитное поле Венеры и Марса невелико: гораздо слабее, чем у Земли.

Поэтому солнечный ветер иногда может взаимодействовать прямо с атмосферой, участвуя в создании ионосфер этих планет. В солнечном ветре Венеры и Марса, так же как и в солнечном ветре Земли, образуются ударные волны, но их фронты располагаются гораздо ближе к поверхности планет, чем у Земли. Однако обе планеты имеют с ночной стороны плазменные шлейфы, напоминающие хвост магнитосферы Земли. Космические аппараты и наземные радиолокаторы уже дали многочисленные сведения об ионосферах Венеры и Марса. У нас уже есть представление и о дневных, и о ночных условиях на этих далеких планетах. Но дискуссии о природе их плазменных оболочек продолжаются, в связи с чем и планируются новые эксперименты.

Интенсивно изучаются и атмосферы планет. Они очень разнообразны по массе, составу, тепловому режиму. Ближе всего к земной по размеру, температуре поверхности и солнечной освещенности атмосфера Марса. Но давление в атмосфере Марса и поверхности составляет только 1% приземного и атмосфера Марса почти полностью состоит из углекислого газа. Гигантские горы и впадины на поверхности Марса существенно влияют на систему ветров в его атмосфере. Ветры у поверхности очень сильны — скорость их достигает иногда 60 км/ч. Время от времени случаются сильнейшие пылевые бури.

Зато на Венере, где основной компонент атмосферы — тоже углекислый газ, давление у поверхности в 90 раз больше приземного, а температура составляет около 400 °С. Крупномасштабная циркуляция в этой плотной, похожей на океан атмосфере приводит к тому, что температура сохраняется практически неизменной днем и ночью на экваторе и на полюсе. Скорости ветров здесь просто фантастические — до 100 км/ч, и это в такой плотной атмосфере! Теперь понятно, какой запас прочности должен быть у космических аппаратов, сажащихся на поверхность Венеры?

В атмосферах Венеры и Юпитера были обнаружены молниевые разряды. Пока трудно понять механизм их возникновения в атмосферах, где нет облаков, состоящих из частиц льда и капель воды, как на Земле. Но понять его необходимо, хотя, честно говоря, мы плохо знаем процесс генерации молниевых разрядов и возникновения таких явлений, как шаровые молнии, и в земных условиях.

В последние годы множество событий заставило общество проявить пристальное внимание к чисто практическим последствиям солнечно-земных связей. И одно из них — падение на Землю космической лаборатории США «Скайлэб». Когда последний астронавт в 1974 г. покинул лабораторию, считалось, что космический аппарат выведен на безопасную орбиту. Там он должен был ожидать прибытия одного из первых челночных космических кораблей многократного использования типа «Шаттл». Корабль должен был подтолкнуть аппарат, перевести на более высокую орбиту. И здесь лаборатория должна была дожидаться расконсервации.

Увы, план этот был сорван, что обусловлено двумя обстоятельствами: во-первых, задержками выполнения

программы «Шаттл», а во-вторых — быстрым ростом солнечной активности в период, близкий к годам максимума. Рост солнечной активности привел к тому, что атмосфера на высоте орбиты стала горячее и плотнее, это усилило торможение «Скайлэба», и орбита стала опускаться гораздо быстрее, чем ожидалось. Точно предсказать место падения оказалось весьма не просто, и газеты разразились предсказаниями катастрофы и гневными выпадами в адрес неугомонных «яйцеголовых», ученых, от которых опять одни неприятности. К счастью, павший жертвой солнечной активности «Скайлэб» упал в пустынном районе Северной Австралии, не причинив особого вреда.

А вот еще один аспект проблемы освоения космической плазмы. На протяжении всей истории нашей цивилизации производство энергии всегда было проблемой номер один. Сейчас энергетика почти целиком основана на невозобновляемых источниках энергии (это уголь, нефть, газ, ядерное топливо и т. п.), и мы порой уже сталкиваемся с их острой нехваткой. А где взять возобновляемые? Может быть, в космосе? Фантастика? Да, пока почти фантастика. Но сколько вполне реальных технических решений начиналось с фантастики?

Идея использования практически безграничного источника энергии — Солнца — отнюдь не новая, но очень заманчивая. Я говорю не о гелиотехнике, где тепло и свет с помощью специальных зеркал или фотоэлементов преобразуется в тепло и электричество. Речь идет о попытках найти способы использования той части энергии Солнца, которая преобразуется в электрическую в самой ионосфере. Ресурсы такой энергетики порядка 10^{10} кВт, что соответствует энергии 10 тыс. атомных электростанций мощностью 1 млн кВт каждая.

Установки, которые непосредственно — без паровых, газовых, гидравлических турбин — преобразуют тепловую энергию в электрическую, уже известны. Это так называемые магнетогидродинамические генераторы (МГД). Магнитная гидродинамика — это наука о движении проводящей электричество жидкости или электропроводящего газа. Проводником, пересекающим магнитное поле, в МГД-генераторах является низкотемпературная плазма, газ, нагретый до нескольких тысяч градусов и содержащий добавки легко ионизируемых веществ (для повышения электропроводности). Если плаз-

му довести до необходимой скорости (а это можно сделать и за счет ее внутренней энергии), то при движении поперек магнитного поля на ее частицы будет действовать электродвижущая сила. Замкнем электроды на какую-нибудь внешнюю нагрузку — по такой цепи пойдет электрический ток. Подобные генераторы существуют, они работают на Земле, находятся под промышленной нагрузкой.

Но ведь мы говорили, что движение космической плазмы в магнитном поле Земли происходит и в ионосфере. Скорости ионосферных дрейфов достигают сотен метров в секунду, а в периоды геомагнитных возмущений даже больше. Уже на высотах областей D и E ионосферы в плазме индуцируется электродвижущая сила, направленная как поперек, так и вдоль ее потока. В результате в ионосфере возникает круговой электрический ток в направлении с востока на запад и продольный ток в направлении к Земле (положительные ионы движутся к Земле, а электроны — от Земли). Схема генерации электрического тока в ионосферной плазме аналогична принципу действия МГД-генератора. Можно сказать, конечно условно, что в освещенной Солнцем части ионосферы располагается источник энергии (МГД-генератор), а в ночной части — приемник энергии (МГД-двигатель). Вместе с проводами (токопроводящей плазмой) источник и приемник образуют замкнутый контур. При вращении Земли вокруг своей оси ионосферная плазма совершает цикл тепловой машины, расширяясь и сжимаясь в соответствии с изменением температуры в суточном цикле. Приблизительные оценки показывают, что в ионосферном МГД-генераторе сила тока 100 млн. А, напряжение в приземной области ионосферы 200 тыс. В! В результате непрерывного взаимодействия ионосферного кругового тока с магнитным полем Земли происходит разделение электрических зарядов: положительный заряд скапливается на нижней границе ионосферы, а электроны — на внешней границе, в районе радиационных поясов. Положительный заряд внутренней поверхности ионосферы, возможно, обуславливает отрицательный заряд на поверхности Земли. Получается гигантский сферический конденсатор, его обкладки — ионосфера и Земля, а диэлектрик между ними — неэлектропроводящий воздух. Можно даже измерить напряженность электрического поля в таком конденсаторе: у поверхности Земли она равна примерно 130 В/м, с вы-

сотой она падает и уже на высоте 20—30 км ничтожно мала.

Это, конечно, прекрасно, что в космосе все есть — и генераторы, и токи, и поля, и конденсаторы — в общем все элементы электростанции. Но как все это использовать для совершения полезной работы на Земле? Как сделать проводники, соединяющие космический генератор и электроплиту в нашей квартире? Вот тут имеется полный простор для фантазии. Мощные кабели на опорных башнях высотой 100 км (!), столбы ионизированного воздуха, создаваемые на вершинах гор путем специального нагрева с добавками легко ионизируемого вещества (как в промышленных МГД-генераторах), организация время от времени «пробоя» конденсатора ионосфера — Земля путем облучения воздуха мощным потоком жесткого ионизирующего излучения от ядерных реакторов и создания «плазменных столбов» между Землей и ионосферой и т. п. и т. д. А для пропускания сверхсильных токов по цепи, работающей сверхвысоким напряжением, на тысячи километров предлагается, естественно, использовать сверхпроводящие материалы. Благо физики уже получили в лабораториях сверхпроводимость не только при сверхнизких температурах, но и при температурах, не требующих криогенной техники.

При осуществлении столь гигантских проектов возникают, правда, такие «мелкие» вопросы, как проблема сохранения ионосферы вообще при разрядке космического конденсатора (значит, разрядка допустима процентов на десять, не более), проблема мощных перемещений воздушных масс, проблема их влияния на механизм образования циклонов и антициклонов в атмосфере, то есть воздействия на погоду, проблема загрязнения атмосферы окислами азота при горении разряда в плазменном столбе и многие другие. Так что, уважаемый читатель, продумывая проекты будущей космической энергетики, соблюдайте, пожалуйста, осторожность, а то как бы не разбить вдребезги это «волшебное зеркало планеты»...

Человек очень давно заметил, что магнитные поля обладают биологическим действием. Особенно сильно воздействуют на живые организмы и растения сильные магнитные поля напряженностью в несколько тысяч эрстед. Очень чувствительна, например, к воздействию магнитных и электрических полей кровь. Магнитное поле

Земли не отличается большой силой, но действует постоянно. Возможно, его изменения, особенно во время сильных магнитных бурь, могут отразиться на биологических процессах, непрерывно происходящих в живых организмах.

Наблюдательные медики опубликовали очень много данных о наличии хорошего согласия, или — выражаясь языком математической статистики — высокой корреляции, между колебаниями различных индексов солнечной и геомагнитной активности (например, числа Вольфа) и возникновением различных эпидемий (например, чумы, холеры, гриппа и т. д.), эпизоотиями, повторяемостью различных заболеваний и увеличением смертности, нарушениями сердечной деятельности и т. п., и т. д. Различные характерные функциональные расстройства наблюдаются и у людей, экранированных от естественного магнитного поля (например, у экипажей подводных лодок в длительном автономном плавании), и у тех, кто работает в сильных магнитных полях (например, работающих у электролизных ванн на алюминиевых и металлургических заводах). Конечно, нет оснований думать, что электромагнитное излучение Солнца может быть причиной эпидемий или болезней, но оно, пожалуй, может регулировать их во времени и по интенсивности. Сейчас широко обсуждается такая точка зрения, что на здоровый организм изменения внешней среды, в том числе электромагнитных полей, действуют слабо. А для больного организма, с нарушенной способностью к восстановлению, солнечная вспышка может оказаться губительной. Можно спорить, утверждать или отрицать принципы гелиобиологии, но отмахнуться от этой проблемы уже нельзя.

Основной вывод, к которому пришли исследователи, — резкие аperiodические колебания экологических факторов оказывают влияние прежде всего на физико-химические процессы в биологических системах. Это создает напряжение на субмолекулярном и молекулярном уровнях и в конечном итоге приводит к функционально-структурным изменениям в организме.

Сейчас активно обсуждаются две гипотезы. Одна связывает возмущения геомагнитного поля и избыточное излучение во время солнечных вспышек и полярных сияний с изменением проницаемости так называемых биологических мембран. Согласно же другой, среда взаимодействует с электромагнитными полями самих

биологических систем и при этом возможен резонанс, резкое усиление эффекта.

Сибирский филиал Академии медицинских наук СССР сейчас ведет исследования по комплексной научной программе «Солнце — климат — человек», проводит глобальный синхронный эксперимент для изучения медико-биологического действия гелиокосмофизических, геофизических и метеорологических факторов. Для освоения Арктики эти исследования имеют огромное значение.

Публикации на тему гелиобиологии захлестнули популярные издания. Но здесь есть большая опасность — принять желаемое за действительное. К сожалению, фанатичные сторонники какой-либо идеи часто добросовестно (я подчеркиваю, добросовестно) заблуждаются, не придавая должного значения фактам, их теорию не подтверждающим, и преувеличивая случаи, ее подтверждающие. Уж очень хочется помочь страждущему человечеству. Я не хочу здесь говорить о «провидцах», сознательно спекулирующих на общественном интересе к какой-либо проблеме, будь то прогноз погоды, прогноз катастроф или прогноз опасных для здоровья периодов. Просто, одно дело — гипотезы, идеи, предположения и дискуссии, а совсем другое — практические рекомендации. И я, например, против того, что в некоторых наших центральных газетах печатаются даты «неблагоприятных дней» для гипертоников и сердечников, вычисленные на основе якобы точных прогнозов солнечной и геомагнитной активности.

Во-первых, столь точного прогноза пока просто не существует. Во-вторых, даже если геомагнитное возмущение и есть, то внимательный читатель этой книги, надеюсь, понял, что следствия его будут различны, например, на Новой Земле и в Кушке. Но газету получают и там, и там. И самое главное — с больными людьми, особенно пожилыми, надо быть предельно осторожными, ведь для них многое определяется состоянием нервной системы, психологическим настроением. Если человек с пораженной сердечно-сосудистой системой или иной патологией будет неделю со страхом ждать «черного дня», он в этот день с большой долей вероятности будет чувствовать себя плохо без всякой магнитной бури. Не надо торопиться, пусть только врачи-специалисты получают эту «достоверную» информацию, пусть усилят на всякий случай контроль за своими подо-

печными в такие дни. От этого хоть вреда не будет.

Очень интересная ситуация сложилась сейчас с проблемой воздействия солнечной активности на погоду и климат. Долгие годы метеорология — наука, изучающая главным образом физические процессы в самом нижнем слое атмосферы, тропосфере, — обходилась без учета космических факторов. Но полеты человека в космос поставили перед многими науками вопрос: как влияют эти космические факторы на течение земных процессов? Встал этот вопрос и перед метеорологией. Впервые было поколеблено казавшееся незыблемым представление, что погода и климат определяются только тепловым воздействием солнечного излучения, а электромагнитные явления к ним отношения не имеют.

Между тем, очень давно — как только стала известна цикличность солнечной активности — аналогичные циклы стали находить во многих земных явлениях. Вот, скажем, самый четкий — 11-летний цикл в появлении солнечных пятен, в изменениях числа Вольфа, о котором мы говорили в главе о Солнце. Он хорошо проявляется, например, в приросте древесины. Видели ли вы когда-нибудь пень — то, что осталось от спиленного старого дерева? Если внимательно приглядеться, то можно увидеть систему окружностей с общим центром в срединной части ствола. Это так называемые годовые кольца. Каждый год дерево становилось толще, нарастало очередное кольцо. Если толщину этих колец измерить, то можно увидеть, что она меняется от года к году (так как каждый год меняется количество тепла и света, влажности и т. п.). А если расположить полученные цифры в последовательный ряд и построить график межгодового изменения, то можно получить рисунок, очень похожий на тот, который мы уже видели, когда обсуждали вариации солнечной активности: каждые 11 лет максимум! В Америке растут огромные деревья — секвойи — они живут сотни лет. И на спиле таких деревьев 11-летняя цикличность видна особенно хорошо.

Влияние солнечной активности можно проследить, изучая многие другие явления — изменения уровня озер и грунтовых вод, стока рек, толщины отлагающегося на дне водоемов ила, ледовитости морей, повторяемости засух, ураганов и ливней, годовых температур. Были найдены и более короткие циклы: например, хорошо выраженный 27-суточный цикл погоды. А ведь Солнце

делает полный оборот вокруг своей оси именно за 27 суток! Исследователи обнаруживают все больше доказательств того, что погода чувствительна к солнечным взрывам — хромосферным вспышкам, особенно в некоторых районах земного шара. Например, очень чувствительными к космическим воздействиям оказались район Исландии и район Азорских островов в Атлантическом океане, а также Аляска, северо-западная оконечность Американского материка. Иногда резкое изменение погоды происходит прямо в день хромосферной вспышки, а иногда — несколько дней спустя.

Поток экспериментальных данных о солнечно-погодных связях непрерывно увеличивается. Но прогноз погоды сам по себе представляет очень сложную проблему. А тут еще надо учитывать солнечную активность, которую тоже предсказать, ох, как нелегко! Поэтому у гипотезы о воздействии солнечной активности на погоду есть не только сторонники, но и убежденные противники. Главный их козырь — это то, что пока не придуман ясный физический механизм такого воздействия. Дело в том, что энергия погодных процессов (дождь, снег, сильные ветры, облачность) очень велика, во много тысяч раз больше энергии, приходящей в тропосферу, скажем, от хромосферной вспышки.

Как же, спрашивается, столь ничтожная причина вызывает столь могучее следствие? Ответить на этот вопрос трудно. Но можно.

Представьте себе крутой снежный склон высоко в горах. Здесь скопились огромные массы снега. Идет цепочка альпинистов. Кто-то громко крикнул. И... катастрофа! Снежная лавина устремляется вниз по склону, сметая все на своем пути. Колоссальная энергия лавины в миллионы раз больше энергии звуковых колебаний. И все-таки неосторожный крик был причиной лавины. Такой механизм действует, как спусковой крючок у ружья. Легкое нажатие — и выстрел! Может быть, аналогичным образом и солнечная вспышка действует на неустойчивые атмосферные явления...

Может быть. Но пока абсолютной уверенности в этом нет, противники идеи будут утверждать, что все эти данные о солнечно-погодных связях — более или менее удачные опыты по самовнушению. Ведь все явления, о которых мы сейчас говорили, зависят не от одной, а от очень многих причин, и выявить, какая из них ведущая, главная, не так-то просто. Для этого необходимы

и длительные наблюдения, и сложные эксперименты, и развитая физическая теория.

Строгой теории пока нет, но гипотезы, и вполне разумные, уже есть. Ведь термосфера и средняя атмосфера являются стоками энергии, которую несет солнечная радиация в спектре электромагнитного излучения в потоке солнечных корпускул, а также энергии межпланетного магнитного поля, содержащейся в солнечном ветре.

Протонные вспышки на Солнце порождают корпускулярные потоки, которые проникают в верхнюю атмосферу в зоне геомагнитных полюсов. Эти частицы могут проникнуть в атмосферу до уровня стратосферы и даже ниже. Дополнительный нагрев верхней атмосферы в зоне полярных шапок, по мнению некоторых ученых, приводит к углублению исландского минимума и усилению интенсивности зональных ветров. В принципе подобный эффект могут произвести галактические космические лучи (надо только оценить точно, хватит ли суммарной энергии), и тогда их интенсивность также будет зависеть от цикла солнечной активности, высоты, магнитной широты и изменений межпланетного магнитного поля.

Если какие-либо энергичные частицы могут проникнуть в тропосферу и произвести ионизацию, то образующиеся в результате ионы становятся ядрами кристаллизации. За счет разности давления насыщенного водяного пара над льдом и водой на этих ядрах кристаллизуется водяной пар из окружающего воздуха и появляются облака типа перистых. Этот процесс моделировался в лаборатории, а статистические расчеты показали, что в периоды высокой солнечной активности действительно чаще наблюдаются перистые облака. Влияние перистой облачности на климат, как утверждают специалисты-метеорологи, весьма заметно.

В цепочке Солнце — погода определенную роль могут играть озон и другие малые примеси в атмосфере. Химические процессы, в результате которых они образуются и исчезают, в принципе зависят и от температуры, и от состава солнечного излучения. Связь эта нелинейная, то есть взаимная.

Некоторые гипотезы связывают долгосрочные климатические изменения под действием солнечной активности со смещением геомагнитных полюсов, о котором мы уже упоминали. Действительно, положение

геомагнитных полюсов, то есть топология магнитного поля планеты, конечно, будет менять условия взаимодействия солнечных корпускулярных потоков с атмосферой. В соответствии с этой гипотезой в те периоды, когда геомагнитный полюс был ближе к Европе, климат ее, особенно в холодное время года, был теплее. А когда полюс был в восточной части Северного Ледовитого океана, на Европу двигались холодные арктические воздушные массы.

Вопрос о связи между солнечной изменчивостью и климатом имеет огромное практическое значение, поскольку водоснабжение и сельское хозяйство во многих регионах мира находится на пределе устойчивости. Возможность надежного прогноза климатической изменчивости очень важна для экономического планирования и распределения ресурсов в региональном, национальном и международном масштабах.

Самые авторитетные научные комитеты, занимающиеся сейчас перспективным планированием научных исследований, признают солнечно-погодные связи важной областью. Солнечно-земные связи в настоящее время изучаются в самых разных областях науки. Мы уже упоминали биологию и метеорологию. Но вот недавно солнечной активностью заинтересовались... сейсмологи. Каждый день на нашей планете происходит множество мелких землетрясений. Но иногда они бывают столь мощными, что превращают в руины целые города, вызывают громадные океанские волны (цунами), становятся причиной гибели десятков тысяч людей. Человечество давно стремится разгадать тайну механизма землетрясений, понять их причины. Только тогда можно будет заранее предсказывать их появление, принимать какие-то меры, чтобы уменьшить причиняемый ими ущерб.

Геологи считают, что землетрясения связаны с механическими напряжениями и движениями в земной коре. Эти напряжения и движения сами зависят от вращения Земли вокруг своей оси. А если Земля вращается не так уж равномерно? Может быть, это вращение внезапно тормозится или ускоряется, а может быть, даже сама ось от вращения меняет свое положение? Когда вы едете в машине и она резко тормозит, сила инерции срывает вас с сиденья и кидает вперед. Грозные силы инерции могут вызвать и землетрясения, если затормозится в своем вращении планета.

Так может ли это быть? Двести с лишним лет тому назад, в 1752 г., Берлинская академия наук объявила конкурс на лучшее исследование, которое ответило бы на следующие вопросы: «Было ли суточное вращение Земли всегда одинаковой скорости, какими способами можно в этом убедиться и, если вращение неравномерно, какая этому причина?» Сначала ответ был один — продолжительность суток не меняется никогда ни на секунду. Но ответ был неверным. Еще каких-нибудь сто лет, и это стало очевидным — было доказано, что длина суток не постоянна, а все время меняется. Еще сто лет — и изменения удалось точно подсчитать. С 1887 по 1944 г., то есть за 57 лет длина суток увеличилась на 34,3 с, или в среднем на 0,6 с в год. И самое главное — изменение скорости вращения происходит не равномерно, а скачками. Резкие изменения могут происходить за короткие промежутки времени.

В чем причина этих резких скачков? Несколько лет назад группа крупных ученых выдвинула идею, что скачки обусловлены изменениями солнечной активности и проникновение энергии солнечного ветра (например, во время магнитной бури) приводит к увеличению скорости суточного вращения Земли. Сопоставляя индексы солнечной активности и сейсмической энергии за много лет, исследователи пришли к выводу, что солнечная активность играет большую роль и в медленных изменениях скорости вращения Земли.

Кстати, не только землетрясения, но и уровень океанов, приливы и отливы, система теплых и холодных течений, а следовательно, погода и климат — тоже зависят от скорости вращения нашей планеты. Так, при увеличении скорости вращения Земли льды подступали к берегам Исландии и Гренландии, а при ее уменьшении ледовитость этих районов понижалась, а Девисов пролив полностью очищался ото льда. Как видите, снова замыкается цепочка Солнце — погода.

Люди постоянно ищут «предвестники» землетрясений. Уже точно известно, что перед землетрясениями меняются свойства подпочвенных вод, их уровень (такие измерения проводились в сейсмоактивных регионах), многие живые организмы ведут себя необычным образом. Естественно, когда появились системы постоянного слежения, постоянного контроля околоземного космического пространства, возник и вопрос: нельзя ли на ионограммах или магнитограммах увидеть грозное

предупреждение грядущих катастроф? Можно даже придумать и физический механизм, физическую гипотезу, делающую этот вопрос не таким уж бессмысленным.

Действительно, существуют такие горные породы, у которых изменение свойств механических тесно связано с изменением свойств электрических. Существует и такое явление «пьезоэлектрический эффект». Оно состоит в том, что при механических деформациях кристаллов в определенных направлениях на их гранях появляются электрические заряды противоположных знаков, то есть они становятся источником электрического поля. Пьезоэффект характерен для кварца, турмалина, сегнетовой соли, титаната бария, цинковой обманки и других веществ.

Так почему ж не предположить, что при гигантских механических напряжениях в земной коре, предшествующих землетрясениям, не появляются электрические поля, которые могут повлиять на электрические свойства волновода Земля — ионосфера, способны проникнуть в ионосферу и воздействовать на движение заряженных частиц? Что же, это вполне разумное предположение. Дело за «небольшим» — научиться видеть этот эффект и выделять его на фоне и без того изменчивых и сложных электромагнитных полей и распределений заряженных частиц в приземной плазме, найти способ, метод, правила для такого «распознавания образов». Ищем. Удачные прогнозы обнадеживают, а ошибочные — заставляют вести поиски еще упорнее.

Много проблем, много загадок, много гипотез. Надо постигать окружающее пространство, надо его использовать, но надо его и оберегать. С полным основанием можно говорить об экологии космической плазмы. Мы уже касались этой проблемы, говоря об «озонном щите» планеты. А вот другой пример из недалекого будущего: создание солнечных энергетических установок в космосе может потребовать и разработки ионных двигателей для выведения этих установок с низких орбит на геостационарные, когда космический аппарат постоянно находится над одной точкой земной поверхности, то есть вращается не вокруг Земли, а вместе с ней. Внесение чужеродных элементов, содержащихся в выхлопах этих двигателей, в верхнюю атмосферу и магнитосферу может нарушить естественный состав частиц в пространстве и устойчивость радиационных поясов. Прохождение мощных пучков микроволнового излучения от солнечных

энергетических станций через ионосферу может оказать отрицательное воздействие на радиосвязь.

Человечество должно быть заинтересовано в том, чтобы создаваемые им возмущения, даже небольшие и слабые, не вызывали триггерных катаклизмов, неуправляемой цепной реакции. Мы еще недостаточно долго населяем Землю и видели только очень малую часть того пути, который прошла наша планета, а уже вмешиваемся в механизмы управления космического корабля «Земля».

Много неизвестных в той задаче, которую мы решаем. Гораздо больше, чем удалось определить за те годы, что существует сравнительно молодая наука — солнечно-земная физика. Что же, тем интереснее работать. И тем, кто придет в науку, хочу напомнить два высказывания Льва Давидовича Ландау: «Ввиду краткости жизни мы не можем позволить себе роскошь тратить время на задачи, которые не ведут к новым результатам» и «Главное, делайте все с увлечением, это страшно украшает жизнь!».

Список рекомендуемой литературы



1. Белов К. П., Бочкарев Н. Г. Магнетизм на Земле и в космосе.— М.: Наука, 1983.
2. Бялко А. В. Наша планета — Земля.— М.: Наука, 1983.
3. Данилов А. Д. Химия, атмосфера и космос.— Л.: Гидрометеиздат, 1969.
4. Данилов А. Д. Популярная астрономия.— Л.: Гидрометеиздат, 1978.
5. Зайцев Ю. И. Спутники «Космос».— М.: Наука, 1975.
6. Красовский В. И. Штили и штормы в верхней атмосфере.— М.: Наука, 1971.
7. Маров М. Я. Планеты Солнечной системы.— М.: Наука, 1981.
8. Мизун Ю. Г. Космос и погода.— М.: Наука, 1986.
9. Мизун Ю. Г., Мизун П. Г. Космос и здоровье.— М.: Знание, 1984.
10. Мирошниченко Л. И. Солнечная активность и Земля.— М.: Наука, 1981.
11. Полетаевкин П. Г. Космическая энергетика.— М.: Наука, 1981.
12. Пушкин Н. В., Силкин Б. И. Внимание! Солнце спокойно.— Л.: Гидрометеиздат, 1966.
13. Физика космоса.— В кн.: Малая энциклопедия. М., 1986.
14. Чижевский А. Л. Земное эхо солнечных бурь.— М.: Мысль, 1976.
15. Эллисон М. А. Солнце и его влияние на Землю.— М.: Наука, 1969.

Научное издание

ЭДУАРД СОЛОМОНОВИЧ КАЗИМИРОВСКИЙ

Планета в космической плазме

Редактор О. Э. Александрова. Художник Н. А. Саутин. Художественный редактор Б. А. Бураков. Технический редактор Н. И. Перлович. Корректор Л. И. Хромова.

ИБ № 1901

Сдано в набор 25.01.90. Подписано в печать 17.07.90. М-19608. Формат 84×108^{1/32}. Бумага книжная № 2. Гарнитура журнальная рубленая. Печать офсетная. Усл. печ. л. 9,66. Усл. кр.-отт. 10,08. Уч.-изд. л. 10,35. Тираж 41 500 экз. Индекс ПЛ-35. Заказ № 1251. Цена 85 коп.

Гидрометеиздат. 199226. Ленинград, ул. Беринга, 38.

Ордена Трудового Красного Знамени тип. издательства Куйбышевского обкома КПСС. 443086, г. Куйбышев, проспект Карла Маркса, 201.