



Их называют геофизическим оружием, способным менять климат, вызывать ураганы и землетрясения. Уверяют, что сгустками плазмы они могут сбивать ракеты и выводить из строя электронику чуть ли не на другом конце Земли. Говорят даже, что огромные антенные поля и круглые чаши радаров распространяют волны, действующие на психику. Всё это, разумеется, выдумки. Но зачем же на самом деле нужны эти мощные, нацеленные в небо радиоизлучатели и ровные ряды столбов с тонкими, едва заметными антеннами? Их задача — изучать ионосферу, заряженную оболочку нашей планеты.

ЗАЧЕМ ГРЕЮТ НЕБО. МИФЫ И ПРАВДА

Кандидат физико-математических наук Алексей ПОНЯТОВ.

КАК ОБНАРУЖИЛИ ИОНОСФЕРУ

Гипотеза, что в атмосфере есть токопроводящий слой, появилась ещё в XIX веке при размышлениях о природе возмущений магнитного поля Земли, но нашла подтверждение только после изобретения радио. В 1902 году Гульельмо Маркони осуществил радиопередачу на расстояние 3400 км. Это была фантастическая дальность — тогда считалось, что радиоволны способны распространяться только в пределах прямой видимости (из-за шарообразности Земли — всего десятки

километров). В том же году независимо Оливер Хевисайд в Великобритании и Артур Кеннелли в США предположили, что за горизонт радиоволны попадают, отражаясь на высоте более ста километров от проводящего слоя. Однако для связи тогда использовали волны с длиной λ от сотен метров до десятков километров, что не позволило его обнаружить. И только когда радиолюбители, которым выделили для работы «непригодный» для дальней радиосвязи диапазон коротких волн (КВ) длиной менее 200 м, в 1922 году установили двухстороннюю связь между Европой



и Америкой, наличие проводящего слоя из гипотезы превратилось в реальность.

В 1924 году, используя интерференцию излучённого и отражённого КВ-сигналов, английский физик Эдуард Эплтон открыл и исследовал слой Кеннелли—Хевисайда, а в 1926-м — более высокий слой, названный его именем (сейчас это области *E* и *F* ионосферы), и получил Нобелевскую премию (1947). Однако ещё в 1923 году наш соотечественник Михаил Васильевич Шулейкин по наблюдениям за приёмом радиовещательных станций рассчитал, что высота отражений ночью должна быть порядка 260 км. В середине 1920-х годов появился термин «ионосфера».

В те годы быстро развивались радиосвязь и радиовещание, зародилось телевидение. Основой дальней связи надолго стали короткие радиоволны. Они скачками, поочерёдно отражаясь от ионосферы и от земли, распространяются на огромные расстояния, достигая даже диаметрально противоположной точки земного шара, а порой совершая и кругосветное путешествие. Во многих странах, в том числе в СССР (Нижегородская радиолaborатория), начинают исследовать ионосферу. Потребности радиосвязи приводят к необходимости систематического наблюдения за ней в разных географических точках. Благодаря Эплтону в Великобритании эти исследова-

Установки для исследования ионосферы огромны и производят пугающее впечатление. На снимке: антенное поле стенда СУРА — фазированная решётка размером 300 × 300 метров.

ния ведутся с 1920-х годов, в СССР и США — с конца 1930-х, с 1957-го в них участвует уже сотня станций по всему миру.

ЧТО ИЗВЕСТНО ОБ ИОНОСФЕРЕ

Выше 50—60 км атмосфера Земли представляет собой плазму, то есть помимо нейтральных молекул содержит некоторое количество ионов и электронов из-за ионизации газов ультрафиолетовым и рентгеновским излучениями Солнца. Доля ионизированных молекул в ионосфере невелика и нигде не превышает 1% — это слабоионизированная плазма. Сегодня ионосферой называют только нижнюю часть плазменного слоя атмосферы, существенно влияющую на распространение радиоволн. Верхней её границей считают высоты порядка 1000 км. Выше расположена магнитосфера, она простирается на расстояние в несколько радиусов Земли, переходя в космическое пространство.

Даже небольшое количество заряженных частиц принципиально меняет свойства

● НАУКА. ДАЛЬНИЙ ПОИСК

газа. В частности, плазма влияет на распространение радиоволн тем, что электромагнитная волна приводит в движение свободные электроны. Поэтому, характеризуя плазму, мы будем говорить именно о концентрации электронов N (их количестве в 1 см^3).

С высотой N быстро растёт, достигая максимума на высотах 250—400 км, а затем медленно спадает по мере уменьшения плотности атмосферы. Из-за изменения с высотой химического состава и баланса процессов ионизации и рекомбинации в ионосфере образуется несколько областей (слоёв) — D , E и F с повышенной концентрацией электронов, не имеющие, однако, чётко выраженных границ. Иногда в E -области появляется ещё один, более тонкий, так называемый спорадический слой E_s . Свойства регулярной ионосферы и концентрация электронов в ней сильно зависят от времени суток, солнечной активности, сезона, широты и долготы места. Концентрация электронов N в пространстве меняется сложным образом, вызывая разнообразие форм траекторий радиоволн, и в пункт приёма каждая радиоволна может прийти несколькими путями — лучами. Их интерференция приводит к искажениям и ослаблению (замиранию) сигнала.

Если группу электронов в плазме сдвинуть относительно ионов, которые можно считать неподвижными, возникнет электрическая возвращающая сила, которая создаст колебания пространственного заряда электронов относительно ионов. Частота, соответствующая максимальной концентрации электронов в области, называется критической f_0 .

Частоту колебаний пространственного заряда

$$\omega_0 = \sqrt{4\pi e^2 N / m}$$

называют плазменной, или ленгмюровской, частотой (e и m — заряд и масса электронов).

Приближённо

$$f_0 (\text{МГц}) = \frac{\omega_0}{2\pi} = 8.98 \cdot 10^{-3} \sqrt{N (\text{см}^{-3})}.$$

Радиоволна, излучённая вертикально (в направлении роста N), отражается от ионосферной плазмы на высоте, где её частота близка к f_0 . Там в результате резонанса энергия передаётся электронам, а затем переизлучается в обратном направлении. Следовательно, максимальная частота радиоволн, отражающихся от ионосферы, соответствует максимуму N . В зависимости от условий она составляет 5—10 МГц, а при

наклонном излучении зависит от распределения N в пространстве и угла излучения, достигая 20—30 МГц. Для радиоволн более высокой частоты ионосфера прозрачна, они проходят её насквозь, позволяя осуществлять связь с космическими аппаратами и вести радиоастрономические наблюдения. Ионосфера изгибает траектории радиоволн, её можно рассматривать как среду с изменяющимся показателем преломления. Отклонение от прямолинейности — рефракция — уменьшается с ростом частоты.

Плазма вызывает поглощение радиоволн, особенно сильное в D -области, где ещё велика плотность атмосферы, после мощных солнечных вспышек и ядерных взрывов, и в высоких широтах во время геофизических возмущений, когда энергичные протоны и электроны солнечного ветра «высыпаются» из магнитосферы. Она замедляет радиоволну, а поскольку скорость радиоволн в плазме зависит от частоты (дисперсия), то сигналы сложной формы, в виде суммы гармоник с различными частотами, искажаются.

Магнитное поле Земли делает плазму анизотропной — её свойства зависят от направления относительно вектора индукции. Оно вызывает вращение плоскости поляризации радиоволн с частотой ниже 3 МГц (эффект Фарадея) и приводит к двойному лучепреломлению: радиоволна расщепляется на два луча с различной поляризацией, которые распространяются по своим траекториям с разной скоростью.

Магнитное поле создаёт в области E крупномасштабные динамо-токи силой в миллионы ампер, порождающая неустойчивость и неоднородность плазмы, колебания геомагнитного поля, помехи и индукционные токи на земле, которые порой приводят к выходу из строя линий электропередачи. Ионосфера начинает излучать в широком диапазоне радиочастот, которые на высоких широтах подавляют полезные сигналы, а на экране локатора могут вызвать появление ложной цели, нередко принимаемой за НЛО.

Неоднородности ионосферной плазмы («пузыри» с повышенной или пониженной концентрацией) вызывают «мерцание» радиосигналов вплоть до гигагерцовых частот, а движения неоднородностей приводят к их доплеровскому сдвигу по частоте.

По некоторым оценкам, более 99% вещества Вселенной находится в плазменном состоянии. Мы не имеем возможности исследовать плазму звёзд и дальнего космоса, поэтому очень важны исследования ионосферы, которую обычно называют «космической плазменной лабораторией».

КАК ИССЛЕДУЮТ ИОНОСФЕРУ

Изучать ионосферу начали с момента открытия, и долгое время единственным методом её исследования была радиолокация. Локатор-ионозонд излучал вертикально вверх КВ-импульсы возрастающей частоты и принимал отражённые ионосферой, что позволяло вычислить зависимость $N(h)$. В 1960-е годы появились другие методы, и одним из наиболее информативных стал метод некогерентного рассеяния радиоволн с частотой, значительно превышающей критическую частоту ионосферы. Анализ спектра рассеянного сигнала позволяет определить ионную и электронную температуру, состав, скорость дрейфа ионов и другие параметры ионосферы. Однако излучение на этих частотах проходит сквозь ионосферу, и возвращается очень слабый сигнал, для регистрации которого используют сложную обработку и длительное статистическое усреднение.

Запуск искусственных спутников Земли позволяет зондировать и просвечивать ионосферу с Земли и с орбиты, проводить бортовые измерения. Однако они имеют отрывочный и локальный характер, а сами спутники вносят значительные возмущения в изучаемую среду.

Ещё более интересны и перспективны активные эксперименты, когда на объект исследования как-то воздействуют, наблюдают последствия и делают выводы о свойствах. Контролируя и меняя параметры воздействия (мощность, место, время и т.д.), можно более уверенно судить о физических процессах.

В середине 1950-х годов в ведущих странах возникли планы облучать ионосферу мощными КВ-радиоволнами, вызывая в ионосферной плазме нелинейные явления (название связано с особенностями их математического описания). Суть нелинейности в том, что волна не только колеблет плазму, но и меняет её состояние, саму себя и другую волну, проходящую через изменённую область (в линейной среде их взаимное влияние отсутствует). К самодействию относятся самофокусировка, изменение формы импульса и ряд других явлений. Например, в 1930 году обнаружили, что к сигналу швейцарской радиостанции примешалась передача мощной радиостанции «Люксембург», вещавшей на совершенно другой частоте. Аналогичный эффект наблюдали в Горьком (теперь снова Нижний Новгород), где на сигналы радиостанций, расположенных западнее Москвы, накладывались передачи мощных столичных радиостанций. Это явление назвали Люксембург-Горьковским эффектом

или кроссмодуляцией («кросс» означает «перекрёстная»). Эффект объяснили в 1934 году тем, что мощная радиоволна повышает температуру ионосферных электронов, что приводит к усиленному поглощению волны. При амплитудной модуляции колебания амплитуды радиоволны порождают такие же изменения её поглощения. Проходящая через эту область другая волна испытывает соответствующие колебания амплитуды и оказывается промодулированной сигналом мощной волны. Полную теорию явления разработал будущий нобелевский лауреат Виталий Лазаревич Гинзбург в 1948 году.

Чтобы понять интерес к воздействию на ионосферу в те годы, нужно вспомнить, что спутниковой связи ещё не было, а ретрансляторы для охвата большой территории нужно слишком много и обходятся они дорого. Поэтому предлагали и другие способы организации связи, порой весьма экзотические: использовать в качестве ретранслятора Луну, спутники в виде отражающих шаров, облака из выброшенных в космос сотен миллионов медных «иголок». В середине 1950-х годов начинали исследовать и создавать линии связи, основанные на рассеянии радиоволн от неоднородностей тропосферы и ионосферы в слоях D , E , E_s и от метеорных следов в ионосфере.

Вот в эти поиски прекрасно вписалось и воздействие на ионосферу мощным КВ-излучением. Оно должно было создавать либо повышенную ионизацию, зеркало, отражающее радиоволны более высокой частоты, чем естественная ионосфера, либо дополнительные неоднородности, увеличивающие интенсивность рассеянного сигнала.

Неудивительно, что в нашей стране к подобным установкам сразу же проявил интерес Министерство связи. Первую в мире установку для воздействия на ионосферу построил в 1961 году НИИ Радио (НИИР) в своём засекреченном городке Лесное в Пушкинском районе под Москвой. Место было выбрано неслучайно: с 1940 года здесь функционировала одна из крупнейших радиостанций Министерства обороны. Именно отсюда с 1943 года осуществляли связь с партизанскими отрядами в немецком тылу и с войсками во время сражения на Курской дуге. Радиоцентр № 1 работает и теперь — отсюда вещает «Радио России». Из батальона технического обеспечения после войны вырос опытный завод НИИР, главный инженер которого З. В. Тапурия, ставший заместителем министра связи, и курировал создание установки. Непосредственно работами руководил начальник отдела НИИР И. С. Шлюгер. По воспоминаниям академика Александра Викторовича



Карта расположения нагревных стенов на планете. Это установки в Боулдере (1970, США); рядом со знаменитым радиотелескопом в Аресибо (1971, Пуэрто-Рико); EISCAT (1980, Тромсе, Норвегия); HIRAS (1980, Фэйрбенкс, Аляска, США); HAARP (1990, Гакона, Аляска, США); SPEAR (2003, Шпицберген).

Гуревича, Министерство связи соблазнили ещё и обещанием вызвать оптическое излучение ионосферы и осветить им Москву.

За основу воздействия взяли явление резонанса между частотой вращения электронов вокруг магнитного поля $f_H = 1,45$ МГц и радиоволной. Предполагали, что так удастся сильно поднять их энергию, но ожидания не оправдались, и для связи установку не использовали. Искусственное свечение ионосферы было настолько слабым, что его удалось зарегистрировать только в 1978 году гораздо более чувствительной аппаратурой.

Научное использование установки оказалось перспективным, и Шлюгер более десяти лет вёл на ней исследования. К сожалению,

Зал передатчиков стенда СУРА.



его работу засекретили, и долгое время она была неизвестна научному сообществу. Автор теории А. В. Гуревич, работая в этой области с 1954 года, узнал о станции только в 1973 году, а широкую известность получили американские исследования 1974—1975 годов. Секретность привела к тому, что отечественные приоритетные результаты оказались невостребованными.

Семидесятые годы стали началом интенсивных экспериментальных исследований по воздействию на ионосферу мощным КВ-радиоизлучением. Теоретическую сторону вопроса к тому времени уже разработали В. Л. Гинзбург и А. В. Гуревич.

В нашей стране инициатором экспериментальных исследований ионосферы стал ученик В. Л. Гинзбурга Герман Григорьевич Гетманцев, сначала заведующий отделом, а с 1973 года директор научно-исследовательского радиофизического института (НИРФИ, Нижний Новгород). Будучи по специальности радиоастрономом, он первоначально загорелся идеей мощным КВ-излучением создать ионосферную линзу, которая фокусировала бы радиоволны для астрономических исследований. Эффект был, но до практического применения дело не дошло из-за низкого «качества» линзы.

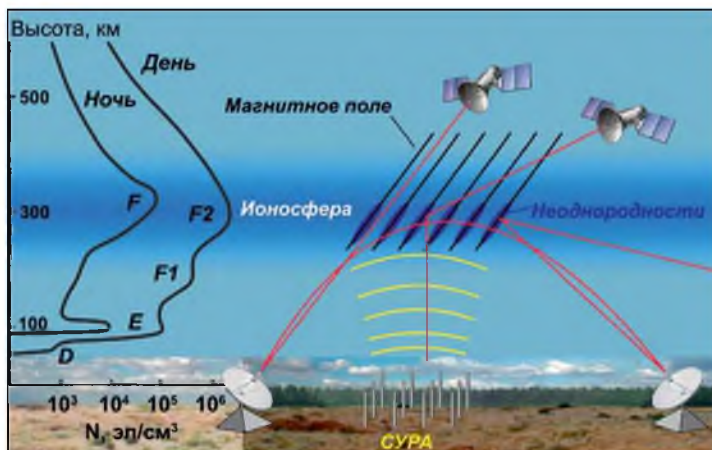
В 1973 году Гетманцев добился строительства стенда «Ястреб» на полигоне НИРФИ «Зименки» недалеко от Нижнего Новгорода, а позднее — стенда в Мончегорске (1976). В 1981 году были построены уникальный стенд СУРА вблизи п. Васильсурск и «Гиссар» в Душанбе, а в 1987-м УРАН-1 недалеко от Харькова. Существует проект высокоширотного нагревного стенда АКВИОН — Активное Воздействие на ИОносферу.

В настоящее время по разным причинам активные эксперименты в ионосфере постоянно проводят только на стендах СУРА, HAARP, EISCAT, SPEAR.

СУРА НА БЕРЕГУ СУРЫ

СУРА представляет собой исследовательский центр с большим комплексом разнообразного оборудования, размещённого на полигоне НИРФИ «Васильсурск» (в месте слияния рек Сура и Волга) в 150 км от Нижнего Новгорода, и в двух диагностических комплексах — «Зименки» (в 30 км от Нижнего Новгорода) и «Новая жизнь» (в 30 км от Васильсурска). Собственно нагревный стенд СУРА, получивший статус уникальной установки России (регистрационный номер 06—30), как и большая

Антенны фазированной решётки стенда СУРА создают в ионосфере неоднородности. Траектории радиоволн, проходящих через ионосферу, отражаются от них (ракурсное рассеяние) или изгибаются. Слева на рисунке показано распределение концентрации электронов по высоте днём и ночью.



часть оборудования, находится на полигоне «Васильсурск». Название «СУРА»

— аббревиатура: Стенд Универсальный Радиофизический, удачно подобранная под название реки.

В состав стенда входят три КВ-радиовещательных передатчика мощностью по 250 кВт и 144-элементная фазированная антенная решётка (ФАР) размером 300 × 300 метров с полосой рабочих частот 4,3—9,5 МГц, смонтированная на железобетонных опорах высотой 22 метра. Коэффициент её усиления на средней частоте примерно 26 дБ, эффективная мощность излучения 80—280 МВт. Важное преимущество установки по сравнению с зарубежными аналогами — способность работать и на передачу, и на приём. Стенд СУРА уникален: он единственный, расположенный в средних широтах. Это позволяет проводить целый ряд исследований, которые затруднены в полярной области в силу её возмущённости и особенностей ориентации магнитного поля.

Главное назначение стенда — воздействовать мощным КВ-радиоизлучением на ионосферу для изучения нелинейных процессов в ней, потоков плазмы, химического состава в зависимости от высоты в различных зонах и других явлений. На полигоне исследуют влияния возмущённой ионосферы на распространение радиоволн КВ- и УКВ-диапазонов. Очень перспективна возможность изменять траектории радиоволн: основное поглощение они испытывают в нижней ионосфере (D- и E-слои), и можно заставить радиоволны туда не опускаться.

За тридцать лет выполнено множество исследований, в которых установку СУРА использовали и как КВ-радар для изучения мезосферы и магнитосферы Земли, околоземной плазмы и солнечного ветра методом радиопросвечивания с приёмом на спутник, и как радиотелескоп для наблюдений космического излучения на частотах менее 10 МГц. Созданный на базе антенной решётки стенда

радиотелескоп ВДРТ-300 — единственный в мире, работающий в этом диапазоне. С его помощью составлены первые карты радиоизотоп Галактики на склонениях более 16°, измерены спектры известных радиоисточников — Крабовидной туманности, Лебедя-A и других. В 2004 году на базе стенда создали уникальный комплекс радиоакустического зондирования атмосферы, позволяющий исследовать температурные профили и динамические процессы на высотах от 0,5 до 15 км. Сравнительно низкий уровень промышленных помех позволяет изучать электромагнитные явления, связанные с грозовой активностью.

В радарных экспериментах по исследованию околоземного космического пространства использовались и приёмные устройства других стран — декаметровый радиотелескоп УТР-2 (Радиоастрономический институт НАН Украины), космический аппарат WIND (NASA, США) и другие.

ЧТО ОБНАРУЖИЛА СУРА

В 1974 году в экспериментах с первым нагревным стендом НИРФИ в Зименках под руководством Г. Г. Гетманцева обнаружили, что под воздействием мощного модулированного КВ-излучения ионосфера, словно гигантская антенна, начинает излучать радиоволны с частотой модуляции — происходит своего рода детектирование сигнала. При работе стенда СУРА регистрировались даже частоты ниже 10 Гц. Это явление назвали у нас «эффектом Гетманцева» (название на Западе не принято). Оно объясняется тем, что мощный КВ-сигнал модулирует электрический ток в E-области, который становится источником вторичных радиоволн. Гетманцев считал, что в полярной области, где токи сильнее, эффект будет значительнее. Это подтвердили работы на стенде в Мончегорске. ⇨

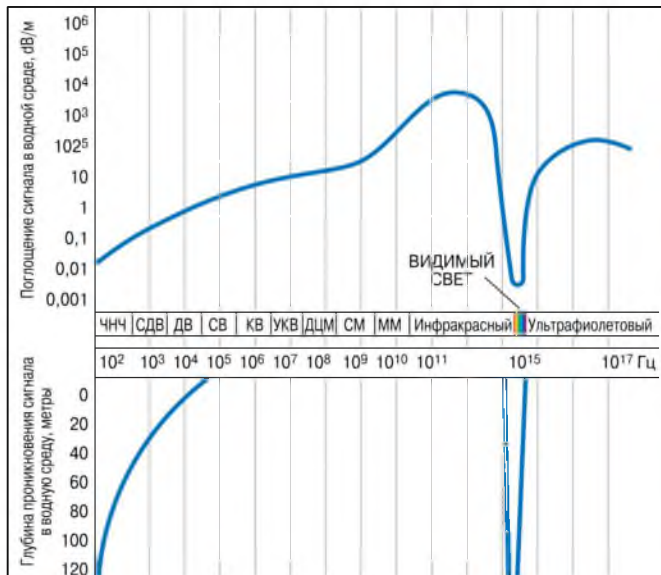


График величины поглощения электромагнитных волн и глубины их проникновения в воду в зависимости от частоты (их шкала дана в логарифмическом масштабе). Из него видно, что на частоте порядка 100 Гц радиоволна доходит до глубины примерно 70 метров. На частоте 20 Гц глубина значительно больше 100 метров и по мере уменьшения частоты стремительно возрастает. В диапазоне видимого света поглощение волн резко падает, а достижимая глубина растёт.

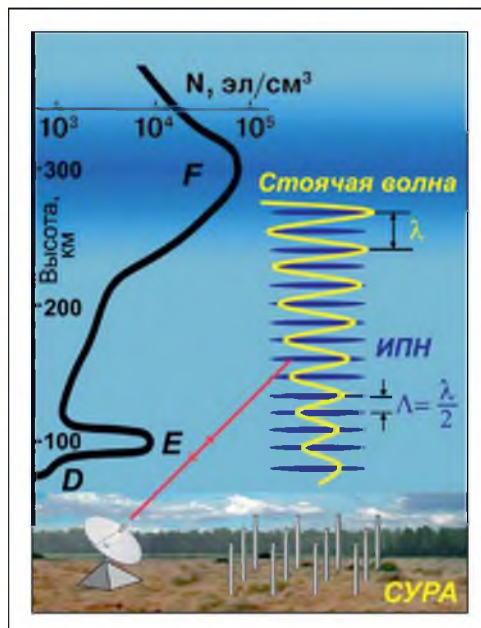
имеет $\lambda = 1500 - 15\,000$ км (200—20 Гц), сравнимую с размером Земли. При работе в основном диапазоне — 82 Гц — её сигнал проникает в воду на глубину 60—70 метров. Обычная

Низкочастотное излучение ионосферы можно использовать для связи с подводными и подземными объектами. Дело в том, что даже применяемые для связи с подводными лодками сверхдлинные волны $\lambda = 10 - 100$ км проникают вглубь всего до 20 метров, а вот ещё более длинные волны легко проходят сквозь гораздо большую толщу земли и воды. Но создание передатчика для столь низких частот — чрезвычайно сложная задача, поскольку требуются огромные антенны и мощности. Во всём мире только у России и США есть такие устройства. Наша система ЗЕВС на Кольском полуострове

дипольная антенна системы была бы длиной в тысячи километров ($\lambda/2$), что технически нереализуемо, и поэтому размер антенны ЗЕВСА всего 60 км, что сделало её крайне неэффективной. Так что использование ионосферы в качестве антенны с характеристиками, недостижимыми для наземного источника, — очень выгодное решение. Именно для «ионосферной» связи с подводными лодками и была построена система HAARP; её сигнал принимается глубоко под водой на расстояниях в тысячи километров.

Ещё одно возможное применение эффекта — радиолокационное исследование земных недр (геолокация, подземная томография). Подобные работы уже идут с использованием систем ЗЕВС и HAARP.

Отечественным учёным из НИРФИ принадлежит безусловный приоритет в обнаружении искусственных периодических неоднородностей (ИПН), формируемых мощной радиоволной в ионосферной плазме (1975 г.). Это позволило разработать ещё один метод диагностики атмосферы. Стенд СУРА излучает вверх мощную радиоволну на частоте ниже критической частоты ионосферы. Отражённая от ионосферы волна интерферирует с ней, образуя стоячую волну. Электрическое поле в её пучностях нагревает электронный газ, создавая периодическую структуру повышенной температуры с периодом $\Lambda = \lambda/2$ падающей радиоволны. Нагретые области, в свою очередь, формируют неоднородности электронной концентрации, на которых импульсы локатора рассеиваются



Стоячая радиоволна, излучённая антеннами стенда, создаёт периодические неоднородности; их исследуют радиолокатором.

и возвращаются к приёмнику. Интенсивный сигнал появляется, только когда волны, рассеянные отдельными неоднородностями, складываются в фазе, что и обусловило название — «метод резонансного рассеяния радиоволн на ИПН». Изучение рассеянного сигнала позволяет исследовать атмосферу на различных высотах.

Немаловажно найти концентрацию электронов в областях, недоступных обычным зондам, например между слоями E и F, где свободных электронов обычно немного и сигнал проходит, не отражаясь. Метод искусственных периодических неоднородностей заключается в использовании двух частот f_1 и f_2 разной поляризации — обыкновенной (o) и необыкновенной (x) волнами. Условие резонанса накладывает на них условие $f_1 n_1^{o(x)} = f_2 n_2^{x(o)}$, где n^o и n^x — показатели преломления, зависящие от f , N и напряжённости магнитного поля.

Подобрав эти частоты, можно наблюдать рассеяние лишь с тех высот, где N удовлетворяет данному условию. На этом основан так называемый частотный способ определения зависимости $N(h)$.

При достаточном нагреве в действие вступают разнообразные нелинейные эффекты, порождающие в плазме неустойчивость, неоднородности и волны. Неустойчивость плазмы — это самопроизвольное нарастание отклонений от её спокойного состояния, причём колебания влияют на неё так, что происходят их усиление, дальнейшее увеличение влияния на среду и ещё большее нарастание колебаний. Неоднородное электрическое поле волны накачки выдавливает электроны из областей с повышенной напряжённостью и сжимает плазму за их пределами. В результате возникает структура, приводящая к переходу значительной части энергии волны накачки в гораздо более интенсивные плазменные волны. Важную роль здесь играет значительное возрастание амплитуды радиоволны вблизи точки отражения из-за уменьшения групповой скорости (это похоже на ситуацию в колонне демонстрантов, когда передние ряды затормозили, а задние напирают, создавая впереди давку). Высокочастотные плазменные волны ускоряют электроны до энергий 10—60 эВ. Их столкновение с нейтральными частицами приводит к дополнительной ионизации.

Нагретые электроны покидают область резонанса за счёт термодиффузии — из-за большей скорости их уходит больше, чем приходит из более холодной периферии.

В результате образуется неоднородность с пониженной величиной N , похожая на вытянутый вдоль магнитного поля пузырь. Он, во-первых, способствует генерации плазменных волн, а во-вторых, способен «ловить» попавшие в него радиоволны, которые ещё сильнее нагревают электроны, выдавливая их прочь. Это приводит к росту неоднородности, к увеличению способности и генерировать, и захватывать волны.

В силу того что в неоднородности понижена величина N , она ведёт себя как фокусирующая линза: более плотные стенки пузыря отклоняют лучи к центру (самофокусирующая неустойчивость). Концентрация энергии приводит к ещё большему нагреву электронов, их вытеснению и соответственно усилению неоднородности и фокусирующих свойств.

Существуют и другие неустойчивости. Возбуждение интенсивных собственных колебаний плазмы в области резонанса вызывает сильное поглощение энергии как волн накачки (аномальное поглощение), так и других радиоволн, распространяющихся в области возмущений (широкополосное поглощение). Аномальным поглощение назвали потому, что обычно около 95% мощности радиоволны отражается от ионосферы и только 5% поглощается, а при резонансе наоборот — поглощается 95% энергии. А широкополосное оно потому, что аномально затухают не только волны с частотой накачки, но и радиоволны в полосе частот шириной 100—200 кГц вокруг неё.

Не менее интересно также искусственное излучение ионосферы, результат частично-превращения плазменных волн в электромагнитные радио- и оптического диапазона. Каждая из спектральных составляющих радиоизлучения, а их на сегодняшний день известно более полутора десятков, несёт информацию об определённом физическом процессе, происходящем в ионосфере под воздействием волны накачки.

Ещё одно интересное явление: сильно вытянутые неоднородности плазмы в области возмущений играют роль зеркала, рассеивающего радиоволну в направлениях, образующих такой же угол с магнитным полем, что и падающая волна (ракурсное рассеяние). Его обнаружили в Боулдере (США), когда при включении станда с расстояния в несколько тысяч километров стали слышны разговоры таксистов, имевших передатчики с $f = 50$ МГц и мощностью всего несколько ватт, работающие в пределах прямой видимости. Даже радиоволны с частотами до 100—150 МГц, которые не отражаются от ионосферы, при включении станда вдруг начинали распространяться очень далеко. Создавалось впечатление,

что появился новый способ радиосвязи, но вскоре выяснилось, что большого практического значения явление не имеет.

МИФЫ И ПРАВДА О НАГРЕВНЫХ СТЕНДАХ

Миф 1. Стенды закачивают в ионосферу излучение мощностью в сотни миллионов и миллиарды ватт.

В возникновении мифа в какой-то мере виноваты сами учёные, которые гордо рапортуют о достигнутом гигаватте эффективной (то есть эквивалентной) мощности, не разъяснив, что это такое. Путаницы добавляет и термин «коэффициент усиления антенны». На самом деле эффективная мощность — это не та мощность, которую излучает стенд, а антенна её не усиливает.

Пусть стенд мощностью P излучает радиоволны одинаково во все стороны. Тогда на расстоянии H от стенда его энергия распределится по поверхности сферы радиусом H , то есть по площади $S = 4\pi H^2$. Количество приходящей на расстояние H энергии характеризуют потоком энергии излучения $\Pi = P/S$ — мощностью, приходящейся на единицу площади ($\text{Вт}/\text{м}^2$). Именно он определяет степень воздействия излучения. В данном случае $\Pi = P/4\pi H^2$. Поскольку P невелико, а $H = 100 - 300$ км, то Π — мало, и до ионосферы дойдёт незначительная энергия, недостаточная для воздействия. Поэтому антенна стенда должна сосредоточить всю излучаемую энергию в тонком луче. Чем тоньше луч, тем меньше размер области воздействия, тем оно сильнее, тем больше энергии поступает на единицу её площади.

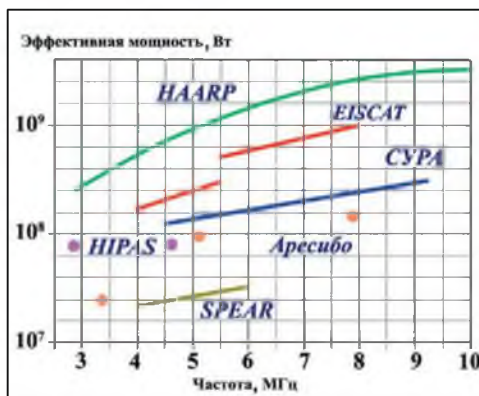
Если на высоте H луч, сформированный антенной, освещает площадь S_1 , то $\Pi_1 = P/S_1$. Величина $G = \Pi_1/\Pi = S/S_1$ называется коэффициентом усиления антенны. Он по-

казывает, во сколько раз поток энергии в луче больше, чем излучение во все стороны при той же мощности, то есть характеризует фокусирующую способность антенны.

Эффективная мощность P_0 — это мощность, которую должен иметь передатчик, чтобы потоки энергии, излучённой им во все стороны, и в луче, совпадали. Очевидно, что $P_0 = GP$. Для стенда СУРА $P = 750$ кВт = = 0,75 МВт (три передатчика по 250 кВт), $G \sim 26$ дБ (примерно в 400 раз) получаем $P_0 = GP \sim 300$ МВт. Таким образом, узнать реальную излучаемую мощность P можно, разделив P_0 на коэффициент усиления антенны G . Например, для HAARP $P_0 = 3,6$ ГВт, $G = 1000$, и реальная мощность излучения $P = P_0/G = 3,6$ МВт. Именно эффективная мощность P_0 характеризует воздействие на ионосферу. Сравнивать установки между собой по ней, легко находя поток энергии на заданной высоте $\Pi = P_0/4\pi H^2$. Для стенда СУРА $P_0 \sim 300$ Мвт на высоте $H = 100$ км получим $\Pi \sim 2 \cdot 10^{-3}$ Вт/м².

Многие, рассматривая фотографии антенн стендов СУРА или HAARP, задавали себе вопрос: а зачем нужны такие большие поля антенн? Причём порой с интонацией Красной Шапочки, спрашивающей Волка: «А зачем тебе такие большие зубы?», намекая, что огромные антенны связаны с чудовищной мощностью. Однако большая площадь антенн связана только с необходимостью формировать узкий луч. Один из способов добиться этого — построить так называемую антенную решётку из множества элементов, каждый из которых узким излучением не обладает. Ширина луча в радианах $\Delta\theta \approx \lambda/D$, где D — размер антенны. Следовательно, для получения узкого луча $\Delta\theta \ll 1$ необходимо, чтобы размер антенны был значительно больше длины волны $D \gg \lambda$. Для стенда СУРА $\Delta\theta = 12^\circ \approx 0,2$ рад, частоте излучения 5 МГц соответствует $\lambda = 60$ м, получаем $D \approx \lambda/\Delta\theta = 300$ м — размер антенного поля стенда. Размер элементарных излучателей сопоставим с половиной длины волны. Другие стенды имеют близкие характеристики.

Сравнение мощности нагревных стендов.



Миф 2. Передатчики стендов обладают уникально большой мощностью.

Мощности этих передатчиков действительно велики. СУРА имеет максимальную мощность 750 кВт, SPEAR — 192 кВт, EISCAT — 1200 кВт, HAARP — 3600 кВт. Но эти мощности вовсе не уникальны.

Уже к концу 1960-х годов радиовещательных КВ-передатчиков мощностью 500 кВт только в СССР работало порядка двадцати. Позднее были созданы КВ-передатчики мощностью 1000 кВт, а в 1976 году в СССР был разработан сверхмощный радиове-

щательный передатчик «Кондор-1» мощностью 2 МВт для радиостанции РВ-713, вещавшей на страны Юго-Восточной Азии и Австралию. К концу 1980-х только в СССР уже работали четыре таких передатчика. Кстати, самая мощная станция находится в нашей стране: радиостанция № 3 в Талдоме (110 км к северу от Москвы) с длинноволновым передатчиком 2500 кВт использует радиостанция «Голос России» для цифрового вещания на Европу.

Таким образом, передатчики станций СУРА, SPEAR и EISCAT по мощности сопоставимы, а то и слабее многих радиовещательных станций, а HAARP лишь ненамного их превышает. Уникальность этих установок не в мощности, а в их антенных системах, в возможности сконцентрировать энергию в узком луче, то есть в огромной эффективной мощности. Напомним, что в стенде СУРА используются обычные радиовещательные передатчики.

Миф 3. Нагревные стенды сильно нагревают и ионизируют огромные объёмы плазмы. Они способны вызвать пробой ионосферы.

В большинстве экспериментов температура электронов T_e возрастает менее чем на 50%, а электронная концентрация N — менее чем на 25%. В некоторых экспериментах T_e может повышаться в несколько раз, а N более чем в полтора.

В начале 2013 года с помощью HAARP на высотах около 170 км создали плазменное облако с концентрацией электронов $9 \cdot 10^5$ на см^3 . Для данных высот это примерно трёхкратное превышение невозмущённой концентрации (300%), что на первый взгляд вступает в противоречие с изложенным выше. А дело в том, что на этой высоте электронов очень мало, поэтому $9 \cdot 10^5$ на см^3 ниже, чем невозмущённая электронная концентрация на высотах порядка 250 км. Кроме того, это другой, редкий вид эксперимента, та же идея, что использовал И. С. Шлюгер, то есть работа на гармонике гирочастоты. В течение часа излучение поддерживало плазменный «шар», который, разумеется, исчез сразу после выключения стенда. На первый взгляд воздействие значительное, но не торопитесь пугаться: речь идёт о температуре (кинетической энергии) только очень лёгких электронов, которые значительно ускоряет даже слабое воздействие. Нейтральные частицы со временем, а ионы почти не испытывают влияния со стороны радиоволны. Масса электронов в десятки тысяч раз меньше массы ионов, нейтральных атомов и молекул, которые в силу этого практически не увеличивают своей энергии в результате соударений

с электронами. А если ещё и вспомнить, что электронов очень мало — в ионосфере ионизовано менее 1% частиц, станет ясно, что температура плазмы в целом за время воздействия не меняется.

Чтобы наглядно представить сказанное, вообразите, что среди 1000 пудовых гирь (ионы, атомы, молекулы) летают 10 песчинок (электроны). Теперь, подув на эти песчинки, вы заставили их летать в два раза быстрее (их температура возросла в четыре раза) и даже добавили ещё пять штук (увеличили количество на 50%). Вряд ли стоит ожидать, что эти 15 песчинок что-то сделают с гирями.

Таким образом, влияние нагрева электронов на ионосферу крайне незначительно. Использование нагрева электронов основано на том, что распространение электромагнитных волн и возбуждение плазменных колебаний связано именно с электронами. И даже такого малого их количества достаточно для получения довольно сильных эффектов, но влияние которых на саму ионосферу ничтожно. Природное свечение ионосферы и полярные сияния вызывают очень высокие энергии, которые стендам недоступны. Говорить о каких-то пробоях и дырах в ионосфере просто бессмысленно.

Ионосферу создаёт излучение Солнца, и в силу этого концентрация электронов в дневное время почти в 10 раз больше, чем в ночное, а нижняя ионосфера (ниже 90 км) ночью практически полностью исчезает. Эти изменения происходят каждый день и не имеют никаких последствий для нас (кроме проблем радиосвязи). Воздействие станций по сравнению с ними крайне незначительно.

Изменения в ионосфере, вызванные излучением стенда, после его выключения бесследно исчезают за время от секунд до десятка минут. Солнечные затмения, вспышки на Солнце оказывают на ионосферу существенно большее воздействие на огромных площадях, но и они быстро пропадают.

Антенные системы станций концентрируют энергию в луче, ширина которого порядка 12° . Легко посчитать, что на высоте 300 км это соответствует области диаметром 60 км и толщиной резонансного слоя 10—20 км — исчезающе малые объёмы по сравнению с десятками тысяч кубических километров ионосферы. Разумеется, за счёт распространения волн затронутая возмущением область может быть в несколько раз больше, особенно вдоль магнитного поля, но ещё раз повторим, что это касается только песчинок электронов.

Миф 4. Нагревные стенды создают в ионосфере огромные потоки энергии, во много раз превосходящие энергию солнечного излучения, что очень опасно.

Этот миф психологически поддерживает пугающая мощность передатчиков, но нужно понимать, что воздействие производит не вся излучаемая мощность, а только та, что доберётся до области воздействия — поток энергии.

Даже самый мощный из стендов HAARP при $P_0 = 3,6$ ГВт создаёт на высоте $H = 300$ км поток $P = P_0 / 4\pi H^2 \sim 0,003$ Вт/м², а на высоте 100 км $\sim 0,03$ Вт/м². Много это или мало? Рассмотрим максимальный поток энергии 0,03 Вт/м². Такой же по величине поток источник мощностью 100 Вт создаёт на расстоянии 16 метров. Чтобы оценить его, включите лампочку в 100 Вт в тёмном зале, отойдите, зафиксируйте свои ощущения, затем выйдите на солнце и сравните. Данная оценка не совсем корректна, но представление даёт. Так что огромность потоков энергии стендов в ионосфере — это миф, они очень малы. Напомним, что поток лучистой энергии Солнца, доходящий до орбиты Земли, составляет около 1400 Вт/м² (солнечная постоянная).

Почему же столь скромный поток энергии стенда СУРА оказывает заметное воздействие, а лампочка на расстоянии 16 метров — нет. Всё дело в том, что лампа даёт световое и инфракрасное излучение, которое в нейтральной атмосфере воспринимается просто как тепло, а излучение стенда вызывает ускорение очень лёгких свободных электронов плазмы при резонансе.

Откуда же берётся пугающее мнение, что эти потоки огромны и во много раз превосходят солнечные? Авторы мифа сравнивают поток энергии излучения стенда с излучением Солнца на той же частоте. Но оно, во-первых, составляет исчезающе малую часть энергии всего солнечного спектра, а во-вторых, просто не добирается до высот, на которые рассчитана работа стенда, — ионосфера не пропускает. Поэтому можно, конечно, объявить слабый поток энергии от стенда огромным по сравнению с практически отсутствующим солнечным, но в этом нет никакого смысла. Сравнить излучение стенда с ионизирующим излучением Солнца тоже некорректно — они действительно сопоставимы по мощности, но КВ-излучение стендов ионов не создаёт.

Миф 5. Нагревные стенды могут послужить спусковым крючком к разрушительным процессам.

Ситуации, когда малое воздействие может приводить к разрушительным по-

следствиям, хорошо известны. Небольшой заряд, разрушив дамбу водохранилища, натворит много бед. Но должен существовать определённый запас энергии (водохранилище), который высвобождается воздействием. В ионосфере такого запаса просто нет, следовательно, нечего и высвобождать. Ионосфера — это всё тот же воздух, только сильно разрежённый и в котором до 1% составляют ионы. Никто же не боится вызвать катастрофу, включая вечером свет в комнате или электрокамин.

Радиационные пояса Земли находятся значительно выше (несколько радиусов Земли), да и воздействие слабого излучения стендов на протоны, которые почти в 2000 раз тяжелее электронов, мало. Некоторые вспоминают знаменитую фразу американского математика и метеоролога Эдварда Лоренца: «Взмах крыльев бабочки в Бразилии вызовет торнадо в штате Техас». Это символическое описание чувствительности системы к малейшим изменениям начальных условий — всего лишь образное выражение, аллегория, а не констатация наличия такой связи. Для подобной чувствительности система должна обладать особыми свойствами, которые не наблюдаются в атмосфере. Нет абсолютно никаких оснований полагать, что воздействие стендов способно привести к каким-либо существенным последствиям, ведь в природе непрерывно происходят значительно большие изменения ионосферы, к ним не приводящие.

Миф 6. Нагревных стендов много.

В интернете можно встретить сообщения, что мир прямо-таки опутан сетью нагревных стендов, и, по мнению авторов, это указывает на их опасность и военное назначение. С мифами об опасности и военном назначении мы уже разобрались, а здесь просто выскажем сожаление, что таких уникальных научных установок в мире всего четыре. Изредка работает стенд в Аресибо. Связано это с финансовыми проблемами: строительство и содержание таких установок — очень дорогое удовольствие, и позволить его себе могут немногие. Именно поэтому в 2010-м закрылся американский стенд HIPAS, не выдержав конкуренции с HAARP, не работают и другие.

Откуда же берутся «лишние» установки? Дело в том, что нагревные стенды путают с радарными некогерентного рассеяния, которые также имеют большую мощность, а некоторые и похожие антенны, например радар в Джикамарке (Перу). Но они

принципиально отличаются от нагревных установок тем, что работают на высоких частотах, для которых ионосфера прозрачна.

Всего таких радаров девять. Наиболее известный, старый (1958 г.), и по-прежнему один из самых мощных — радар в Джикамарке мощностью 5 МВт и частотой 50 МГц. Напомним, что при вертикальном излучении от ионосферы отражаются частоты до 10—12 МГц. Так что, несмотря на мощность, превосходящую HAARP, нагреть ионосферную плазму он не в состоянии. Такую же частоту имеют радары в Аресибо и Японии (MU). Другие радары работают на значительно больших частотах, например Миллстон-Хилл (США) — 440 МГц, Сондрестрем в Гренландии — 1330 МГц.

Миф 7. Нагревные стенды можно использовать как оружие.

Уже разоблачения предыдущих мифов должны привести к мысли, что использовать нагревные установки в качестве оружия — погодного, геофизического, плазменного, психотронного — невозможно.

Погодные процессы происходят главным образом в тропосфере и нижней части стратосферы (высоты ниже 20 км). Эти высоты прозрачны для КВ-излучения стендов, которое взаимодействует со свободными электронами, а ионосфера начинается с 50—60 км. Влияние ионосферы на процессы в лежащей ниже атмосфере крайне мало, связи ионосферных возмущений с погодой не обнаружено даже для мощных и глобальных магнитных бурь после солнечных вспышек. Поэтому воздействие стендов ни на погоду, ни на озоновый слой, располагающийся на высотах 15—50 км, невозможно.

Говоря о плазменном оружии, имеют в виду так называемые плазмойды — сгустки плазмы. Как уже говорились, стенд увеличивает концентрацию электронов, составляющих всего 1% от числа частиц, раза в полтора. Такой плазмойд не способен ничему и никому навредить. Космические аппараты годами летают в плазме и благополучно переживают сильнейшие изменения концентрации электронов во время солнечных вспышек. Невозможно плазмойд, созданный стендом, куда-то направить. Он жёстко привязан к небольшой области высот ионосферы внутри луча и существует, только когда стенд излучает. Возмущения с повышенной величиной N возникают на высоте порядка 100 км. Воздействовать там не на что — самолёты не поднимаются выше 20 км.

Землетрясения и их воздействие на человека и животных связывают с низкочастотным (менее 20 кГц) излучением. Стенды действительно могут вызвать излучение ионосферы на этих частотах (эффект Гетманцева), но только в миллион раз слабее тех, что вызывают биологические эффекты, и более чем в 10 миллионов раз слабее фонового поля Земли. Влияние стендов исчезающе мало по сравнению с более мощными природными излучениями на этих частотах.

Известны электромагнитные предшественники землетрясений, возмущения ионосферы перед ними исследуют, пытаются их прогнозировать. Но надо чётко понимать: из того, что процессы перед или во время землетрясения генерируют слабые электромагнитные поля, не следует, что излучение стендов может вызывать землетрясения. Для этого оно слишком слабо, да и механизма запуска тектонических процессов нет. На Землю от Солнца поступает порядка 10^{17} Вт энергии, в 100 000 раз больше, чем потребляет всё человечество, однако даже здесь чёткой связи не прослеживается, что уж тут говорить о крошечной энергии стендов.

Иногда мифотворцы пугают сообщениями о генерации в ионосфере гравитационных волн. На самом деле их полное название, акустико-гравитационные волны (АГВ), по сути — просто звук. Принципиальное их отличие от звука только в одном: звук — чисто продольные колебания среды, а АГВ имеют поперечную составляющую благодаря силе тяжести, отсюда и их название.

В военных целях можно использовать только мощное электромагнитное излучение стенда. Сбивать летящие цели оно не способно, но создать помехи электронному оборудованию может, хотя и в этом отношении стенды малозффективны из-за большой длины волны. Кроме того, их излучение велико только в радиусе нескольких километров вокруг стенда (высоты до 20 км), поскольку его луч способен наклоняться не более чем на 40° . За счёт отражения от ионосферы он может распространяться довольно далеко, но поток энергии быстро уменьшается с расстоянием.

Таким образом, стенды разрабатывались не в качестве оружия. В лучшем случае их можно использовать для обороны, и то вряд ли. Так что главным интересом военных остаётся исследование проблем связи. Наиболее сложна ситуация в стратегически важных приполярных районах, где связь затрудняют природные явления.