

Лекция 11. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРЫ, РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН, ЭФФЕКТЫ В ИОНОСФЕРЕ

Лекция 11-ая, в которой рассмотрены вопросы распространения в ионосфере радио и акустических волн и сейсмоионосферный эффект. Сообщается о Шумановском резонансе.

Ионосфера и распространение радиоволн

Ионосферой называют пограничную часть атмосферы Земли, в которой уровень ионизации достаточно велик, чтобы оказывать заметное влияние на распространение радиоволн. Нижняя граница ионосферы располагается на высоте 50-60 км, верхняя на уровне порядка 1000 км переходит в плазмосферу или другие магнитосферные плазменные образования.

Основные параметры ионосферы - концентрация электронов, ионный состав, температура - меняются с высотой сложным образом. Выделены три основных области максимальной концентрации электронов - D (80км), E (110км), и F-слой, который делится на F1 (170км) и F2 (300км). Значения высот указаны в скобках ориентировочно, на самом деле высота слоев, концентрация и другие параметры испытывают значительные вариации, как регулярные так и спорадические. Регулярные вариации в D и E области прежде всего определяются уровнем освещенности ионосферы и поэтому суточные и сезонные вариации наиболее значительны. В Области F существенное значение приобретает влияние магнитосферных процессов на движение плазмы.

Так как влияние указанных выше факторов зависит от широты, принято отдельно рассматривать состояние ионосферы в разных широтных поясах; экваториальная или низкоширотная ионосфера располагается от 0 до 35°, среднеширотная - 35-55°, субавроральная ионосфера - примерно от 55 до 65°, дальше до полюса простирается высокоширотная ионосфера, которую в свою очередь можно разделить на ионосферу авроральной зоны и полярной шапки.

Нерегулярные изменения параметров ионосферы, возмущения, связаны с воздействием частиц и излучений, генерированных во время солнечных или магнитосферных вспышечных событий. Внезапные ионосферные возмущения (Sudden Ionospheric Disturbances, SID) в E и D области вызываются всплеском рентгеновского излучения, генерируемого на Солнце во время хромосферных вспышек. Длительность их составляет несколько минут, концентрация электронов может возрасти на порядок в D и на 50-200% в E области. Эффекты и сопутствующие явления наблюдаются только в освещенной части ионосферы.

Приход на Землю солнечных космических лучей вызывает ионосферное возмущение известное под именем Поглощения в полярной шапке (ППШ или PCA - Polar Cap Absorption). Названием своим это возмущение обязано тому факту, что солнечные протоны с энергией от 10 МэВ и выше относительно свободно проникают в полярную шапку, а на меньших широтах задерживаются магнитным полем Земли. ППШ относится к D-области ионосферы, где концентрация электронов может возрасти на два порядка. Продолжительность ППШ определяется длительностью порождающего ее события и может составлять несколько суток.

Развитие суббури в авроральной области вызывает значительные изменения во всей толще ионосферы и сильно меняет условия прохождения радиосигналов вплоть до полного поглощения (т.н. блэкауты). В F-области регистрируются как уменьшения, так и увеличения концентрации и значительные вертикальные перемещения, в E-области появляются т.н. спорадические слои Es.

В D - области наблюдается поглощение аврорального типа, связанное с высыпанием в ионосферу авроральных электронов с энергией в единицы и десятки кэВ. Изменчивость ионосферы, особенно существенная в высоких широтах, привлекала большое внимание в связи с важностью устойчивой радиосвязи для народохозяйственных

и военных целей. В последние десятилетия прикладное значение этих работ уменьшилось в связи с массовым использованием методов радиосвязи с помощью спутников.

Методы исследования ионосферы

Исследования ионосферы до появления возможности прямых измерений с помощью ракет, базировались на использовании способности ионосферы поглощать, отражать, рассеивать радиосигналы. Наиболее распространенным был метод вертикального зондирования (ВЗ), при котором измеряется время распространения импульса от ионозонда до отражающего слоя и обратно к приемнику сигнала. Используется набор частот в коротковолновом диапазоне ($f > 1$ МГц), высота точки отражения уменьшается с ростом частоты радиосигнала и измеренная зависимость задержки (высоты) от частоты волны (ионограмма) используется для вычисления высотного профиля электронной концентрации.

К методам, использующим ту же цепочку: передатчик - ионосфера - приемник, относятся наклонное зондирование, возвратно-наклонное зондирование, радиопросвечивание ионосферы сигналами со спутников, метод частичных отражений и измерения прохождения радиосигналов на конкретных радиотрассах.

К методам, выделившимся в отдельные самостоятельные направления, можно отнести риометрические исследования, радиолокационные исследования, метод некогерентного рассеяния и исследование распространения сверхдлинных волн (СДВ). Активное воздействие на ионосферу и изучение ее реакции используется в установках по нагреву ионосферы мощными импульсами радиоизлучения. Ионосферные методы используются не только для исследования собственно ионосферы и ее параметров, но и для исследования магнитосферных процессов. В частности измерение поглощения космического радиощума с помощью риометров в основном использовалось для исследования пространственно-временных характеристик потоков заряженных частиц магнитосферного и солнечного происхождения, высыпающихся в полярную и авроральную ионосферу.

ОНЧ - излучения и радиоволны

В зависимости от частотного диапазона электромагнитные и электростатические колебания относятся к пульсациям (частота меньше 3-5 Гц), ОНЧ-излучениям (от 3-5 Гц до 12-30 кГц) и радиоволнам $> 10 - 30$ кГц.

Часто применяется более подробное деление ОНЧ-диапазона:

УНЧ (ULF) - ультранизкие частоты - 3-30 Гц, $10^8 - 10^7$ м,

КНЧ (ELF) – крайне низкие частоты - 30 - 3000 Гц, $10^7 - 10^5$ м,

ОНЧ (VLF) - очень низкие частоты - 3 - 30 кГц, $10^5 - 10^3$ м.

Радиоволны, свою очередь, делятся на *сверхдлинные* (СДВ), от 10 до 30 кГц, *длинные* - до 300 кГц, *средние* - до 3 мГц, *короткие* - выше 3 мГц.

Радиоволны при распространении в ионосферной и частично магнитосферной плазменной среде испытывают воздействие (рассеяние, отражение, преломление, поглощение) не искажающее значительно частотные характеристики и структуру волнового пакета, что, собственно, и позволяет использовать их для передачи информации. Влияние ионосферы на распространение радиоволн представляет самостоятельный практический интерес и используется для исследования динамики ионосферы.

Воздействие космической плазмы на ОНЧ- излучения гораздо более активное. Классический пример такого воздействия представляют собой *свистящие атмосферерики*. Порождают их короткие широкополосные импульсы генерируемые разрядом молнии. После "путешествия" через магнитосферную плазму они возвращаются на Землю в виде узкополосных звуковых сигналов длительностью увеличенной на несколько порядков. Таким образом, ОНЧ-излучения несут на себе информацию о параметрах

воздействовавшей на него плазмы и тем самым вызывают значительный интерес исследователей.

Для регистрации ОНЧ используются специальные радиоприемники с магнитными или электрическими антеннами, регистрирующей аппаратурой и разнообразными устройствами обработки информации. Наиболее распространенной формой представления ОНЧ-измерений являются сонограммы или динамические спектры сигнала. Образец такого спектра представлен рис. 1.

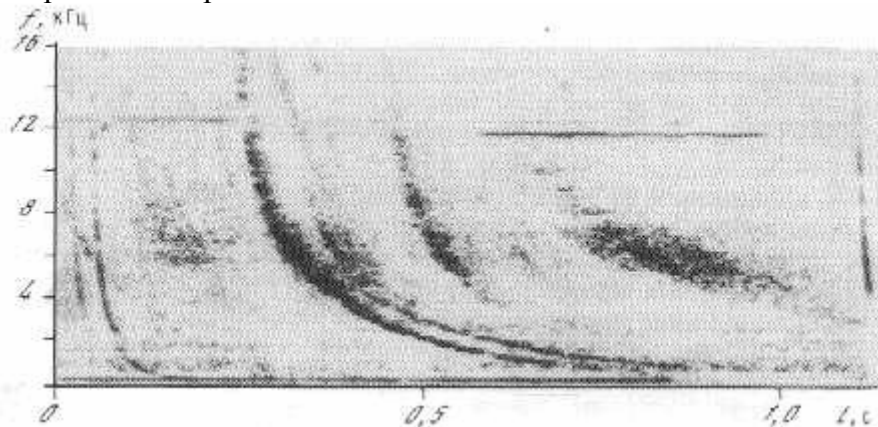


Рис. 1. Пример динамических спектров ОНЧ-сигналов, зарегистрированных на ИСЗ «Интеркосмос-3». Интенсивность сигнала дается почернением.

ОНЧ-излучения делятся на естественные и индуцированные, вызванные сигналами в основном антропогенного происхождения. Поскольку воздействие среды велико, существует большое различие между характеристиками сигналов, записанных на Земле, на низковысотных и высокоапогейных спутниках. Некоторые типы излучений циркулируют в магнитосфере и не доходят на поверхности Земли, другие быстро затухают вблизи области генерации, к последним относятся электростатические излучения.

Прямые измерения

Прямые методы измерения параметров магнитосферы включают стратосферные исследования, ракеты и спутники. Как правило, это измерения комплексные, каждый аппарат имеет на борту целую группу приборов, и поэтому в данном разделе, в отличие от предыдущих, мы не можем выделить какое-то одно научное направление. На отдельном сайте мы дадим описание нескольких комплексных проектов.

Стратосферные исследования исторически наиболее древние: собственно уже на первом полете аэростата открытого типа, шарльере, его изобретатель парижский профессор Шарль проводил измерения температуры воздуха и атмосферного давления (1883г.).

Ракетные исследования начали развиваться в послевоенное время с появлением соответствующих средств подъема. В СССР это были в основном метеорологические ракеты, и попытки использовать ракеты для магнитосферных исследований не дали больших результатов. За рубежом были созданы научные ракетные полигоны - на Аляске в США и в Кируне, Швеция, европейский ракетно-аэростатный полигон ESRANGE.

С появлением спутников многие экспериментальные группы оставили или резко сократили аэростатные и ракетные программы и перешли на создание спутниковой аппаратуры. Собственно общая или близкая по принципу действия аппаратура, как научная, так и вспомогательная, служебная, и объединяет все эти три направления. Перечислим основные группы приборов.

Датчики заряженных частиц, начиная от простейших счетчиков Гейгера до сложных систем типа калориметра Григорова, составляют большую разветвленную

группу инструментов, сведения о которых мы будем накапливать в специальном сайте "приборы для измерения частиц".

Магнитометры являются неременной частью каждого спутника и каждой научной подвески аэростата. Они несут и чисто научную нагрузку и служат вспомогательными датчиками ориентации (например, отслеживая вращение аэростата). Как правило, это *феррозондовые датчики (flux-gate magnetometers)*, обладающие большим диапазоном измерений и высокой чувствительностью.

Электрическое поле в стратосфере и магнитосфере измерять очень важно и очень трудно. Трудно потому, что из-за низкой проводимости среды приходится применять датчики с очень высоким внутренним сопротивлением, кроме того, чтобы измерить слабое электрическое поле, приходится датчики разносить на расстояние до нескольких десятков метров. Кроме того, сам спутник вносит искажение в локальную структуру поля, на корпусе может накапливаться статический заряд, к тому же и само поле очень изменчиво. Все это создает сложности при интерпретации результатов измерений. Тем не менее нам известно довольно много о крупномасштабной структуре электрического поля. На рис 1р приводится картина распределения напряженности электрического поля поперек хвоста магнитосферы, измеренный на спутнике OGO-6: в центральной части хвоста поле направлено с утра на вечер, а на флангах - в обратную сторону, что соответствует конвективному переносу плазмы к Земле в центре и от Земли - вдоль границы с магнитопаузой.

Полярные сияния рассмотреть сверху стало возможным сначала как побочный результат работы американских шпионских спутников серии DMSP, имевших полярную орбиту и линейку фотодатчиков, сканирующих ночную картину освещенности поверхности Земли.

Позднее уже на научных спутниках были установлены специальные датчики полярных сияний, при этом использование ультрафиолетового диапазона позволило различать сияния и на дневной, освещенной Солнцем, части авроральной зоны.

Риометр (Relative Ionospheric Opacity meter).

Специальный радиоприемник для непрерывного измерения уровня поглощения космического радишума в слое D ионосферы Земли. Используется для мониторинга высыпающихся в атмосферу авроральных электронов и протонов солнечного происхождения.

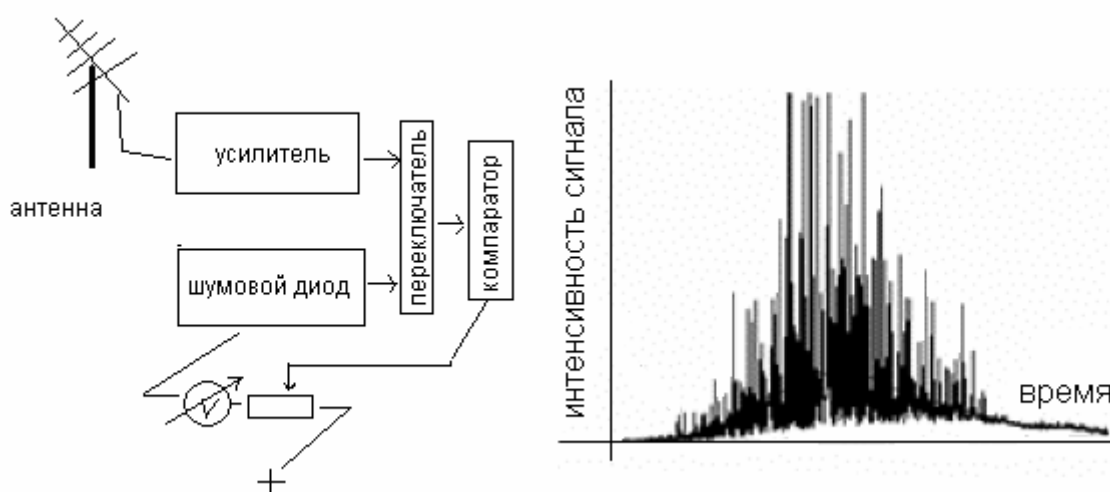


Рис. 2. Риометр: схема, результат.

Риометр работает в диапазоне 15-50 МГц (стандартная частота 32 МГц). Принцип работы основан на сравнении излучения, принимаемого антенной типа "волновой канал" с излучением шумового диода. Риометр был изобретен американскими геофизиками Лейнбахом и Чиверсом в пятидесятые годы и используется на десятках станций преимущественно в высоких широтах.

Ионосферные станции

Ионосферные станции или ионозонды предназначены для диагностики ионосферы и оперативного прогноза КВ связи. Они состоят из мощного передатчика, передающей и приемной антенн, приемника и регистрирующей системы. Диапазон частот передающего устройства может достигать 0.5-25 МГц.

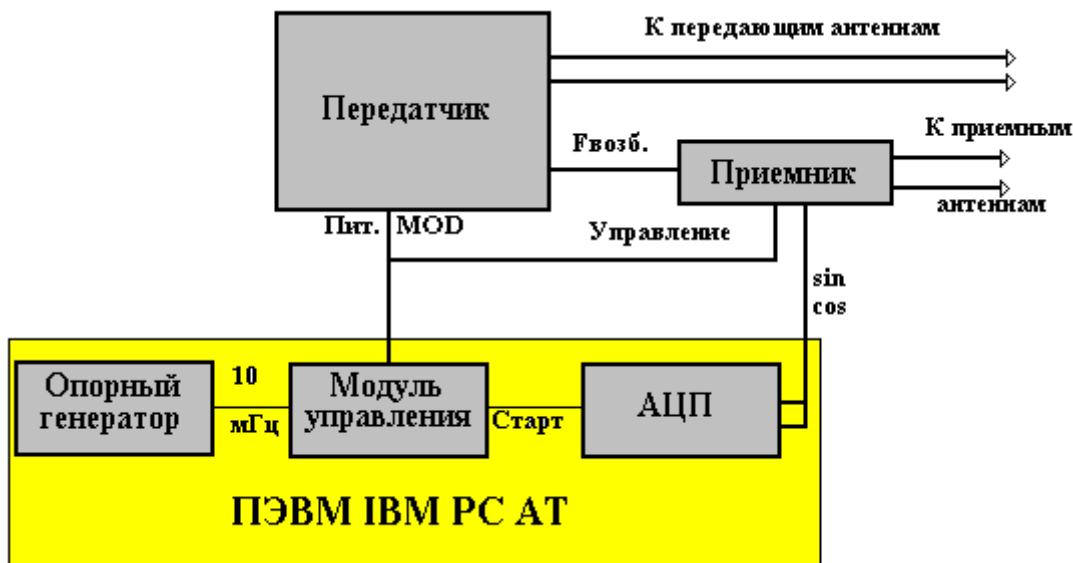


Рис. 3. Блок-схема ионозонда «Парус».

На рис 3 приведена блок-схема ионозонда ИЗМИРАН "ПАРУС", разработанного в конце прошлого столетия. В 50-х годах прошлого века была организована мировая сеть ионозондов вертикального зондирования ионосферы, включавшая более 120 станций, с помощью которой были изучены основные закономерности динамики ионосферы экваториальных, средних и высоких широт.

На рис 4 показана идеализированная ионограмма, на которой видны основные ионосферные слои. На рис. 5 – реальные ионограммы.

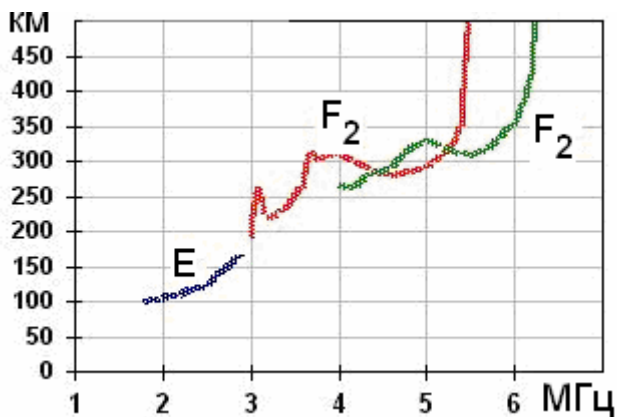


Рис. 4. Идеализированная ионограмма

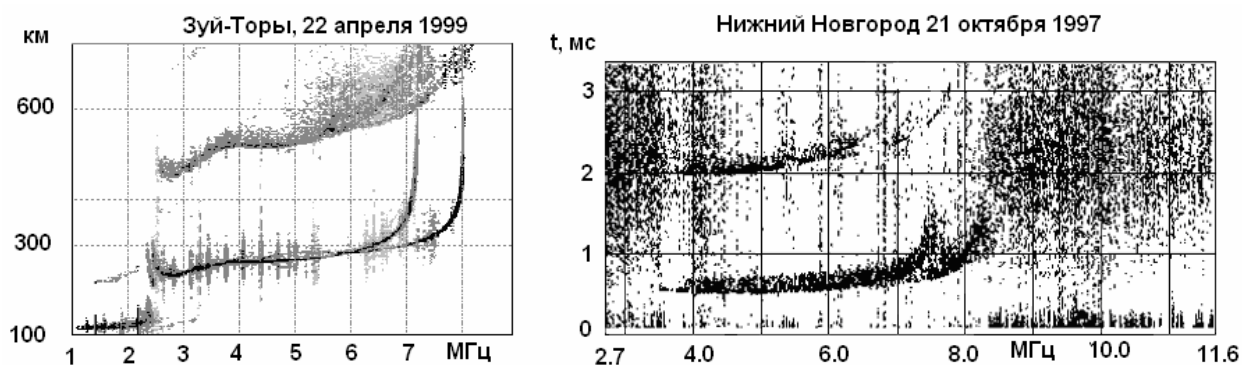


Рис. 5. Реальные ионограммы.

В последние годы происходит замена старых станций цифровыми ионозондами различной конструкции.

Конструкция ионозондов выполнена по модульному принципу. DPS-4 состоит из основного блока, монитора; 2-х передающих антенн; 4-х приемных антенн с поляризационными ключами; GPS-приемника и блока батарей резервного питания. Основной блок включает в себя два компьютера, передатчик, четыре приемника, и сигнальный процессор. Основной компьютер управляет процессами приема и передачи, считывает данные из выходного буфера сигнального процессора, осуществляет преобразование данных в необходимый формат, записывает данные на жесткий диск вспомогательного компьютера. Вспомогательный компьютер осуществляет вторичную обработку данных, записывает данные на жесткий диск, на CD-диск, пересылает данные на сервер через FTP-канал.

С помощью ионозонда можно проводить измерения амплитудных характеристик, спектра, формы и фазы пришедшего сигнала, измерения скорости дрейфа ионосферной плазмы ряд других характеристик ионосферной плазмы.

Ионозонд "ПАРУС" предназначен для диагностики ионосферы и оперативного прогноза КВ связи.

С помощью ионозонда можно проводить **измерения амплитудных характеристик, спектра, формы и фазы пришедшего сигнала при наличии соответствующей антенной системы**. Измерения осуществляются независимо по обоим разделенным магнитоионным компонентам. Ионозонд может работать в режимах: вертикального, наклонного, возвратно-наклонного и трансionoсферного зондирования. Ионозонд сопровождается специальным математическим обеспечением и имеет возможность работы со сложным фазово-манипулированным сигналом.

Практически мгновенный (~ 10 с.) высотный профиль распределения содержания электронов, высокое разрешение по основным измеряемым характеристикам получаемым в стандарте URSI (**по высоте до 800 м., по частоте – до 5 кГц**) в сочетании с уникальными временными рядами непрерывных рядов данных с **временным шагом 15 мин.** критических частот и действующих высот ионосферных слоев за период 1936 -2007 г.г. и высотно-частотных характеристик за период 1996-2007 г.г. позволяют изучать широкий спектр *проблем физики ионосферы и верхней атмосфере на современном мировом уровне.*

Основные технические параметры ионозонда "Парус"

Диапазон рабочих частот 0,5-20 МГц

Импульсная мощность транзисторного РПДУ 1 кВт

Мощность лампового усилителя, до 20 кВт

Длительность импульса, программируемая 10-200 мкс

Шаг перестройки частоты программируемый 5 кГц

Чувствительность при S/N 10 дБ 2 мкВ

Полоса пропускания приемного устройства 20 кГц

Дискретность отсчета высоты 0.8 км

Аппаратная точность определения фазы 0.1 %

Режим работы.

- Мониторинг - с шагом 15 мин.

- Исследовательский - с шагом от 3 мин.

Потребляемая мощность, соответственно 600 Вт

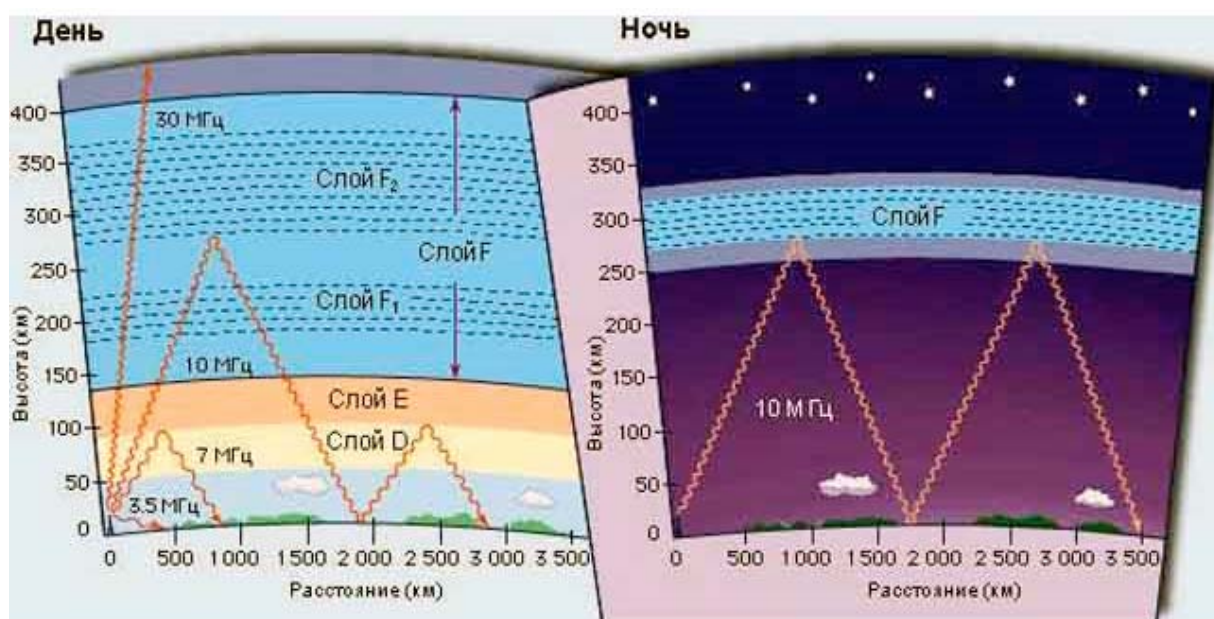
Виды услуг:

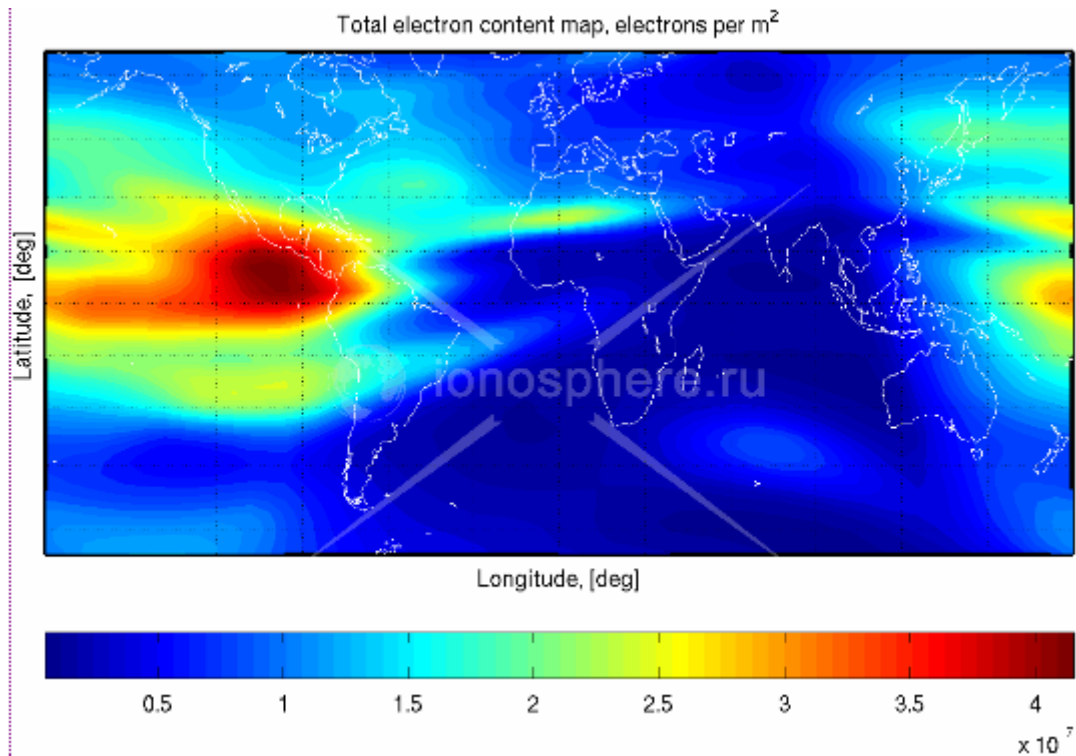
– ежечасные ионосферные данные в стандарте URSI

– проведение циклов измерений по заявкам заинтересованных организаций и лиц, во время уникальных событий на Солнце и околоземном космическом пространстве.

Полное электронное содержание ионосферы

ПЭС (полное электронное содержание) является одной из важнейших характеристик ионосферы Земли, однако, на сегодняшний день, на территории России в глобальном масштабе его мониторинг не осуществляется. Аналитические модели дают хорошую оценку этого параметра при условии спокойной геомагнитной обстановки, но в случае возмущенной ионосферы оценка ПЭС становится существенно менее точной, что негативно сказывается на работе различных (в частности навигационных) спутниковых систем. Радиопросвечивание атмосферы с помощью сигналов спутниковых радионавигационных систем и сети наземных станций является легкодоступным и не требующим больших затрат способом мониторинга ионосферы в реальном времени. Для решения задачи глобального мониторинга ПЭС нами предложен комплексный подход, заключающийся как в использовании существующих моделей так и двух взаимодополняющих методик обработки данных радиопросвечивания, о которых пойдет речь ниже. На основе этой методики были созданы программные средства обработки данных в формате RINEX, поставляемых как российскими ККС так и международной сетью IGS.





Просвечивание атмосферы двухчастотными радиосигналами основано на существовании явления дисперсии радиоволн микроволнового диапазона в электронной плазме, образующей ионосферу Земли. Коэффициент преломления радиосигнала, при прохождении через атмосферу от передатчика, расположенного на спутнике определяется формулой:

$$N = (n - 1)10^{-6} = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \cdot 10^5 \frac{P_w}{T^2} - 40.3 \frac{n_e}{f^2}$$

где P – давление сухого воздуха в Паскалях, P_w – парциальное давление водяного пара T – температура в Кельвинах, f – несущая частота, n_e – концентрация электронов, n – коэффициент преломления.

Таким образом, полное электронное содержание вдоль луча визирования от фазового центра антенны приёмника на антенну передатчика пропорционально разности набегов фазы на двух частотах. Учитывая, что фазовая скорость равна по знаку и противоположна по величине групповой скорости, нетрудно видеть, что ПЭС пропорционален модулю разности фаз или пропорционален разности псевдодальностей, определяемых из навигационных сигналов на двух частотах. Однако, не трудно понять, что для фазовых измерений ПЭС может быть определён лишь с точностью до постоянной (в пределах одного сеанса) константы. Стоит отметить также, что измерения сдвига фазы на несколько порядков точнее кодовых измерений псевдодальности, поэтому для определения абсолютного ПЭС удобнее всего использовать кодовые и фазовые измерения совместно.

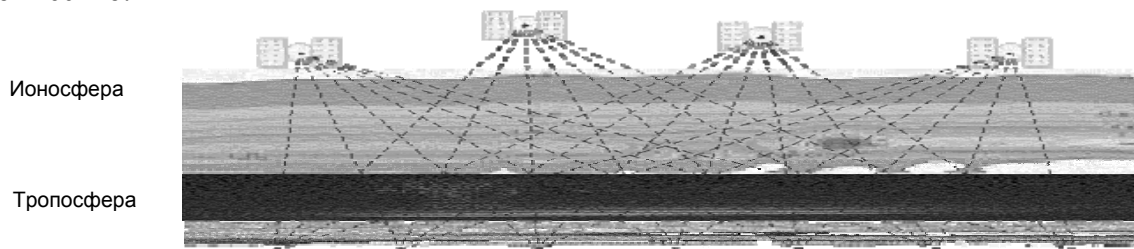


Схема радиопросвечивания атмосферы

Следующим шагом является переход от измеренных абсолютных или относительных задержек вдоль наклонного луча визирования к вертикальным задержкам. Можно выделить два подхода к решению этой задачи. Первый – характеризовать все одновременные измерения лишь одним средним значением вертикального ПЭС, привязанным к координатам антенны приёмника; второй – рассчитывать вертикальное ПЭС непосредственно в «подионосферных точках» (точка, соответствующих, пересечению луча визирования на спутник с гипотетическим бесконечно тонким ионосферным слоем, находящимся на выбранной высоте). Первая методика, как нетрудно заметить, имеет крайне невысокое пространственное разрешение, однако позволяет избежать многих проблем, связанных с определением корректной проекционной функции и последующим восстановлением пространственного распределения. Вторая характеризуется высоким пространственным разрешением, но более сложна и, следовательно, менее надёжна.

Использование комплексной методики, сочетающей в себе измерения и корректируемую модель, позволяет компенсировать недостатки каждого из вышеупомянутых методов. В качестве нулевого приближения, которое необходимо для статистической оценки систематических ошибок, неизбежных при измерениях абсолютных значений ПЭС, используется модель NeQuick. Важнейшим параметром модели является величина солнечной активности. Для нулевого приближения используются спрогнозированные среднемесячные её значения. Далее по данным сети ККС производится региональная подстройка модели – то есть рассчитывается поле значений величины локального уровня ионизации. С использованием этого результата, по модели NeQuick рассчитывается реальное поле значений ПЭС, на котором, тем не менее, не находят отражения локальные возмущения. Мониторинг локальных возмущений производится с использованием разностных методов, а проекционная функция вычисляется непосредственно из скорректированной модели, что позволяет достичь точности определения относительного ПЭС порядка тысячных долей TECU.

При проведении измерений в навигационных спутниковых системах типа "Навстар (GPS)" (США) и "Глонасс" (Россия) могут использоваться как несущие частоты, так и их коды модуляции. Из характера проведения измерений - кодовые измерения или измерения по несущей - уже следует, что измерения по несущей обладают более высокой точностью в силу того, что длительность сигнала с кодовой последовательностью больше длительности сигнала на несущей частоте.

Все величины, применяемые в навигационных системах, являются линейными величинами, т.е. представляют собой данные типа дальностей. Особенностью измеряемых величин является то, что их получение происходит в условиях неинвариантности во времени частот излучаемых сигналов и инвариантности фаз этих сигналов. Основным принципом измерения этих величин является сравнение параметров переданного сигнала с аналогичными параметрами опорного.

Частоты: В системе GPS для всех спутников номинальные частоты одинаковые: $L_1 = 1575,42$ МГц, $L_2 = 1227,60$ МГц.

В системе Глонасс $L_1 = (1602 + 0,5625 \cdot k)$ МГц, $L_2 = (1246 + 0,4375 \cdot k)$ МГц, где k - номер частотной литеры для каждого спутника.

Для определения полной интегральной концентрации ионосферы используются как псевдодальномерные измерения (кодовые измерения дальности), так и измерения по фазе несущей. С учетом возможных ошибок измерений псевдодальномерные и фазовые измерения могут быть представлены в следующем виде: псевдодальномерные измерения по P - или C/A -коду:

$$PR_{L_1} = R + RI_{L_1} + RM_{L_1} + RN_{L_1},$$

$$PR_{L2} = R + RI_{L2} + RM_{L2} + RN_{L2},$$

фазовые измерения (измерения по фазе несущей):

$$\Phi_{L_1} = \frac{2\pi}{\lambda} (R - RI_{L_1} + R\Phi_{L_1} + N_1\lambda_1 + RM\Phi_{L_1} + RN\Phi_{L_1}),$$

$$\Phi_{L_2} = \frac{2\pi}{\lambda} (R - RI_{L_2} + R\Phi_{L_2} + N_2\lambda_2 + RM\Phi_{L_2} + RN\Phi_{L_2}).$$

Здесь R – псевдодальность, включающая в себя тропосферную задержку, погрешности, обусловленные рассинхронизацией бортовых часов спутника и приемника, прочие частотно- независимые погрешности, общие для всех четырех уравнений наблюдения; RI_L – изменения псевдодальности за счёт влияния ионосферы, причем $RI_{L2} = k RI_{L1}$; $k = (L_1/L_2)^2 = (77/60)^2$ для системы GPS, $k = (L_1/L_2)^2 = (9/7)^2$ для системы Глонас; RM и $RM\Phi$ – измерения псевдодальности, вызванные многолучевостью распространения при дальномерных и фазовых измерениях, соответственно; RM и $RN\Phi$ – шумовая ошибка измерений.

При двухчастотных измерениях псевдодальностей вклад ионосферы может быть определен из линейных комбинаций соотношений:

$$RI_{L_1}(t) = \frac{1}{1-k} \left\{ [PR_{L_1}(t) - PR_{L_2}(t)] + \Delta RT + \Delta RM + \Delta RN \right\},$$

где $\Delta RT = RT_{L1} - RT_{L2}$, $\Delta RM = RM_{L1} - RM_{L2}$, $\Delta RN = RN_{L1} - RN_{L2}$ – ошибки измерения дальностей, обусловленные задержками времени распространения сигналов в трактах передатчика и приемника, многолучевостью и шумами приемника.

Значения интегральной электронной концентрации ТЕС можно определить непосредственно из измерений псевдодальностей по следующей формуле:

$$TEC(t) = 9.52 \cdot 10^{16} \left\{ [PR_{L2}(t) - PR_{L1}(t)] + \delta R_k \right\} \text{эл/м}^2.$$

Шумановские резонансы

Шумановские резонансы это естественные электромагнитные колебания, возбуждающиеся в концентрической сферической полости, ограниченной поверхностью Земли и нижней ионосферой. На возможность возникновения глобальных резонансов впервые указал Шуман в 1952 г. Он рассчитал спектр собственных частот сферического резонатора Земля-ионосфера в предположении идеальной проводимости его стенок и отметил, что источником волн являются грозовые разряды, которых на земном шаре наблюдается порядка 100 в каждую секунду. Такой резонатор характеризуется двумя геометрическими параметрами - радиусом Земли и высотой ионосферы. С учетом конечной проводимости стенок и влияния магнитного поля Земли значения резонансных частот несколько изменяются и, как показали многочисленные наблюдения, отмечаются на частотах порядка 8, 14, 20, и 26 Гц. Шумановские резонансы - это стабильные, достаточно длительные, глобальные колебания, представляющие собой типичный естественный дневной фон биосферы. Интерес к этим колебаниям обусловлен тем, что их частоты попадают в диапазон собственных колебаний биотоков мозга: альфа-ритма (8-13 Гц) и бета-ритма (13-30 Гц) и поэтому могут быть биологически значимыми.

Электромагнитная энергия шумановских резонансов связана главным образом с излучением вертикальных грозовых разрядов (разряды облако-земля и внутриоблачные разряды). Молния представляет собой кратковременный электрический разряд, длина которого обычно составляет несколько км. В умеренных широтах высота грозового облака составляет 8-12 км, а в тропических районах наблюдаются грозовые облака, вершина которых достигает 20 км. Верхняя часть грозового облака несет, как правило, отрицательный электрический заряд, а нижняя - положительный. Молния обычно состоит

из двух частей. Начинается она лидером, который движется вниз по пути наибольшей напряженности. После того, как лидер достигнет земли, происходит главный пробой промежутка облако-земля - возвратный разряд, движущийся вверх по ионизированному столбу с высокой скоростью (0.1-0.3 скорости света). Если при грозном разряде промежутки облако-земля пробиваются только один раз, то такой разряд называют коротким. Такие разряды наблюдаются относительно редко и составляют 15-20% всех вертикальных разрядов. Как правило. Возвратный разряд состоит из нескольких последовательных пробоев длительностью около 100 мкс со средним интервалом порядка 40 мкс. Средний пиковый ток каждого из пробоев составляет 20 кА. Энергия отдельных молний может сильно отличаться друг от друга. Не вся энергия молниевых разрядов переходит в излучение. Большая часть её тратится на ионизацию и разогрев плазмы канала, часть идет на омические потери в земле, часть на возбуждение ударных звуковых волн (гром) и световых излучений.

Грозные разряды тесно связаны с климатическими и погодными условиями. При одинаковых погодных условиях имеется ряд географических особенностей, благоприятных для концентрации грозных разрядов, например, горные хребты, вытянутые определенным образом относительно направления господствующих ветров, широкие влажные речные долины, а также группы островов в океане. Области экстремально большой грозной активности (свыше 2500 разрядов на 100 кв. км в год) называют мировыми грозными центрами. Для сравнения в областях повышенной грозной активности, например, на юге Европы это число в среднем составляет 350-400. Выделяются следующие мировые центры гроз - Центральная Африка (4000-5000 разрядов на 100 кв. км в год), Южная и Центральная Америка (3000-3500 разрядов) и Юго-Восточная Азия (5000-5500 разрядов).

Neil Cherry развивает следующую гипотезу. Известно, что стабильность биологических (особенно циркадных) ритмов живых организмов во многом определяется мелатонин серотонин (М С) балансом, который влияет на все функции и органы, включая кровяное давление, дыхательную, иммунную, сердечно-сосудистую и нервную системы. Мелатонин оказывает непосредственное влияние на иммунную систему благодаря наличию специфических клеточных рецепторов. ...

Уменьшение мелатонина способствует развитию сердечно-сосудистых и неврологических заболеваний. Основным биологическим механизмом влияния солнечно-геомагнитной активности на живые организмы, по мнению Н. Черри, является детектирование мозгом шумановских резонансов, которые нелинейно взаимодействуют с осциллирующими в том же диапазоне частот ионами кальция в нейронах, изменяя уровень мелатонина и М С баланс.

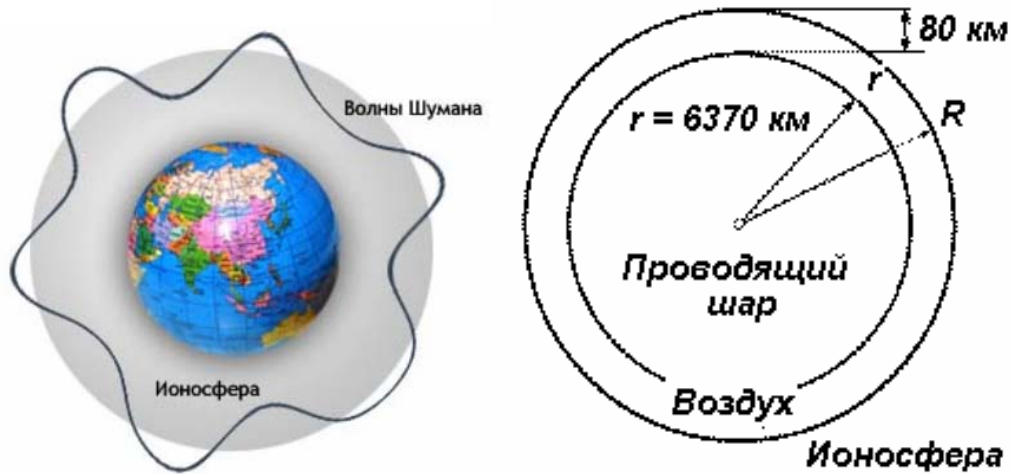
Резонансом Шумана называется явление образования стоячих электромагнитных волн низких и сверхнизких частот между поверхностью Земли и ионосферой. Земля и её ионосфера — это гигантский сферический резонатор, полость которого заполнена слабоэлектропроводящей средой. Если возникшая в этой среде электромагнитная волна после огибания земного шара снова совпадает с собственной фазой (входит в резонанс), то она может существовать долгое время.

Рассмотрим объёмный резонатор, состоящий из двух концентрических проводящих сфер. Внутренняя сфера представляет собой поверхность Земли, а внешняя — ионизированный газ ионосферы, находящийся на высоте около 80 км над землёй.

Предположим, что электромагнитная волна, n раз отражаясь попеременно от поверхности Земли и ионосферы, огибает земной шар. Если на окружности Земли

укладывается целое число отражений, то возникает резонанс, и такая волна может существовать продолжительное время. Считая, что волна распространяется со скоростью света $c = 300\,000$ км/с, а окружность Земли составляет $L = 40\,000$ км, получим частоту колебаний, равную

$$f_n = \frac{cn}{L} \approx 7,5n \text{ Hz.}$$



Простейшая модель сферического объёмного резонатора

Для первых пяти гармоник эта формула даёт ряд частот 7,5 — 15,0 — 22,5 — 30,0 — 37,5 ... Гц. Сравнивая теоретические частоты с частотами, полученными экспериментально (7,83 — 14,1 — 20,3 — 26,4 — 32,4 ... Гц), заметим, что при хорошем совпадении частоты первой гармоники ошибка с ростом n увеличивается.

В своей оригинальной работе Шуман проанализировал колебания, возникающие в сферическом объёмном резонаторе. При этом он учитывал, что поверхность земли имеет постоянную проводимость около $\sigma = 10^{-3}$ См/м, а проводимость ионосферы на высотах 70–90 км меняется в пределах $\sigma = 10^{-5}—10^{-3}$ См/м. Из-за этого средняя скорость распространения электромагнитной волны $V(\sigma)$ примерно на 20% меньше, чем при отражении от сферы с бесконечной проводимостью. Для частоты n -й гармоники Шуман получил

$$f_n = \frac{V(\sigma)}{L} \sqrt{n(n+1)} \approx 6,0 \sqrt{n(n+1)} \text{ Hz,}$$

что для первых пяти гармоник даёт 8,5 — 14,7 — 20,8 — 26,8 — 32,9 Гц.

Причины возникновения волн

Существует несколько гипотез возникновения электромагнитных волн в полости Земля-ионосфера.

«Грозовая» гипотеза

Разряды молнии, как полагают, являются первичным естественным источником возбуждения резонанса Шумана. Молнии ведут себя как огромные антенны, которые излучают электромагнитную энергию на частотах около 100 кГц. Они-то и являются причиной возбуждения электромагнитных колебаний в широком диапазоне частот. Данным явлением и объясняется, по мнению большинства специалистов, наличие устойчивых сверхнизкочастотных колебаний, которые практически не затухают и имеют фиксированные частоты.

Характеристики

После многочисленных исследований и перепроверок была точно определена частота резонанса Шумана — 7,83 Гц. Из-за волновых процессов плазмы внутри земли наиболее чётко наблюдаются пики на частотах примерно 8, 14, 20, 26, 32 Гц. Для основной, самой низкой частоты, возможны вариации в пределах 7-11 Гц, но большей частью в течение суток разброс резонансных частот обычно лежит в пределах $\pm(0,1-0,2)$ Гц.

Спектральная плотность колебаний составляет 0,1 мВ/м.

Интенсивности резонансных колебаний и их частоты зависят

- от времени суток. Ночью амплитуда резонансных волн меньше в 5-10 раз, из-за уменьшения скорости расхода воды в океанском конвейере (ОК), уменьшения взаимных скоростей петель ОК.
- от времени года. В летние месяцы (с мая по август в Северном полушарии) частоты резонансов повышаются; В Южном полушарии повышение частот резонансов происходит с ноября по февраль.
- от места нахождения на земном шаре. Волны Шумана наиболее отчетливо выражены вблизи мировых очагов гроз: Африка, Южная Америка, Индонезия, Индия (в местах однонаправленных петель расхода воды в ОК). В приполярных регионах амплитудные пики на этих частотах уже не столь выражены (минимальная токовая составляющая вектора напряженности электрического поля E) На полюсах максимален вектор напряженности магнитного поля H , вектор E минимален, на экваторе наоборот.
- от солнечной активности. Во время магнитных бурь их интенсивность возрастает на 15%. Есть случаи возбуждения частот в 12500 Гц, что соответствует движению ядра земли на глубине 3,6 км от центра ядра земли.
- от скорости расхода воды в ОК (океанском конвейере)
- фаз луны
- периодов солнечной активности (СА)

История исследований

Впервые эффект стоячих волн был обнаружен и проанализирован Николой Тесла. Спустя пять с лишним десятилетий этот эффект был подробно исследован для случая ионосферы и позднее стал известен как «резонанс Шумана». Предположение о существовании резонанса электромагнитных волн в пространстве Земля-ионосфера высказал профессор Мюнхенского университета В.О. Шуман в 1952 году. Какого-либо значения этому предположению он не придал, но опубликовал о нём три статьи. Ознакомившись с ними, врач Герберт Кёниг (Herbert König) обратил внимание на совпадение частоты волны, рассчитанной Шуманом, с диапазоном альфа-волн человеческого мозга. Он связался с Шуманом и они продолжили исследования. В том же 1952 году они экспериментально подтвердили существование таких естественных резонансов.

Продолжил изучение Вольфганг Людвиг, проводивший эксперименты в открытом море и в подземных шахтах. В. Людвиг выпустил книгу о резонансе Шумана «Информативная медицина».

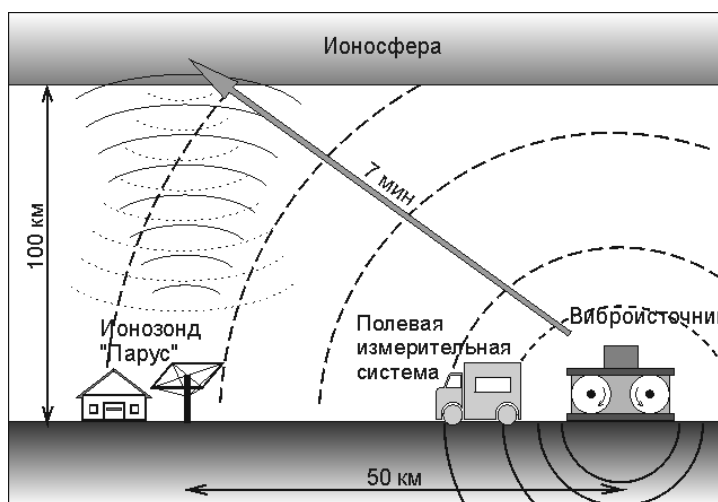
Затруднения в исследовании волн Шумана обусловлены тем, что для их приёма требуется специальная очень чувствительная аппаратура и соответствующая окружающая обстановка: даже движение деревьев, животных или людей рядом с приёмником может повлиять на его показания.

Станции для постоянного наблюдения за резонансом Шумана располагаются:
 Россия, г. **Томск**, **Томский государственный университет**. Данные на сайте обновляются каждые два часа;
 Словакия, г. **Модра**, **геофизическая обсерватория**.



Обнаружение сейсмоионосферного эффекта

Сеймовибраторы. Установленные на Быстровском вибросейсмическом полигоне СО РАН (Новосибирская обл.) сеймовибраторы представляют собой стационарные виброисточники дебалансного типа с амплитудой силы воздействия на поверхность Земли до 100 т (ЦВ-100), до 40 т (ЦВ-40) и до 30 т (ЦВ-30), а также гидрорезонансный вибратор ГРВ-50 с амплитудой силы 50 т. Все указанные устройства, обычно используемые для вибросейсмического зондирования Земли, могут работать как в режиме монохроматического излучения с возможным переключением частоты непосредственно в течение сеанса, так и в свип-режиме. Рабочий частотный диапазон от 5 до 12 Гц, стабильность частоты колебаний платформы вибратора $\Delta f/f < 10^{-7}$. Продолжительность сеанса устанавливается от 20 до 48 мин. В свип-режиме частота изменяется линейно в заданных пределах (например, пробег частоты при наиболее часто используемом свип-режиме для ЦВ-100 составляет 6.25-9.57 Гц за 47 мин). Временная привязка начала свип-сеанса (установление нулевой фазы) к шкале точного времени обеспечивается системой управления сеймовибратором с точностью не хуже 1 мс.



Ионосферная станция. На удалении 49 км от сейсмовибратора в обсерватории ИГФ СО РАН “Ключи” установлен цифровой ионозонд “Парус” (разработка ИЗМИРАН, г.Москва), работающий в режиме непрерывного мониторинга за состоянием ионосферы. Он позволяет получать как обычные ионограммы (в цифровом виде), так и проводить доплеровские измерения циклами по заранее установленной с помощью ЭВМ сетке радиочастот (в диапазоне 1-20 МГц) и высот отражения (до 450 км). По измеренным эхосигналам от отражающих слоев ионосферы вычислялись квадратурные составляющие и доплеровский спектр. Частота посылки радиоимпульсов составляет 50 Гц, что уверенно перекрывает рабочий частотный диапазон сейсмовибраторов. Длительность непрерывного единичного сеанса доплеровского зондирования, состоящего из максимально возможного количества (16000) отсчетов, составляет 320 с. Время начала сеанса фиксируется с точностью до 1 с.

Доплеровское зондирование ионосферы. Особый интерес вызывают результаты доплеровского зондирования ионосферы в связи с возможным воздействием на нее акустического излучения сейсмовибраторов. Акустические волны инфразвукового диапазона способны распространяться на большие расстояния и при благоприятных условиях (малом затухании и рассеянии, слабой рефракции в атмосфере) достигать ионосферных высот.

Прохождение такой акустической волны через область отражения зондирующей ионосферу радиоволны должно приводить к фазовой модуляции последней на частоте вибратора. Поэтому была поставлена задача обнаружения в доплеровском спектре зондирующей ионосферу радиоволны спектральных составляющих на частоте вибратора. Для усиления эффекта зондирование желательно осуществлять на радиочастотах, отражаемых нижними слоями ионосферы. В частности, выбирались случаи отражения радиоволн от E-слоя ионосферы (высоты 90-140 км). К сожалению, в ночное время, когда чаще всего работал сейсмовибратор, отражения от высот E-слоя на ионограммах отсутствуют.

Они появляются лишь при наличии спорадического слоя Es, который не характеризуется какими-либо регулярными закономерностями. Кроме того, такие его особенности, как частичная прозрачность, независимость действующей высоты отражения от частоты и т.п., не позволяют предполагать простого характера взаимодействия Es с акустической волной, приводящего к фазовой модуляции зондирующей радиоволны. В связи со сказанным, наибольший интерес вызывали доплеровские измерения радиоволн, отражавшихся от регулярного E-слоя. Исследования доплеровских спектров таких радиоволн, проведенное нами, показали их сложную структуру в рассматриваемом диапазоне от 0 до 25 Гц, в частности, регулярное наличие отдельных спектральных компонент в диапазоне рабочих частот сейсмовибратора.

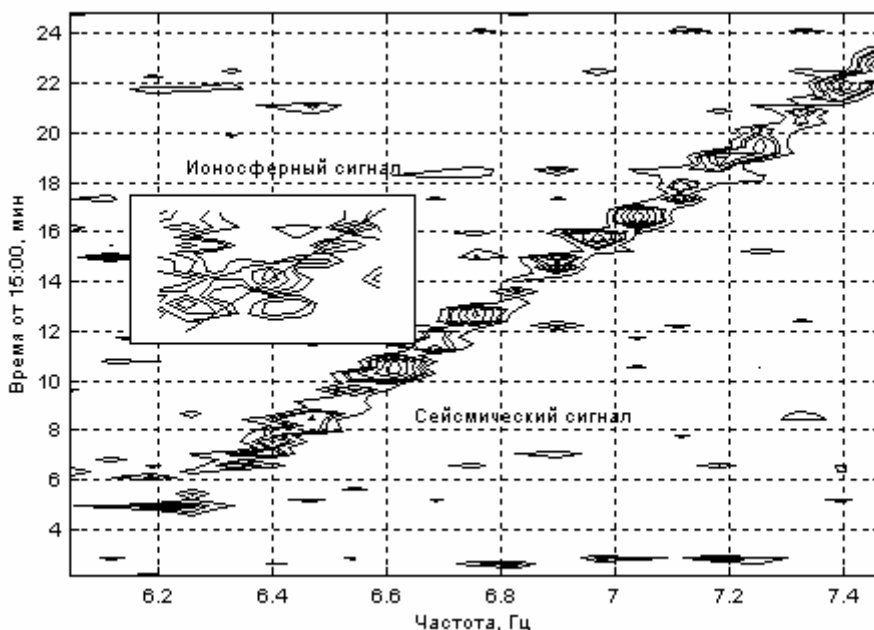
Далее, ионозонд “Парус” размещен в п.Ключи в 49 км от сейсмовибратора и осуществляет вертикальное зондирование ионосферы. Для обнаружения обсуждаемого сейсмоионосферного эффекта, очевидно, необходимо, чтобы акустическая волна от сейсмовибратора прошла через область ионосферы внутри диаграммы направленности ионозонда. В связи со сказанным и в силу его слабости эффект трудно обнаружить. Кроме того, поскольку единичный сеанс доплеровского зондирования длится лишь 320 с, невозможно осуществить длительное накопление полезного сигнала.

Поэтому для обнаружения эффекта применялась методика спектрального-временного анализа, и наблюдения велись во время свип-режимов работы сейсмовибратора. Далее, строились изолинии поверхности, отображающей скользящий амплитудный доплеровский спектр радиоволны в координатах доплеровская частота - время. В случаях, когда исследуемый эффект есть, должна, очевидно, “прорезаться” наклонная прямая линия, отображающая изменение рабочей частоты сейсмовибратора в

ходе сеанса. Наклон прямой, наблюдаемой при доплеровских измерениях, должен совпадать с наклоном аналогичной кривой, полученной по сейсмическим данным, а ее сдвиг по оси времени - отображать время прихода акустической волны от земной поверхности к области отражения зондирующей радиоволны в ионосфере. За время описываемых наблюдений нами зарегистрировано всего два таких случая (из трех дневных свип-сеансов ЦВ-100), удовлетворяющих указанным требованиям.

На данных, полученных с сейсмического и акустического датчиков, легко увидеть прямые, характеризующие изменение рабочей частоты сейсмовибратора. Аналогичная осредненная прямая, полученная по данным доплеровского зондирования, отображающая наблюдавшееся со временем изменение частоты спектральной составляющей доплеровского спектра, приведена в левой части. Справа дана также прямая, изображающая изменение рабочей частоты сейсмовибратора в момент наблюдения. Смещение по оси времени оказывается порядка 7 минут, что соответствует вертикальной скорости распространения акустической волны 333 м/с.

Результат. Экспериментально обнаружено воздействие на ионосферу акустической волны, возбуждаемой при работе мощного сейсмовибратора в диапазоне инфразвуковых частот. Оно проявляется в дополнительной фазовой модуляции и изменениях доплеровского спектра зондирующей ионосферу радиоволны на рабочих частотах сейсмовибратора. Эффект выявлен в случаях отражения зондирующей радиоволны в дневных условиях от высот Е-слоя ионосферы, возмущаемой сейсмовибратором. Измеренное в свип-режиме время прихода акустической волны на высоты Е-слоя ионосферы приблизительно равно 7 минутам.



Спектрально-временные диаграммы сейсмических и доплеровских наблюдений в п. Ключи (49 км). Сеанс 15:05-15:52 за 18.11.97г., вибратор ЦВ-100, частоты 6.25-9.57 Гц. Доплеровское зондирование на частоте 1785 кГц с высоты 140 км.