

DOI: <https://10.15407/rej2018.01.019>

УДК 537.87:550.380.2

PACS: 93.85.Bc; 93.85.Jk; 94.20.Cf; 94.20.ws

И. Г. Кудинцева¹, Ю. П. Галюк², А. П. Николаенко³, М. Хайакава⁴¹*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
4, пл. Свободы, Харьков, 61077, Украина*²*Санкт-Петербургский государственный университет
35, Университетский просп., Санкт-Петербург, Петергоф, 198504, Россия
E-mail: j.galuk@spbu.ru*³*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Акад. Проскуры, Харьков, 64085, Украина*

E-mail: sasha@ire.kharkov.ua

⁴*Институт Хайакавы, Компания сейсмического электромагнетизма,
Инкубационный центр 508 Университета электросвязи
1-5-1 Чофугаока, Чофу, Токио, 182-8585, Япония*

E-mail: hayakawa@hi-seismo-em.jp

МОДИФИКАЦИИ ПРОВОДИМОСТИ СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ ВНЕЗАПНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ И ИЗМЕНЕНИЯ ПИКОВЫХ ЧАСТОТ ШУМАНОВСКОГО РЕЗОНАНСА

Исследования влияния космической погоды на различные области земной атмосферы было и остается актуальной задачей дистанционного зондирования окружающей среды. В работе изложена методика обнаружения модификации пиковых частот шумановского резонанса при внезапных ионосферных возмущениях (ВИВ), вызванных рентгеновскими вспышками на Солнце. ВИВ проявляется как резкое снижение ионосферы над дневным полушарием Земли при хромосферной вспышке. Понижение дневной ионосферы уменьшает среднюю высоту промежутка Земля–ионосфера и приводит к росту резонансных частот. В работе используется модель профиля проводимости средней атмосферы и его модификации. По методу полного поля вычисляются резонансные частоты полости Земля–ионосфера и характеристические высоты профиля проводимости в зависимости от интенсивности ионосферного возмущения. Энергетические спектры вертикального электрического поля рассчитаны с помощью двумерных телеграфных уравнений для равномерного пространственного распределения гроз в резонаторе с неоднородностью день–ночь при нескольких положениях наблюдателя относительно солнечного терминатора. Получены изменения пиковых частот в зависимости от интенсивности ионосферного возмущения. Для первых трех модов вычислена среднезвешенная частота шумановского резонанса, и по методу наименьших квадратов определены параметры линейной зависимости этой частоты от интенсивности ВИВ и/или от изменений магнитной характеристической высоты профиля проводимости. Эти данные предлагается использовать в качестве калибровочных кривых при интерпретации наблюдений и оценке модификации нижней ионосферы по шумановским резонансным частотам. Ил. 7. Табл. 3. Библиогр.: 15 назв.

Ключевые слова: шумановский резонанс, профиль проводимости средней атмосферы, внезапное ионосферное возмущение, среднезвешенная частота шумановского резонанса, калибровочная кривая.

В исследованиях глобального электромагнитного (шумановского) резонанса в полости Земля–ионосфера большое внимание уделяется обнаружению различных возмущений нижней ионосферы в наблюдаемых резонансных колебаниях. Модификации ионосферы связаны, как правило, с солнечной активностью, которая определяет космическую погоду в околоземном пространстве. Солнечная активность проявляется большей частью в виде рентгеновских вспышек, при которых из хромосферы на Землю приходит резко увеличившийся поток ионизирующего электромагнитного излучения от гамма- до

ультрафиолетового диапазона длин волн. Несколько реже наблюдаются вспышки в корпускулярном потоке частиц – солнечные протонные или солнечные электронные события (СПС и СЭС). Хромосферные вспышки резко увеличивают ионизацию средней и верхней атмосферы освещенного полушария, что сказывается на радиосвязи в различных диапазонах длин волн на дневной стороне Земли. Эти события называются внезапными ионосферными возмущениями (ВИВ). Потoki заряженных частиц при протонных и электронных событиях отклоняются геомагнитным полем и, проникая к Земле через

магнитосферу, модифицируют приполярную ионосферу в Северном и Южном полушариях. В радиодиапазоне наблюдается резкое ослабление сигналов на полярных трассах распространения (поглощение в полярных шапках).

Эти явления уверенно наблюдаются в диапазоне от очень низких частот (единицы кГц) до коротких длин волн (10 МГц), благодаря чему удается диагностировать изменения ионосферной плазмы на высотах 120 км и выше. Что же касается радиоволн сверхнизких частот (СНЧ = 3 Гц...3 кГц) и в частности, диапазона шумановского резонанса (4...40 Гц), чувствительных к свойствам ионосферной плазмы ниже 100 км, то здесь влияние на шумановский резонанс даже самых мощных солнечных вспышек и связанных с ними ВИБ оставалось до последнего времени сомнительным.

В работе [1] была предложена специальная методика обработки записей шумановского резонанса, которая выявляет резкие изменения резонансных частот под влиянием ВИБ. Для этого вместо привычных пиковых частот шумановского резонанса следует использовать средневзвешенную частоту, равную математическому ожиданию редуцированных (взвешенных) частот нескольких резонансных модов. Сначала из записей отдельных пиковых частот вычитают изменения, связанные с перемещением мировых гроз относительно наблюдателя в течение суток. Так получают «центрированные» пиковые частоты, лежащие вблизи 8, 14, 20 Гц и т. д. В записях этих частот влияние расстояния источник–приемник оказывается ослабленным, и их редуцируют к единой частоте 8 Гц. Эта операция будет описана ниже.

Редуцированные (взвешенные) частоты сохраняют флуктуации, связанные с шумовой природой грозовых источников, со случайным распределением грозовых разрядов по поверхности Земли. Эти флуктуации оказываются взаимно независимыми на разных частотах благодаря различиям в пространственном распределении поля каждого из модов. Усреднив взвешенные частоты по ансамблю резонансных модов, мы получим средневзвешенную частоту (СВвЧ), в которой случайные флуктуации сильно ослаблены.

Обнаружение ВИБ в записях шумановского резонанса основано на том, что резкие из-

менения в нижней ионосфере дневного полушария вызывают синхронное скачкообразное увеличение всех резонансных частот, причем форма изменений практически одинакова на всех модах резонансных колебаний. Благодаря ослаблению независимых случайных флуктуаций при усреднении, средневзвешенная частота оказывается значительно чувствительнее к солнечной вспышке, чем резонансные частоты отдельных модов. Это было продемонстрировано в работе [1], где удалось не только выявить модификации нижней ионосферы во время нескольких умеренных ВИБ, но и оценить величину смещения вертикального профиля проводимости средней атмосферы. При этом использовалась эвристическая модель колена.

В настоящей работе используется профиль проводимости, отвечающий наблюдению шумановского резонанса [2–4], учитывается неоднородность резонатора день–ночь и постулируются изменения проводимости на дневном полушарии во время ВИБ различной интенсивности. Затем оценивается чувствительность средневзвешенной частоты к модификациям дневной ионосферы. Полученные модельные калибровочные кривые можно применять впоследствии к данным наблюдений с тем, чтобы оценить степень ионосферных возмущений во время солнечных вспышек.

1. Вертикальные профили проводимости.

Наблюдаемые экспериментально параметры глобального электромагнитного (шумановского) резонанса полости Земля–ионосфера зависят от высотного профиля проводимости средней атмосферы. В [2–4] описан профиль проводимости атмосферы, отвечающий наблюдениям шумановского резонанса в однородном по угловым координатам резонаторе Земля–ионосфера и с учетом неоднородности ионосферы день–ночь.

В этих работах речь шла о проводимости атмосферы Земли в условиях спокойного Солнца. В том случае, когда на Солнце происходят рентгеновские вспышки, на дневное полушарие Земли приходит резко возросший поток жесткого ионизирующего излучения. В результате этого концентрация ионосферной плазмы повышается, и профили проводимости изменяются, а верхние слои атмосферы с заданной проводимостью во время вспышки сдвигаются на меньшие высоты.

Такие возмущения охватывают освещенное, дневное полушарие, а поскольку они происходят внезапно, их называют внезапными ионосферными возмущениями.

Наибольшие модификации ионосферы во время ВИВ сосредоточены в ее верхней части и в окрестности максимума ионизации (250...300 км над поверхностью Земли). При уменьшении высоты до значений, существенных для шумановского резонанса (50...100 км), эффекты ослабевают, и на высотах ниже 50–60 км возмущения, влияющие на наблюдаемые сигналы шумановского резонанса, исчезают. Поэтому говорят, что ВИВ снижает верхнюю (магнитную) характеристическую высоту профиля проводимости, тогда как нижняя (электрическая) высота остается неизменной.

Эти особенности моделируются следующим образом. Профиль проводимости дневного полушария в отсутствие вспышек на Солнце описывается дневным профилем проводимости [2–4]. Этот профиль показан на рис. 1 гладкой верхней кривой без маркеров (кривая 0).

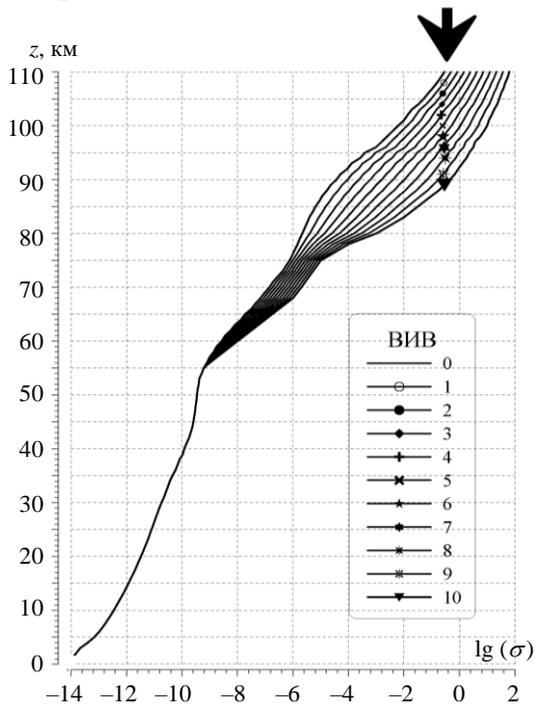


Рис. 1. Вертикальные профили проводимости спокойной и возмущенной ионосферы

На этом рисунке по оси ординат отложена высота над поверхностью Земли в километрах. Вдоль оси абсцисс отложен логарифм проводимости (С/м) средней атмосферы. Показан набор профилей проводимости, каждая

кривая пронумерована от 0 до 10. Кривая 0 показывает проводимость атмосферы при спокойном Солнце. Во время ВИВ нижняя часть этой кривой (область от 0 до 55 км) остается неизменной, а верхняя часть профиля на высотах до 110 км модифицируется «линейным образом». При максимальном потоке жесткого излучения во время хромосферной вспышки на Солнце профиль проводимости переходит в кривую 10 (рис. 1). Соответствующие данные для спокойных условий и максимальной модификации приведены в табл. 1 Приложения.

Профиль 10 возмущенной ионосферы на рис. 1 (см. табл. 1 Приложения) был получен из спокойного профиля 0 следующим образом. На высоте 55 км и ниже модификации отсутствуют. На высоте 110 км профиль проводимости спокойной ионосферы снижается на $\Delta = 21$ км, что обозначено вертикальной стрелкой на рис. 1. Из-за этого снижения значение логарифма проводимости $\lg(\sigma) = -0,54$ с высоты $z = 110$ км в спокойных условиях смещается на высоту 89 км во время максимального ВИВ (см. табл. 1).

Вертикальное смещение dh относительно остальных значений высоты h находится с помощью следующей линейной формулы:

$$dh = \frac{\Delta(h - z_1)}{z_2 - z_1}, \quad (1)$$

где $\Delta = 21$ км, $z_1 = 55$ км, $z_2 = 110$ км. Следует отметить, что поскольку вдоль оси абсцисс на рис. 1 отложен логарифм проводимости, линейные изменения высоты отвечают экспоненциальным изменениям проводимости воздуха. Такое поведение физически оправдано, оно связано с экспоненциальным затуханием ионизирующего излучения по мере проникновения в среднюю атмосферу.

Так были получены две крайние зависимости, показанные в табл. 1 и на рис. 1 гладкой кривой для спокойных условий (интенсивность возмущения $B = 0$) и кривой с треугольниками для максимального возмущения (интенсивность $B = 10$). Между ними находятся профили проводимости, отвечающие промежуточной интенсивности возмущения B , изменяющейся от 1 до 9 баллов. Эти профили были получены с помощью линейной интерполяции двух крайних зависимостей. Таким образом, для внезапных ионосферных возмущений, интенсивность которых $0 < B < 10$,

были построены профили проводимости средней атмосферы.

Используя метод полного поля [3–9], мы рассчитали для каждого профиля частотные

зависимости комплексных характеристических высот и постоянной распространения сверхнизкочастотных радиоволн, показанные на рис. 2.

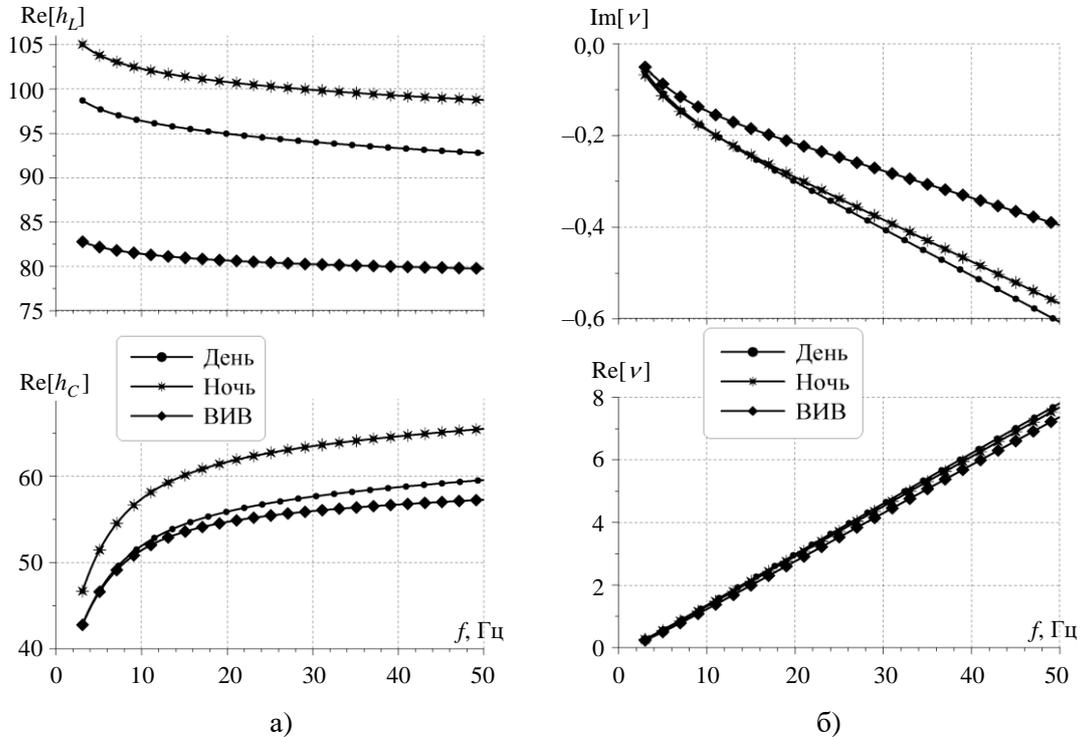


Рис. 2. Характеристические высоты (а) и постоянная распространения (б) СНЧ-радиоволн для спокойного и возмущенного Солнца

В методе полного поля при определении постоянной распространения СНЧ-радиоволн $\nu(f)$ рассматривается плоскослоистая проводящая среда, в которой строится строгое решение электродинамической задачи. В каждом из горизонтальных слоев учитывают электромагнитные волны, вертикально распространяющиеся вверх и вниз. Толщину слоев выбирают намного меньше длины волны в среде, поэтому их свойства предполагаются неизменными. На границах слоев тангенциальные компоненты поля непрерывны. Таким образом, для M слоев получают алгебраическую систему из $2M$ линейных уравнений относительно коэффициентов отражения и прохождения. Так удается рассчитать зависимость $\nu(f)$, отвечающую заданному профилю $\sigma(h)$ [3–9]. Классический метод полного поля (*full wave solution*) наталкивается на сложности, если проводимость воздуха оказывается малой и медленно изменяется с

высотой. Тогда можно воспользоваться тем, что рассматриваемая задача сводится к нелинейному дифференциальному уравнению первого порядка (уравнению Риккати), если от полей перейти к поверхностному импедансу на границах слоев (отношению тангенциальных компонент поля E и H). Полученное уравнение решается численно с помощью метода последовательных приближений, и в результате получают искомые комплексные характеристические высоты профиля проводимости и постоянную распространения $\nu(f)$. Электрическая $h_C(f)$ и магнитная $h_L(f)$ характеристические высоты [$h_C(f) < h_L(f)$] интерпретируются как границы, выше которых амплитуда электрического и магнитного поля падающей на ионосферу снизу монохроматической электромагнитной волны резко затухает с высотой. Поскольку решение задачи строится формально строго и учитываются изменения по-

ля в толще атмосферы, метод получил название метода полного поля.

На рис. 2, а показаны изменения реальных частей характеристических высот ионосферы, полученных для конкретных профилей проводимости атмосферы. Вдоль оси абсцисс отложена частота в диапазоне от 3 до 50 Гц. Верхняя панель рисунка показывает реальную часть магнитной (верхней) характерной высоты $h_L(f)$, полученную для регулярных ночного (кривая со звездочками) и дневного (кривая с точками) профилей, а также для дневного профиля во время ВИБ интенсивностью 10 баллов (кривая с ромбами). Магнитные высоты убывают с частотой от значений около 100 км, причем зависимость, отвечающая внезапному ионосферному возмущению, расположена примерно на 15 км ниже кривой для спокойной ионосферы. Здесь уместно напомнить, что истинный профиль проводимости атмосферы, показанный на рис. 1, был снижен на 21 км относительно 110 км.

Нижняя панель рис. 2, а показывает частотную зависимость реальной части электрической (нижней) характерной высоты $h_C(f)$, полученной для тех же профилей. Эти высоты увеличиваются с ростом частоты от 40–45 км до 60–65 км. Зависимость для внезапного ионосферного возмущения вначале совпадает с кривой регулярной дневной ионосферы, а затем располагается на несколько километров ниже, чем в невозмущенной ионосфере. Такое поведение представляется вполне естественным, поскольку область высот ниже 55 км в истинном профиле проводимости атмосферы остается почти неизменной во время ВИБ.

На рис. 2, б показаны частотные зависимости комплексной постоянной распространения $\nu(f)$ СНЧ-радиоволн, полученные для моделей однородного резонатора Земля–ионосфера, ограниченного сверху спокойной дневной (кривые с точками) и ночной (кривые со звездами) ионосферой, а также дневной ионосферой во время ВИБ интенсивностью в 10 баллов (кривые с ромбами).

Верхняя панель рисунка показывает мнимую часть постоянной распространения $\text{Im}[\nu(f)]$ (затухание радиоволн) как функцию частоты. Видно, что снижение верхней части профиля проводимости приводит к заметному уменьшению потерь в резонаторе

Земля–ионосфера. Происходит увеличение наблюдаемых пиковых частот глобального электромагнитного резонанса, что проявляется на нижней панели рис. 2, б в том, что частотная зависимость реальной части постоянной распространения в резонаторе с возмущением расположена правее всех других зависимостей. Таким образом, резонансное условие $\text{Re}[\nu(f)] = n$, где $n = 1, 2, 3, \dots$, реализуется при наличии возмущения на более высоких частотах. Эффект объясняется тем, что нижняя граница ионосферы в возмущенных условиях становится более резкой и это увеличивает пиковые частоты и добротности резонансных колебаний.

Интересно также отметить, что при аппроксимации невозмущенной мнимой части постоянной распространения степенной функцией получается частотная зависимость вида $-\text{Im}[\nu(f)] \propto f^{0,69}$. Этот результат очень близок к широко используемой эталонной частотной зависимости затухания СНЧ-радиоволн [6] вида $-\text{Im}[\nu(f)] \propto f^{0,64}$. Согласованность модельных данных с эталоном говорит в пользу используемого профиля проводимости средней атмосферы. Отличие от эталона в показателе частотной зависимости на 0,05 объясняется использованием дневного профиля проводимости, когда затухание превышает ночные (и средние) значения.

2. Изменения резонансных частот, вызванные ВИБ. Воспользуемся модельными частотными зависимостями $\nu(f)$ для выявления связи резонансных частот различных модов с вертикальным профилем проводимости средней атмосферы во время ВИБ. Используем соображения, изложенные в работах [10–15] и проверенные авторами в расчетах.

Модель резонатора Земля–ионосфера с неоднородностью день–ночь получают из однородного резонатора введением антисимметричного возмущения, у которого параметры на дневной и ночной стороне планеты отличаются от средних значений «в разные стороны и на одинаковую величину». Такое возмущение называют асимметрией день–ночь. Например, пусть средняя высота ионосферы равна 75 км, а асимметрия день–ночь составляет 15 км, тогда ночная высота равна 90 км, а дневная – 60 км. Очевидно,

что величина асимметрии не может превышать среднее значение, иначе значение параметра модели на дневной стороне может оказаться нулевым. Теоретический анализ и расчеты показали [11–15], что асимметрия день–ночь слабо влияет на собственные частоты полости Земля–ионосфера и на форму резонансных спектров при любых разумных ее относительных значениях, например 0,25. Поэтому необходимо пояснить, каким образом внезапные возмущения ионосферы, вызванные солнечными или галактическими вспышками, могут заметным образом повлиять на параметры шумановского резонанса.

Внезапное ионосферное возмущение изменяет дневной профиль проводимости, не затрагивая ночную сторону Земли. Поэтому ВИБ модифицирует не только асимметрию, но и средние параметры резонатора, а это уже заметно изменяет пиковые частоты и спектр колебаний. Пусть, например, резонатор в отсутствие ВИБ имел ночную высоту 90 км и дневную – 60 км (средняя высота равна 75 км), а во время ВИБ дневная высота уменьшилась на 20 км (до 40 км). Тогда средняя высота промежутка Земля–ионосфера снизилась до 65 км, а асимметрия возросла до 25 км. Последнее обстоятельство на спектры практически не повлияет, но снижение ионосферы в среднем вызовет заметные эффекты. Таким образом, ионосферные возмущения на дневной полусфере способны обеспечить заметный эффект за счет изменений средней глобальной ионосферы.

Экспериментальное обнаружение изменений пиковых частот во время ВИБ сильно затруднено из-за шумовой природы сигналов шумановского резонанса, создаваемого радиоизлучением мировых гроз. Недавно была предложена методика обработки записей шумановского резонанса, позволяющая выделить резкие синхронные изменения, связанные с рентгеновскими вспышками на Солнце [1]. Для этого используются не сами пиковые частоты, а средневзвешенная частота (СВвЧ). Для ее получения из записей суточных вариаций пиковых частот трех-четырёх резонансных модов убирают медленные тренды, обусловленные дрейфом мировых гроз вокруг Земли. Для этого используют записи за несколько суток до и после события и усредняют их по ансамблю дней. В результате получают стандартные суточ-

ные изменения для каждого мода за период наблюдений. Эти средние изменения вычитают из записей, что устраняет медленные тренды, но не быстрые флуктуации частот в таких «центрированных записях».

Из центрированных пиковых частот каждого мода получают взвешенные частоты, т. е. частоты, редуцированные к 8 Гц. Здесь необходимы пояснения. Хорошо известно, что собственные частоты идеального резонатора Земля–ионосфера пропорциональны $\sqrt{n(n+1)}$, где n – номер резонансного мода. Множитель $n(n+1)$ называют постоянной разделения сферической системы координат. В реальном резонаторе с потерями резонансные (пиковые) частоты (8, 14, 20 Гц и т. д.) лежат ниже собственных частот идеальной полости, но по-прежнему остаются пропорциональными $\sqrt{n(n+1)}$, что свидетельствует о том, что Земля имеет форму шара [7]. Пользуясь этим свойством, удастся свести пиковые частоты высших модов к значениям основной резонансной частоты 8 Гц. Для этого необходимо центрированные частоты высших модов умножить на $\sqrt{\frac{2}{n(n+1)}}$, где

n – номер резонансного мода. В результате такой редукции частоты 14, 20 и 26 Гц снижаются до 8 Гц. Взвешенные частоты следует усреднить по ансамблю резонансных модов и получить СВвЧ, что снижает взаимно независимые флуктуации отдельных записей и подчеркивает согласованные изменения резонансных частот, вызванные резкими модификациями глобальной ионосферы. Таким образом, удастся выделить резкие изменения резонансных частот во время ВИБ. В работе [1] с помощью модели колена были получены калибровочные зависимости отклонений СВвЧ от модификации магнитной характеристической высоты ионосферы, что позволило оценить вертикальное смещение профиля проводимости.

Для получения связи резонансных частот с интенсивностью ВИБ используем дисперсионные соотношения $\nu(f)$, отвечающие профилям проводимости дневной атмосферы, показанным на рис. 1. Резонансные частоты удовлетворяют дисперсионному уравнению $\text{Re}[\nu(f)] = n$. Для каждого из профилей мы

рассчитали зависимости $\text{Re}[v(f)]$, аналогичные графикам рис. 2, б. Из этих зависимостей для каждого из возмущений $B \in [0; 10]$ по методу наименьших квадратов были получены следующие выражения для резонансных частот $f^{(B)}$ как функций номера мода n :

$$f^{(0)} = 6,18123 n + 1,55171,$$

$$f^{(1)} = 6,24805 n + 1,55525,$$

$$f^{(2)} = 6,32214 n + 1,57012,$$

$$f^{(3)} = 6,38577 n + 1,60423,$$

$$f^{(4)} = 6,43738 n + 1,64324,$$

$$f^{(5)} = 6,47914 n + 1,67997,$$

$$f^{(6)} = 6,51183 n + 1,71411,$$

$$f^{(7)} = 6,53672 n + 1,74501,$$

$$f^{(8)} = 6,55625 n + 1,77104,$$

$$f^{(9)} = 6,57259 n + 1,79189,$$

$$f^{(10)} = 6,58674 n + 1,80885.$$

Из этих соотношений, варьируя n , легко получить резонансные частоты различных модов шумановского резонанса при различной интенсивности ВИБ. Получив резонансные частоты f_n первых трех модов для возмущений различной интенсивности, рассчитаем взвешенные частоты второго и третьего мода, $F_n = \sqrt{\frac{2f_n}{n(n+1)}}$, $n = 1, 2$, и найдем средневзвешенную частоту $\langle F(B) \rangle$ для ВИБ различной интенсивности.

Построив зависимость $\langle F(B) \rangle$ и линеаризовав ее, получим следующие соотношения:

$$\langle F(B) \rangle = 8,04 + 0,0643 B \quad (2)$$

для средневзвешенной частоты и

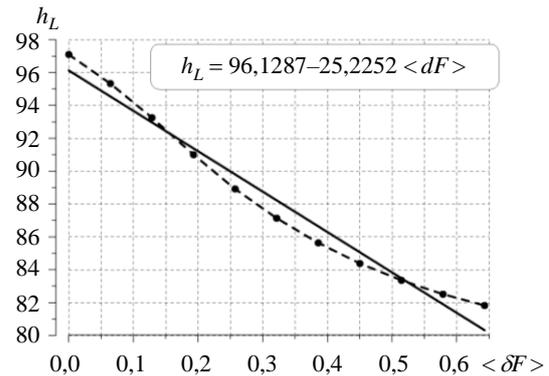
$$\langle \delta F(B) \rangle = 0,0643 B \quad (3)$$

для ее изменения, вызванного модификацией ионосферы во время ВИБ.

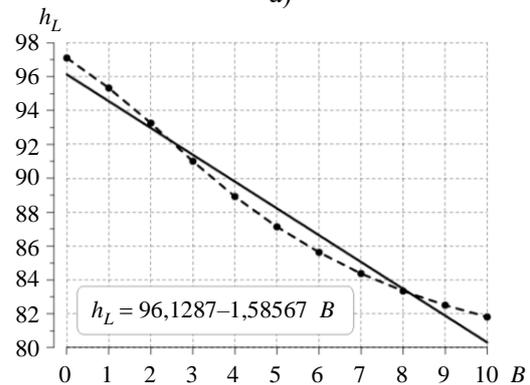
Имеет место и обратная зависимость

$$B = 15,01 \langle \delta F(B) \rangle, \quad (4)$$

полезная при оценке интенсивности возмущения по наблюдаемому изменению СВВЧ. Из формулы (4) следует, что увеличение средневзвешенной частоты на 0,2 Гц свидетельствует о ВИБ интенсивностью в 3 балла (см. соответствующий профиль на рис. 1).



а)



б)

Рис. 3. Калибровочные кривые для изменений средневзвешенной частоты, связанных с возмущениями проводимости средней атмосферы во время ВИБ

Аналогичное рассмотрение можно провести, связав вариации СВВЧ с изменениями магнитной характеристической высоты h_L профиля проводимости (изменения электрической характеристической высоты h_C в используемой модели оказываются пренебрежимо малыми). В этом случае получим данные, показанные на рис. 3 и приведенные в колонках 8, 9 табл. 2 Приложения.

По оси абсцисс на нижней панели рис. 3 отложена интенсивность ВИБ в баллах, а по оси абсцисс верхней панели показаны отклонения средневзвешенной частоты во время возмущения. Вдоль ординат на обеих панелях рис. 3 отложена расчетная характеристическая магнитная высота ионосферы h_L , усредненная по первым трем модам шумановского резонанса. Расчетная зависимость изображается на обеих панелях точками, соединенными штриховой линией, а прямые линии показывают результаты линейной интерполяции данных. Здесь же приведены соответствующие формулы:

$$h_L = 94,298 - 24,662 \langle \delta F \rangle \quad (6)$$

и

$$h_L = 94,298 - 1,49 B, \quad (7)$$

связывающие характеристическую магнитную высоту h_L с изменениями СВЧ $\langle \delta F \rangle$ и интенсивностью ВИБ B . Из соотношения (6) следует, что увеличение средневзвешенной частоты $\langle \delta F \rangle$ на 0,1 Гц связано со снижением магнитной высоты ионосферы $\langle \delta h_L \rangle$ на 2,5 км.

3. Расчетные спектры шумановского резонанса при равномерном распределении источников. Приведенные выше оценки были получены из дисперсионного соотношения $\text{Re}[v(f)] = n$. Поскольку реальные наблюдения используют энергетические спектры шумановского резонанса, желательно получить калибровочные зависимости, основанные на модельных спектрах резонансных колебаний, а не на дисперсионном соотношении.

Энергетические спектры вертикальной электрической компоненты поля можно вычислить с помощью характерных высот ионосферы и постоянной распространения СНЧ-радиоволн. Для этого используем численное решение задачи с помощью двумерного телеграфного

уравнения. Конкретный алгоритм описан в работах [7–9], там же приведены подробные ссылки на литературу по использованию двумерного телеграфного уравнения в задаче о шумановском резонансе.

Основная сложность, встречающаяся при моделировании в неоднородном резонаторе, связана с необходимостью оценить изменения наблюдаемых пиковых частот за счет возмущений в ионосфере над дневным полушарием, тогда как пространственное распределение гроз (источников поля) остается произвольным. При этом желательно, чтобы суточные вариации пиковых частот, связанные с перемещением мировых гроз по поверхности Земли в течение дня, оказались компенсированными. В этом случае можно получить «среднюю» калибровочную зависимость, которая свяжет модификации профиля проводимости с резкими изменениями пиковых частот шумановского резонанса. Чтобы устранить из рассмотрения расстояние между наблюдателем и источником, предположим, что грозовая активность равномерно распределена по поверхности Земли. Соответствующие энергетические спектры вертикального электрического поля показаны на рис. 4.

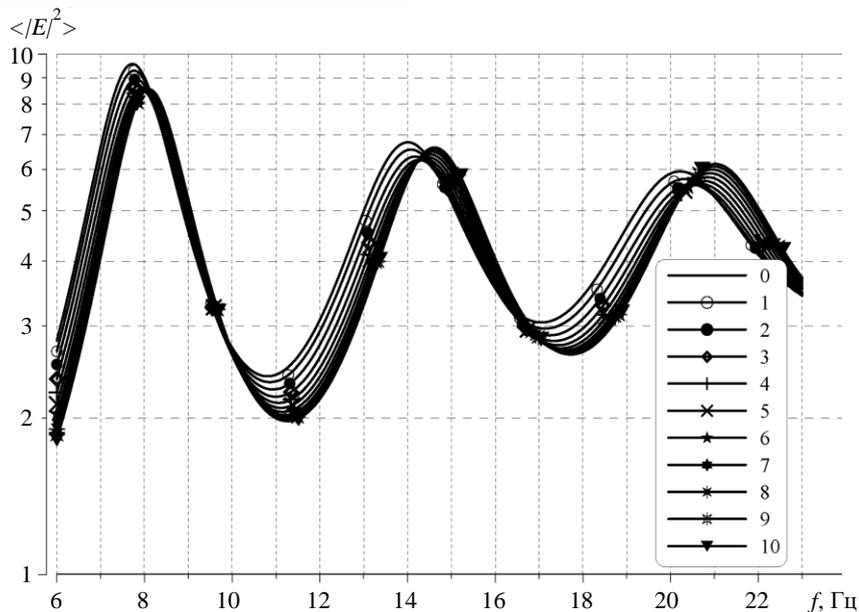


Рис. 4. Изменения энергетического спектра вертикального электрического поля во время ВИБ, связанные с модификациями нижней ионосферы различной интенсивности (B от 0 до 10 баллов)

В резонаторе с неоднородностью день–ночь даже при равномерном распределении

источников возникает дополнительная проблема: возможное влияние положения наблю-

дателя относительно терминатора на результаты наблюдений. Мы выполнили три серии расчетов энергетических спектров, когда наблюдатель располагается в центре дневного полушария, в центре ночного полушария или же на границе день–ночь. Использовалась модель плавного перехода день–ночь [5, 8]. Оказалось, что перемещение наблюдателя при прочих равных условиях приводит преимущественно к вертикальному смещению энергетического спектра над осью частот, тогда как сами пиковые частоты не изменяются. Поскольку нас интересуют именно пиковые частоты, положение наблюдателя оказывается несущественным, и для расчетов, показанных на рис. 4, он размещался на границе света и тени, т. е. на солнечном терминаторе.

По оси абсцисс отложена частота радиосигнала в герцах, а вдоль оси ординат в относительных единицах показана спектральная интенсивность вертикальной компоненты электрического поля. Рисунок содержит графики, отвечающие профилям проводимости рис. 1, поэтому маркировка кривых на этих рисунках идентична.

Из графиков рис. 4 следует, что резонансные частоты лежат вблизи 8, 14 и 20 Гц. Изменения профиля проводимости приводят к сложным изменениям формы резонансных спектров, когда одновременно изменяются высота, положение и ширина резонансного пика. Для нас важно, что при увеличении интенсивности внезапного ионосферного возмущения B от 0 до 10 баллов, обусловленного ростом интенсивности солнечного ионизирующего излучения, пиковые частоты всех резонансных мод монотонно возрастают.

Такие изменения физически связаны с увеличением скорости нарастания проводимости атмосферы с высотой, что увеличивает отражательную способность и снижает потери энергии электромагнитных колебаний. В силу этого обстоятельства спектральные максимумы становятся более узкими, а пиковые частоты растут, смещаясь в сторону значений идеального резонатора. Очень наглядно эта тенденция видна в динамических спектрах шумановского резонанса, показанных на рис. 5 над плоскостью «частота – интенсивность модификации ионосферы». На этом рисунке вдоль горизонтальной оси отложена частота радиосигнала в герцах, а по

вертикальной – интенсивность возмущения профиля проводимости B в баллах от 0 (резонатор с регулярной ионосферой) до 10 (ВИВ максимальной интенсивности). Спектральная плотность колебаний $\langle |E|^2 \rangle$ показана над этой плоскостью с помощью затемнения разной интенсивности. Показаны три распределения спектральной плотности, содержащие три пика шумановского резонанса, рассчитанные для равномерного пространственного распределения источников поля в неоднородном резонаторе. Верхняя карта получена для наблюдателя, расположенного в центре дневного полушария, а нижняя – для наблюдателя в центре ночного. Между ними показаны расчетные данные для наблюдателя на линии солнечного терминатора. Видно, что распределения поля имеют много общего, хотя в деталях имеются отличия.

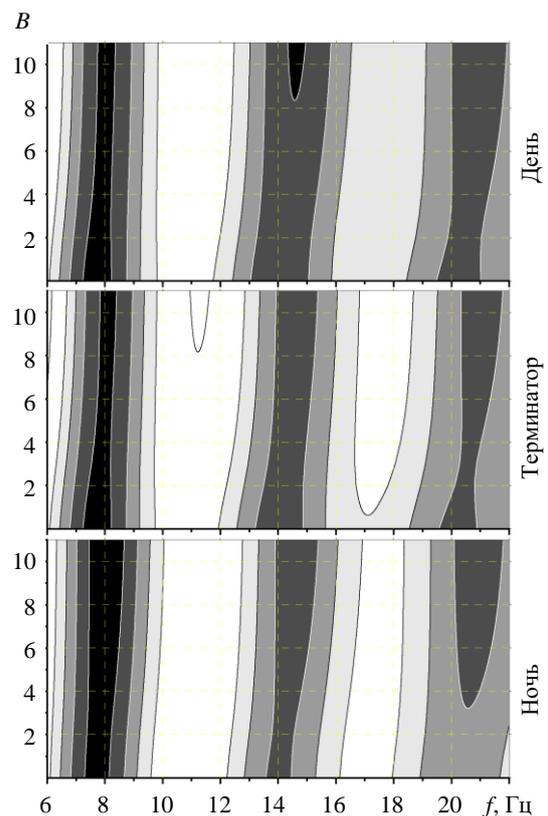


Рис. 5. Динамические спектры интенсивности шумановского резонанса, полученные при равномерном распределении источников по поверхности Земли

Важно, что положение спектральных пиков над осью частот вблизи 8, 14 и 20 Гц при фиксированной интенсивности возмущения B не зависит от расположения наблюдателя. Могут измениться взаимные высоты резонансных

пиков, но не их положение над осью частот. Это свойство, с одной стороны, указывает на то, что смещение наблюдаемых пиков под воздействием внезапного ионосферного возмущения действительно происходит благодаря изменению среднего по планете профиля проводимости, а с другой – позволяет использовать одинаковую калибровочную кривую «интенсивность возмущения – пиковая частота» для любых положений наблюдателя относительно неоднородности день–ночь.

Как показывает рис. 5, при возрастании интенсивности ВИБ наблюдается монотонное увеличение пиковых частот шумановского резонанса. По расчетным энергетическим спектрам можно построить зависимости взвешенных пиковых частот от интенсивности возмущения B для всех трех модов шумановского резонанса. Они показаны на рис. 6 с помощью точек, ромбов и звездочек, соединенных штриховыми линиями (для первого, второго и третьего резонансных модов соответственно). Их усреднение дает средневзвешенную зависимость, обозначенную на рис. 6 четырехконечными звездами,

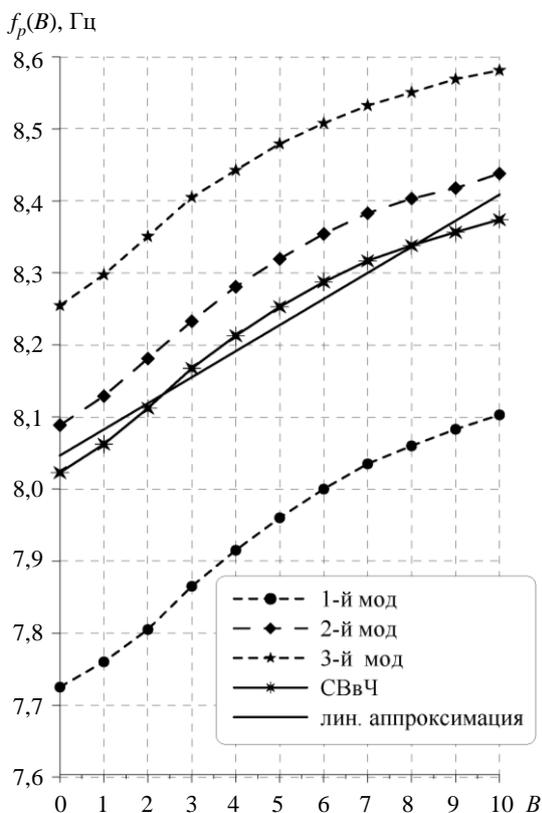


Рис. 6. Калибровочная кривая для определения интенсивности ВИБ по средней приведенной частоте

соединенными сплошной линией. Прямая линия показывает линейную аппроксимацию СВЧ по методу наименьших квадратов $f_p(B) = 8,05 + 0,04 B$. Ее можно использовать как калибровочную зависимость при обработке результатов наблюдений.

4. Связь средневзвешенной пиковой частоты с интенсивностью ВИБ и магнитной высотой профиля проводимости. Мы получили калибровочную прямую для обработки экспериментальных данных вида $f_p(B) = 8,05 + 0,04 B$. Ей отвечает обратная зависимость вида: $B = 26,76 \delta f_p$. Согласно калибровке, полученной для энергетических спектров поля в резонаторе с неоднородностью день–ночь, возрастание средневзвешенной резонансной частоты на 0,1 Гц вызывается изменением интенсивности ВИБ на 2,5 балла. Как и ожидалось, эта величина указывает на вдвое меньшую чувствительность частот шумановского резонанса к возмущениям в дневном полушарии по сравнению с модификациями всей ионосферы: 2,5 против 1,5 балла.

В табл. 3 Приложения собраны результаты моделирования, полученные при обработке энергетических спектров шумановского резонанса в неоднородном резонаторе Земля–ионосферы во время внезапных ионосферных возмущений различной интенсивности B при однородном распределении гроз в пространстве и наблюдателе, расположенном на линии солнечного терминатора.

При моделировании была получена зависимость магнитной высоты профиля проводимости от интенсивности внезапного ионосферного возмущения B , которую удается аппроксимировать следующей линейной функцией:

$$\langle h_L \rangle = 96,449 - 1,586 B. \quad (8)$$

Здесь магнитная высота дневной ионосферы $\langle h_L \rangle$ измеряется в километрах, а интенсивность возмущения B – в баллах.

По данным табл. 3 можно построить график изменений магнитной высоты δh_L на освещенной стороне планеты под воздействием ВИБ как функцию отклонений средневзвешенной частоты δf_p от невозмущенных значений (см. рис. 7). Здесь по горизонтальной оси отложены отклонения СВЧ, пред-

ставленные в восьмом столбце табл. 3, а по вертикальной оси – изменения магнитной высоты профиля проводимости из десятого столбца этой же таблицы. Расчетные данные показаны на графике звездочками, соединенными штриховыми линиями. С помощью метода наименьших квадратов легко получить следующую линейную аппроксимацию:

$$\langle \delta h_L \rangle = -43,16 \delta f_p + 0,084, \quad (9)$$

изображенную прямой линией на рис. 7.

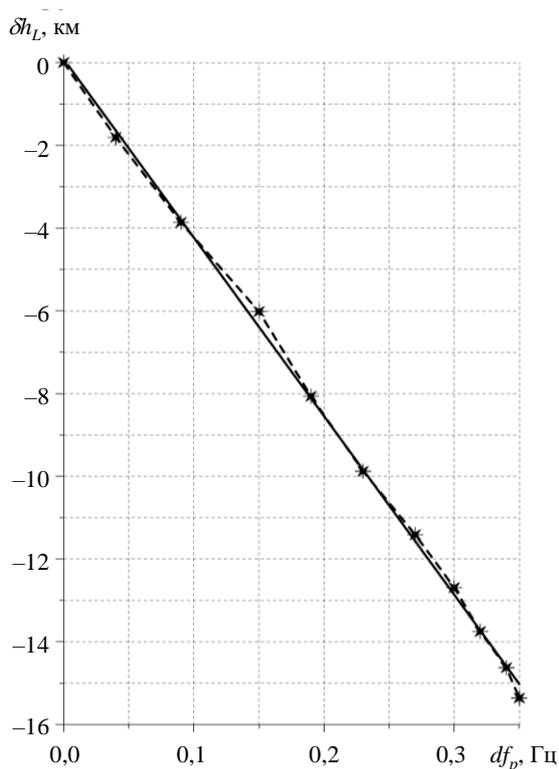


Рис. 7. Изменения магнитной высоты δh_L и средневзвешенной частоты при ВИБ различной интенсивности

Линейная зависимость (9) удобна, если надо оценить, каким образом рентгеновская вспышка на Солнце действует на характеристическую магнитную высоту профиля проводимости средней атмосферы. Видно, что резкое возрастание средневзвешенной частоты во время ВИБ на 0,1 Гц свидетельствует о столь же резком снижении профиля проводимости в окрестности магнитной высоты ионосферы на 4,3 км. Уместно отметить, что, как и ожидалось, этот результат указывает на почти двукратное увеличение в снижении ионосферы под воздействием солнечного рентгеновского излучения по сравнению с

величиной 2,2 км, полученной в [1] в рамках модели колена.

Выводы. С помощью реалистичного профиля проводимости средней атмосферы была построена модель модификации нижней ионосферы во время солнечных вспышек, в которой ионизирующее излучение Солнца увеличивает проводимость на высотах 55 км и более. В зависимости от плотности потока рентгеновского излучения изменяется интенсивность внезапного ионосферного возмущения, изменяющаяся от 0 (отсутствие возмущения) до 10 баллов (максимальное возмущение).

С помощью метода полного поля и двумерного телеграфного уравнения оценены изменения характеристических высот ионосферы, резонансных частот полости Земля–ионосфера и энергетических спектров шумановского резонанса в вертикальном электрическом поле. Расчеты выполнены для ВИБ различной интенсивности. Это позволило связать интенсивность ВИБ с магнитной высотой профиля проводимости, а также с пиковыми частотами различных резонансных модов.

Моделирование позволило обнаружить линейные калибровочные зависимости, приспособленные к обработке результатов наблюдений. Одна из них связывает возрастание средневзвешенной частоты шумановского резонанса с интенсивностью внезапного ионосферного возмущения, а вторая – с величиной снижения магнитной высоты. Показано, что возрастание средневзвешенной частоты на 0,1 Гц связано с изменением интенсивности ВИБ на 2,5 балла, оно же свидетельствует о снижении профиля проводимости средней атмосферы в окрестности магнитной характеристической высоты на 4,3 км.

Библиографический список

1. Швец А. В., Николаенко А. П., Чебров В. Н. Влияние солнечных вспышек на частоты шумановского резонанса. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2017. Т. 60, № 3. С. 208–222.
2. Kudintseva I. G., Nickolaenko A. P., Rycroft M. J. and Odzimek A. AC and DC global electric circuit properties and the height profile of atmospheric conductivity. *Ann. Geophys.* 2016. Vol. 59, N 5. A0545 (15 p.). DOI:10.4401/ag-6870
3. Nickolaenko A. P., Galuk Yu. P. and Hayakawa M. Vertical profile of atmospheric conductivity that

- matches Schumann resonance observations. *Springer-Plus*. 2016. Vol. 5, N 108. 12 p. DOI: 10.1186/s40064-016-1742-3
4. Николаенко А. П., Галюк Ю. П., Хайакава М. Вертикальный профиль проводимости атмосферы, отвечающий параметрам шумановского резонанса. *Радиофизика и электроника*. 2015. Т. 6 (20), № 3. С. 30–37. DOI: <https://doi.org/10.15407/rej2015.03.030>
 5. Galuk Yu. P., Nickolaenko A. P., Hayakawa M. Amplitude variations of ELF radio waves in the Earth–ionosphere cavity with the day–night non-uniformity. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2017. Vol. 169. P. 23–36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.01.001>
 6. Ishaq M. and Jones D. Ll. Method of obtaining radiowave propagation parameters for the Earth–ionosphere duct at ELF. *Electron. Lett.* 1977. Vol. 13, Iss. 2. С. 254–255.
 7. Галюк Ю. П., Николаенко А. П., Хайакава М. Сравнение точного и приближенного решения задачи о шумановском резонансе для профиля проводимости с «коленом». *Радиофизика и электроника*. 2015. Т. 6 (20), № 2. С. 40–47. DOI: <https://doi.org/10.15407/rej2015.02.040>
 8. Николаенко А. П., Галюк Ю. П., Хайакава М. Смещение антиподного максимума электрического поля в резонаторе Земля–ионосфера за счет неоднородности день–ночь. *Радиофизика и электроника*. 2017. Т. 22, № 2. С. 29–40. DOI: <https://doi.org/10.15407/rej2017.02.028>
 9. Гюннинен Э. М., Галюк Ю. П. Поле вертикального электрического диполя над сферической землей с неоднородной по высоте ионосферой. *Пробл. диффр. и распр. радиоволн*. 1972. Вып. 11. С. 109–120.
 10. Блюх П. В., Николаенко А. П. Глобальные электромагнитные резонансы. *Природа*. 1986. № 4. С. 3–15.
 11. Nickolaenko A. P. and Hayakawa M. *Resonances in the Earth-ionosphere Cavity*. Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 2002. 380 p.
 12. Nickolaenko A. and Hayakawa M. *Schumann Resonance for Tyros (Essentials of Global Electromagnetic Resonance in the Earth–Ionosphere Cavity)*. Tokyo: Springer, 2014. 348 p. Series XI, Springer Geophysics.
 13. Tanaka Y. T., Hayakawa M., Hobara Y., Nickolaenko A. P., Yamashita K., Sato M., Takahashi Y., Terasawa T., and Takahashi T. Detection of transient ELF emission caused by the extremely intense cosmic gamma-ray flare of 27 December 2004. *Geophys. Res. Lett.* 2011. Vol. 38, Iss. 8. P. L08805(4 p.). DOI: [10.1029/2011GL047008](https://doi.org/10.1029/2011GL047008)
 14. Nickolaenko A. P., Kudintseva I. G., Pechony O., Hayakawa M., Hobara Y. and Tanaka Y. T. The effect of a gamma ray flare on Schumann resonances. *Ann. Geophys.* 2012. Vol. 30. P. 1321–1329. DOI: [10.5194/angeo-30-1321-2012](https://doi.org/10.5194/angeo-30-1321-2012)
 15. Николаенко А. П., Кудинцева И. Г., Печеная О., Хайакава М., Накамура Т., Хобара Я., Танака Я. Влияние гамма-всплеска на шумановский резонанс. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2010. Т. 53, № 9–10. С. 605–620. DOI: [10.1007/311141-011-9249-9](https://doi.org/10.1007/311141-011-9249-9)
 1. Shvets, A. V., Nickolaenko, A. P., Chebrov, V. N., 2017. Effect of solar flares on the Schumann resonance frequencies. *Radiophys. Quant. El.*, **60**(3), pp. 186–199. <https://doi.org/10.1007/s11141-017-9789-8>, Springer US
 2. Kudintseva, I. G., Nickolaenko, A. P., Rycroft, M. J. and Odzimek, A., 2016. AC and DC global electric circuit properties and the height profile of atmospheric conductivity. *Ann. Geophys.*, **59**(5), pp. A0545 (15 p.). DOI: [10.4401/ag-6870](https://doi.org/10.4401/ag-6870)
 3. Nickolaenko, A. P., Galuk, Yu. P. and Hayakawa, M., 2016. Vertical profile of atmospheric conductivity that matches Schumann resonance observations. *Springer-Plus*, **5**(108), 12 p. DOI: [10.1186/s40064-016-1742-3](https://doi.org/10.1186/s40064-016-1742-3)
 4. Nickolaenko, A. P., Galuk, Yu. P., Hayakawa, M., 2015. Vertical profile of atmospheric conductivity corresponding to Schumann resonance parameters. *Radiofiz. Elektron.*, **6**(20)(3), pp. 30–37 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.15407/rej2015.03.030>
 5. Galuk, Yu. P., Nickolaenko, A. P., Hayakawa, M., 2017. Amplitude variations of ELF radio waves in the Earth–ionosphere cavity with the day–night non-uniformity. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **169**, pp. 23–36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.01.001>
 6. Ishaq, M. and Jones, D. Ll., 1977. Method of obtaining radiowave propagation parameters for the Earth–ionosphere duct at ELF. *Electron. Lett.*, **13**(2), pp. 254–255.
 7. Galuk, Yu. P., Nickolaenko, A. P. and Hayakawa, M., 2015. Comparison of exact and approximate solutions of the Schumann resonance problem for the knee conductivity profile. *Radiofiz. Elektron.*, **6**(20)(2), pp. 40–47 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.15407/rej2015.02.040>
 8. Nikolaenko, A. P., Galyuk, Yu. P. and Hayakawa, M., 2017. Shift of antipode maximum of electric field in the Earth–ionosphere cavity caused by day–night non-uniformity. *Radiofiz. Elektron.*, **22**(2), pp. 29–40 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.15407/rej2017.02.028>
 9. Hynninen, E. M., Galuk, Y. P., 1972. Field of vertical dipole over the spherical Earth with non-uniform along height ionosphere. *Problems of diffraction and radio wave propagation*, **11**, pp. 109–120. Leningrad: Leningrad State University Publ. (in Russian).
 10. Bliokh, P. V. and Nickolaenko, A. P., 1986. Global electromagnetic resonances. *Природа (Nature)*, **4**, pp. 3–15 (in Russian).
 11. Nickolaenko, A. P. and Hayakawa, M. 2002. *Resonances in the Earth-ionosphere Cavity*. Dordrecht: Kluwer Academic Publ.
 12. Nickolaenko, A. and Hayakawa, M., 2014. *Schumann Resonance for Tyros (Essentials of Global Electromagnetic Resonance in the Earth–Ionosphere Cavity)*. Tokyo: Springer, 348 p. Series XI, Springer Geophysics.
 13. Tanaka, Y. T., Hayakawa, M., Hobara, Y., Nickolaenko, A. P., Yamashita, K., Sato, M., Takahashi, Y., Terasawa, T., and Takahashi, T., 2011. Detection of transient ELF emission caused by the extremely intense cosmic gamma-ray flare of 27 December 2004. *Geophys. Res. Lett.*, **38**(8), pp. L08805(4 p.). DOI: [10.1029/2011GL047008](https://doi.org/10.1029/2011GL047008)
 14. Nickolaenko, A. P., Kudintseva, I. G., Pechony, O., Hayakawa, M., Hobara, Y. and Tanaka, Y. T., 2012. The effect of a gamma ray flare on Schumann resonances. *Ann. Geophys.*, **30**, pp. 1321–1329. DOI: [10.5194/angeo-30-1321-2012](https://doi.org/10.5194/angeo-30-1321-2012)
 15. Nickolaenko, A. P., Kudintseva, I. G., Pechonaya, O., Hayakawa, M., Nakamura, T., Hobara, Y., Tanaka, Y., 2010. Impact of a gamma-ray burst on the Schumann

REFERENCES

resonance. *Radiophys. Quant. El.*, **53**(9–10), pp. 542–556. DOI:10.1007/s 11141-011-9249-9

weighted average frequency of Schumann resonance, calibration curve.

Рукопись поступила 26.12.2017.

I. G. Kudintseva, Yu. P. Galyuk,
A. P. Nikolaenko, M. Hayakawa

MODIFICATIONS OF THE MIDDLE
ATMOSPHERE CONDUCTIVITY DURING
SUDDEN IONOSPHERE DISTURBANCES
AND VARIATIONS OF SCHUMANN
RESONANCE FREQUENCIES

The investigation of the effect of space weather on different layers of the terrestrial atmosphere has been and remains a relevant problem of remote sensing of the environment. We describe a technique for detecting modifications of the peak frequencies of the Schumann resonance during the sudden ionospheric disturbances (SID) caused by the solar X-ray flares. The SID is associated with a sharp lowering of the ionosphere over sunlit hemisphere during the chromospheric flare. Lowering of the daytime ionosphere reduces the average height of Earth-ionosphere cavity and leads to an increase in Schumann resonance frequencies. The model of the conductivity profile of the middle atmosphere and its modification is used. The resonance frequencies of the Earth-ionosphere cavity and the characteristic heights of the conductivity profile are calculated by the full wave method for the ionospheric disturbances of different intensity. The power spectra of the vertical electric field are computed using the 2D telegraph equations for the uniform spatial distribution of thunderstorms in the resonator with the day-night non-uniformity at several positions of the observer relative to the solar terminator. The changes in the peak frequencies are obtained depending on the intensity of the ionospheric disturbance. The weighted average frequency of the Schumann resonance is calculated for the first three modes, and, using the least squares method, the parameters of linear dependence of this frequency on the intensity of the SID and/or on the changes of magnetic characteristic height of the conductivity profile are established. The data are suggested to be used as a calibration curve for interpretation of the observational results and estimation of the modification in the lower ionosphere from the Schumann resonance frequencies.

Key words: Schumann resonance, conductivity profile of the middle atmosphere, sudden ionospheric disturbances,

И. Г. Кудинцева, Ю. П. Галюк,
О. П. Николаенко, М. Хайакава

МОДИФІКАЦІЇ ПРОВІДНОСТІ
СЕРЕДНЬОЇ АТМОСФЕРИ
ПІД ЧАС РАПТОВИХ ІОНОСФЕРНИХ
ЗБУРЕНЬ ТА ЗМІНИ ПІКОВИХ ЧАСТОТ
ШУМАНІВСЬКОГО РЕЗОНАНСУ

Дослідження впливу космічної погоди на різні шари атмосфери було та залишається однією з актуальних тем дистанційного зондування навколишнього середовища. У роботі викладено методику виявлення модифікації пікових частот шуманівського резонансу під час раптових іоносферних збурень (РІЗ), що викликані рентгенівськими спалахами на Сонці. РІЗ спостерігаються як різке зниження іоносфери над денною півкулею Землі під час хромосферного спалаху. Зниження денної іоносфери зменшує середню висоту проміжку Земля–іоносфера та призводить до зростання резонансних частот. У роботі використовується реалістичний профіль провідності середньої атмосфери та його модифікації. Методом повного поля обчислюються резонансні частоти порожнини Земля–іоносфера та характеристичні магнітні висоти профілю провідності залежно від інтенсивності іоносферного збурення. Енергетичні спектри вертикального електричного поля розраховані за допомогою двовимірних телеграфних рівнянь для рівномірного розподілу гроз у просторі в резонаторі з неоднорідністю день/ніч для декількох положень спостерігача відносно сонячного термінатора. Отримано зміни пікових частот залежно від інтенсивності іоносферного збурення. Для перших трьох модів обчислено середньозважену частоту шуманівського резонансу, та за методом найменших квадратів знайдено параметри лінійної залежності цієї частоти від інтенсивності РІЗ або від змін магнітної характеристичної висоти профілю провідності. Ці дані можна використовувати як калібрувальні криві для інтерпретації спостережень та оцінки модифікації нижньої іоносфери, що витікає із записів шуманівського резонансу.

Ключові слова: шуманівський резонанс, профіль провідності середньої атмосфери, раптові іоносферні збурення, середньозважена частота шуманівського резонансу, калібрувальні криві.

Приложение

Таблица 1

Логарифм проводимости воздуха [См/м] как функция высоты над поверхностью Земли

z, км	День	Максимум ВИВ	z, км	День	Максимум ВИВ	z, км	День	Максимум ВИВ
0	-14,12	-11,48	37	-10,16	-9,01	74	-6,25	-5,14
1	-13,97	-11,40	38	-10,09	-8,86	75	-6,12	-5,00
2	-13,82	-11,32	39	-9,97	-8,75	76	-6,02	-4,66
3	-13,67	-11,24	40	-9,92	-8,57	77	-5,93	-4,33
4	-13,40	-11,17	41	-9,84	-8,45	78	-5,83	-4,00
5	-13,17	-11,10	42	-9,75	-8,24	79	-5,76	-3,50
6	-12,99	-11,03	43	-9,69	-8,10	80	-5,66	-3,00
7	-12,84	-10,96	44	-9,63	-7,87	81	-5,58	-2,66
8	-12,71	-10,89	45	-9,59	-7,73	82	-5,49	-2,33
9	-12,58	-10,82	46	-9,56	-7,50	83	-5,41	-2,00
10	-12,46	-10,74	47	-9,53	-7,35	84	-5,29	-1,75
11	-12,35	-10,65	48	-9,51	-7,17	85	-5,19	-1,50
12	-12,24	-10,58	49	-9,48	-7,02	86	-5,05	-1,25
13	-12,13	-10,51	50	-9,46	-6,90	87	-4,94	-1,00
14	-12,03	-10,44	51	-9,44	-6,83	88	-4,77	-0,74
15	-11,93	-10,35	52	-9,40	-6,80	89	-4,64	-0,54
16	-11,84	-10,24	53	-9,38	-6,78	90	-4,43	-0,34
17	-11,74	-10,16	54	-9,29	-6,76	91	-4,29	-0,17
18	-11,65	-10,09	55	-9,22	-6,74	92	-4,04	-0,04
19	-11,57	-9,97	56	-9,10	-9,00	93	-3,89	0,10
20	-11,48	-9,92	57	-9,01	-8,75	94	-3,58	0,25
21	-11,40	-9,84	58	-8,86	-8,50	95	-3,40	0,35
22	-11,32	-9,75	59	-8,75	-8,25	96	-3,01	0,5
23	-11,24	-9,69	60	-8,57	-8,00	97	-2,81	0,56
24	-11,17	-9,63	61	-8,45	-7,75	98	-2,61	0,75
25	-11,10	-9,59	62	-8,24	-7,50	99	-2,41	0,88
26	-11,03	-9,56	63	-8,10	-7,25	100	-2,21	1,0
27	-10,96	-9,53	64	-7,87	-7,00	101	-2,00	1,06
28	-10,89	-9,51	65	-7,73	-6,75	102	-1,87	1,16
29	-10,82	-9,48	66	-7,50	-6,50	103	-1,72	1,25
30	-10,74	-9,46	67	-7,35	-6,25	104	-1,48	1,36
31	-10,65	-9,44	68	-7,17	-6,00	105	-1,29	1,43
32	-10,58	-9,40	69	-7,02	-5,85	106	-1,13	1,5
33	-10,51	-9,38	70	-6,85	-5,70	107	-0,96	1,59
34	-10,44	-9,29	71	-6,72	-5,56	108	-0,81	1,65
35	-10,35	-9,22	72	-6,55	-5,42	109	-0,67	1,74
36	-10,24	-9,10	73	-6,37	-5,28	110	-0,54	1,8

Таблица 2

Резонансные частоты и магнитная высота h_L для ВИВ различной интенсивности B

B	Частота f_1	Частота f_2	Частота f_3	Взвешенная частота F_2	Взвешенная частота F_3	СВЧ $\langle F(B) \rangle$	Магнитная высота h_L , км	$\langle \delta F \rangle$, Гц
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	7,733	13,914	20,095	8,033	8,204	7,990	97,104	0
1	7,803	14,051	20,299	8,113	8,287	8,068	95,328	0,064
2	7,892	14,214	20,537	8,207	8,384	8,161	93,256	0,129
3	7,99	14,376	20,762	8,30	8,476	8,255	91,004	0,193
4	8,077	14,518	20,955	8,382	8,555	8,338	88,917	0,257
5	8,159	14,638	21,117	8,451	8,621	8,411	87,136	0,321
6	8,226	14,738	21,250	8,509	8,675	8,470	85,633	0,386
7	8,282	14,818	21,355	8,555	8,718	8,518	84,377	0,450
8	8,327	14,884	21,440	8,593	8,753	8,558	83,347	0,514
9	8,364	14,937	21,510	8,624	8,781	8,590	82,509	0,579
10	8,396	14,982	21,569	8,650	8,806	8,617	81,817	0,643

В первом столбце указана интенсивность возмущения в баллах. В следующих трех столбцах приведены резонансные частоты f_n первых трех модов в герцах. Пятый и шестой столбцы содержат взвешенные частоты второго и третьего мода $F_n = \sqrt{\frac{2f_n}{n(n+1)}}$. Последний столбец указывает изменения средневзвешенной частоты, полученные для ВИБ различной интенсивности.

Таблица 3
Пиковые частоты энергетических спектров и характеристические частоты дневной ионосферы в неоднородном резонаторе для ВИБ различной интенсивности B

B	Пиковая частота, Гц			Взвешенная частота, Гц		СВВЧ, Гц		Магнитная высота h_L , км			Средняя магнитная высота, км,	Возмущение магнитной высоты, км,
	f_1	f_2	f_3	F_2	F_3	f_p	δf_p	1 мод	2 мод	3 мод	$\langle h_L \rangle$ день	$\langle \delta h_L \rangle$ день
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	7,73	14,01	20,22	8,09	8,25	8,02	0	99,595	96,845	95,707	97,382	0
1	7,76	14,08	20,33	8,13	8,30	8,06	0,04	97,979	95,035	93,705	95,573	-1,809
2	7,81	14,17	20,46	8,18	8,35	8,11	0,09	96,227	92,918	91,411	93,518	-3,864
3	7,87	14,26	20,59	8,23	8,41	8,17	0,15	94,248	90,656	89,184	91,363	-6,019
4	7,92	14,34	20,68	8,28	8,44	8,21	0,19	92,084	88,600	87,263	89,315	-8,067
5	7,96	14,41	20,77	8,32	8,48	8,25	0,23	90,005	86,850	85,655	87,503	-9,879
6	8,00	14,47	20,84	8,35	8,51	8,29	0,27	88,210	85,378	84,325	85,971	-11,411
7	8,04	14,52	20,9	8,38	8,53	8,32	0,30	86,680	84,154	83,244	84,693	-12,689
8	8,06	14,56	20,95	8,40	8,55	8,34	0,32	85,370	83,155	82,372	83,632	-13,75
9	8,08	14,58	20,99	8,42	8,57	8,36	0,34	84,262	82,343	81,656	82,753	-14,629
10	8,10	14,62	21,02	8,44	8,58	8,37	0,35	83,345	81,670	81,051	82,022	-15,36

В таблице собраны данные, полученные из энергетических спектров шумановского резонанса в резонаторе с неоднородностью во время ВИБ различной интенсивности B . Предполагалось однородное распределение гроз в пространстве. Наблюдатель располагался на линии солнечного терминатора.

Первый столбец содержит интенсивности внезапного ионосферного возмущения B . Затем приведены значения пиковых частот первого, второго и третьего модов. Здесь указаны пиковые частоты: координаты локального максимума энергетического спектра вертикального электрического поля. В пятом и шестом столбцах даны взвешенные пиковые частоты для $n = 2$ и $n = 3$. Далее расположена средневзвешенная частота: в столбце 7 указана $f_p = (f_1 + F_2 + F_3)/3$, в столбце 8 – ее изменения $\delta f_p(B)$.

Поскольку пиковые частоты шумановского резонанса отличаются друг от друга, соответствующие им магнитные высоты (столбцы с 9 по 11) тоже отличаются. Мы используем среднее значение $\langle h_L \rangle$, представленное в столбце 12. В столбце 13 указаны изменения средней магнитной высоты $\langle \delta h_L \rangle$ при увеличении интенсивности ВИБ. Изменения характеристической магнитной высоты близки к постулированной в модели модификации профиля, но не совпадают с ней. Так, например, ВИБ максимальной интенсивности в 10 баллов снижает дневной профиль проводимости спокойной ионосферы от 110 до 89 км ($\Delta = 21$ км). Соответствующее уменьшение магнитной высоты составляет $\langle \delta h_L \rangle = 15,36$ км и отсчитывается от 97,382 км, а не от 110 км.