

УДК 550.388.2+521.37

ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК НА ЧАСТОТЫ ШУМАНОВСКОГО РЕЗОНАНСА

А. В. Швец^{1}, А. П. Николаенко¹, В. Н. Чебров²*

¹ Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, г. Харьков, Украина

² Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия

Приведены результаты анализа реакции частот шумановского резонанса на солнечные вспышки рентгеновского излучения. Разработана методика, позволившая с помощью использования средне-взвешенной пиковой частоты выделить резкое изменение, которое присутствует во всех резонансных модах, но скрыто регулярными вариациями в сочетании со стохастическими флуктуациями. На основе сопоставления формы отклика и интенсивности вспышки проанализированы и определены параметры статистической связи изменений частоты и интенсивности рентгеновского излучения для модели нелинейной регрессии. Показано, что увеличение резонансной частоты в среднем пропорционально логарифму интенсивности рентгеновского излучения в степени 1,7. По величине изменения частоты резонатора рассчитаны соответствующие изменения характеристической «магнитной» высоты профиля проводимости нижней ионосферы и проведено сравнение с независимыми результатами анализа данных измерений сигналов радиостанций очень низкочастотного диапазона.

ВВЕДЕНИЕ

Земная ионосфера создаётся ионизирующим излучением Солнца, переменная солнечная активность изменяет ионосферную плазму и влияет на характеристики глобального электромагнитного (шумановского) резонанса полости Земля—ионосфера. Механизмы воздействия Солнца на ионосферу разнообразны и сложны, однако для нас важны лишь два фактора. Жёсткая электромагнитная радиация ионизирует воздух и создаёт на освещённой стороне Земли сравнительно плотную плазму. Радиационный фактор проявляется наиболее ярко во время солнечных вспышек, когда концентрация плазмы дневного полушария резко увеличивается на несколько часов, т. е. происходит внезапное ионосферное возмущение. Ионосфера существует и на ночной стороне планеты, где её нижняя часть поддерживается за счёт фонового ионизирующего излучения галактики.

Вспышка на Солнце приводит также к выбросу солнечной массы и повышению скорости солнечного ветра. Этот второй фактор снижает уровень галактического фона и ионизацию на ночной стороне Земли, что обнаруживается как ослабление или исчезновение слоя *C* ионосферы. Явление «выметания» солнечным ветром галактического фона из Солнечной системы называют форбуш-эффектом [1, 2]. Одна и та же солнечная вспышка может снизить нижнюю границу дневной ионосферы из-за возрастания потока жёстких квантов и одновременно приподнять нижнюю границу ночной ионосферы благодаря форбуш-эффекту.

Возмущения дневной ионосферы хорошо видны в записях амплитуды и фазы радиосигналов очень низкочастотного (ОНЧ) диапазона (10÷30 кГц), если трасса их распространения проходит по дневной полусфере. Сигналы на частотах глобального электромагнитного резонанса обладают рядом особенностей. Первая из них связана с тем, что в этом случае понятие дневной или ночной трассы распространения оказывается неуместным. Действительно, на первой резонансной частоте 8 Гц длина радиоволны равна окружности земного экватора $4 \cdot 10^4$ км, поэтому вся

* alexander_shvets@ukr.net

поверхность Земли оказывается внутри первой зоны Френеля при произвольном расположении источника и наблюдателя. Иными словами, «трасса» распространения заведомо охватывает всю планету, т. е. и её дневное, и ночное полушарие. При типичном расстоянии от наблюдателя до источника сигнала $5 \cdot 10^3$ км это происходит для первых (нижних) резонансных мод. Поэтому асимметрия день–ночь и её изменения слабо сказываются на параметрах сигналов, и только изменения параметров резонатора в среднем способны повлиять на шумановский резонанс [3–5].

Вторая особенность шумановского резонанса связана с двумя характерными высотами в вертикальном профиле проводимости атмосферы [6]. Пиковая частота n -го резонанса f_n определяется из соотношения [7, 8]

$$f_n = f_n^0 \sqrt{h_0/h_1}, \quad (1)$$

где $f_n^0 = c\sqrt{n(n+1)}/(2\pi R_E)$ — частота резонатора Земля–ионосфера, образованного идеально проводящими стенками (шумановская частота), c — скорость света, R_E — радиус Земли. Характерная высота h_0 называется электрической, на ней токи проводимости ионосферы становятся равными токам смещения, а электрическое поле выше h_0 быстро убывает ($h_0 = 50 \div 60$ км). Высота $h_1 > h_0$ называется магнитной, до этой высоты проникает магнитное поле радиоволны. Как правило, $h_1 \leq 100$ км.

Попытки обнаружить влияние солнечных вспышек на параметры шумановского резонанса предпринимались неоднократно [9–13]. Трудности обнаружения ожидаемых изменений связаны с их маскировкой флуктуациями естественного сверхнизкочастотного (СНЧ, $3 \div 3000$ Гц) радиосигнала, обусловленными шумовой природой его источников (мировых гроз). До настоящего времени не удавалось однозначно продемонстрировать связь солнечных вспышек и параметров СНЧ радиосигналов, а затем оценить соответствующие изменения состояния ионосферы. Заполнение этого пробела и является целью данной работы.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе анализируются данные мониторинга параметров шумановского резонанса на комплексной геофизической обсерватории «Карымшина», Камчатка, Россия (координаты $52,9^\circ$ с. ш., $158,25^\circ$ в. д.) Для измерений вариаций магнитного поля используется трёхкомпонентный индукционный магнетометр, разработанный в ИЗМИРАН [14]. Основные параметры магнетометра следующие: диапазон частот $0,003 \div 40$ Гц; уровень шума в зависимости от текущей частоты $(0,16f[\text{Гц}])^{-1}$ пТ/Гц $^{1/2}$; коэффициент преобразования составляет $0,4f[\text{Гц}]$ В/Тл и $1,6$ В/Тл для частот $f < 4$ Гц и $f > 4$ Гц соответственно.

Датчики горизонтальных магнитных компонент поля H и D ориентированы вдоль магнитного меридиана и перпендикулярно к нему соответственно, датчик Z -компоненты ориентирован вертикально. Датчики поля конструктивно объединены с предварительными усилителями и представляют собой индукционные катушки с сердечниками из аморфного сплава. Они помещены в алюминиевые ударопрочные и влагозащищённые корпуса. Потребляемый ток одного датчика составляет 20 мА при напряжении питания $\pm(11 \div 15)$ В. Высокие показатели чувствительности и частотного диапазона датчика удалось обеспечить при весьма небольших его весе и габаритах, которые составляют 7 кг и 100×750 мм соответственно. Диапазон рабочих температур датчиков при сохранении указанных параметров составляет $-30 \div 50^\circ\text{C}$, что позволяет использовать их в неблагоприятных климатических условиях. Датчики соединяются с модулем аналого-цифрового преобразователя кабелем с длиной более 100 м. Параметры всех трёх датчиков идентичны и могут отклоняться друг от друга менее, чем на 3 % по абсолютной величине коэффициента преобразования и на 2° по его фазе. Эти отклонения корректировались с использованием калибровочных

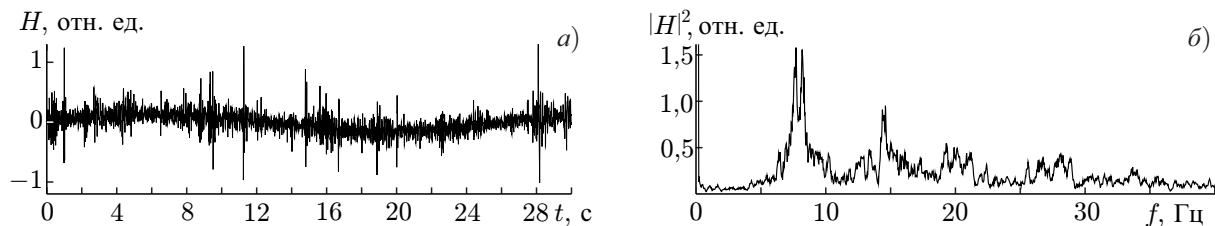


Рис. 1. Сигнал с выхода датчика магнитного поля с длительностью 30 с (а) и его спектр мощности, демонстрирующий резонансную структуру (б)

цепей. Для подавления сейсмических, ветровых, акустических и других помех датчики помещены в бетонный бункер, заполненный сухим песком.

С 2013 года сотрудниками КФ ГС РАН была введена в эксплуатацию новая система передачи геомагнитных данных на приёмный центр в Петропавловске-Камчатском, обеспечивающая их получение в режиме реального времени. Аналоговый сигнал от магнитометра по кабельной линии передаётся в 24-разрядную систему сбора данных GSR-24, которая находится на удалении 100 м от места закладки датчиков в защитном сооружении. В этой системе оцифровывается с частотой 100 Гц. Далее по беспроводному каналу связи данные передаются на стационарный пункт наблюдения КГО «Карымшина», где они временно хранятся на кольцевом буфере обмена и затем передаются по проводным каналам на приёмный центр КФ ГС РАН вместе с данными сейсмических, акустических, электротеллурических и метеорологических измерений [15].

Образец сигнала с выхода магнитного датчика с длительностью 30 с и его спектр мощности, сглаженный по 9-ти точкам, приведены на рис. 1. Сигнал представляет собой случайную последовательность импульсов при наличии медленно меняющейся фоновой составляющей. Видно, что уже при длительности сигнала 30 с в спектре вполне различимы как минимум первые три моды шумановского резонанса. В сигнале мы не видим помехи на частоте 50 Гц от силовой сети, которая, по данным большинства исследователей, значительно превышает уровень естественного сигнала. Кроме низкочастотной фильтрации сигналов с датчиков, это обеспечивается оптимальным выбором места для обсерватории: вдали от населённых пунктов и системы местного электропитания и питания аппаратуры.

2. ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Исходные данные измерений плотности потока солнечного рентгеновского излучения на длинах волн $0,1 \div 0,8$ нм на спутниках GOES-13 и GOES-15 были взяты с сайта National Geophysical Data Center [16], и далее усреднялись нами по пятиминутным интервалам.

Для определения пиковых частот шумановского резонанса использовалась процедура подгонки к экспериментальным спектрам суммы четырёх лоренцевых кривых, соответствующих первым четырём модам. Первичные спектры мощности излучения рассчитывались на основе преобразования Фурье временной реализации с длиной 3 000 точек, что обеспечило разрешение по частоте 0,033 Гц. Затем спектры сглаживались по 9-ти точкам и усреднялись по пятиминутным интервалам.

Как известно, суточные вариации пиковых частот шумановского резонанса связаны с пространственным перемещением мировой грозовой активности. Происходят они за счёт взаимодействия комплексных резонансных характеристик соседних мод, обладающих невысокой добротностью. Движение мировых гроз вокруг Земли изменяет наблюдаемую интенсивность отдельных мод и вызывает вариации пиковых частот. Последние приобретают характерные для данной обсерватории суточные зависимости, которые изменяются от сезона к сезону [3]. Поэтому для

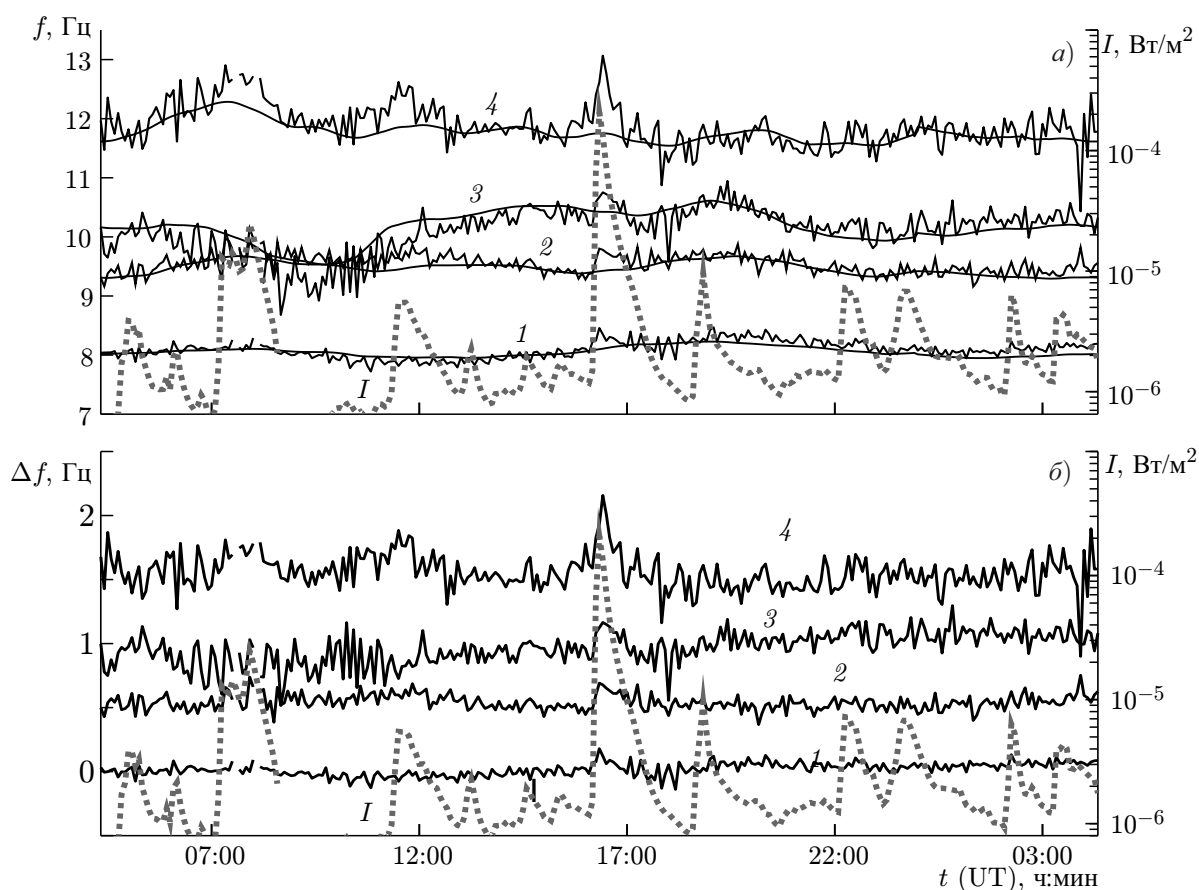


Рис. 2. Записи пиковых частот первых 4-х мод шумановского резонанса во время солнечной вспышки в 16:19 UT 11 марта 2015 года (а, изрезанные линии). Средние вариации за 5 суток (а, сглаженные линии), вариации потока мощности рентгеновского излучения (серые пунктирные линии), вариации пиковых частот с вычтенными средними суточными вариациями (б, сплошные линии). Номер кривой соответствует номеру моды

выделения реакции пиковых частот глобального резонатора на солнечную вспышку на первом этапе обработки данных мы находим и компенсируем средние суточные ходы пиковых частот за период, охватывающий событие.

На рис. 2а тонкими линиями показаны вариации пиковых частот во временной окрестности вспышки 11 марта 2015 класса X2.1, толстыми линиями — средние суточные изменения за 5 дней (± 2 дня относительно даты основного события). Средние суточные вариации сглаживались по 17 точкам. Для лучшего совмещения графики частот 2, 3 и 4-й моды были смещены вдоль оси ординат вниз на 5; 10 и 15 Гц соответственно. Плотность потока мощности рентгеновского излучения I показана на рисунке серой пунктирной линией, построенной в логарифмическом масштабе относительно правой вертикальной оси. На рис. 2б для сравнения показаны вариации пиковых частот после вычитания их среднего суточного хода: $\Delta f_n(t) = f_n(t) - \bar{f}_n(t)$. Эти зависимости для первых 4 мод были смещены друг относительно друга на 0,5 Гц.

На рис. 2 видно резкое возрастание всех пиковых частот в момент начала вспышки. Величина отклика увеличивается с ростом номера моды, что согласуется с формулой (1). Однако даже после удаления суточных трендов идентификация возрастания пиковых частот с рентгеновской вспышкой всё ещё затруднена быстрыми случайными флуктуациями пиковых частот.

3. УМЕНЬШЕНИЕ СЛУЧАЙНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ

Оставшиеся после компенсации суточных трендов флуктуации пиковых частот обусловлены случайностью характеристик источников (разрядов молний), формирующих сигнал шумановского резонанса. Для повышения точности спектральных оценок и, соответственно, оценок пиковых частот обычно используется накопление спектров в течение длительного интервала времени вплоть до одного часа [17]. Из-за продолжительности солнечной вспышки от десятков минут до нескольких часов накопление спектров нельзя сделать слишком длительным, иначе реакция глобального резонатора окажется сглаженной. Мы используем стандартное накопление спектров мощности шумановского резонанса в течение 5 мин. Поскольку оставшиеся флуктуации пиковых частот обусловлены случайным характером распределения молний по поверхности Земли, то они неодинаковы для различных мод шумановского резонанса (см. рис. 2). В то же время реакция на модификацию ионосферы солнечной вспышкой окажется одинаковой и синхронной на всех резонансных модах, потому что она вызвана изменением собственных частот полости. Следовательно, случайные флуктуации можно было бы уменьшить, если усреднить временные изменения различных пиковых частот и таким образом усилить эффект модификации глобального резонатора.

Для этой цели с учётом формулы (1) мы вводим нормированную резонансную частоту n -й моды колебаний

$$f'_n = \frac{\sqrt{2} f_n}{\sqrt{n(n+1)}} = \frac{c}{\sqrt{2} \pi R_E} \sqrt{\frac{h_0}{h_1}}. \quad (2)$$

Её зависимость от номера моды определяется только слабой частотной зависимостью характерных высот h_0 и h_1 , а коэффициент $\sqrt{2}$ в числителе введён для приведения нормированных частот шумановского резонанса к частоте первой моды для дальнейшего сопоставления с результатами моделирования. Случайные флуктуации нормированных резонансных частот по-прежнему независимы, поэтому можно провести усреднение по нескольким модам и получить средневзвешенную частоту шумановского резонанса:

$$f_{\text{wa}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N f'_n. \quad (3)$$

Для вычисления средневзвешенной частоты усреднение выполнялось по первым четырём ($N = 4$) модам, которые уверенно наблюдаются в экспериментальных спектрах при исследовании шумановского резонанса.

Далее мы будем рассматривать отклонения средневзвешенной частоты от её среднего суточного хода:

$$\Delta f_{\text{wa}}(t) = f_{\text{wa}}(t) - \bar{f}_{\text{wa}}(t), \quad (4)$$

где $f_{\text{wa}}(t)$ и $\bar{f}_{\text{wa}}(t)$ — текущая и средняя суточная зависимости средневзвешенной частоты соответственно. Средняя суточная зависимость получается методом наложения эпох, когда каждое значение средневзвешенной частоты для данного момента времени суток рассчитывается как средняя величина за несколько суток, охватывающих событие.

Графики отклонений средневзвешенной частоты, относящиеся к событиям 20 декабря 2014 года и 11 марта 2015 года, произошедшим в дневные и ночные часы соответственно, в пункте наблюдений «Карымшина» приведены на рис. 3. Данные представлены в том же формате, что и на рис. 2. Вариации интенсивности рентгеновского излучения показаны пунктирной линией.

Моменты восхода и захода Солнца в пункте наблюдения отмечены на рис. 3 треугольниками с вершинами, направленными вверх и вниз соответственно. Переход к вариациям средневзвешенной частоты делает очевидным совпадение и подобие временной формы всплеска рентгеновского

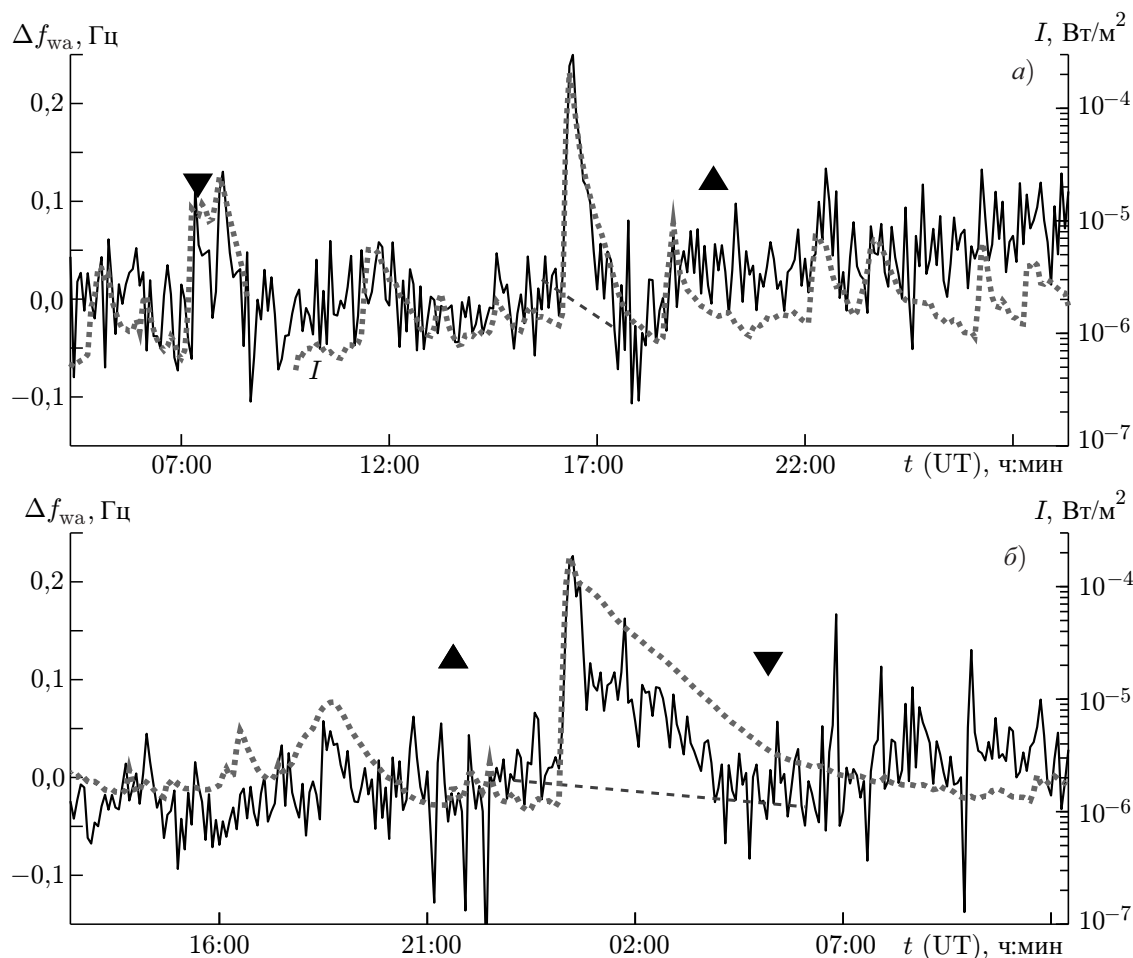


Рис. 3. Вариации средневзвешенной частоты (сплошные линии) и потока мощности рентгеновского излучения (пунктирные линии) во время солнечных вспышек в 16:19 UT 20 декабря 2014 года (а) и в 00:25 UT 11 марта 2015 года (б). Моменты восхода и заката над пунктом «Карымшина» отмечены треугольниками с вершинами, направленными вверх и вниз соответственно

излучения Солнца и реакции пиковых частот глобального резонатора Земля—ионосфера. Усреднение по четырём резонансным модам заметно ослабило случайные флуктуации и выделило реакцию не только на главное событие, произошедшее в 16–17 ч UT 11 марта 2015 года, но и на более слабые всплески, которые имели место около 7 и 22 ч. Следует отметить также хорошее соответствие формы отклика резонатора Земля—ионосфера и изменений интенсивности потока рентгеновского излучения для основного события.

4. АНАЛИЗ СОБЫТИЙ

Для дальнейшего анализа реакции характеристик шумановского резонанса на солнечные вспышки были отобраны шесть событий классов M 5,8–X 2,7, произошедшие в период с декабря 2014 года по май 2015 года. Можно отметить, что, как и в случаях, показанных на рис. 3, фронт рентгеновских вспышек и реакция средневзвешенной частоты идеально совпадают в пределах пятиминутного интервала разрешения данных. Кроме того, наблюдается корреляция длительности рентгеновской вспышки и продолжительности отклика средневзвешенной частоты шумановского резонанса.

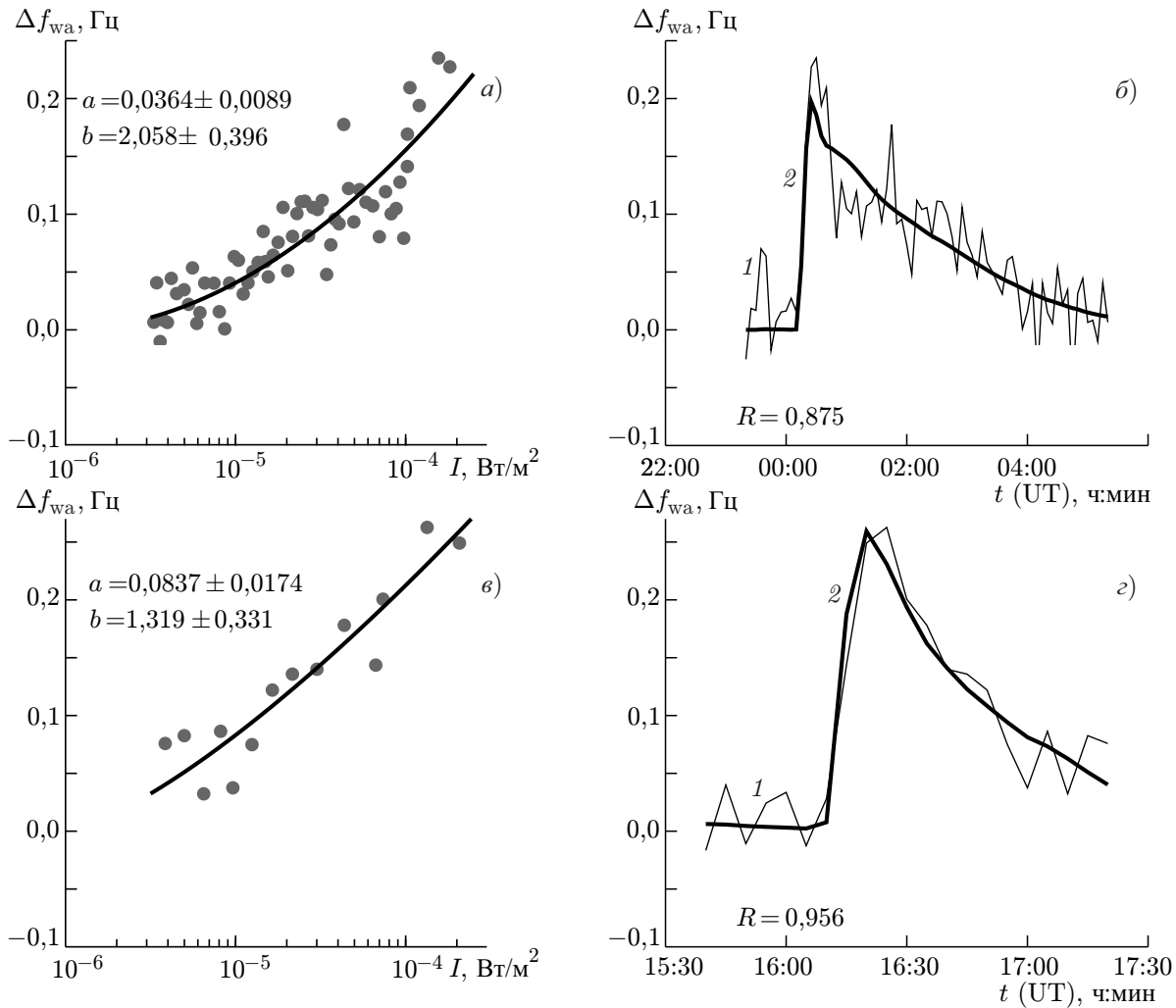


Рис. 4. Результаты регрессионного анализа данных наблюдений 20 декабря 2014 года (а, б) и 11 марта 2015 года (в, з). Наблюдаемые (кривые 1) и прогнозируемые (кривые 2) в модели регрессии временные вариации Δf_{wa} (б, з). На панелях а и в точки соответствуют экспериментальным данным, линии — модели (5)

Полученные и обработанные нами экспериментальные данные позволяют оценить характер связи между отклонениями приведённых частот глобального резонанса и увеличением потока рентгеновского излучения Солнца. Для этого к записям каждого события применялся нелинейный регрессионный анализ в рамках степенной логарифмической модели:

$$\Delta f_{wa} = a [\lg(I/I_0)]^b. \quad (5)$$

В качестве параметра модели в формуле (5) принят уровень рентгеновского излучения $I_0 = 10^{-6} W/m^2$, соответствующий в среднем невозмущённому состоянию ионосферы [18] и отвечающий нулевой величине отклонения средневзвешенной частоты.

При обработке записей локальный тренд частоты в окрестности события компенсировался вычитанием линейной функции, соединяющей точки, соответствующие средним значениям вариаций средневзвешенной частоты в начале и в конце интервала, охватывающего выделенное событие. Линии тренда для событий 20 декабря 2014 года и 11 марта 2015 года показаны на графиках на рис. 3 штриховыми отрезками.

Таблица 1. Параметры степенной логарифмической модели регрессии для связи между вариациями средневзвешенной частоты и мощностью солнечной вспышки

Событие		Коэффициенты модели регрессии			
Дата	Класс	a	b	R^2	R
17.12.2014	M8,7(д)	$0,033 \pm 0,007$	$2,10 \pm 0,38$	0,906	0,959
18.12.2014	M6,9(д)	$0,066 \pm 0,015$	$1,62 \pm 0,50$	0,658	0,840
20.12.2014	X1,8(д)	$0,036 \pm 0,009$	$2,06 \pm 0,39$	0,767	0,875
09.03.2015	M5,8(д)	$0,049 \pm 0,016$	$2,08 \pm 0,71$	0,841	0,921
11.03.2015	X2,1(н)	$0,084 \pm 0,017$	$1,32 \pm 0,33$	0,895	0,957
05.05.2015	X2,7(д)	$0,020 \pm 0,033$	$2,57 \pm 2,13$	0,677	0,844
Полный ансамбль	M5,8–X2,7	$0,047 \pm 0,006$	$1,77 \pm 0,23$	0,686	0,862

Примеры регрессионного анализа двух событий представлены на рис. 4. Здесь на панелях *a* и *б* точками показаны отклонения средневзвешенной частоты Δf_{wa} как функции потока мощности рентгеновского излучения I , построенные по экспериментальным данным, и функциональные зависимости, полученные в результате нелинейного регрессионного анализа по формуле (5). Кривые нелинейной регрессии показаны сплошными линиями, значения коэффициентов a и b указаны на рисунке.

Параметры модели и их разброс при доверительной вероятности 95 % показаны на рис. 4б, *г*. Для каждого события тонкой ломаной линией представлены наблюдаемые временные вариации средневзвешенной частоты. На экспериментальные записи наложены прогнозируемые вариации, рассчитанные по изменениям интенсивности рентгеновского излучения для степенной логарифмической модели (толстая кривая). Также на панелях указаны коэффициенты взаимной корреляции R между измеренными и прогнозируемыми вариациями средневзвешенной частоты.

Полученные для всех событий коэффициенты модели регрессии, их разброс при доверительной вероятности 95 % и коэффициент детерминации R^2 (он аналогичен квадрату коэффициента взаимной корреляции модельной зависимости и наблюдательных данных) сведены в табл. 1. Буквы «д» и «н» во второй колонке обозначают день или ночь в пункте наблюдения в момент вспышки соответственно.

Здесь важно подчеркнуть, что событие 11 марта 2015 года пришлось на ночные часы в обсерватории «Карымшина». Однако, в отличие от наблюдений в ОНЧ диапазоне, показывающих отсутствие реакции на ночных трассах распространения, мы имеем реакцию сигналов на частотах глобального электромагнитного резонанса, что указывает на отмечавшуюся выше чувствительность характеристик шумановского резонанса к средним по планете изменениям ионосферы.

Можно видеть, что модель регрессии с достаточно высокой степенью достоверности описывает связь между вариациями интенсивности рентгеновского излучения и средневзвешенной частоты шумановского резонанса в каждом отдельном событии. Так, коэффициенты корреляции между наблюдаемыми и прогнозируемыми временными вариациями средневзвешенной частоты лежат в интервале $R = 0,84 \div 0,95$. Для разных событий разброс параметров модели от вспышки к вспышке оказывается существенным. По-видимому, здесь всё ещё сказываются остаточные флуктуации за счёт случайной природы естественных источников электромагнитного поля.

Для того, чтобы найти средние параметры модели, мы объединили записи всех событий в единый ансамбль. Результат регрессионного анализа для такого объединённого ансамбля данных представлен на рис. 5а. Сопоставление измеренных и прогнозируемых вариаций средневзвешенной частоты с использованием усреднённых параметров модели приведено на рис. 5б.

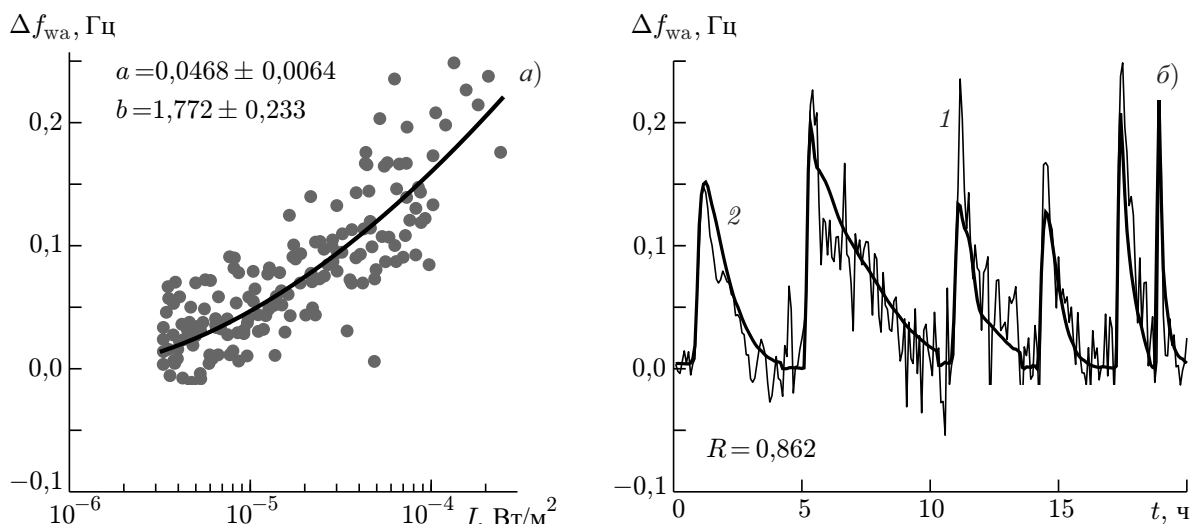


Рис. 5. Наблюдаемые (кривые 1) и прогнозируемые (кривые 2) вариации средневзвешенной частоты (б) в модели нелинейной регрессии (а), построенные для объединённого ансамбля данных

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Предложенный способ обработки записей выявляет отклик резонатора на солнечные рентгеновские вспышки и делает очевидными изменения его резонансных частот во время внезапных ионосферных возмущений. Как отмечалось выше, влияние вспышек на Солнце на распространение средних, длинных и сверхдлинных волн хорошо известно: внезапное ионосферное возмущение вызывает резкие изменения амплитуды и фазы сигналов от радиопередатчиков на дневной трассе распространения, не оказывая на них никакого влияния в случае ночных трасс распространения. Наблюдения интерпретируются как уменьшение высоты нижней границы дневной ионосферы, когда профиль проводимости на высотах $60 \div 70$ км, характерный для спокойных условий, резко опускается на несколько километров.

Внезапные ионосферные возмущения возникают вместе с рентгеновской вспышкой, они обычно продолжаются несколько часов, а соответствующие ей изменения интенсивности солнечного ветра достигнут Земли в лучшем случае через сутки после начала вспышки. Поэтому вариации частоты, приуроченные к моменту вспышки, обусловлены только рентгеновскими квантами, которые уменьшают высоту нижней границы дневной ионосферы в верхней части области D , т. е. изменяют высоту h_1 . Таким образом, мы рассматриваем «чистые» возмущения, когда потоки выброшенных Солнцем релятивистских протонов и электронов ещё не достигли Земли.

Реакция характеристик шумановского резонанса на солнечные вспышки показывает, что пиковые частоты возрастают во время внезапных ионосферных возмущений. Изменения регистрируются как на дневном, так и на ночном полушариях. Так, например, резкое возрастание средневзвешенной частоты на рис. 3 наблюдается в ночных условиях на обсерватории «Карымшина», тогда как возмущение ионосферы происходит на противоположном (дневном) полушарии Земли.

Шумановский резонанс, как явление глобальное, реагирует на изменения характеристик нижней ионосферы в целом, и рост пиковых частот регистрируется независимо от локальных условий освещённости. Как следует из формулы (1), возрастание пиковых частот можно связать либо с уменьшением высоты h_1 , либо с повышением электрической высоты h_0 . Однако поскольку наблюдения внезапных ионосферных возмущений на сверхдлинных, длинных и средних волнах показали, что возмущения проводимости локализованы в интервале высот от 70 до 100 км, для

согласия с ними следует выбрать уменьшение магнитной высоты h_1 .

Используя результаты моделирования, приведённые в Приложении, мы получили следующую формулу, связывающую вариации средневзвешенной частоты Δf_{wa} с изменениями магнитной высоты профиля Δh :

$$\Delta h[\text{км}] = -0,0447 \Delta f_{wa}[\text{Гц}]. \quad (6)$$

Принимая во внимание, что в модели использовалось изменение средней высоты сферически симметричного резонатора, полученные величины Δh в выражении (6) удвоены, чтобы отнести их к изменениям высоты дневного полушария, поскольку только оно подвержено воздействию солнечного рентгеновского излучения.

Полученные данные о высоте нижней ионосферы были сопоставлены с результатами независимых наблюдений в ОНЧ диапазоне [18]. В работе [18] обсуждаются резкие изменения фазы и амплитуды ОНЧ радиосигналов, принятых в г. Данедин (Новая Зеландия), вызванные солнечными вспышками. Анализировались внезапные ионосферные возмущения, обусловленные солнечными вспышками, в сигналах ОНЧ станций «Омега» на частотах 10,2 и 13,6 кГц, NLK (Сиэтл, США) на частоте 23,4 кГц и NPM (Гавайи) на частоте 21,4 кГц, принятых в г. Данедин.

На дневных трассах в условиях внезапного ионосферного возмущения, вызванного рентгеновской вспышкой на Солнце, из записей сигналов ОНЧ радиостанций было получено, что увеличение интенсивности потока ионизирующего излучения Солнца на 20 дБ приводит к следующим изменениям базовой высоты H' и обратного высотного масштаба профиля электронной концентрации β : H' падает от 70 до 62 км, а β растёт от 0,4 до 0,5 км⁻¹ (или высотный масштаб $\zeta = \beta^{-1}$ падает с 2,5 до 2,0 км). Таким образом, уменьшение эффективной высоты ионосферы, усреднённое по Земле, оказывается равным $\delta H' = -4$ км, а среднее уменьшение высотного масштаба $\delta \zeta = 0,25$ км.

На рис. 6 построены зависимости изменений высоты дневной ионосферы от относительной интенсивности солнечной вспышки I/I_0 , полученные на основе модели нелинейной регрессии из записей характеристик шумановского резонанса. Изменения высоты относительно величины, соответствующей невозмущённому состоянию ионосферы, рассчитывались по формуле (6). Коэффициенты регрессии, определённые по объединённому ансамблю, взяты из табл. 1. Результаты для степенной логарифмической модели (5) показаны на рис. 6 штриховой линией.

Для сравнения, сплошной прямой линией на рис. 6 дана зависимость отклонения базовой высоты H' экспоненциального профиля проводимости ионосферы от пиковой интенсивности рентгеновских вспышек, полученная в работе [18]. Отклонение H' отсчитывается от величины 71 км, соответствующей в работе [18] невозмущённому состоянию ионосферы. Магнитная высота h_1 , используемая в нашей работе, не совпадает с базовой H' и для СНЧ лежит выше, однако изменение высоты H' на некоторую величину приводит к изменению магнитной высоты практически на такую же величину. Поэтому мы используем прямое сравнение результатов нашего анализа с данными наблюдений в ОНЧ диапазоне.

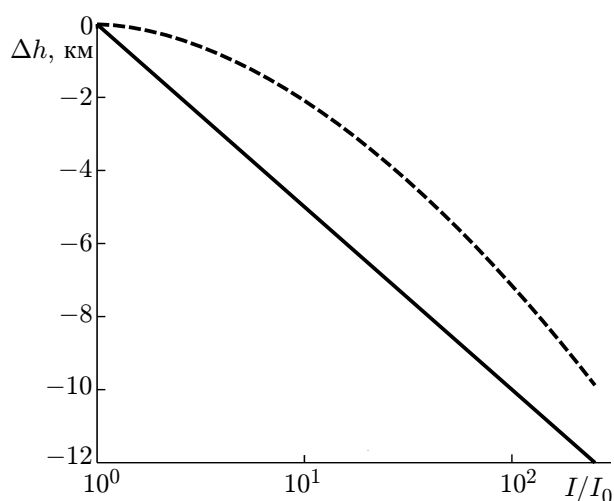


Рис. 6. Изменения эффективной высоты ионосферы во время солнечных вспышек, полученные из данных наблюдений в СНЧ и ОНЧ диапазонах. Штриховая линия соответствует модели (5), сплошная — данным из работы [18]

Из графиков на рис. 6 можно видеть, что в основном результаты анализа на СНЧ показывают несколько меньшее изменение характеристической высоты ионосферы по сравнению с данными анализа сигналов ОНЧ станций. Это расхождение в диапазоне интенсивностей рентгеновского излучения $10^{-5} \div 2,5 \cdot 10^{-4}$ Вт/м² в среднем не превышает 2 км. Для отдельных событий данное расхождение составляет от 1 до 4 км в указанном диапазоне интенсивностей рентгеновского излучения.

Полученные результаты позволяют заключить, что внезапные ионосферные возмущения, вызванные солнечными вспышками, — надёжно наблюдаемое явление в записях характеристик шумановского резонанса, особенно при применении предложенной нами методики обработки с использованием средневзвешенной частоты. Такое заключение выглядит парадоксальным на фоне публикаций о попытках обнаружить аналогичные модификации ионосферы, вызванные гамма-вспышками [4, 5, 19]. Эти вспышки достигли земли 27 августа 1999 года и 27 декабря 2004 года и пришли от внегалактического источника SGR 1900+14 (Soft Gamma Repeater) в малом Магеллановом облаке и от магнетара SGR 11806–20 в нашей галактике соответственно. Плотность потока жёсткого электромагнитного излучения в первом случае превышала самые мощные солнечные вспышки на четыре порядка, а во втором — на пять порядков.

Казалось бы, столь мощные потоки должны вызвать экстраординарные внезапные ионосферные возмущения, которые уверенно регистрировались бы в записях характеристик шумановского резонанса. Однако это не так. Гамма-вспышка 1998 года если и привела к возмущениям в записях характеристик резонанса, то эти возмущения не вышли за пределы естественных флуктуаций, обусловленных шумовой природой источников электромагнитного поля [19]. Событие 2004 года удалось обнаружить в области частот шумановского резонанса только благодаря специальной методике обработки и прямому сопоставлению модельных данных с наблюдениями [3, 4].

Отмеченное противоречие требует ответа на вопрос: почему более слабые солнечные вспышки удаётся зарегистрировать в диапазоне частот шумановского резонанса, а более мощные гамма-всплески прошли незамеченными. На наш взгляд основная причина связана с продолжительностью интенсивной фазы событий. Максимальный поток излучения при гамма-всплесках длился сотые доли секунды, тогда как в солнечных вспышках он длится минуты. Иными словами, гамма-всплеск вызывает гигантские, но непродолжительные модификации ионосферы, которые невозможно наблюдать на частотах шумановского резонанса. Дополнительное усреднение энергетических спектров за 5 мин наблюдений ещё более ослабит кратковременное возмущение. С одной стороны, глобальный резонанс не успевает «откликнуться» на возмущения с длительностью 10^{-2} с, а с другой — последующее накопление окончательно сглаживает и без того ослабленную реакцию.

Изложенная причина, по нашему мнению, является основной, хотя можно упомянуть целый ряд дополнительных факторов. Например, жёсткое излучение от магнетара приходит на Землю в «чистом» виде, его не может сопровождать никакое корпускулярное излучение, реакция ионосферы зависит от энергии ионизирующих квантов, и т. д. И всё же, главным отличием солнечной вспышки является её большая продолжительность.

ВЫВОДЫ

Приведённые нами экспериментальные данные и их обработка позволяют сформулировать следующие результаты.

1) Предложена оригинальная методика выявления реакции собственных частот резонатора Земля–ионосфера на внешнее воздействие путём подавления флуктуаций этих частот, обусловленных случайной природой естественных источников электромагнитного поля. Методика измерений состоит в использовании средневзвешенной частоты — среднего значения нормализо-

ванных пиковых частот нескольких мод шумановского резонанса. Переход к средневзвешенной частоте позволил наглядно продемонстрировать резкое возрастание наблюдаемых пиковых частот, связанное как с сильными, так и с умеренными солнечными вспышками.

2) На основе регрессионного анализа возмущений средневзвешенной частоты и мощности рентгеновского излучения во времени определены параметры наиболее вероятной модели нелинейной зависимости отклонений средневзвешенной частоты от мощности рентгеновской вспышки на Солнце.

3) Путём численного моделирования получены калибровочные зависимости, позволившие связать изменения пиковых частот шумановского резонанса с уменьшением характеристической магнитной высоты в профиле проводимости.

4) Показано, что снижение характеристической высоты ионосферы приблизительно пропорционально логарифму отношения мощности рентгеновского излучения во вспышке к фоновому значению в степени 1,77; при этом из анализа данных наблюдений в ОНЧ диапазоне [18] следует прямая пропорциональность логарифму данного отношения.

5) Прогнозируемое снижение характеристической высоты профиля проводимости ионосферы на дневной полусфере составляет в среднем 4–10 км для интенсивности рентгеновского излучения, соответствующего вспышкам классов M1–X2,5, что приблизительно на 2 км меньше значений, полученных по независимым результатам анализа данных наблюдений в ОНЧ диапазоне.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Связь пиковой частоты шумановского резонанса с изменениями магнитной высоты профиля проводимости ионосферы

Как видно из данных наблюдений в ОНЧ диапазоне, внезапное ионосферное возмущение увеличивает электронную концентрацию до 20 раз. Это означает снижение профиля проводимости на высотах около 70–100 км примерно на три высотных масштаба. Важно отметить, что эти изменения происходят на высотах, где проводимость среды определяется свободными электронами [20]. Поэтому для оценки воздействия возмущения на характеристики шумановского резонанса разумно использовать модель «колена» [21, 22], в которой увеличение потока рентгеновского излучения Солнца приводит к модификации (снижению) профиля проводимости в области верхней характерной (магнитной) высоты. В области «колена», где расположена нижняя характерная (электрическая) высота, модификации практически отсутствуют [24].

Для того, чтобы сделать модельную задачу однопараметрической, мы примем, что все характеристики вертикального профиля проводимости атмосферы [21, 22] остаются неизменными (см. табл. П1), а варьируется только приведённая магнитная высота h_1^* .

В расчётах применялась модель «колена», предложенная в работе [22], её параметры приведены в табл. П1. Модель «колена» позволяет находить постоянную распространения СНЧ радиоволн через характерные высоты (электрическую и магнитную) ионосферы, зависящие от частоты радиосигнала и соответствующих высотных масштабов профиля проводимости. Здесь мы опустим описание модели и формулы, этот материал можно найти в работах [3, 20–27].

Обработка записей ОНЧ радиосигналов во время высотного ионосферного возмущения показала, что возмущение профиля проводимости было локализовано в интервале высот от 70 до 100 км, в области электронной проводимости плазмы. Поэтому в нашем анализе мы используем изменения модели в окрестности верхней (магнитной) характерной высоты. Конечной целью

Таблица П1. Параметры модели «колена»

Магнитная высота привязки h_1^* , км	96,5
Магнитная частота привязки f_m^* , Гц	8
Магнитный масштаб на частоте привязки ζ_m^* , км	4
Параметр частотной зависимости магнитного масштаба f_m^* , Гц	8
Параметр частотной зависимости магнитного масштаба b_m , км	20
Частота «колена» $f_{\text{кnee}}$, Гц	10
Высота «колена» $h_{\text{кnee}}$, км	55
Масштаб выше «колена» ζ_a , км	2,9
Масштаб ниже «колена» ζ_b , км	8,3

будет получение «градуировочных» кривых, связывающих наблюдаемые резонансные частоты с характерной магнитной высотой профиля проводимости.

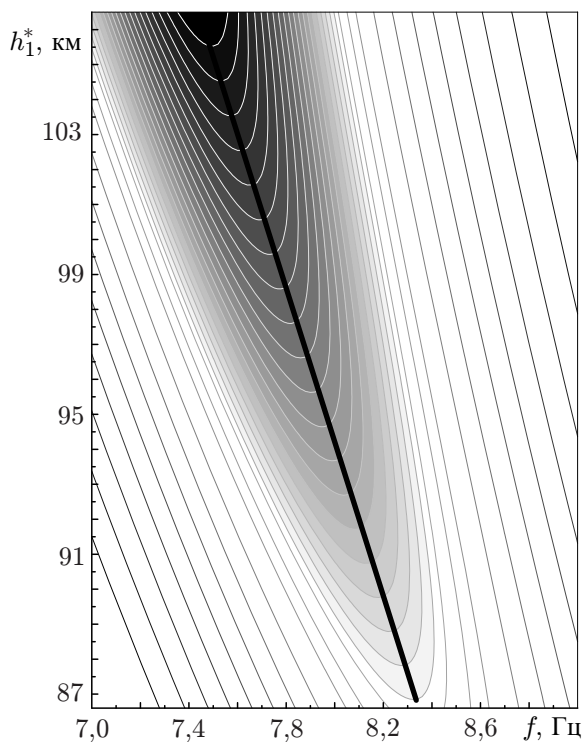


Рис. П1. Калибровочная зависимость: контурные линии — первый максимум шумановского резонанса над плоскостью частота—приведённая магнитная высота профиля проводимости; прямая линия — магнитная высота профиля проводимости как функция первой резонансной частоты

ний, полученной методом наименьших квадратов по координатам соответствующих максимумов в спектрах. Аналитическое выражение для этой линейной зависимости имеет вид

$$h_1^*[\text{км}] = 272,598 - 22,358f[\text{Гц}]. \quad (\text{П1})$$

По тем же модельным данным можно построить и обратную зависимость:

$$f[\text{Гц}] = 12,196 - 0,0447h_1^*[\text{км}]. \quad (\text{П2})$$

Пользуясь моделями «колена» с различными магнитными высотами h_1^* , мы рассчитали соответствующие частотные зависимости постоянной распространения $\nu(f)$. Это позволило получить энергетические спектры излучения в окрестности частот шумановского резонанса при равномерном распределении грозových разрядов по поверхности Земли. Результаты расчётов представлены на рис. П1.

Спектральные данные показаны в виде двумерного рельефа энергетического спектра $\langle |E(f)|^2 \rangle$ над плоскостью частота—приведённая магнитная высота профиля проводимости.

Диапазон частот охватывает окрестность первой резонансной моды $7 \text{ Гц} < f < 9 \text{ Гц}$, а приведённая магнитная высота лежит в области $86,5 \text{ км} < h_1^* < 106,5 \text{ км}$. Интенсивность резонансных колебаний показана тёмной заливкой (более тёмные области соответствуют большей интенсивности), на которую наложены линии постоянного уровня спектральной плотности. Как видно, увеличение высоты h_1^* снижает пиковую частоту шумановского резонанса.

Пользуясь этими расчётными данными, мы построили зависимость приведённой магнитной высоты профиля проводимости от первой пиковой частоты, показанную на рис. П1 прямой линией.

Таким образом, из расчётных данных, полученных с использованием модели «колена», следует, что изменение наблюдаемой пиковой частоты первого шумановского резонанса на 0,1 Гц связано с изменением средней по Земному шару магнитной высоты h_1^* на 2,2 км. Если же известно, что эта высота изменилась на 1 км, то первая пиковая частота должна измениться на 44,7 мГц.

Зависимость (П1) была использована при интерпретации наблюдательных данных по шумановскому резонансу. С другой стороны, формулу (П2) можно применить к изменениям эффективной высоты ионосферы $\Delta H' = -4$ км, найденным по данным наблюдений в ОНЧ диапазоне. Тогда окажется, что внезапное ионосферное возмущение должно привести к увеличению первой пиковой частоты шумановского резонанса на 0,18 Гц, что весьма близко к результатам наблюдений, представленным на рис. 5.

Приведённые выше формулы можно применить к экспериментальным записям резонансных частот во время внезапного ионосферного возмущения и найти по ним соответствующие вариации магнитной высоты ионосферы.

Авторы выражают искреннюю благодарность А.Ю. Щекотову за сопровождение измерений характеристик шумановского резонанса в обсерватории «Карымшина».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилов А. Д. Современная аэрономия. Ленинград: Гидрометиздат, 1989. 227 с.
2. Филипп Н. Д., Блаунштейн Н. Ш., Ерухимов Л. М. и др. Современные методы исследования динамических процессов в ионосфере / Под ред. В. Д. Гусева. Кишинёв: Штиинца, 1991. 286 с.
3. Nickolaenko A. P., Hayakawa M. Resonances in the Earth-ionosphere cavity. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2002. 380 p.
4. Николаенко А. П., Кудинцева И. Г., Печеная О. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 9–10. С. 605.
5. Nickolaenko A. P., Kudintseva I. G., Pechony O., et al. // Ann. Geophys. 2012. V. 30, No. 9. P. 1 321.
6. Greifinger C., Greifinger P. // Radio Sci. 1978. V. 13. P. 831.
7. Николаенко А. П., Рабинович Л. М. // Космические исслед. 1982. Т. 20, № 1. С. 82.
8. Николаенко А. П., Рабинович Л. М. // Космические исслед. 1987. Т. 25, № 2. С. 301.
9. Sao K., Yamashita M., Tanahashi S., et al. // J. Atmos. Terr. Phys. 1973. V. 35, No. 11. P. 2 047.
10. Roldugin V. C., Maltsev Ye. P., Vasiljev A. N., Vashenyuk E. V. // Ann. Geophysicae. 1999. V. 17, No. 10. P. 1 293.
11. Roldugin V. C., Maltsev Y. P., Vasiljev A. N., et al. // J. Geophys. Res. 2004. V. 109, No. A1. Art. no. A01216.
12. Ouyang X.-Y., Xiao Z., Hao Y.-Q., Zhang D.-H. // Adv. Space Res. 2015. V. 56, No. 7. P. 1 389.
13. Zhou H., Qiao X. // J. Geophys. Res. 2015. V. 120, No. 10. P. 4 600.
14. Schekotov A. Y., Molchanov O. A., Hayakawa M., et al. // Radio Sci. 2007. V. 42. Art. no. RS6S90.
15. Берсенёва Н. Ю. // Исследования в области наук о Земле. XII Регион. молодежная научн. конф., 25 ноября 2014. г. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. В. Беринга, 2014. С. 85.
16. http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new_full/.
17. Belyaev G. G., Schekotov A. Yu., Shvets A. V., Nickolaenko A. P. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 1999. V. 61, No. 10. P. 751.
18. McRae W. M., Thomson N. R. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2004. V. 66, No. 1. P. 77.
19. Price C., Mushtak V. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2001. V. 63, No. 10. P. 1 043.
20. Greifinger P. S., Mushtak V. C., Williams E. R. // Radio Sci. 2007. V. 42, no. 2. Art. RS2S12.

21. Williams E. R., Mushtak V. C., Nickolaenko A. P. // J. Geophys. Res. 2006. V. 111, No. D16. Art. no. D16107.
22. Mushtak V. C., Williams E. R. // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2002. V. 64, No. 18. P. 1989.
23. Николаенко А. П., Хайакава М. // Радиофизика и электроника. 2015. Т. 6 (20), № 1. С. 32.
24. Pechony O. Modeling and simulations of Schumann resonance parameters observed at the mitzpe ramon field station // Ph. D. Thesis. Tel-Aviv, Israel: Tel-Aviv University, 2007. 92 p.
25. Pechony O., Price C., Nickolaenko A. P. // J. Geophys. Res. 2006. V. 111, No. D23. Art. no. D23102.
26. Nickolaenko A., Hayakawa M. Schumann resonance for tyros (Essentials of global electromagnetic resonance in the Earth-ionosphere cavity). Springer Geophys. Ser. XI, 2014. 348 p.
27. Галюк Ю. П., Николаенко А. П., Хайакава М. // Радиофизика и электроника. 2015. Т. 6 (20), № 2. С. 41.

Поступила в редакцию 12 января 2016 г.; принята в печать 17 марта 2016 г.

EFFECT OF SOLAR FLARES ON THE SCHUMANN RESONANCE FREQUENCIES

A. V. Shvets, A. P. Nickolaenko, and V. N. Chebrov

We present the results of analyzing the response of the Schumann resonance frequencies to the X-ray solar flares. A special technique, by which a sharp variation that is present in all the resonant modes, but is hidden by regular variations combined with stochastic fluctuations is singled out using the weighted average frequency, has been developed. On the basis of comparison of the response form and the flare intensity, the parameters of the statistical relationship between the frequency variations and the X-ray radiation intensity were analyzed and determined for the nonlinear regression model. It has been shown that an increase in the resonant frequency is proportional on the average to the logarithm of the X-ray radiation intensity in power 1.7. The magnitude of changes in the resonator frequency is related with the corresponding changes in the characteristic “magnetic” height of the conductivity profile of the lower ionosphere and compared with the results of the independent analysis performed by measuring VLF radio signals.