

УНЧ-СНЧ-РЕЗОНАНСЫ В ГЕОКОСМОСЕ КАК ИНДИКАТОРЫ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

В.Г. Синицын, Ю.М. Ямпольский

ULF-ELF RESONANCES IN GEOSPACE AS SPACE WEATHER INDICATORS

V.G. Sinitsyn, Y.M. Yampolsky

Термином «космическая погода» принято обозначать комплекс явлений и физических условий на Солнце, в солнечном ветре, магнитосфере, ионосфере и термосфере Земли, которые влияют на функционирование технических систем в ближнем космосе и на Земле, а также на здоровье и безопасность человека. С развитием высоких технологий 20–21 вв. – систем космической связи и навигации, разветвленных электроэнергетических сетей и автоматизированных систем управления – появились новые факторы риска отказа техники, связанные с состоянием геокосмоса. Неблагоприятные условия в околоземном пространстве могут приводить к перебоям в работе аппаратуры искусственных спутников и обитаемых космических кораблей, нарушениям радиосвязи, сбоям в навигационных системах и управлении транспортом. Вследствие этого возрастает потребность в надежных методах прогноза изменений в состоянии космической погоды или хотя бы их регистрации в текущем времени. Дистанционные методы такого мониторинга опираются на измерения электрических и магнитных составляющих в сигналах, порождаемых волновыми процессами в плазменном околоземном пространстве. Среди природных образований, которые «с готовностью» отзываются генерацией или модуляцией волн на изменения условий в ближнем космосе, выделяются крупномасштабные структуры в плазменной оболочке Земли, служащие резонаторами для электромагнитных и магнитогидродинамических (МГД) волн. Вследствие неоднородности пространственного распределения плазмы можно указать несколько характерных граничных поверхностей, где резко изменяются параметры, определяющие условия распространения волн, – такие как граница плазмосферы, нижняя (области D и E) и верхняя (выше максимума слоя F) ионосфера, магнитопауза и др. Области между такими границами как раз и являются волноводами и (или) резонаторами для волн различных типов. Среди таких структур отметим магнитосферный резонатор (МР) для альфвеновских и магнитозвуковых волн, существующий в области замкнутых силовых линий геомагнитного поля [1]; ионосферный альфвеновский резонатор (ИАР), возникающий вдоль магнитной силовой трубки между нижней ионосферой и зоной быстрого спада плотности плазмы в верхней [2, 3] и, наконец, шумановский электромагнитный резонатор (ШР), занимающий полость между поверхностью Земли и нижней ионосферой [4–6]. Эти три структуры физически примыкают друг к другу, частично перекрываясь в довольно широком диапазоне высот над поверхностью Земли. Шумановский резонатор лежит между уровнями 0 и ≈ 100 км;

ионосферный альфвеновский простирается от 100–120 до 10^3 км; наконец, колебательные моды, характерные для магнитосферного резонатора, формируются на пространственных масштабах в несколько радиусов Земли R_E , или несколько десятков R_E . Основные параметры резонаторов – собственные частоты и ширины линий, или добротности резонанса, определяются формой и размером волноведущего образования и распределением его плазменного заполнения, в первую очередь, электронной плотности N_e и частот соударений заряженных и нейтральных частиц, ν_e , ν_i и др. Все эти характеристики, включая геометрическую форму и размер системы, могут изменяться вследствие регулярных и спорадических вариаций геофизических и гелиофизических факторов, составляющих космической погоды. В частности, очевиден эффект воздействий, таких как мощные возмущения магнитного поля (бури и суббури), потоки высокоэнергетичных частиц, всплески рентгеновского и ультрафиолетового излучения, сопровождающие вспышечную деятельность на Солнце, и, с другой стороны, солнечные затмения и ежедневные, а также сезонные вариации освещенности на высотах ионообразования в верхней атмосфере Земли.

Теоретические модели, позволяющие рассчитать параметры каждого из резонаторов, весьма многочисленны и в зависимости от сложности обеспечивают большую или меньшую точность расчета качественных и количественных характеристик. Первой моделью резонатора между Землей и ионосферой, которую предложил сам первооткрыватель, или, скорее, изобретатель этого резонатора В. Шуман, была конструкция из двух идеально проводящих концентрических сфер. Собственные частоты такой системы (шумановские резонансы) даются формулой:

$$f_n^{\text{SCH}} = (c/2\pi R_E) n^{1/2}(n+1)^{1/2} \quad (1)$$

и, как видно, не зависят от геофизических факторов. Более реальные модели ШР учитывают неоднородность его граничных поверхностей, связанную с различием ионосферных параметров днем и ночью, конечную проводимость ионосферной стенки резонатора и ее анизотропию, обусловленную влиянием геомагнитного поля [5, 6]. Расчеты собственных частот, амплитудных и поляризационных характеристик резонансного поля в рамках таких моделей хорошо совпадают с экспериментом и позволяют решать ряд обратных задач – определения параметров среды распространения или источника волнового поля по измеренным полевым характеристикам. В Академии наук Украины наблюдения ШР являются частью программы мониторинга электромагнитного окружения приполярных областей. На рис. 1

представлен динамический спектр вариаций магнитной компоненты СНЧ-поля, измеренный на антарктической станции Академик Вернадский.

Как известно, в Антарктике практически отсутствуют грозы – основной источник электромагнитных шумов СНЧ-диапазона, а промышленная деятельность и связанные с ней генерация и потребление значительных количеств электроэнергии запрещены международными соглашениями. Вследствие этого чрезвычайно низок уровень местных помех в СНЧ-диапазоне, что позволяет наблюдать рекордно большое число шумановских мод (см. рис. 1 вблизи 8, 14, 20, 27 Гц и т. д.). Суточные, сезонные, а также спорадические (зависящие от условий космической погоды) изменения параметров резонатора немедленно сказываются на частотах и поляризационных характеристиках резонансного поля. В литературе описаны случаи изменения частоты ШР при рентгеновских и протонных вспышках на Солнце, причем система по-разному реагирует на радиационную и корпускулярную составляющие солнечного возмущения [7, 8].

На рис. 2 представлены вариации ряда параметров шумановского поля, измеренные на станции Академик Вернадский до и после яркого геофизического события – протонной вспышки 8–11 сентября 2005 г. Хорошо заметны изменения поляризации и частотного хода первого мода между 48 и 170 часами наблюдения.

Два других резонатора расположены «выше» шумановского в пространстве, отличаются более низкими характерными частотами и поддерживают волны совершенно иного типа, а именно, магнитогидродинамические (МГД) колебания, которые принципиально возможны только в плазменной среде. Наземный наблюдатель фиксирует электромагнитное поле, преоб-

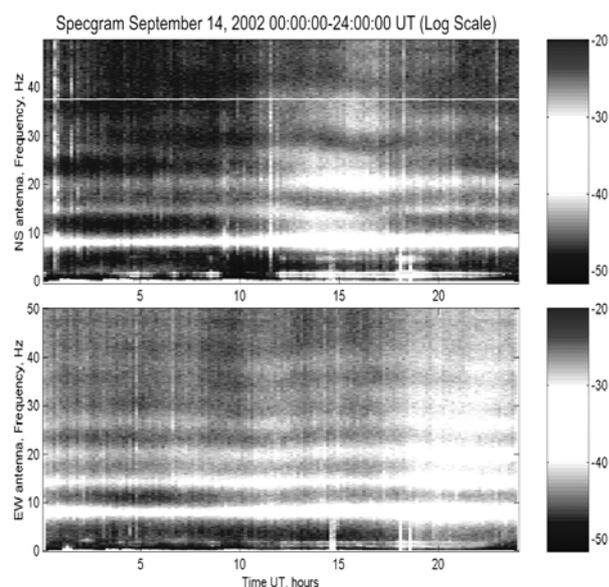


Рис. 1. Спектрограмма резонансного поля в полости Земля–ионосфера (измерения на станции Академик Вернадский). В диапазоне 8–40 Гц видны 5–6 шумановских линий в обоих ортогональных каналах приема магнитной составляющей.

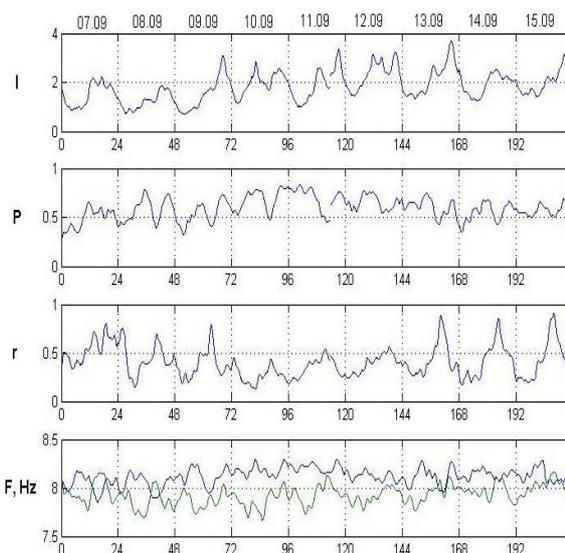


Рис. 2. Вариации параметров поля (первый мод, наблюдения на станции Академик Вернадский) до и после солнечной протонной вспышки 8–11 сентября 2005 г. По горизонтальной оси отложено время в часах от 00:00 LT 7 сентября; на вертикальных шкалах, начиная с верхней панели, представлены: I_p – интенсивность поляризованной компоненты поля, P – поляризационное отношение, r – коэффициент эллиптичности, ψ – угол ориентации большой оси эллипса и f – частота низшего (первого) резонансного мода.

разованное из МГД-волны в нижней ионосфере на границе между плазменной оболочкой и нейтральной атмосферой Земли. Частотный диапазон, в котором распространяются МГД-волны, определяется условием $\omega < \Omega_i$, где Ω_i – гирочастота ионов (в ионосфере $\Omega_i \sim 10^1 - 10^2 \text{ с}^{-1}$). Законы дисперсии для двух «основных» видов МГД-волн таковы: $\omega = k_z V_A = k V_A \cos\theta$ (поперечная альфвеновская волна) и $\omega = k V_A$ (быстрая магнитозвуковая); $V_A = B_0(4\pi N_i M)^{-1/2}$ – альфвеновская скорость. Здесь B_0 – геомагнитное поле; N_i – концентрация ионов, M – масса иона; θ – угол между направлением волны и вектором внешнего магнитного поля. Параметры собственных колебаний, которые устанавливаются вдоль силовой линии в магнитосфере (FLR – field line resonances), определяются профилем альфвеновской скорости V_A и коэффициентами отражения МГД-волн от «концевых зеркал» резонатора. Коэффициент отражения зависит от отношения интегральной проводимости ионосферной плазмы поперек геомагнитного поля к «волновой проводимости» силовой линии, $\Sigma_w = c^2/4\pi V_A$ [10, 11]. Типичные значения Σ_w в невозмущенных условиях – несколько сименсов (10^0 См), а величины поперечных проводимостей имеют порядок 10^{-1} См в ночной ионосфере и 10^1 См днем [10]. Характерные частоты колебаний FLR составляют десятки миллигерц. Они известны как короткопериодные пульсации геомагнитного поля и наблюдаются чаще всего в виде узкополосных, квазисинусоидальных цугов вариаций поля в дневное время. Отражающие свойства ионосфер зависят как от регулярных факторов, таких как сезонные и суточные вариации интенсивности радиационных потоков, падающих в ионосферу, так и от спорадических

проявлений космической погоды. Например, интегральные проводимости плазмы в авроральной ионосфере могут изменяться в 2–3 раза при выпадении энергичных частиц [9]. Величину вариаций частоты, обусловленных изменениями ионосферных параметров, можно оценить, исследуя ее суточный ход в спокойных или возмущенных условиях.

На рис. 3 показан ход частоты геомагнитных пульсаций класса Pc4, измеренных на станции Академик Вернадский в условиях южнополярного лета в январе 2004 г.

Альфвеновский резонатор в ионосфере отличается от МР не только размером и соответственно диапазоном частот, но и качественно, поскольку в нем отсутствует вторая стенка, отражающая волновое поле. «Захват» волн, т. е. формирование дискретного спектра собственных мод в подобных открытых структурах происходит за счет рефракции при наличии соответствующей координатной зависимости коэффициента преломления. Такая зависимость в ИАР обусловлена быстрым ростом альфвеновской скорости между высотами 500–600 и 2000–2500 км.

На экспериментальных спектрограммах электромагнитного шума в диапазоне СНЧ (единицы герц) отклик ИАР виден как несколько узкополосных линий ниже первого шумановского мода (рис. 4). Этот спектр в каждый момент времени почти эквидистантен, расстояние между линиями составляет от 0.5 до 1.5 Гц в зависимости от геофизических условий. Вероятность наблюдения эффекта и интенсивность каждой линии весьма изменчивы. Чаще всего ИАР наблюдается в ночное и переходное время суток как в средних широтах Северного полушария [2], так и в Антарктиде. На станции Академик Вернадский большинство регистраций ИАР относятся к периоду с 16–17 до 04 часов местного времени. Суточная вариация частоты регистрации эффекта антикоррелирует с вариациями критических частот в слоях F, E_s, что соответствует простым теоретическим представлениям [2].

Реакция АР на резкое изменение геофизических условий во время протонной вспышки свидетельствует о его высокой чувствительности как индикатора

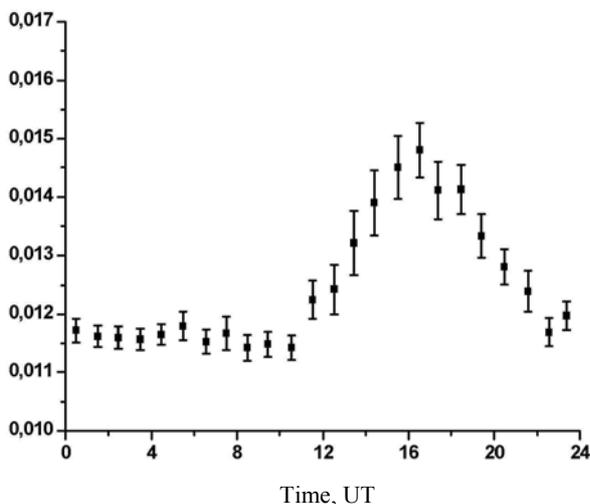


Рис. 3. Суточная вариация частоты пульсаций Pc4 (Гц) на станции Академик Вернадский в январе 2004 г. (южнополярное лето).

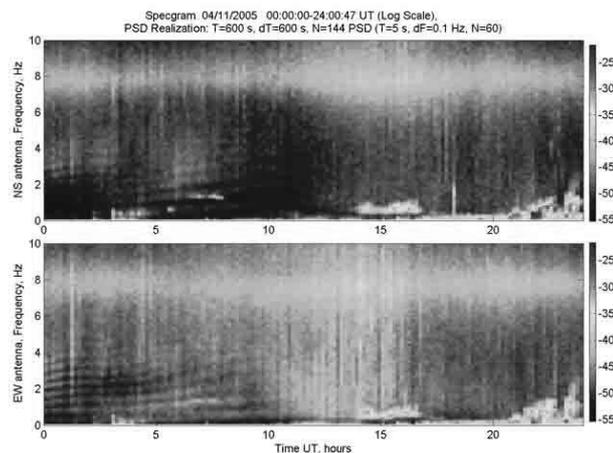


Рис. 4. Динамический спектр наземного отклика на резонансное поле ионосферного альфвеновского резонатора (станция Академик Вернадский, апрель 2005 г.)

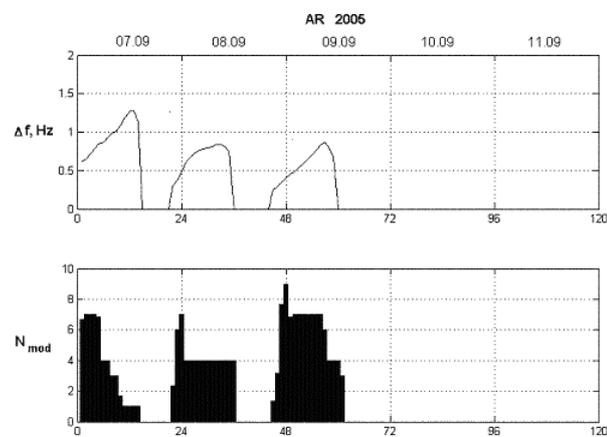


Рис. 5. Зависимость от времени числа наблюдаемых резонансных линий, N и усредненного частотного интервала между линиями ИАР во время протонного события 8–11 сентября 2005 г.

космической погоды. На рис. 5 приведены вариации числа наблюдаемых линий АР и частотного расстояния между ними до и после вспышки 08–11 сентября 2005 г. Максимум потока частиц с энергией > 10 МэВ на высоте геостационарного спутника (1800 p.f.u.) наблюдался 11 сентября 2005 г. Как видно, с приходом энергичных протонов в ионосферу когерентная структура резонансного поля разрушается.

В отношении низкочастотных резонаторов в геокосмосе на сегодня накоплен значительный объем данных о динамике их собственных частот, поляризации и пространственном распределении волновых полей, влиянии различных геофизических факторов на собственные частоты и другие параметры. Отдельно для каждой из структур разработаны подробные теоретические модели. Вместе с тем остается открытым вопрос об электродинамической связи этих резонаторов. Физической причиной, обуславливающей по меньшей мере параметрическую связь околосезных волноведущих образований, является наличие у них общего структурного элемента – нижней ионосферы. В связанных резонаторах изменения космической погоды должны проявляться согласованным образом. Проследить появление коррелированных вариаций их характеристик возможно путем постоянного электромагнитного мони-

торинга в диапазоне, перекрывающем все собственные частоты этих образований, а также построением и анализом адекватных теоретических моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беспалов П.А., Трахтенгерц В.Ю. Альфвеновские мазеры. ИПФ АН СССР. Горький, 1986. 190 с.
2. Поляков С.В., Рапопорт В.О. Ионосферный альфвеновский резонатор // Геомагнетизм и аэрономия. 1981. Т. 21. С. 816.
3. Lysak R.L. Generalized model of the ionospheric Alfvén resonator // Auroral Plasma Dynamics: Geophysical Monograph 80, AGU, 1993. P. 121–128.
4. Polk C. Schumann resonances // CRC Handbook of Atmospherics / Ed. H. Volland CRC Press, Boca Raton, Fla. 1982. V. 1. P. 452–484.
5. Bliokh P.V., Nickolaenko A.P., Filippov Y.F. Schumann resonances in the Earth–ionosphere cavity. Peter Peregrinus, London, 1980.
6. Безродный В.Г. Асимптотическая теория полей шумановских резонансов в гиротропной полости Земля–ионосфера // Радиофизика и радиоастрономия. 2004. Т. 9, № 4.
7. Roldugin V.C., Maltsev Y.P., Petrova G.A., Vasiljev A.N. Decrease of the first Schumann resonance frequency during solar proton events // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. P. 18,555–18,562.
8. Roldugin V.C., Maltsev Y.P., Vasiljev A.N., et al. Schumann resonance frequency increase during solar X-ray bursts // J. Geophys. Res. 2004. V. 109, N A01216, doi:10.1029/2003JA010019.
9. Brekke A., Moen J. Observations of high latitude ionospheric conductances // J. Atm. Solar-Terr. Phys., 1993. V. 55. P. 1493–1512.
10. Ляцкий В.Б., Мальцев Ю.П. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие // М.: Наука, 1983.
11. Sinitsyn V.G., Yampolsky Y.M., Zalizovsky A.V., et al. Spatial field structure and polarization of geomagnetic pulsations in conjugate areas // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 2003. V. 65. P. 1161–1167.

Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkov, Ukraine, sinits@rian.kharkov.ua