

НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

А.В. Колосков, Ю.М. Ямпольский

LOW-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELDS IN THE NEAR-EARTH ENVIRONMENT

A.V. Koloskov, Yu.M. Yampolsky

В лекции проанализированы основные природные и антропогенные факторы, формирующие электромагнитное окружение Земли в ультранизкочастотном (УНЧ) и сверхнизкочастотном (СНЧ) диапазонах. Рассмотрены глобальные электромагнитные резонансы: шумановский (ШР) и ионосферный альфвеновский (ИАР). Продемонстрирована связь УНЧ/СНЧ-сигналов с мировой грозовой активностью, и описан метод восстановления активностей грозовых центров по данным мониторинга сигналов в диапазоне ШР. Изучены морфологические особенности сигналов ИАР, показана их связь с локальным значением критической частоты ионосферы, и предложена методика оценки ее величины по измерениям собственных частот ИАР. Исследованы основные источники УНЧ/СНЧ-сигналов техногенной природы. Приведены результаты мониторинга сигналов промышленных энергосетей на сверхдальних расстояниях. Обсуждается возможность использования этих данных для контроля уровня электромагнитного «загрязнения» в СНЧ-диапазоне волн.

In the lecture the basic natural and anthropogenic factors that form the Earth's electromagnetic environment in the ultra low (ULF) and extremely low frequency (ELF) ranges are analyzed. The global electromagnetic resonances, namely, Schumman (SR) and Ionospheric Alfvén (IAR) are considered. The relationship between ULF/ELF signals and the global thunderstorm activity is shown, and a technique is presented for restoration of the thunderstorm center activity from monitoring of SR signals. Morphological features of IAR signals and their relation to local magnitude of the critical frequency of the ionosphere are analyzed. A technique of estimating the critical frequency of the ionosphere from measured eigenfrequencies of the IAR is suggested. The main sources of ULF/ELF signals of technogenic nature are investigated. Results of the super-long range monitoring of signals from power mains are presented. The possibility of using these data to monitor the level of electromagnetic "pollution" in the ELF range is discussed.

Электромагнитное излучение Земли в диапазоне ультранизких (УНЧ) 0.01–10 Гц и сверхнизких (СНЧ) частот 3–300 Гц формируется преимущественно сигналами и шумами, возбуждаемыми приземными источниками. Основным естественным источником СНЧ-полей является, без сомнения, мировая грозовая активность. Сигналы вертикальных молниевых разрядов возбуждают шумановский резонатор (ШР) – резонансную систему, образованную поверхностью Земли и нижней границей ионосферы [Блиох и др., 1977]. Поскольку ШР имеет глобальный характер, резонансные сигналы несут информацию о мировых грозах, распределенных по поверхности всего земного шара. Как было показано Вильямсом [Williams, 1992], измерения интенсивности сигнала ШР можно использовать для мониторинга мировой грозовой активности и связанных с ней долговременных температурных трендов в экваториальной области. Развитая сотрудником РИ НАНУ д.ф.-м.н. В.Г. Безродным асимптотическая теория полей шумановских резонансов в гиротропной полости Земля-ионосфера [Bezrodny, 2007] продемонстрировала возможность оценки активности каждого из трех мировых грозовых центров по данным поляризационных измерений сигналов ШР. Методика таких расчетов была разработана в РИ НАНУ и используется для обработки СНЧ-данных, получаемых на Украинской антарктической станции (УАС) [Колосков и др., 2005]. Отметим, что поляризационный анализ позволяет исследовать не только интегральный вклад мировых гроз, но и с использованием данных нескольких пространственно-разнесенных обсерваторий производить локацию отдельных сверхмощных молний [Колосков и др., 2004]. Другой резонансной системой Земли, наблюдаемой в УНЧ-диапазоне, является открытый в 70-х гг. прошлого века русскими учеными С.В. Поляковым и В.О. Рапопортом ионо-

сферный альфвеновский резонатор (ИАР) [Поляков, Рапопорт, 1981]. Результаты наших наблюдений и данные других авторов показывают, что параметры сигналов ИАР характеризуются гораздо большей сезонной и суточной изменчивостью, чем у ШР [Baru, Koloskov, 2010]. Определяющим фактором для этих вариаций являются изменения локальных ионосферных условий над пунктом наблюдения, что позволило высказать идею о применимости наблюдений ИАР для ионосферной диагностики [Belyaev et al., 1999]. Например, критическая частота слоя F2 может быть оценена по величине частотного интервала между резонансными пиками ИАР. Методика таких измерений разработана в РИ НАН Украины, а ее достоверность протестирована на большом объеме синхронных измерений на станции ионосферного зондирования и с помощью УНЧ/СНЧ-магнитометра [Бару, Колосков, 2011]. Также УНЧ/СНЧ-сигналы характеризуются гигантской длиной волны, что позволяет им проникать на значительные глубины. Это свойство дает возможность применять УНЧ/СНЧ-излучение для зондирования земных недр и связи с погруженными объектами.

На качество измерений в УНЧ/СНЧ-диапазоне существенное воздействие оказывают промышленные помехи и сигналы от ближних молний. Главным техногенным источником помех является излучение энергосистем, генерирующих, транспортирующих и потребляющих электроэнергию. В промышленно развитых регионах интенсивность помех существенно превосходит уровень природного СНЧ-фона и зачастую делает невозможной регистрацию ШР и ИАР. Поэтому обсерватории по измерению УНЧ/СНЧ-сигналов размещают как можно дальше от промышленных зон. Идеальным местом для проведения измерений являются полярные области, где не только минимален уровень промышленного излучения, но и отсутству-

ют помехи от ближних гроз. В 2002 г. Национальный антарктический центр поддержал инициативу РИ НАНУ по установке на Украинской антарктической станции индукционного СНЧ-магнитометра для мониторинговых измерений ортогональных горизонтальных составляющих магнитного поля в диапазоне 0.3–300 Гц. Для измерений используется отечественная аппаратура, разработанная Львовским центром Института космических исследований НАНУ-НКАУ. В 2005 г. в состав комплекса были добавлены УНЧ-сенсоры, что расширило диапазон рабочих частот до 0.01–300 Гц. С 2007 г. РИ НАНУ также проводит непрерывные измерения УНЧ/СНЧ-полей в Низкочастотной обсерватории (НЧО) вблизи г. Харькова (Украина). Оба измерительных комплекса оборудованы GPS-приемниками для синхронизации данных UT, что позволяет осуществлять взаимную обработку сигналов с разных приемных пунктов. Отметим, что как на УАС, так и в НЧО кроме магнитометров установлена также аппаратура для диагностики состояния атмосферы и ионосферы (метеостанция, ионозонд, GPS/ТЕС-приемник, доплеровские приемные комплексы ВЧ-диапазона), обеспечивающая комплексную диагностику состояния геокосмоса в обоих пунктах.

Предварительный анализ УНЧ/СНЧ-данных производится непосредственно на пунктах наблюдения. Сигналы подвергаются процедуре спектральной и поляризационной обработки по методике, изложенной в работе [Колосков и др., 2005]. Суть обработки состоит в следующем. Суточные реализации разбиваются на интервалы длительностью dT , для каждого из которых рассчитываются усредненные энергетические (S_{xx} , S_{yy}) и взаимные (S_{xy}) спектры ортогональных горизонтальных составляющих магнитного поля согласно выражению

$$S_{ik}(f) = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N \tilde{H}_i^{(p)}(f) \tilde{H}_k^{(p)*}(f), \quad (1)$$

где $i, k = x, y$.

Входящие в (1) комплексные «мгновенные» спектры $\tilde{H}_{i,k}^{(p)}(f)$ соответствуют временным интервалам $(p-1)T \leq t \leq pT$; $p = 1, 2, \dots, N$, $N \cdot T = dT$, и определяются на основании соотношения

$$\tilde{H}_{i,k}^{(p)}(f) = \frac{1}{T} \int_{(p-1)T}^{pT} dt H_{i,k}(t) e^{-i2\pi ft}. \quad (2)$$

В зависимости от типа исследуемого процесса (ШР, ИАР, антропогенный источник сигналов) выбираются времена усреднения от 10 до 120 мин и частотные разрешения от 0.01 до 1 Гц. Затем рассчитываются параметры Стокса:

$$\begin{aligned} I(f) &\equiv S_{xx}(f) + S_{yy}(f), \\ Q(f) &\equiv S_{xx}(f) - S_{yy}(f), \\ U(f) &\equiv 2 \operatorname{Re} S_{xy}(f), \\ V(f) &\equiv 2 \operatorname{Im} S_{xy}(f), \end{aligned} \quad (3)$$

которые в дальнейшем используются для вычисления поляризационных параметров: коэффициента

эллиптичности $r(f)$, позиционного угла эллипса поляризации $\Psi(f)$, интенсивности поляризованной компоненты $I_p(f)$ и степени поляризации $P(f)$:

$$r = \frac{V}{\sqrt{Q^2 + U^2} + \sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}, \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \sin(2\Psi) \\ \cos(2\Psi) \end{aligned} \right\} = \frac{1}{\sqrt{Q^2 + U^2}} \begin{cases} U \\ Q \end{cases}, \quad (5)$$

$$I_p = \sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}, \quad (6)$$

$$P = I_p / I. \quad (7)$$

Таким образом, каждые сутки генерируются ряды спектральных и поляризационных параметров сигналов с разным частотным разрешением и временем усреднения, которые в дальнейшем используются для восстановления характеристик ШР, ИАР и антропогенных сигналов по методикам, изложенным в работах [Колосков и др., 2004, 2005; Бару, Колосков, 2011]. На рис. 1 представлена типичная суточная спектрограмма естественных УНЧ/СНЧ-шумов. Спектральные максимумы на частотах 8, 14, 21 Гц и далее соответствуют пикам ШР, а резонансная структура спектров (РСС), проявляющаяся на частотах 0.1–20 Гц, формируется благодаря ИАР.

Анализ спектральных и поляризационных свойств сигналов ШР показал наличие устойчивых суточных зависимостей. Их характер обусловлен существованием трех экваториальных грозовых центров, кульминирующих в послеполуночные часы местного времени [Блиох и др., 1977]. На рис. 2, а показан усредненный за месяц суточный ход поляризованной части интенсивности трех мод ШР по данным измерений на УАС. Для первой и третьей моды хорошо видны три максимума, соответствующие азиатскому, африканскому и американскому грозовым центрам (для 2-й моды африканский центр находится в минимуме интерференционной картины и сигнал для него отсутствует). Расчеты позиционного угла эллипса поляризации сигналов (рис. 2, б) позволяют оценить пеленг на источник (рис. 2, в), который для каждого из максимумов соответствует направлению на соответствующий грозовой центр. Наблюдения, выполненные на УАС, демонстрируют

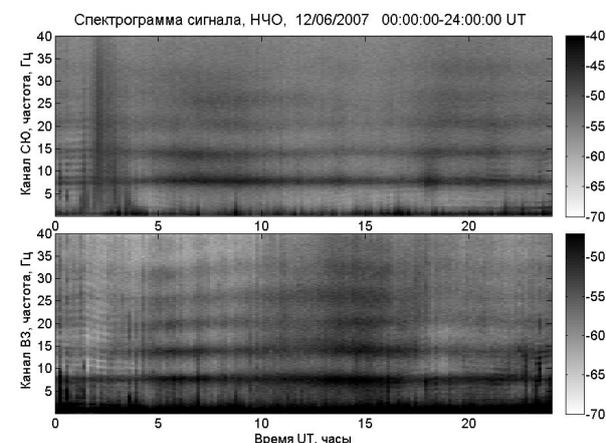


Рис. 1. Суточная спектрограмма естественных УНЧ/СНЧ-шумов (НЧО).

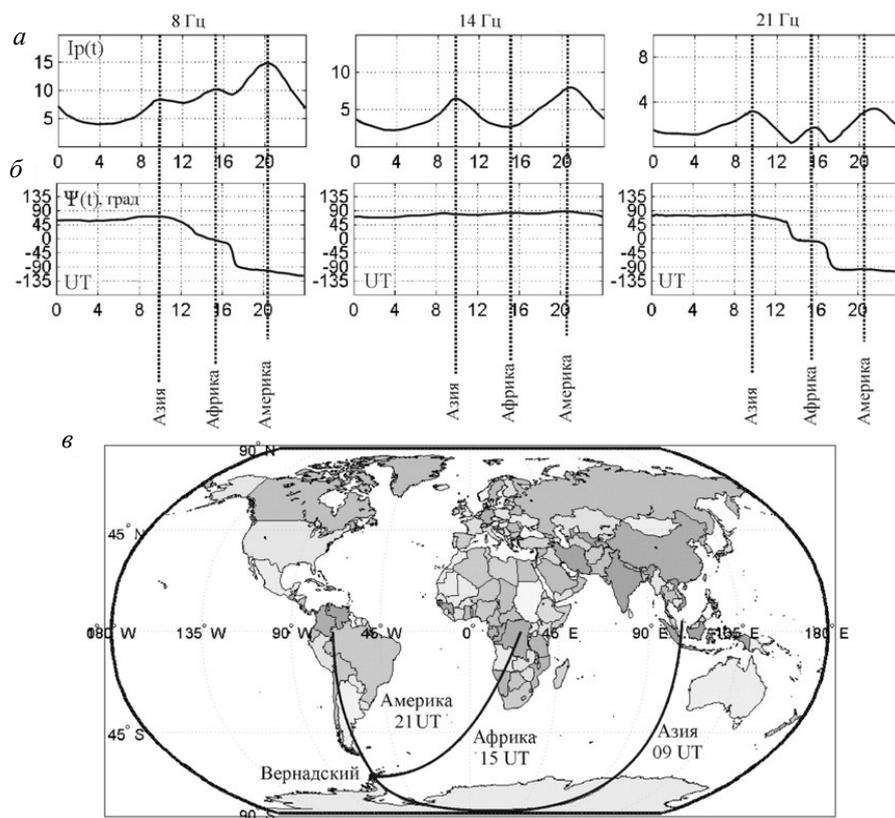


Рис. 2. Суточная зависимость $I_p(t)$ для трех мод ШР, октябрь 2009 г. (а); суточная зависимость $\Psi(t)$, октябрь 2009 г. (б); карта расположения мировых грозовых центров (в).

также наличие сезонных закономерностей в поведении интенсивности грозовых центров. Для иллюстрации на рис. 3, а изображены графики общей активности мировых гроз, активности африканского центра, и суммарной активности азиатского и американского грозовых центров, рассчитанные для 2008, 2009 гг. Вычисления выполнены в соответствии с методикой, изложенной в работе [Колосков и др., 2005]. На рис. 3, б приведены оценки сезонного хода активности, полученные во время кульминации каждого из центров, что позволило разделить вклад от находящихся на одной дуге большого круга азиатского и американского центров. Из рисунков видно, что для каждого из центров наблюдаются сравнительно устойчивые сезонные вариации активности. В то же время суммарная интенсивность мировых гроз остается достаточно стабильной в течение всего года и достоверных многолетних трендов активности выявлено не было. Одной из возможностей для улучшения точности оценок долговременного хода грозовой активности и поиска трендов, связанных с глобальными изменениями климата, является привлечение для анализа данных, получаемых синхронно в разных пунктах наблюдения. Результаты расчетов свидетельствуют, что активности, рассчитанные по данным НЧО (Украина), качественно соответствуют вычисленным для УАС (Антарктида). В то же время данные НЧО, особенно в летние месяцы, существенно искажены помехами от ближних гроз, что не позволяет напрямую использовать их для уточнения расчетов активностей. В настоящее время в РИ НА-НУ разрабатываются методики селекции сигналов

от помех, которые позволят улучшить качество данных. Другая возможность улучшения точности расчетов заключается в использовании более адекватных моделей источников, учитывающих их сезонный дрейф вдоль широты и распределенный, а не точечный характер. Наконец, с 2010 г. измерения УНЧ/СНЧ-полей начаты на обсерватории ИСЗФ СО РАН вблизи Иркутска. Отметим, что долгота УАС близка к долготе американского, НЧО к долготе африканского, а Иркутска к долготе азиатского мирового грозового центра. Таким образом, кооперация с российскими коллегами позволит проводить синхронные наблюдения в трех пространственно разнесенных пунктах, достаточно удачно расположенных относительно грозовых центров, что должно улучшить качество восстановления мировой грозовой активности.

Другой резонансной системой, приводящей к возникновению резонансных структур спектра V (PCC) УНЧ/СНЧ, является ионосферный альфвеновский резонатор. ИАР – это резонансная система для магнитогидродинамических альфвеновских волн, распространяющихся на высотах F2-области вдоль силовой трубки геомагнитного поля. Сверху резонансная полость ограничена верхней частью F-области, характеризующейся уменьшением электронной концентрации и соответственно ростом характерной скорости МГД-волн. Нижняя граница резонатора соответствует высоте нижней ионосферы и совпадает с верхней границей шумановского резонатора, что обуславливает структурную связь резонансных систем и возможность возникновения коррелированных вариаций

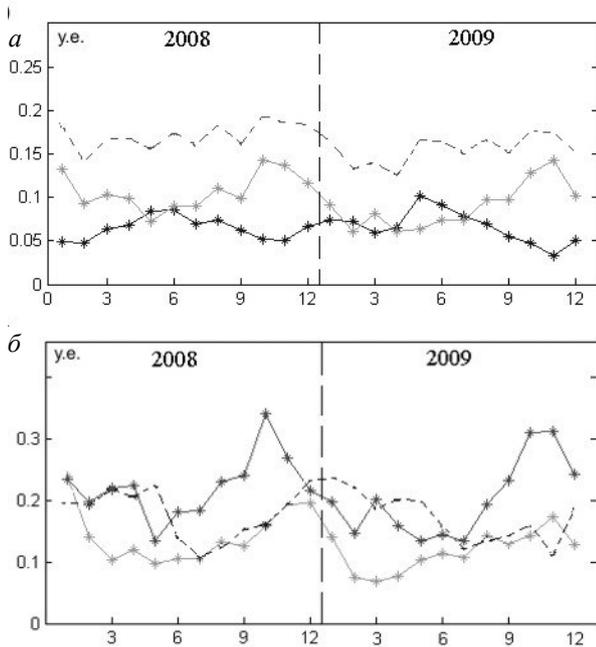


Рис. 3. Среднемесячная активность мировых грозовых центров за 2008, 2009 гг.: суммарная активность (штриховая кривая); африканский центр (черная кривая); азиатский и американский центр (серая кривая) (а); среднемесячная активность, рассчитанная для моментов кульминации источников: американский центр (черная кривая); африканский центр (штриховая кривая); азиатский центр (серая кривая) (б).

ций параметров поля при резких изменениях внешних условий, например во время геофизических возмущений. В отличие от ШР, РСС, вызванные ИАР, существуют не постоянно. Вероятность их появления ночью существенно больше, чем днем. Известно также, что наблюдаемость РСС возрастает в минимуме солнечного цикла и существенно уменьшается в период максимума [Belyaev et al., 2000]. Для исследования морфологических характеристик ИАР нами был обработан годовой интервал непрерывных наблюдений УНЧ-шумов вблизи минимума солнечного цикла (ноябрь 2007–ноябрь 2008 г.), выполненных в Антарктиде (УАС) и в Украине (НЧО). Анализировались среднесуточный ход вероятности (т.е. относительной частоты) регистрации линий РСС в зависимости от сезона и частотный разнос между линиями dF . На рис. 4 а, б представлены суточные зависимости для всего года. Слева приведены данные для УАС, справа для НЧО. Видно, что РСС чаще регистрируются на УАС (средняя за год вероятность регистрации 0.40), чем в НЧО (средняя вероятность регистрации 0.16). Максимум вероятности приходится на 5 UT на УАС и на 21 UT в НЧО, что соответствует местной полуночи. В обоих пунктах наблюдается рост вероятности регистрации ночью с последующим ее уменьшением в дневные часы, однако на УАС РСС регистрируются в течение всех суток, а в НЧО только в ночные часы. На рис. 4, в, г представлены среднесуточные зависимости для различных сезонов. В среднем местной зимой вероятность регистрации РСС больше, чем летом. При этом сезонные различия наблюдаемости РСС более явно выражены на УАС. Местной зимой для этого

пункта вероятность регистрации РСС наиболее высока и слабо зависит от времени суток. Весной вероятность регистрации резко уменьшается и достигает минимума летом, когда РСС наблюдаются только в ночные часы. Осенью наблюдаемость РСС вновь возрастает и они, как и зимой, регистрируются круглосуточно. В НЧО сезонные различия менее заметны. Как и для УАС, вероятность регистрации РСС в НЧО зимой максимальна, однако днем линии отсутствуют в течение всех сезонов года. Анализ зависимости для dF показал, что эта величина определяется в основном критической частотой над пунктом наблюдения. Действительно, для оценки разницы частот между резонансными модами РСС может быть использовано следующее выражение [Беляев и др., 1989]:

$$dF = \frac{c}{2 n_A L}, \quad (8)$$

где c – скорость света; $L=h+l$ – линейный размер резонатора, состоящий из толщины главного ионосферного максимума h и характерного масштаба спада альфвеновского показателя преломления выше максимума слоя F2 l ; n_A – альфвеновский показатель преломления в максимуме слоя F2, рассчитываемый как

$$n_A = \frac{c\sqrt{4\pi\rho}}{B_0} \propto \sqrt{M_{\text{eff}} N_{e\text{max}}}. \quad (9)$$

Здесь: B_0 – напряженность магнитного поля Земли; ρ и $N_{e\text{max}}$ – плотность плазмы и электронная концентрация на высоте максимума; M_{eff} – эффективная масса ионов. В свою очередь, электронная концентрация зависит от плазменной частоты f_p по квадратичному закону:

$$N_e = 0.0124 \cdot f_p^2. \quad (10)$$

Анализ выражений (8)–(10) позволяет считать, что величина dF обратно пропорциональна критической частоте в максимуме слоя F2 f_0F2 и ввести соответствующее эмпирическое выражение для оценки f_0F2 . При вычислении параметров для модельной зависимости $f_0F2 = f(dF)$ были использованы данные синхронных изменений dF и результаты ионосферного зондирования, полученные на УАС за годовой период. Модель была использована для оценки критической частоты слоя F2 по данным УНЧ-наблюдений РСС. Затем было проведено сопоставление с данными ионозонда. Результат сравнения (для восьми суток с 15 по 22 ноября 2008 г.) показан на рис. 5. Коэффициент корреляции между расчетной и экспериментальной кривыми равен 0.8, что позволяет использовать данные наблюдений РСС для оценки критической частоты ионосферы. Отметим, что данная методика позволяет не только оценивать регулярную величину f_0F2 , но и диагностировать ее квазипериодические вариации, связанные с наличием над пунктом наблюдения перемещающихся ионосферных возмущений.

Как уже отмечалось ранее, интенсивность УНЧ/СНЧ-излучения местных силовых сетей является основной техногенной помехой и, как прави-

ло, превосходит уровень естественного фона. В то же время в известной авторам литературе отсутствуют данные систематических экспериментальных исследований распространения фундаментальной гармоники силовой сети (50 либо 60 Гц) на сверхдальние расстояния. Эксперименты по регистрации распространения сетевой гармоники 60 Гц регулярно выполняются на УАС (на частоте 50 Гц наблюдения затруднены из-за излучения местной силовой сети станции). Для выделения сетевых гармоник анализировались средние спектры шумов в полосе 59–61 Гц с частотным разрешением 0.01 Гц и временем усреднения 120 мин. При таких параметрах обработки на частоте 60 Гц уверенно регистрируется узкополосный (несколько сотых герца) спектральный максимум [Колосков, Ямпольский, 2009]. Анализ данных за годовой период показал, что по-

ляризация сигнала близка линейной (коэффициент эллиптичности не превосходит 0.2), а среднегодовое и среднемесячные значения азимута источника не выходят за пределы сектора углов на объединенную энергосистему Востока США (Eastern Interconnection), где генерируется около 54 % от мирового производства электроэнергии с частотой 60 Гц. Это свидетельствует о генерации линии энергосистемой США. На рис. 6 мощность производства энергии объединенной энергосистемой Востока США (штриховая линия) за недельный период сопоставлена с интенсивностью линии 60 Гц по данным наблюдений на УАС (сплошная кривая). Обе зависимости демонстрируют высокое подобие. Величина коэффициента взаимной корреляции между интенсивностью линии и кривой энергопроизводства равна 0.92. Для обеих кривых хорошо прослеживаются

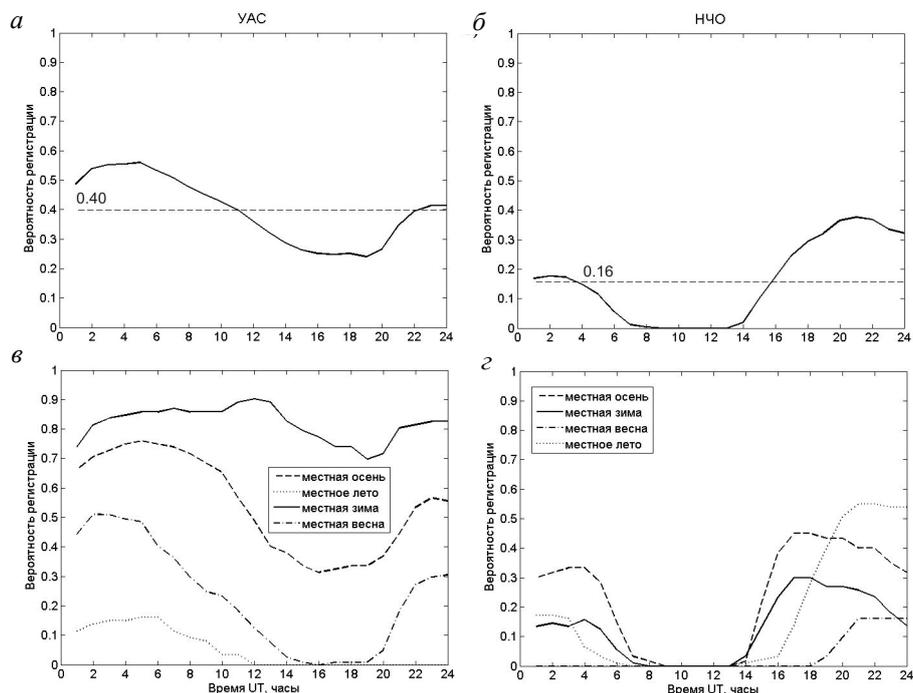


Рис. 4. Суточный ход вероятности регистрации РСС: УАС, годовое усреднение (штриховая линия соответствует среднесуточному значению) (а); НЧО, годовое усреднение (штриховая линия соответствует среднесуточному значению) (б); УАС, усреднение по сезонам (в); НЧО, усреднение по сезонам (з).

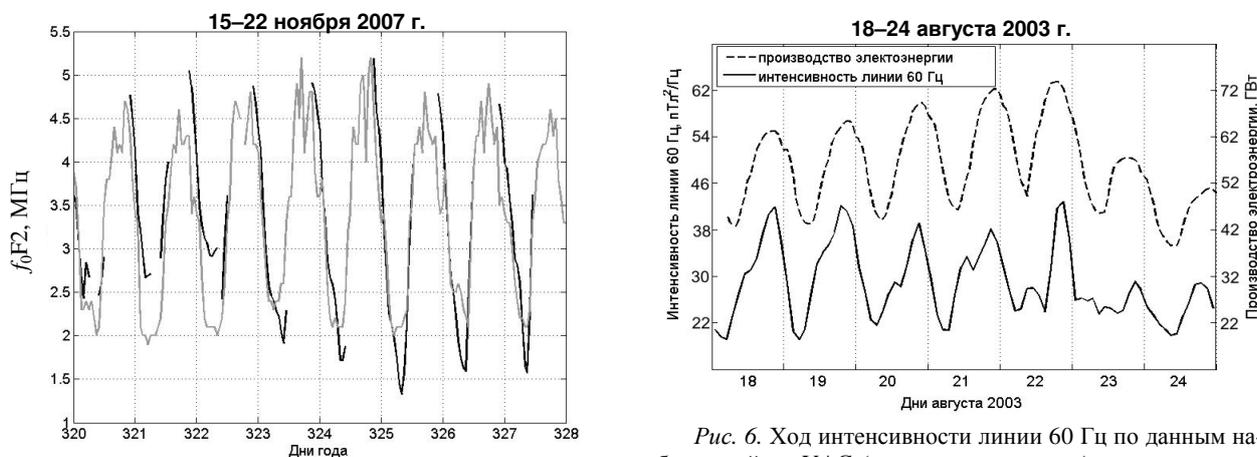


Рис. 5. Критическая частота слоя F2 ионосферы, измеренная ионозондом (серая кривая) и рассчитанная по данным наблюдений РСС (черная кривая).

Рис. 6. Ход интенсивности линии 60 Гц по данным наблюдений на УАС (непрерывная кривая) совместно с зависимостью производства электроэнергии энергосистемой PJM (штриховая кривая) для недельного интервала 18–24 августа 2003 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

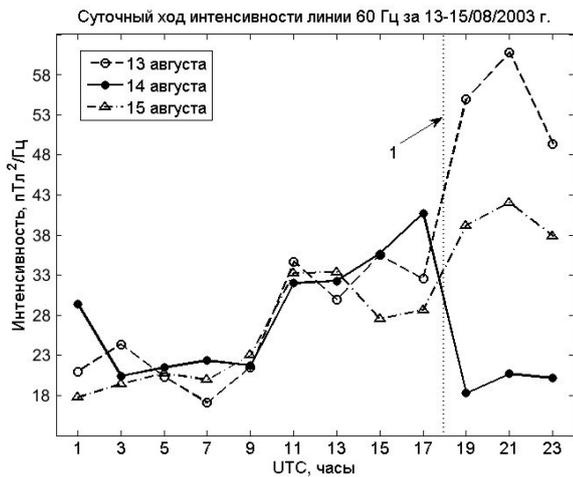


Рис. 7. Суточные зависимости интенсивности линии 60 Гц для 13–15 августа 2003 г. Пунктирная вертикальная линия 1 соответствует началу аварийных отключений в энергосистеме США–Канады 14 августа 2003 г.

суточная и недельная периодичности. Максимумы соответствуют вечерним часам по местному времени источника ($LT=UTC-4$). Минимумы приходятся на ночные и утренние часы. В продемонстрированной недельной зависимости (18–24 августа) отчетливо наблюдается уменьшение интенсивности в воскресные дни (23–24 августа) – «эффект конца недели». На рис. 7 показаны суточные кривые интенсивности линии 60 Гц по данным регистрации на УАС во время масштабной аварии в системе энергоснабжения на северо-востоке США 14–15 августа 2003 г. Отключения электросетей начались около 18 ч, авария продолжалась почти сутки. Изображенные зависимости демонстрируют, что после начала аварийных отключений произошло резкое уменьшение интенсивности излучения на частоте 60 Гц. Вместо главного суточного максимума, который хорошо прослеживается для 13 и 15 августа, наблюдался минимум интенсивности.

Приведенные результаты показывают, что рассмотренные методики спектрального и поляризационного анализа сигналов УНЧ/СНЧ-диапазона естественной и техногенной природы могут быть эффективным способом диагностики процессов в геокосмосе. При этом могут быть как исследованы условия на трассе распространения и характеристики ионосферы над пунктами наблюдения, так и восстановлены свойства источников сигналов. Авторы выражают признательность д.ф.-м.н. Безродному и другим сотрудникам отдела радиофизики геокосмоса РИ НАНУ за помощь при обработке и интерпретации данных, а также за полезные дискуссии при подготовке лекции. Работа выполнена при поддержке НТР «Гелео-макс» (НАНУ).

Бару А.Н., Колосков А.В. Диагностика параметров ионосферы по данным мониторинга ионосферного альфвеновского резонанса // 11-я Украинская конференция по космическим исследованиям. Сборник тезисов. Евпатория. 2011. С. 17.

Беляев П.П., Поляков С.В., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю. Теория формирования резонансной структуры спектра атмосферного электромагнитного шумового фона в диапазоне короткопериодных геомагнитных пульсаций // Известия вузов. Радиофизика. 1989. Т. 32, № 7. С. 802–810.

Блиох П.В., Николаенко А.П., Филиппов Ю.Ф. Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля–ионосфера. Киев: Наукова Думка, 1977. 199 с.

Колосков А.В., Буданов О.В., Безродный В.Г., Ямпольский Ю.М. Определение местоположения сверхмощных молниевых разрядов на основе поляризационных магнитных измерений в диапазоне шумановских резонансов // Радиофизика и радиоастрономия. 2004. Т. 9, № 4. С. 391–403.

Колосков А.В., Безродный В.Г., Буданов О.В. и др. Поляризационный мониторинг шумановских резонансов в Антарктике и восстановление характеристик мировой грозовой активности // Радиофизика и радиоастрономия. 2005. Т. 10, № 1. С. 11–29.

Колосков А.В., Ямпольский Ю.М. Наблюдения излучения энергосистем Североамериканского континента в Антарктике // Радиофизика и радиоастрономия. 2009. Т. 14, № 4. С. 367–376.

Поляков С.В., Рапопорт В.О. Ионосферный альфвеновский резонатор // Геомагнетизм и аэрономия. 1981. Т. 21, № 5. С. 816–822.

Baru A.N., Koloskov A.V. Synchronous observations of the spectral structure of Ionospheric Alfvén resonances in Ukraine and in the Antarctic Peninsula region // 10th Ukrainian Conference on Space Research, Yevpatoria, Crimea. 2010. P. 80.

Belyaev P.P., Bosinger T., Isaev S.V., Kangas J. First evidence at high latitudes for the ionospheric Alfvén resonator // J. Geophys. Res. V. 104, N A3. 1999. P. 4305–4317.

Belyaev P.P., Polyakov S.V., Ermakova E.N., Isaev S.V. Solar cycle variations in the ionospheric Alfvén resonator 1985–1995 // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2000. V. 62, N 4. P. 239–248.

Bezrodny V.G. Magnetic polarization of the Schumann resonances: An asymptotic theory // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2007. V. 69, N 9. P. 995–1008. doi: 10.1016/j.jastp.2007.03.007.

Williams E.R. The Schumann resonance: A global tropical thermometer // Science. 1992. V. 256, N 5060. P. 1184–1187. doi: 10.1126/science.256.5060.1184.

Радиоастрономический институт НАН Украины, Харьков, Украина