

Наблюдения излучения энергосистем Североамериканского континента в Антарктике

А. В. Колосков, Ю. М. Ямпольский

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: koloskov@rian.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 18 марта 2009 г.

Проанализированы годовые данные (с марта 2003 г. по февраль 2004 г.) непрерывных измерений излучения энергосистем Североамериканского континента, принимаемого на Украинской антарктической станции “Академик Вернадский”. Изучены записи вариаций горизонтальных магнитных компонент сигналов вблизи первой сетевой гармоники 60 Гц. Показано, что регистрируемое излучение не является местной помехой, а генерируется в северном полушарии. Проанализированы суточные и сезонные вариации спектральных и поляризационных параметров основной сетевой гармоники и широкополосного СНЧ фона. Установлена высокая степень корреляции интенсивности спектральной линии 60 Гц с суточным циклом генерирования объединенной энергосистемы США и Канады. Зарегистрировано систематическое уменьшение интенсивности линии в воскресные дни (“эффект конца недели”), подробно рассмотрена крупная авария в энергосистеме США и Канада 14 августа 2003 г. Показана возможность использования данных СНЧ мониторинга для контроля электромагнитного загрязнения Антарктики излучением энергосетей промышленно развитых регионов земного шара.

1. Введение

Известно, что одним из главных источников техногенных помех в СНЧ диапазоне электромагнитных волн (3 ÷ 300 Гц) является “паразитное” излучение энергосистем, генерирующих, транспортирующих и потребляющих электроэнергию. Частоты основных гармоник электросистем в восточном полушарии составляют 50 Гц, а в западном – 60 Гц. Основные генерирующие станции и большинство потребителей расположены в среднеширотном поясе северного полушария. Энергия, производимая всеми электростанциями на земном шаре за год, составляет порядка 18.2 ТВт·ч ($6.5 \cdot 10^{16}$ Дж). Примерно 60 % производимой электроэнергии приходится на евроазиатский регион с частотой сети 50 Гц. Североамериканский континент, Бразилия и Япония производят и транспортируют электроэнергию

на частоте 60 Гц. Большинство потерь электроэнергии на излучение происходит при ее транспортировке в магистральных линиях электропередач. В соответствии со средними оценками они составляют примерно 0.1 %. Таким образом, приближенно можно считать, что в СНЧ диапазоне на Земле непрерывно “работает” распределенная сеть излучающих “передатчиков” с ежегодным энерговыделением порядка $6.5 \cdot 10^{13}$ Дж <<http://earthtrends.wri.org>>. И хотя эффективность излучения в этом частотном диапазоне крайне низка, электромагнитные сигналы на частотах 50 и 60 Гц и их гармониках распространяются на глобальные расстояния в волноводном канале Земля–ионосфера с малыми потерями и могут быть зарегистрированы в любом регионе земного шара. Сигналы гармоник устойчиво наблюдаются на расстояниях до несколько десятков – сотен километров от источника, распространяясь, по-видимому,

поверхностной волной [1, 2]. В литературе описаны также случаи регистрации спектральных линий с частотным разносом, равным или близким к 50 и 60 Гц, на значительных удалениях (тысячи километров) от областей энергопроизводства и линий электропередач. Высшие гармоники наблюдаются преимущественно в СНЧ диапазоне на частотах от десятых килогерца до нескольких килогерц. Мощные производители и потребители электроэнергии за счет нелинейности входных и выходных устройств могут “запитывать” магнитосферный канал для распространения высших гармоник энергосетей. Свидетельством этому являются наблюдения на поверхности Земли [3-5] и на борту космических аппаратов [6, 7] периодических последовательностей спектральных линий. Известны случаи синхронного обнаружения подобных сигналов на земной поверхности и в космическом пространстве [8]. В то же время в большом числе наблюдений спектральные линии регистрируются эпизодически, а частотный разнос между ними отличается от 50/100 и 60/120 Гц [9, 10], что не позволяет достоверно связать такие сигналы с излучением энергосетей. Некоторые авторы [11] регистрируют понижение вероятности наблюдения линий в выходные дни по сравнению с рабочими, что связывается с известным эффектом уменьшения энергопроизводства (“эффект конца недели”). Другие исследователи свидетельствуют, что проявление “эффекта конца недели” при наблюдении линий не является статистически достоверным [12, 13]. Имеются данные об увеличении амплитуды наблюдаемых линий [7] и уменьшении вероятности их регистрации [6] с ростом уровня геомагнитной активности. В известной авторам литературе отсутствуют данные систематических экспериментальных исследований распространения фундаментальной гармоники силовой сети (50 либо 60 Гц) на значительные расстояния (более 10 000 км). Это, по-видимому, вызвано сложностью выделения СНЧ сигналов удаленных силовых сетей на фоне местных помех техногенного и природного происхождения. В то же время подобные измерения являются полезными как с точки зрения дистанционного контроля источника, так и для

решения задачи диагностики условий на трассе распространения СНЧ сигналов. Для обнаружения априорно слабых излучений удаленных силовых энергосетей целесообразно размещать приемный пункт в зонах с минимальным уровнем техногенных и природных шумов. Такому критерию удовлетворяет СНЧ обсерватория, размещенная на Украинской антарктической станции (УАС) “Академик Вернадский”, на которой с 2002 г. осуществляется непрерывный мониторинг излучения в СНЧ диапазоне. В ходе систематических наблюдений на УАС устойчиво зарегистрирована узкополосная линия на частоте 60 Гц [14]. Выполнен анализ энергетических, спектральных и поляризационных характеристик излучения удаленных электросетей, проведено их сопоставление с независимыми показателями энергопроизводства на Североамериканском континенте. В работе получены подтверждения того, что источником излучения линии 60 Гц, наблюдаемой на УАС, является энергосистема США и Канады, зарегистрирована крупная авария в этой системе 14 августа 2003 г.

2. Используемая аппаратура и методика наблюдений

Непрерывные круглосуточные СНЧ измерения на УАС (координаты: 65°14'45" ю. ш., 64°15'27" з. д.) осуществляются с февраля 2002 г. Регистрации выполняются с помощью магнитометра LEM112A, изготовленного Львовским центром Института космических исследований НАНУ – НККАУ <<http://www.isr.lviv.ua/products.htm>>. Устройство состоит из двух идентичных магнитных датчиков индукционного типа с низким уровнем собственных шумов (0.1 пТл/Гц^{1/2}) и компьютерной системы управления и регистрации. Различия амплитудно-частотных характеристик зондов в пределах полосы анализа не превышают 1 %. Датчики расположены в горизонтальной плоскости и ориентированы в двух ортогональных направлениях: один вдоль географического меридиана (канал юг–север, ЮС), другой вдоль параллели (канал запад–восток, ЗВ). Синхронизация времени обеспечивается системой GPS. Для уменьшения возможных пара-

зитных наводок СНЧ оборудование размещено на расстоянии около полукилометра от основных зданий станции. Измерительный комплекс проводит цифровую регистрацию волновых форм вариаций магнитного поля в диапазоне частот $0.3 \div 300$ Гц. Выбор диапазона регистрации обусловлен тем, что, кроме анализа характеристик шумановских [15, 16] и альфвеновских [17] резонансов, осуществлялась локация сверхмощных молниевых разрядов [18] и решалась задача обнаружения гармоник удаленных энергетических сетей [14].

Предварительная обработка данных выполнялась непосредственно на станции. Она включала построение суточных спектрограмм сигнала в диапазоне шумановских и альфвеновских резонансов ($0 \div 50$ Гц) и определение поляризационных характеристик трех первых шумановских мод (подробнее см., [15]). Исследование “паразитных” излучений мировых энергосистем проводилось вблизи частоты 60 Гц, поскольку дизель-генератор на УАС работал на частоте 50 Гц и создавал мощную местную помеху, не позволявшую проводить анализ излучения удаленных источников на этой частоте. Для выделения сетевых гармоник анализировались средние спектры шумов в полосе $59 \div 61$ Гц с частотным разреше-

нием 0.01 Гц. Текущие спектры вычислялись по единичным реализациям длительностью 100 с, усреднение проводилось по двухчасовым интервалам. На рис. 1. в качестве примера в режиме “водопада” представлена характерная суточная спектрограмма сигнала в канале ЗВ магнитометра.

Как видно из рисунка, на частоте 60 Гц уверенно регистрируется узкополосный спектральный максимум с хорошим превышением уровня шумов. Для исключения возможности генерирования этих сигналов местным станционным оборудованием был проведен специальный контрольный эксперимент по регистрации сигналов на удалении 12 км от станции. С 30.01.2003 г. по 01.02.2003 г. магнитометр был вывезен в аварийный павильон на острове Расмуссен (координаты: $65^{\circ}14'45''$ ю. ш., $64^{\circ}05'04''$ з. д.), где отсутствовали какие-либо источники электромагнитного излучения. Электропитание магнитометра осуществлялось от аккумуляторных батарей. Анализ спектров сигналов показал, что интенсивность излучения силовой сети станции 50 Гц уменьшилась на величину порядка 25 дБ, максимумы на частотах не кратных 50 и 60 Гц не наблюдались. В то же время интенсивность спектральной линии 60 Гц осталась на прежнем

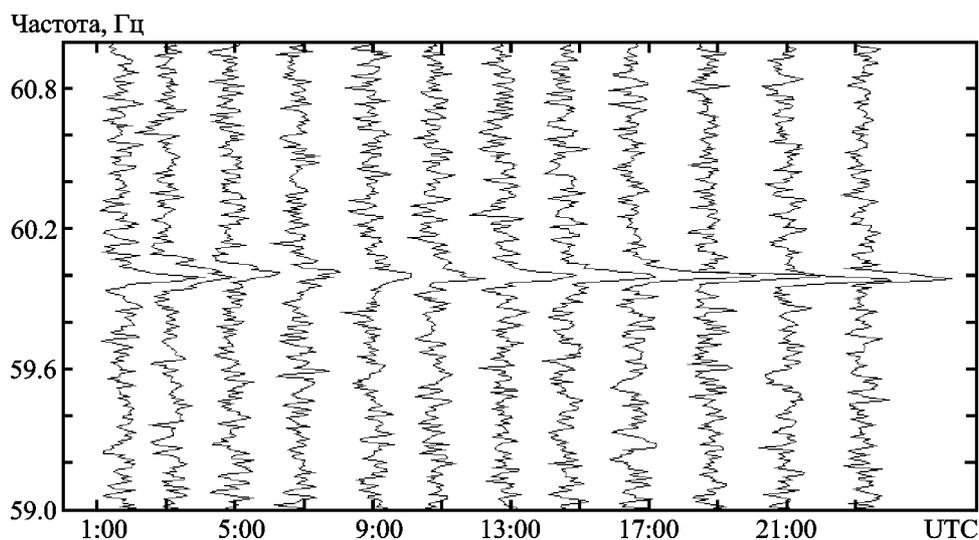


Рис. 1. Средние спектры сигнала для 18 июля 2003 г. в канале З-В. Время накопления каждого спектра – 2 ч, разрешение по частоте – 0.01 Гц

уровне. Это обстоятельство позволило убедиться в том, что излучение на частоте 60 Гц обусловлено удаленными источниками.

3. Результаты обработки и их обсуждение

Для подробного анализа поведения спектрального максимума на частоте 60 Гц был выбран годичный временной интервал непрерывных наблюдений с 01.03.2003 г. по 29.02.2004 г. Анализ спектрограмм сигнала показал, что линия 60 Гц регистрировалась ежедневно и превышала фон на 2 ÷ 5 дБ. Максимальный уровень сигнала наблюдался в канале ЗВ. Ширина спектральной линии по уровню половинной мощности не превышала одной десятой герца. Обработка данных включала этапы спектрального и поляризационного анализа. На первом этапе обработки непрерывные суточные записи разбивались на временные интервалы длительностью по 2 ч. Для каждого двухчасового интервала строились средние комплексные спектры сигналов для обеих ортогональных компонент вариаций магнитного поля. Спектры с разрешением по частоте 0.01 Гц использовались для обнаружения узкополосной линии и оценки ее интенсивности. Разрешение 0.1 Гц применялось для вычисления поляризационных параметров и дальнейшего решения пеленгационной задачи. Поляризационная обработка была основана на вычислении параметров Стокса электромагнитного поля [19] и осуществлялась по методике, изложенной в [15]. При расчетах использовались значения средних энергетических спектров $S_{xx}(f)$, $S_{yy}(f)$, а также модуля $S_{xy}(f)$ и фазы $\delta_{xy}(f)$ среднего взаимного спектра (здесь x соответствует каналу ЮС, а y – ЗВ). Параметры Стокса рассчитывались по формулам [15]:

$$\begin{aligned} I(f) &\equiv S_{xx}(f) + S_{yy}(f), \\ Q(f) &\equiv S_{xx}(f) - S_{yy}(f), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} U(f) &\equiv 2S_{xy}(f) \cos \delta_{xy}(f), \\ V(f) &\equiv 2S_{xy}(f) \sin \delta_{xy}(f). \end{aligned}$$

Для каждого двухчасового интервала анализа принималось решение об обнаружении линии. Линия считалась обнаруженной в случае, когда величина максимума суммарной спектральной интенсивности $(1) I_{60} = I(f)|_{f=60 \text{ Гц}}$ в 2 и более раза превосходила интенсивность шумового фона в полосе частот 59 ÷ 61 Гц. Интенсивность фона I_b оценивалась как среднее значение суммарной спектральной интенсивности в полосе частот 59 ÷ 61 Гц, исключая спектральные составляющие узкополосной “полезной” линии. Для временных интервалов, на которых линия считалась обнаруженной, кроме ее интенсивности I_{60} , вычислялись значения коэффициента эллиптичности r_{60} и позиционного угла эллипса поляризации Ψ_{60} [15]:

$$\begin{aligned} r_{60} &= \\ &= \frac{V(f)}{\sqrt{Q^2(f) + U^2(f)} + \sqrt{Q^2(f) + U^2(f) + V^2(f)}} \Big|_{f=60 \text{ Гц}}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \sin \Psi_{60} \\ \cos \Psi_{60} \end{aligned} \right\} = \frac{1}{\sqrt{Q(f)^2 + U(f)^2}} \left. \begin{aligned} U(f) \\ Q(f) \end{aligned} \right|_{f=60 \text{ Гц}}.$$

Расчеты показали, что для всего годового цикла наблюдений значение коэффициента эллиптичности не превосходит 0.2 (среднее за год значение $\langle r_{60} \rangle = 0.05$ при среднеквадратичном отклонении $\langle \sigma_{r_{60}} \rangle = 0.15$). Это свидетельствует о близости поляризации излучения к линейной и позволяет пренебречь влиянием магнитного поля Земли в предположении, что процесс распространения электромагнитных волн на этих частотах изотропный [15, 20]. В этом случае азимутальное направление на область излучения A_{60} будет соответствовать нормали к большой оси эллипса поляризации [15]:

$$A_{60} = \Psi_{60} \pm 90^\circ. \quad (3)$$

Выражения (1)-(3) были использованы для определения направления на источник. Сред-

нее за год значение позиционного угла оказалось равным $70.1^\circ \pm 11^\circ$, соответственно азимут прямого и “зеркального” источников варьировался в пределах $161.1^\circ \pm 11^\circ$ и $-19.9^\circ \pm 11^\circ$ (угловая координата в горизонтальной плоскости отсчитывалась по часовой стрелке от географического севера). Азимут -19.9° соответствует направлению на восточную часть Североамериканского континента, где расположено более 80 % мощностей объединенной энергосистемы США и Канады. Логично предположить, что данная удаленная силовая сеть является источником излучения узкополосной линии на частоте 60 Гц, наблюдаемой на УАС. В соответствии с этой гипотезой при вычислении азимута в выражении (3) будем использовать знак минус. На рис. 2 представлен годовой ход наблюдаемых азимутов на излучающую область.

Точки на графике обозначают среднемесячные значения азимута, а вертикальные отрезки соответствуют 95 %-ым доверительным интервалам оценки направления на источник, определяемым согласно известной методике, изложенной в [21]. Штрихпунктирные горизонтальные линии 1 и 2 задаются азимутами на восточное и западное побережье Северной Америки. Сектор углов, ограниченный линиями 1 и 3, соответствует объе-

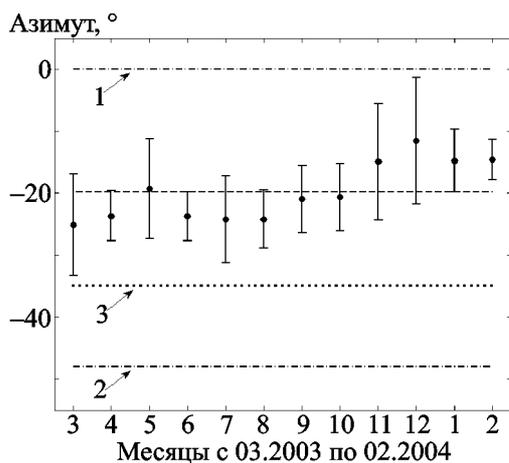


Рис. 2. Годовой ход азимута на источник линии 60 Гц, наблюдаемой на УАС, в период с 03.2003 г. по 02.2004 г.

диненной энергосистеме Востока (Eastern Interconnection), где генерируется около 54 % от мирового производства электроэнергии с частотой 60 Гц [22]. Отметим, что для всего интервала наблюдений оценки направления на источник, рассчитанные с 95 %-й вероятностью, не выходят за пределы данного сектора. Для зимних месяцев отмечается небольшое смещение азимутов на источник к востоку, а для весенних и летних – к западу. В то же время величина смещений пеленга относительно среднего значения практически для всего анализируемого периода лежит в пределах доверительных интервалов, что не позволяет считать наблюдаемую сезонную зависимость для азимута статистически достоверной. Среднее за год значение пеленга определяет направление на центр области излучения, которая задается большим числом произвольно ориентированных в горизонтальной плоскости индивидуальных источников – линий электропередач. При среднегодовом значении -19.9° эффективный центр области приблизительно соответствует центру объединенной энергосистемы Востока. Аналогичные результаты получены и при пеленгации источника во время выездного эксперимента 30.01.2003 г. – 01.02.2003 г. Азимут изменялся в диапазоне $-9^\circ \div -28^\circ$ со средним значением -18° . Это позволило считать источником возбуждения линии 60 Гц энергосистему США и Канады.

Кривые на рис. 3 характеризуют поведение интенсивности линии 60 Гц (I_{60}) и СНЧ фона (I_b) для годового интервала анализа с марта 2003 г. по февраль 2004 г. Из рисунка видно, что временные зависимости интенсивности для сигнала и фона демонстрируют синхронное поведение на суточном интервале. Максимум интенсивности приходится на ночные по UTC часы, а минимум соответствует утреннему времени. При этом среднесуточная вариация интенсивности линии (около 14 пТл²/Гц при глубине модуляции порядка 38 %) более чем в три раза превышает вариацию фона (порядка 4 пТл²/Гц) и запаздывает относительно последней на несколько часов. Анализ сезонных зависимостей показывает, что на годовом интервале интенсивность

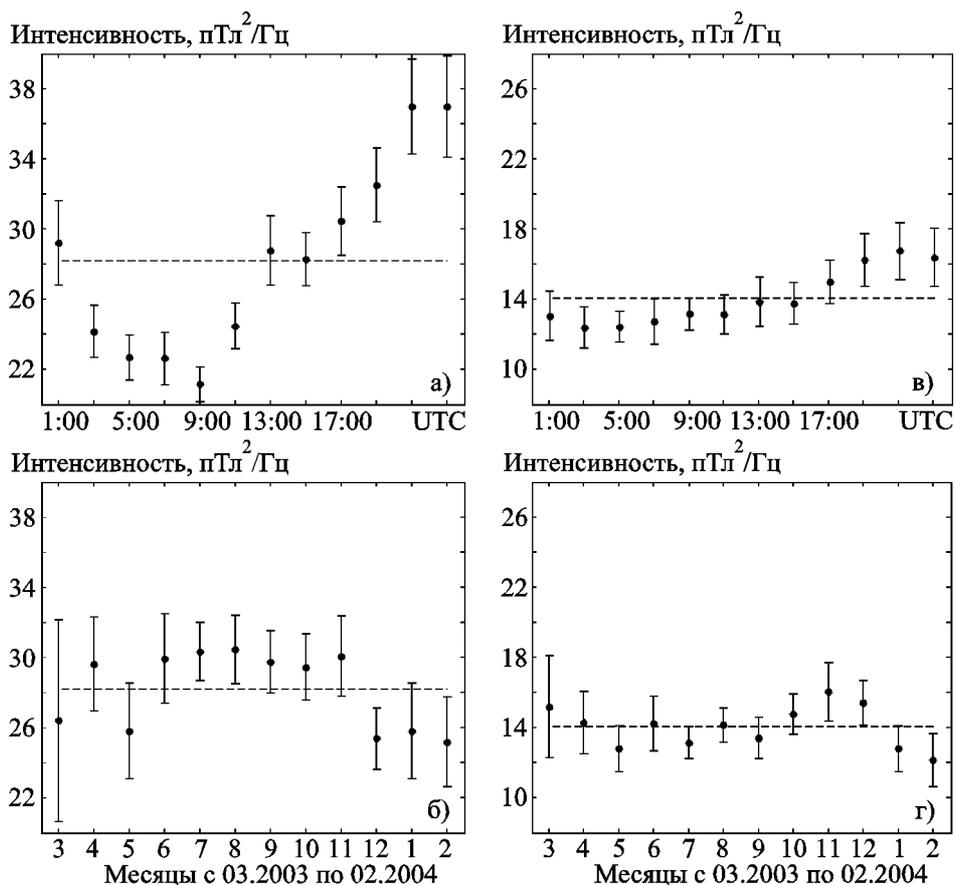


Рис. 3. Суточные и сезонные зависимости интенсивности СНЧ сигналов в окрестности частоты 60 Гц в период с 03.2003 г. по 02.2004 г.: а) – среднесуточный ход интенсивности линии 60 Гц; б) – годовой ход интенсивности линии 60 Гц; в) – среднесуточный ход интенсивности фона; г) – годовой ход интенсивности фона. Точки на графике обозначают средние значения интенсивности, а вертикальные отрезки соответствуют 95 %-ым доверительным интервалам оценки

линии зимой несколько ниже, чем в летние месяцы, в то время как интенсивность фона не обнаруживает каких-либо явных сезонных закономерностей. Отметим, что только суточная вариация интенсивности линии демонстрирует размах в несколько раз большей величины доверительных интервалов и может считаться статистически достоверной. Амплитуды суточной вариации фона и обеих сезонных зависимостей сопоставимы с характерными величинами доверительных интервалов.

Для объяснения природы суточной вариации интенсивности линии сопоставим ее с уровнем энергопроизводства в США. На рис. 4, а штриховой линией показана мощность производства электроэнергии объединенной систе-

мой PJM, являющейся частью объединенной энергосистемы Востока, которая, как уже отмечалось, производит большую часть электроэнергии в США и Канаде [22]. На этом же рисунке приведены сглаженные шестичасовым окном вариации интенсивности линии 60 Гц по данным наблюдений на УАС (сплошная кривая).

Зависимости демонстрируют высокое подобие. Значение коэффициента взаимной корреляции между интенсивностью линии и кривой энергопроизводства равно 0.92, что свидетельствует о правильной идентификации области излучения. Для обеих кривых хорошо прослеживаются суточная и недельная периодичности. Максимумы соответствуют ве-

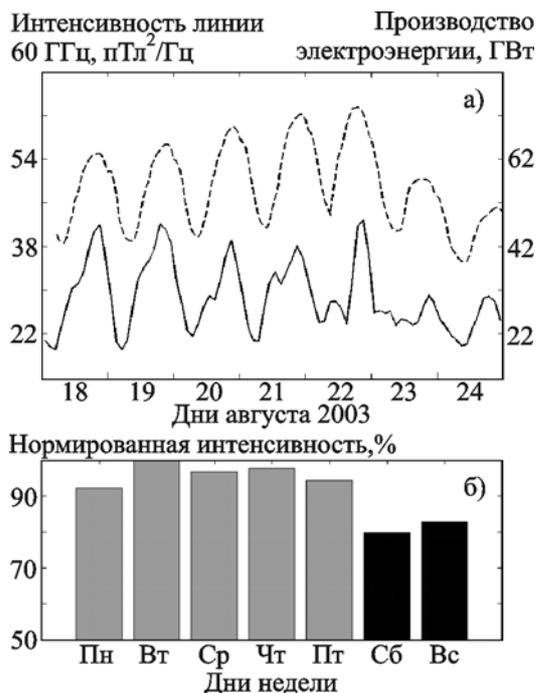


Рис. 4. *Ход интенсивности линии 60 Гц по данным наблюдений на УАС (непрерывная кривая) совместно с зависимостью производства электроэнергии энергосистемой PJM (штриховая кривая) для недельного интервала 18 – 24 августа 2003 г. (а); усредненный для годового интервала 03.2003 г. – 02.2004 г. ход интенсивности линии 60 Гц за неделю (б)*

черным часам по местному времени источника (LT = UTC – 4 ч). Минимумы приходятся на ночные и утренние часы. В приведенной недельной зависимости (с 18 по 24 августа) отчетливо наблюдается уменьшение интенсивности в выходные дни (23 и 24 августа) по сравнению с интенсивностью в рабочие дни недели, обусловленное снижением производства и потребления электроэнергии. “Эффект конца недели” отчетливо прослеживается в поведении интенсивности линии в течение всего года. Рис. 4, б демонстрирует усредненную за год зависимость изменений относительной интенсивности излучения на частоте 60 Гц для каждого дня недели. Видно, что интенсивность линии в выходные дни в среднем на 10 ÷ 15 % ниже, чем в будни. На рис. 5 показаны суточные кривые интенсивности линии 60 Гц,

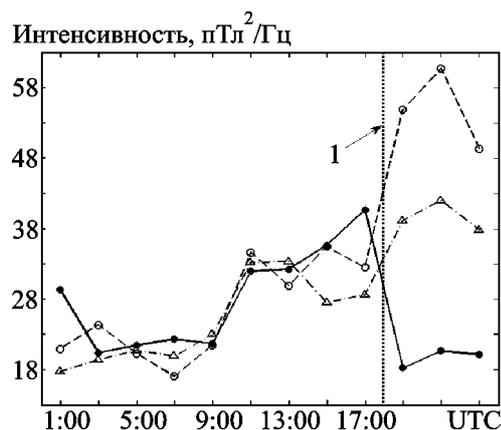


Рис. 5. *Суточные зависимости интенсивности линии 60 Гц для 13–15 августа 2003 г.: –○– – 13 августа; –●– – 14 августа; –△– – 15 августа. Пунктирная вертикальная линия 1 соответствует началу аварийных отключений в энергосистеме США и Канады 14 августа 2003 г.*

по данным регистраций на УАС, во время масштабной аварии в системе энергоснабжения на северо-востоке США 14 – 15 августа 2003 г. [22]. Отключения электросетей начались около 18:00, авария продолжалась почти сутки. Из приведенных зависимостей видно, 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.

Таким образом, анализ СНЧ сигналов, зарегистрированных на УАС с марта 2003 г. по февраль 2004 г., позволяет сделать вывод о том, что узкополосная линия с частотой 60 Гц возбуждается объединенной энергосистемой США и Канады. Интересно отметить, что среднесуточные зависимости поведения интенсивности узкополосного излучения и фона демонстрируют сходные периодичности (см. рис. 3, а, рис. 3, в). По-видимому, к природному “широкополосному” СНЧ фону добавляется техногенная составляющая, обусловленная импульсными переходными процессами при подключении и отключении генерирующих и потребляющих электросистем. Сле-

дует также отметить, что магнитосопряженная область для приемной позиции на УАС находится около северо-восточного побережья США, вблизи города Бостона. В ряде случаев магнитосферный канал может играть роль волноведущей системы для транспортировки “паразитного” излучения высших гармоник электрических сетей. Есть сведения о регистрации в Антарктике гармоник силовых сетей 10 ÷ 20 порядка [12]. Однако для СНЧ сигналов основной и низших гармоник процесс распространения на большие расстояния происходит в ионосферном канале Земля–ионосфера, поэтому можно ожидать, что влияние возмущенности магнитного поля Земли (МПЗ) на них не должно сильно сказываться. На рис. 6 показано поведение интенсивности линии 60 Гц в период с марта 2003 г. по февраль 2004 г. в зависимости от уровня магнитной активности. В качестве показателя возмущенности МПЗ был использован индекс Kp <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/GEOMAG/kp_ar.html>. Каждая точка на графике соответствует среднему значению интенсивности линии, полученному при наблюдениях с данным значением индекса Kp . Видно, что уро-

вень возмущенности магнитного поля не оказывает существенного воздействия на интенсивность линии. Это свидетельствует в пользу гипотезы о распространении электромагнитной волны в подионосферном канале. Рост погрешностей оценок с увеличением индекса Kp является следствием уменьшения статистического объема данных для магнитовозмущенных периодов (им соответствуют большие значения $Kp > 5$).

Таким образом, обработка и интерпретация данных за годовой период наблюдений продемонстрировала стабильность основных характеристик линии – устойчивую наблюдаемость сигнала, стабильность частоты максимума, узкополосность спектра, малую величину коэффициента эллиптичности, фиксированный азимутальный сектор расположения источников. Выявленные суточные и недельные закономерности поведения интенсивности узкополосной составляющей излучения преимущественно порождены характеристиками источника. Основным каналом распространения излучения на первой гармонике является волновод Земля–ионосфера.

4. Выводы

В работе проанализированы систематические регистрации вариаций горизонтальных магнитных компонент сигналов в СНЧ диапазоне электромагнитных волн, полученные на УАС. Показано, что в течение всего времени наблюдений (начиная с 2002 г.) в окрестности гармоники силовой сети 60 Гц устойчиво регистрируется узкополосная спектральная линия. Выполнена спектральная и поляризационная обработка сигналов на частоте 60 Гц для годового объема данных с марта 2003 г. по февраль 2004 г. С помощью специальных экспериментов исключена возможность генерации линии местными источниками. Показано, что преимущественный пеленг на источники излучения совпадает с направлением на восточную часть Североамериканского континента, где производится около 54 % электроэнергии с частотой генерации 60 Гц. Продемонстрирована высокая степень соответствия интенсивности сигнала, регистрируе-

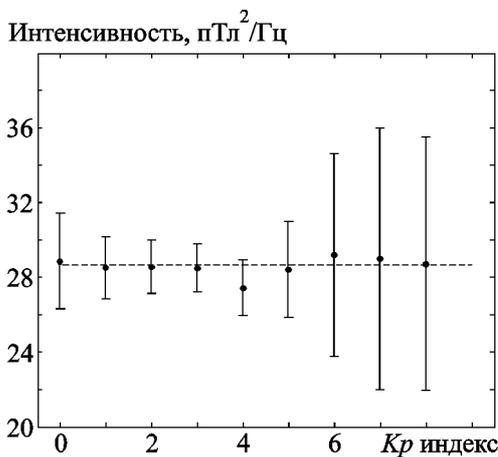


Рис. 6. Интенсивности линии 60 Гц при различных значениях индекса магнитной активности Kp в период с 03.2003 г. по 02.2004 г. Точки обозначают среднюю интенсивность линии 60 Гц, вертикальные отрезки соответствуют доверительным интервалам с вероятностью 95 %

мого на УАС, суточному и недельному циклам производства электроэнергии. По данным дистанционного мониторинга интенсивности излучения на частоте 60 Гц из Антарктики зарегистрирована крупная авария в системе производства электроэнергии в США и Канаде 14 августа 2003 г. Установлено, что возмущенность МПЗ практически не влияет на условия генерации, излучения и распространения первой сетевой гармоники. Показано, что уровень электромагнитного фона в СНЧ диапазоне зависит от мощности производимой и потребляемой электроэнергии в области, магнитосопреженной с точкой наблюдения. Систематический мониторинг излучения мировых энергосистем в экологически чистом регионе Антарктики позволяет контролировать техногенные эффекты изменения электромагнитного климата Земли.

Авторы благодарны сотрудникам РИ НАН Украины В. Г. Безродному и В. Г. Галушко за участие в обсуждении результатов, полученных в работе, и ряд полезных замечаний. Мы также признательны В. Е. Корепанову и сотрудникам Львовского центра ИКИ НАНУ – НКАУ за разработку магнитометрических систем, установленных в Антарктике.

Работа выполнена при частичной поддержке проектов “Шпицберген – 09” НАН Украины, “Ионосат – 08” НКА Украины и НИР “Резонансы 2005-2006” НАНЦ МОН Украины.

Литература

- Manninen J., Oikarinen A., and Turunen T. Features of power line harmonic radiation (PLHR) related narrow band ELF-emissions at very high latitudes // VLF Workshop 2004. – Sodankylä (Finland). – 2004. – P. 44.
- Oikarinen A., Manninen J., and Turunen T. Daily variation of PLHR doublets detected in Northern Finland // VLF Workshop 2004. – Sodankylä (Finland). – 2004. – P. 46.
- Helliwell R. A., Katsufakis J. P., Bell T. F., and Raghuram R. VLF line radiation in the Earth's magnetosphere and its association with power system radiation // J. Geophys. Res. 1975. – Vol. 80. – P. 4249-4258.
- Park C. G., Helliwell R. A. Magnetospheric effects of power line radiation // Science. – 1978. – Vol. 200. – P. 727-730.
- Matthews J. P., Yearby K. Magnetospheric VLF line radiation observed at Halley, Antarctica // Planet. Space Sci. – 1978. – Vol. 29. – P. 97-106.
- Parrot M. Observations of Power Line Harmonic Radiation by the Low-Altitude AUREOL 3 Satellite // J. Geophys. Res. – 1994. – Vol. 99 (A3). – P. 3961-3969.
- Nemec F., Santolík O., Parrot M., Berthelier J. J. Power line harmonic radiation: A systematic study using DEMETER spacecraft // Advances in Space Research. – 2007. – Vol. 40. – P. 398-403.
- Parrot M., Manninen J., Santolík O., Nemec F., Turunen T., Raita T., and Macusova E. Simultaneous observation on board a satellite and on the ground of large-scale magnetospheric line radiation // Geophys. Res. Lett. – 2007. – Vol. 34. – L19102, doi:10.1029/2007GL030630.
- Bullough K., in: Handbook of Atmospheric Electrodynamics Power Line Harmonic Radiation: Sources and Environmental Effects. V. 2. – Boca Raton, Fla., Ch.: CRC Press. – 1995. – P. 291-332.
- Nemec F., Santolík O., Parrot M., Berthelier J. J. Power line harmonic radiation (PLHR) observed by the DEMETER spacecraft // J. Geophys. Res. – 2006. – Vol. 111. – A04308. doi:10.1029/2005JA011480.
- Park C. G., Miller T. R. Sunday decreases in magnetospheric VLF wave activity // J. Geophys. Res. 1979. – Vol. 84. – P. 943-950.
- Rodger C. J., Clilverd M. A., Yearby K., Smith A. J. Is magnetospheric line radiation man-made? // J. Geophys. Res. – 2000. – Vol. 105. – P. 15981-15990.
- Karinen A., Mursula K., Ulich T., Manninen J. Does the magnetosphere behave differently on weekends? // Ann. Geophys. – 2002. – Vol. 20, No. 8. – P. 1137-1142.
- Безродный В. Г., Буданов О. В., Колосков А. В., Ямпольский Ю. М. Электромагнитное окружение Земли в СНЧ-диапазоне // Космічна наука та технологія. – Т. 9, №5/6. – 2003. – С. 117-123.
- Колосков А. В., Безродный В. Г., Буданов О. В., Пазнухов В. Е., Ямпольский Ю. М. Поляризационный мониторинг шумановских резонансов в Антарктике и восстановление характеристик мировой грозовой активности // Радиофизика и радиоастрономия. – 2005. – Т. 10, №1. – С. 11-29.
- 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., Сеницын В. Г., Герасимова Н. Н., Ямпольский Ю. М. Околоземные резонаторы СНЧ-волн как индикаторы космической погоды // Космічна наука і технологія. – 2008. – Т. 14, №5. – С. 49-64.

18. Колосков А. В., Буданов О. В., Безродный В. Г., Ямпольский Ю. М. Определение местоположений сверхмощных молниевых разрядов на основе поляризационных магнитных измерений в диапазоне шумановских резонансов // Радиоп физика и радиоастрономия. – 2004. – Т. 9, №4. – С. 391-403.
19. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М: Наука, 1970. – 855 с.
20. Безродный В. Г. Асимптотическая теория полей шумановских резонансов в гиротропной полости Земля–ионосфера // Радиоп физика и радиоастрономия. – 2004. – Т. 9, №4. – С. 375-390.
21. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. – М: Мир, 1989. – 540 с.
22. U.S.-Canada Power System Outage Task Force. Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations April 2004. <<https://reports.energy.gov/BlackoutFinal-Web.pdf>>

Спостереження випромінювання енергосистем Північноамериканського континента у Антарктиці

О. В. Колосков, Ю. М. Ямпольський

Проаналізовано річні дані (від березня 2003 р. до лютого 2004 р.) безперервних вимірів випромінювання енергосистем Північноамериканського континента, що реєструється на Українській антарктичній станції “Академік Вернадський”. Вивчено записи варіацій горизонтальних магнітних компонентів сигналів поблизу першої гармоніки мережі 60 Гц. Показано, що реєстроване випромінювання не є місцевою перешкодою, а генерується в північній півкулі. Проаналізовано добові та сезонні варіації спектральних і поляризаційних параметрів основної гармоніки мережі і широкосмугового ННЧ фону. Встановлено високий рівень кореляції інтенсивності спектральної лінії 60 Гц з добовим циклом генерації об’єднаної енергосистеми США

і Канади. Зареєстровано систематичне зменшення інтенсивності лінії у суботу та неділю (“ефект кінця тижня”), докладно розглянуто велику аварію в енергосистемі США і Канади 14 серпня 2003 р. Вказано на можливість використання даних ННЧ моніторингу для контролю електромагнітного забруднення Антарктики випромінюванням енергомереж промислово розвинених регіонів земної кулі.

Observations of Radiation from North American Power Mains in Antarctica

A. V. Koloskov and Y. M. Yampolski

The annual data (from March, 2003 till February, 2004) of continuous measurements of power mains radiation of the North American continent at the Ukrainian Antarctic Station “Akademik Vernadsky” is analyzed. Records of variations of horizontal magnetic components of signals near the first harmonic 60 Hz of the power mains are studied. The recorded radiation is shown to be no local interference signal but generated in the northern hemisphere. Diurnal and seasonal variations of spectral and polarizing parameters of the fundamental harmonic of the power mains and broadband ELF background are analyzed. The high degree of correlation of the intensity of the spectral line of 60 Hz with the diurnal cycle of the electric power generation in the USA – Canada power system is established. Regular reduction of intensity of the line during the weekend (“weekend effect”) is established. The large power blackout in the USA – Canada power system on August 14, 2003 is examined in detail. The possibility of using the data in the ELF waveband for the monitoring of electromagnetic pollution in the Antarctic Region produced by the radiation of the power mains from industrially advanced regions of the globe is shown.