

УДК 550.388.2

В. Г. Безродный, О. В. Буданов, А. В. Колосков, Ю. М. Ямпольский

Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины, Харьков

Электромагнитное окружение Земли в СНЧ-диапазоне

Подаються результати спостережень магнітної складової ННЧ-полів, виконаних на Українській антарктичній станції «Академік Вернадський» з травня 2001 р. по січень 2003 р. Аналізуються сезонні залежності поляризаційних характеристик електромагнітних шумів, збуджуваних світовою грозовою активністю на частотах шуманівських резонансів. Приводиться відтворений за цими характеристиками добовий хід активностей трьох основних світових грозових центрів для різних місяців року. Показано зв'язок вузької спектральної лінії 60 Гц, що надійно реєструється на станції, з випромінюванням силових електромереж північноамериканського континенту.

ВВЕДЕНИЕ

Стационарное электромагнитное окружение Земли в диапазоне сверхнизких частот 3—300 Гц формируют преимущественно сигналы и шумы, возбуждаемые приземными источниками. Основным естественным приземным источником СНЧ-полей является, без сомнения, мировая грозовая активность, распределенная по поверхности земного шара. В качестве наиболее вероятных приземных источников СНЧ-излучения антропогенного происхождения следует, на наш взгляд, рассматривать мощные силовые электрические сети промышленно развитых регионов мира. Начиная с мая 2001 г., систематические наблюдения в СНЧ диапазоне осуществляются сотрудниками Радиоастрономического института НАН Украины (РИНАУ) на Украинской антарктической станции «Академик Вернадский» (65°14' S, 64°15' W), расположенной на островах Аргентинского архипелага вблизи от Антарктического полуострова. Бесспорным удобством и преимуществом СНЧ наблюдений в Антарктике является полное отсутствие здесь местных грозовых и промышленных помех, существенно затрудняющих и даже делающих подчас невозможными подобные наблюдения в других регионах мира. Измерения обеспечиваются Украинским антарктическим центром и выполняются в рамках Государственной программы антарктических исследований по научному направлению «Изучение физики верхней ат-

мосферы и ближнего космоса». Основная направленность представленных ниже исследований состояла в изучении поляризационных свойств глобальных шумановских резонансов (ШР) в полости Земля—ионосфера и поиске узкополосных спектральных составляющих электромагнитных СНЧ-полей техногенного происхождения.

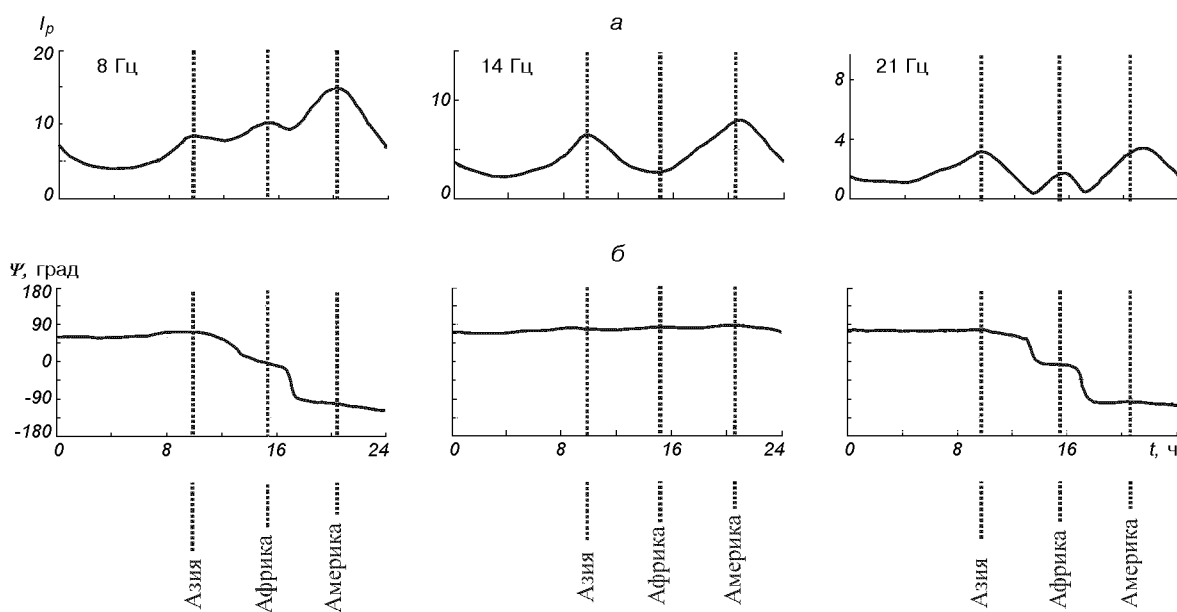
АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

На протяжении 2001 г. регистрация магнитного компонента СНЧ-сигналов осуществлялась при помощи приемного комплекса РИНАУ, начиная с марта 2002 г. и по настоящее время — с использованием широкополосного (0.03—300 Гц) магнитометрического комплекса Lem112A, разработанного и изготовленного Львовским центром Института космических исследований НАНУ—НКАУ. Комплекс состоит из двух идентичных магнитных датчиков индукционного типа, блока управления и регистрирующего компьютера. В состав комплекса входит также аппаратура для измерения горизонтальных составляющих электрического поля, которая в данной работе рассматриваться не будет. Для уменьшения возможных паразитных наводок комплекс размещен в ОНЧ-павильоне, расположенном на удалении около полукилометра от основных зданий станции. Датчики вынесены за пределы павильона на несколько десятков метров и ориен-

тированы взаимно ортогонально в направлениях север—юг и восток—запад. Сигналы с них регистрируются 16-ти разрядным АЦП с темпом оцифровки 500 Гц. Временная синхронизация обеспечивается GPS-системой, встроенной в блок управления. Комплекс работает непрерывно в мониторинговом режиме. Непосредственно на станции осуществляется предварительная обработка сигналов. Как сами сигналы, так и результаты их обработки, считываются раз в неделю в цифровой архив на CD-Rom.

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ШУМАНОВСКИХ РЕЗОНАНСОВ

Достаточно хорошо известно [1], что электромагнитные шумановские СНЧ-резонансы (полоса частот условно 6—60 Гц) возбуждаются в глобальном резонаторе Земля—ионосфера излучением вертикальных молниевых разрядов. Главными источниками таких разрядов являются три основных центра мировой грозовой активности, расположенные в экваториальных районах соответственно Южной



В

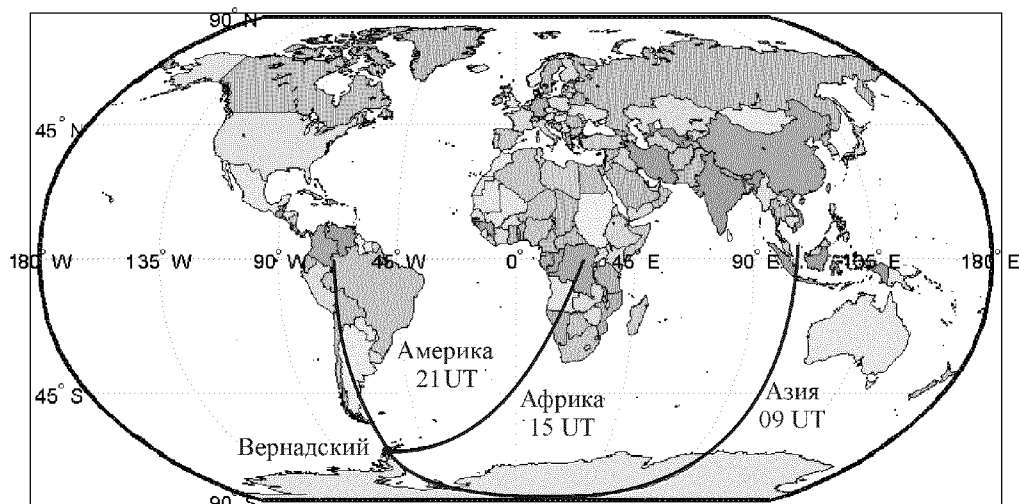


Рис. 1. Суточная зависимость $I_p(t)$ для трех мод ШР, октябрь 2002 г. (а); суточная зависимость $\Psi(t)$, октябрь 2002 г. (б); карта расположения мировых грозовых центров (в)

Америки, Африки и Юго-Восточной Азии. Наблюдение за шумановскими резонансами на длительных временных интервалах позволяет судить о глобальных изменениях состояний ионосферы и земного климата. В проведенных нами регистрациях устойчиво наблюдалось в течение суток до шести указанных шумановских максимумов. Для первых трех из них (соответственно 8, 14 и 20 Гц) осуществлялась поляризационная обработка. В ходе такой обработки для горизонтального магнитного компонента СНЧ-поля каждой из перечисленных резонансных частот определялись суточные вариации параметров Стокса I , Q , U , V , а также производных от них поляризационных характеристик СНЧ-шума: интенсивности поляризованной составляющей I_p , степени поляризации P , коэффициента эллиптичности r , позиционного угла эллипса поляризации Ψ . Расчеты выполнялись с использованием известных формул [2]. Для определения среднего за месяц суточного хода характеристик I_p , P , r , Ψ использовались параметры Стокса, дополнительно усредненные по соответствующему месячному ансамблю суточных реализаций. Рассмотрим, как выглядят такие усредненные зависимости.

На рис. 1, а, б представлены достаточно типичные, соответствующие октябрю 2002 г., суточные зависимости от мирового времени UT интенсивности поляризованной составляющей I_p и позиционного угла Ψ эллипса поляризации для магнитных полей первых трех шумановских мод. В интенсивностях поляризованного компонента первой и третьей мод обращают на себя внимание три максимума, положения которых на временной оси совпадают с интервалами максимальной активности основных мировых грозных центров: азиатского (вблизи 09:00 UT), африканского (около 15:00 UT) и американского (вблизи 21:00 UT). Месторасположение этих центров иллюстрирует карта, приведенная на рис. 1, в. При пересчете UT в местное время указанные максимумы активности для каждого из центров приходятся на предзаходные периоды (17-18LT), что хорошо согласуется с известными литературными данными на этот счет. Для второй мод шумановских резонансов «африканский максимум» отсутствует в силу того, что дистанция от «Вернадского» до африканского центра близка к условиям формирования минимума интерференционного поля соответствующей частоты. На кривых для позиционного угла эллипса поляризации первой и третьей мод отчетливо прослеживаются три характерных «ступеньки». Восстановленные по их положениям азимуты на источники оказываются близки к ожидаемым направлениям

на азиатский, африканский и американский центры мировой грозовой активности соответственно.

На рис. 2 представлены суточные зависимости коэффициентов эллиптичности полей двух первых резонансных мод для различных месяцев 2001 г. и 2002 г. Видно, что кривые для одноименных месяцев двух лет достаточно хорошо совпадают (а в отдельных случаях — вплоть до мелких деталей), указывая тем самым на некие устойчивые зависимости. Такие зависимости проявляются в следующем:

- для первой моды во все сезоны года значения коэффициента эллиптичности на протяжении суток остаются достаточно большими по величине и положительными, что в использованных нами определениях соответствует вращению магнитной составляющей СНЧ-поля в горизонтальной плоскости по часовой стрелке;
- для второй моды в период после осеннего равноденствия (сентябрь—ноябрь) коэффициент эллиптичности ведет себя таким же образом, как и у первой моды, т. е. сохраняет положительный знак в течение всех суток; вблизи же летнего солнцестояния (май—август) его знак, а значит направление вращения вектора магнитного поля, изменяется на протяжении дня несколько раз; абсолютные значения коэффициента эллиптичности второй моды всегда ниже, чем у первой;
- для третьей моды (соответствующие кривые на рисунке не приведены) коэффициент эллиптичности во все сезоны года оказывается малым по абсолютной величине и знакопеременным в течение дня со среднесуточным значением, близким к нулю.

В настоящее время нами завершается решение теоретической задачи о поляризации полей шумановских резонансов в гиротропном резонаторе Земля—ионосфера. В процессе решения уже объяснено положительное направление вращения магнитной составляющей первой моды, наблюдаемое нами в Антарктике, и предсказано изменение этого направления на противоположное при перемещении наблюдателя в Северное полушарие. Предсказано, а затем зарегистрировано экспериментально, связанное с гиротропией отрицательное систематическое смещение азимутов источников излучения, восстановленных из поляризационных измерений, по отношению к их истинным значениям. В соответствии с экспериментальными данными 2002 г. величины таких смещений составляют 10—15° для первой моды и быстро уменьшаются с ростом номера резонансного максимума. Восстановлены средние за каждый месяц наблюдений суточные ходы суммарной мировой грозовой активности (рис. 3, б) и активностей каждого из грозных центров, взя-

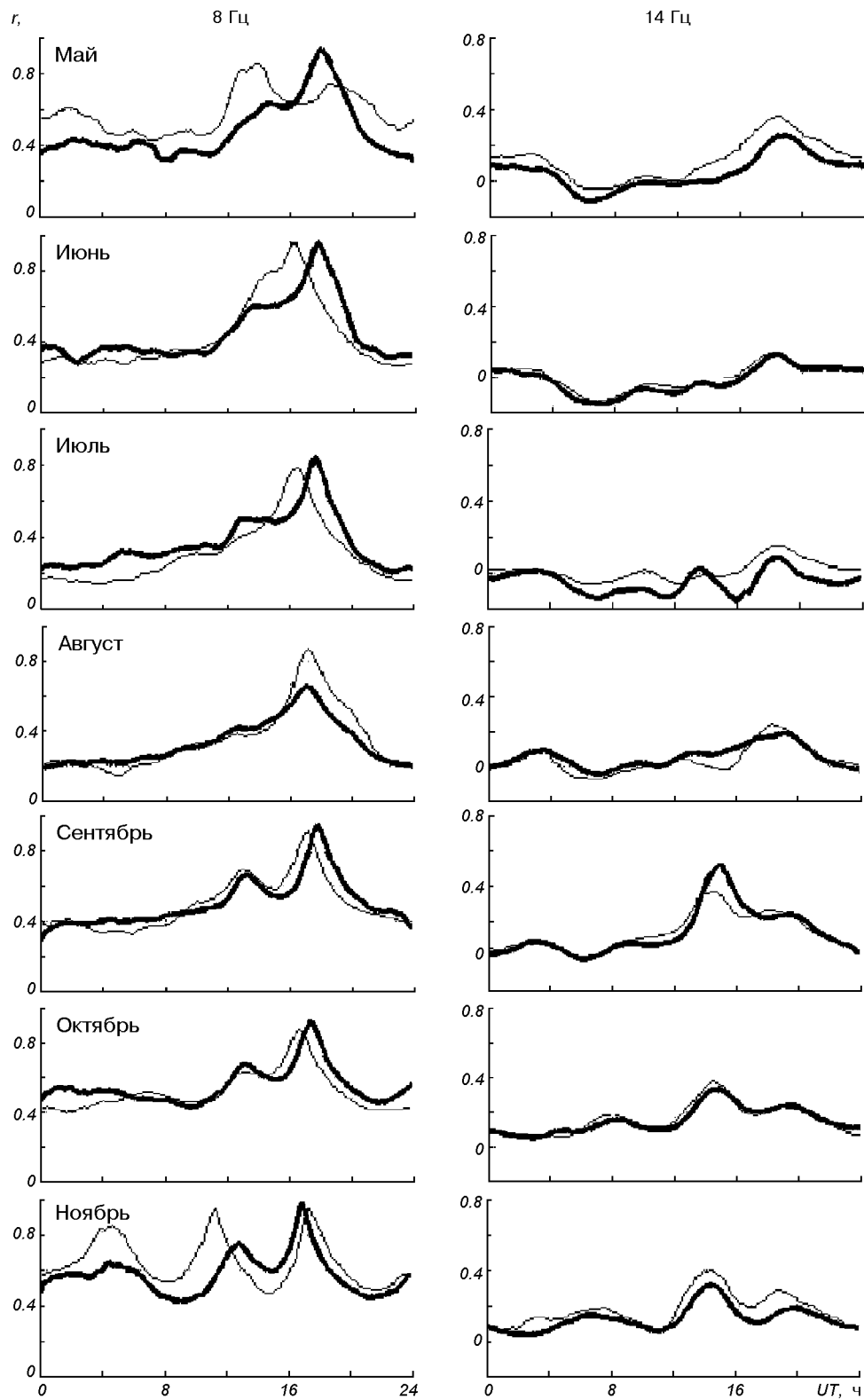


Рис. 2. Суточные зависимости $r(t)$ для двух мод ШР в период май—ноябрь 2001 г. (тонкая линия) и 2002 г. (жирная линия)

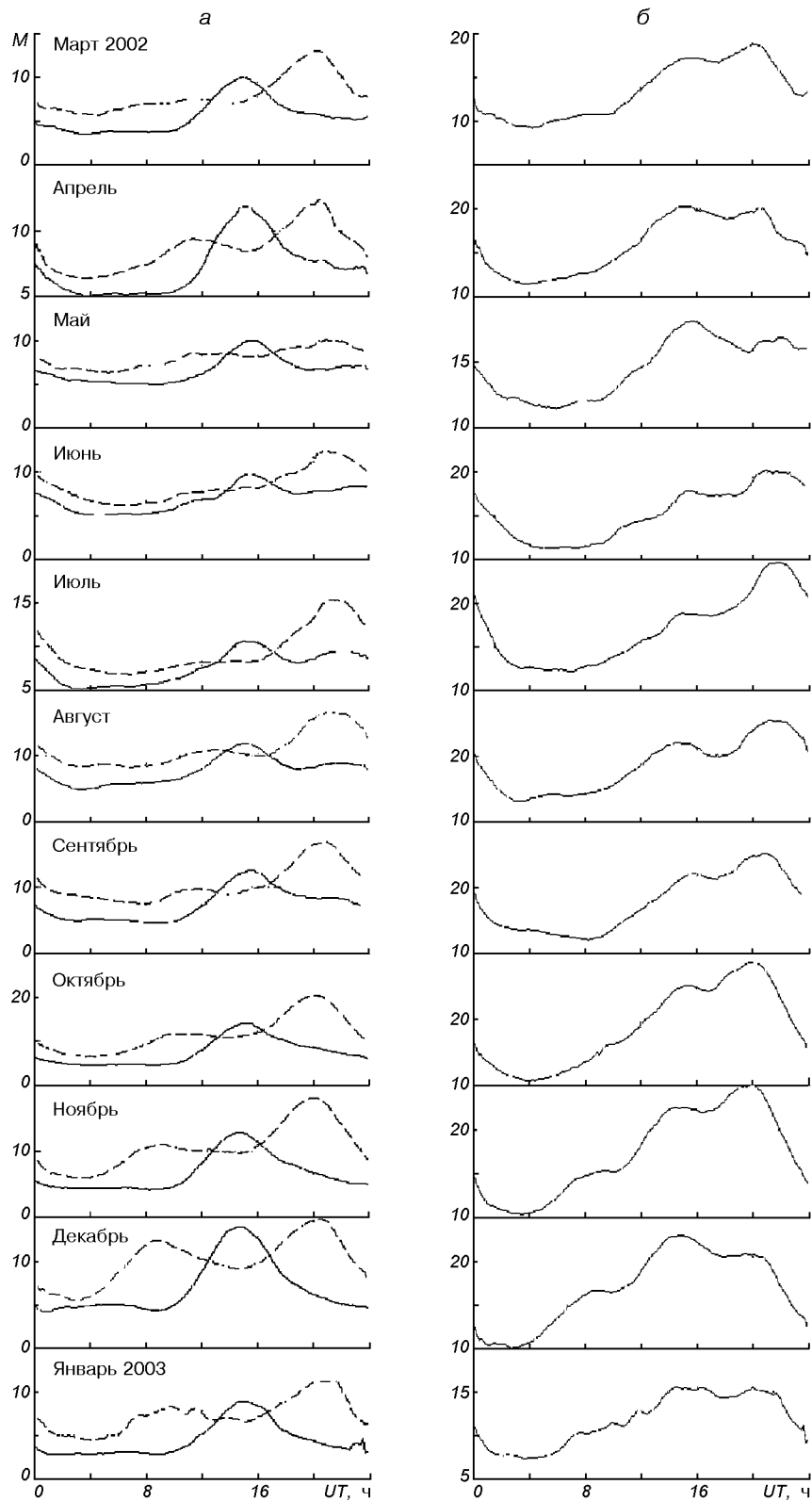


Рис. 3. Восстановленные за период март 2002 г.—январь 2003 г. суточные ходы активности: *a* — африканского (сплошная кривая), восточно-азиатского и южно-американского (штриховая линия) грозовых центров; *б* — интегральной мировой грозовой активности

тых в отдельности (рис. 3, *a*). Здесь по горизонтальной оси отложено мировое время, сплошная линия соответствует африканскому грозовому центру, штриховая — совместному действию азиатского и американского центров. Перечисленные результаты наглядно демонстрируют возможность использования данных непрерывных поляризационных наблюдений шумановских резонансов для осуществления однопунктового дистанционного мониторинга из Антарктики уровней активности мировых грозовых центров и характеристик ионосферной границы резонатора Земля—ионосфера.

РЕГИСТРАЦИЯ СНЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕХНОГЕННОЙ ПРИРОДЫ

Как уже указывалось, кроме естественных источников, к возбуждению полости Земля—ионосфера в диапазоне СНЧ могут приводить также мощные излучающие системы техногенного происхождения. К последним прежде всего относятся силовые электрические сети промышленно развитых регионов Европы и США, соответственно 50 Гц и 60 Гц. Помехи, создаваемые на Украинской антарктической станции работой местной генераторной установки 50 Гц, исключают возможность регистрации здесь излучения европейской электросети. Поэтому поиск спектральных линий проводился нами только для частот вблизи 60 Гц. Соответствующие измерения выполнялись на протяжении 2002 г. При расчетах экспериментальных спектров использовалось высокое спектральное разрешение (0.007 Гц) и большие времена накопления (2 ч). В ходе таких измерений нами была надежно обнаружена узкополосная стабильная по частоте спектральная линия 60 Гц. Эта линия устойчиво регистрировалась в течение всего годового цикла наблюдений. В пользу ее связи с силовыми сетями США свидетельствуют следующие аргументы.

На рис. 4, *a* представлена типичная суточная зависимость азимута на источник излучения, восстановленная из экспериментально полученных значений позиционного угла. Видно, что кривая попадает точно внутрь полосы граничных направлений на территорию США. Амплитуда линии имеет устойчивый суточный ход (рис. 4, *b*). В ее спектре, построенном за временной период с марта по октябрь 2002 г. (рис. 4, *в*), кроме суточной и полусуточной, имеются также недельная и полунедельная гармоники. Наличие у амплитуды исследуемой линии таких спектральных составляющих связано, по всей видимости, с характерными для силовых сетей США регулярными циклами измене-

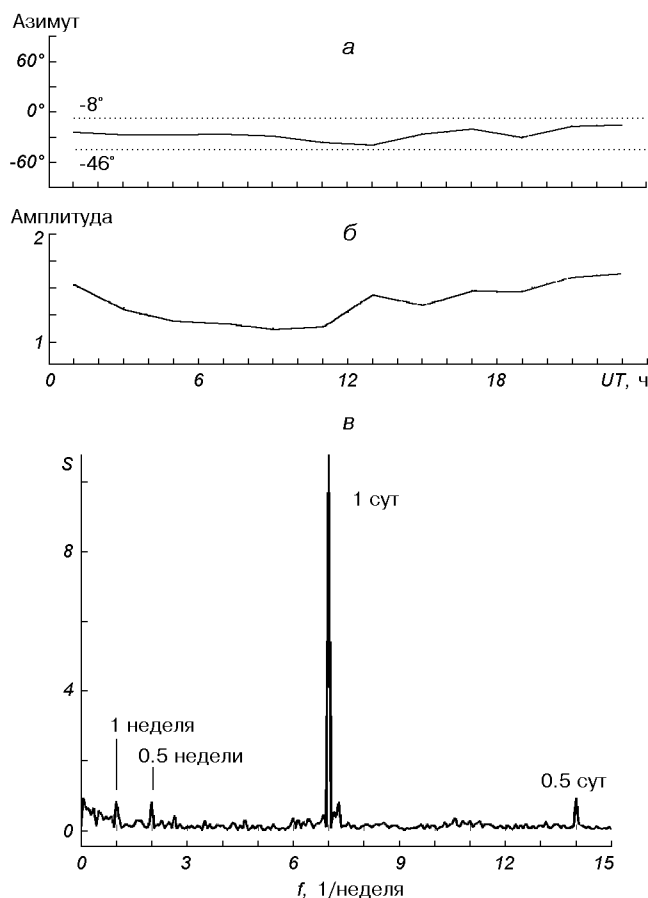


Рис. 4. Усредненная суточная зависимость азимута на источник линии 60 Гц, июнь 2002 г. (*a*) (азимуты -8° и -46° соответствуют восточному и западному побережью США); усредненная суточная зависимость амплитуды линии 60 Гц, июнь 2002 г. (*б*); спектр амплитуды линии 60 Гц за период с марта по октябрь 2002 г. (*в*)

ний мощности энергопотребления.

Для исключения возможности генерации линии 60 Гц непосредственно на УАС, была проведена серия экспериментов по отключению потенциальных источников ее возбуждения, в ходе которых линия продолжала неизменно фиксироваться. Кроме того, линия на том же уровне интенсивности и с тем же азимутальным углом прихода наблюдалась и в выездном эксперименте на антарктический материк, когда магнитометр был вывезен на удаление 12 км от станции.

Изложенные доводы дают основание утверждать, что в проведенном нами на станции «Академик Вернадский» цикле поляризационных СНЧ-измерений 2002 г. была впервые зарегистрирована в Антарктике линия силовой электросети США и продемонстрирована возможность использования ре-

зультатов таких измерений для осуществления оперативного мониторинга степени проникновения энерговыделений силовой сети США на Антарктический континент.

Работа выполнена при поддержке НТЦУ, проект № Р-072. Авторы глубоко признательны руководству Украинского антарктического центра за возможность проведения измерений на Украинской антарктической станции.

1. Блюх П. В., Николаенко А. П., Филиппов Ю. Ф. Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля—ионосфера. — Киев: Наук. думка, 1977.—199 с.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. — М: Наука, 1970.—855 с.

ELECTROMAGNETIC ENVIRONMENT OF THE EARTH AT ELF

V. G. Bezrodny, O. V. Budanov, A. V. Koloskov,
and Yu. M. Yampolski

Some results of observations of the ELF field's magnetic component at the Ukrainian Antarctic Station «Akademic Vernadsky» are presented which cover a period of May 2001 through January 2003. We analysed seasonal dependences of polarization properties of the electromagnetic noise excited by global thunderstorm activity at the Schumann resonance frequencies. The dependences were used to recover diurnal variations of the activity at three major world thunderstorm centres over different seasons. The relation between the narrow spectral line at 60 Hz which is reliably detectable at the Vernadsky Station and the radiation from electric power networks of the North-American continent is justified.