
ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 537.636:577.3

СПЕКТР МАГНИТНОГО ШУМА НИЗКИХ ЧАСТОТ В КРУПНОМ ГОРОДЕ

© 2017 г. Д.С. Тягунов, О.Л. Сокол-Кутыловский

*Институт геофизики Уральского отделения РАН,
ул. Амундсена, 100, Екатеринбург, 620016 Россия. E-mail: tds-07@mail.ru*

Поступила в редакцию 16.03.2016 г.

Исследован спектральный состав техногенного магнитного шума крупного индустриального центра в диапазоне частот 0.01÷200 Гц. Показано, что городской магнитный шум преимущественно сконцентрирован вблизи промышленной частоты 50 Гц и ее первых гармоник, а также в диапазоне частот менее 1 Гц. В центральных районах города наблюдаются отдельные короткие импульсы большой амплитуды, связанные с движением электрического транспорта. Амплитуда вертикальной составляющей магнитного шума, как правило, больше амплитуды горизонтальных составляющих. В дневное время она может достигать 4000 нТл (от пика до пика) в центральных районах города и снижаться почти в 4 раза ночью. Амплитуда горизонтальных составляющих магнитного шума в центре города достигает 1500 нТл (от пика до пика) и уменьшается ночью примерно в 2 раза. Магнитный шум на окраине в 100 раз ниже, чем в центре города, но тем не менее он более чем в 100 раз выше геомагнитных вариаций, соответствующих невозмущенному геомагнитному полю в исследуемом частотном диапазоне. Единичные измерения амплитуды магнитного шума в узкой полосе частот могут значительно отличаться от реальной амплитуды магнитного шума, полученного при записи шумового сигнала в широкой полосе частот или при анализе шумовой дорожки.

Ключевые слова: техногенный магнитный шум, индустриальные помехи, электромагнитный шум.

ВВЕДЕНИЕ

Исследованию электромагнитных шумов низких частот до недавнего времени уделялось относительно мало внимания. Однако в связи с резко увеличивающейся энергетической насыщенностью городов, транспорта и промышленных предприятий эта проблема становится заметной уже в настоящее время [1, 4]. Проблема электромагнитного шума в ближайшее время может обостриться в результате развития робототехники, микроэлектроники, медицинской техники, систем автоматизации и управления, многочисленные датчики которых чувствительны к электромагнитным помехам.

В данной статье исследуется магнитная составляющая техногенного электромагнитного шума крупного индустриального города, т.е. техногенный магнитный шум, причем измеряются одновременно все три компонента магнитной индукции.

За объект исследования взят крупный промышленный город с развитой транспортной инфраструктурой. Измерения магнитного шума

проводились в центре города и на его окраинах. По центральной части города проходят трамвайные и троллейбусные маршруты, линия метрополитена, имеется интенсивное автомобильное и автобусное движение. В радиусе 3 км находятся железнодорожный вокзал, несколько промышленных предприятий и жилой сектор с многоэтажной застройкой различной плотности. В точках измерения на окраине города отсутствует линия метрополитена, нет промышленных предприятий и трамвайного движения.

Энергетическое влияние слабого магнитного поля низкой частоты на человека достаточно мало, чтобы представлять серьезную опасность для жизни и здоровья человека. Однако интенсивное электромагнитное поле низких частот может негативно влиять на чувствительные электронные приборы и системы. Электромагнитный шум не только создает помехи в работе чувствительной электронной аппаратуры, но и может привести к ее полной неработоспособности. Так, приборы медицинской диагностики для регистрации магнитных кардиограмм

или энцефалограмм не могут успешно функционировать в условиях даже небольших электромагнитных помех [5]. Техногенный электромагнитный шум низких частот влияет на работу геомагнитных обсерваторий, искажая изучение естественных геомагнитных вариаций [3]. Ряд геофизических методов поиска и разведки полезных ископаемых также не должны выполняться в местах интенсивного электромагнитного шума. Прежде всего к таким методам относятся некоторые методы магниторазведки, магнитотеллурическое зондирование и методы электроразведки на переменном токе. Поэтому изучение распределения и величины электромагнитных шумов техногенного происхождения — актуальная проблема, которую необходимо если не контролировать, то хотя бы знать о ее существовании.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Для измерения амплитуды магнитного шума применен трехкомпонентный преобразователь магнитной индукции с порогом чувствительности около 1 нТл на частоте 1 Гц [2]. Частотный диапазон измерений магнитомодуляционного преобразователя — от 0.01 до 200 Гц. Выходные сигналы каждой из компонент магнитной индукции подавались на многоканальный 24 разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) AD7734, управляемый переносным компьютером. Массив цифровых данных, записанных за время измерения, накапливался и сохранялся в памяти компьютера. Программная обработка данных заключалась в приведении величины отсчетов разрядов АЦП в соответствии с измеренной амплитудой магнитной индукции (выраженной в нТл) при известном коэффициенте преобразования и разрядности АЦП; построении и обработке графиков измеренных сигналов магнитной индукции, а также в построении спектров записанных сигналов с помощью дискретного преобразования Фурье.

Измерялась амплитуда трех взаимно ортогональных компонент магнитной индукции: вертикальной (B_z) и двух горизонтальных (B_x , B_y), причем одна из горизонтальных компонент (B_x) имела направление на северный магнитный полюс. Датчик преобразователя магнитной индукции располагался на штативе, установленном на удалении от явных локальных источников магнитного шума. Продолжительность записи составляла 24 часа, что при выбранной дискретизации АЦП (~2 мс) позволило получить около 40 млн измерений каждой из компонент магнитной индукции в каждом суточном сеансе измерений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 1 показаны суточные записи амплитуды магнитного шума, выполненные в самом центре г. Екатеринбурга. На рисунках верхняя зависимость представляет собой запись магнитного шума в диапазоне частот 0.01 ÷ 200 Гц, нижняя — в диапазоне 0.01 ÷ 45 Гц (данные для нее были пропущены через фильтр нижних частот с частотой среза 45 Гц), что исключило сетевую частоту 50 Гц и ее гармоники, а также срезало импульсы, длительность которых менее 22 мс.

Шкала амплитуды магнитной индукции на рис. 1а при построении ограничена величиной ±1300 нТл, однако в течение записи несколько сот коротких импульсов превысили эти значения в ~1.5 раза, так что полная амплитуда магнитного шума от пика до пика в этой записи достигала ~4000 нТл. Эти короткие импульсы максимальной амплитуды вызваны магнитным полем, создаваемым электрическим транспортом, преимущественно электропоездами метрополитена. Сплошной магнитный шум (за исключением коротких импульсов) вызван магнитными полями рассеяния сетевой частоты и ее гармоник, магнитными моментами движущегося автотранспорта, другими многочисленными источниками переменного магнитного поля.

Амплитуда горизонтальной составляющей (рис. 1б) магнитного шума в центре города несколько меньше, чем вертикальной, но короткие импульсы, вызываемые преимущественно электрическим транспортом, также присутствуют и имеют наибольшую амплитуду по отношению к другим источникам шума в течение всего времени суток.

На рис. 2 показаны полные спектры вертикальной составляющей магнитного шума, соответствующие верхней записи на рис. 1а. Верхний спектр соответствует дневному магнитному шуму, а нижний — ночному. Средняя амплитуда магнитного шума частоты 50 Гц на рис. 2 ограничена при построении графика. Днем ее пиковое значение составило 34.6 нТл, а ночью — 11.5 нТл.

На рис. 3 приведены фрагменты спектров вертикальной составляющей дневного (слева) и ночного (справа) магнитного шума в диапазоне от 0.01 до 1 Гц в центре города, а на рис. 4 — суточная запись в 7.5 км от центра города в юго-западном направлении.

На рис. 5 представлены фрагменты записи трех компонент магнитного шума в лесопарковой зоне на окраине Екатеринбурга и соответствующие им спектры в области низкой частоты до 1 Гц.

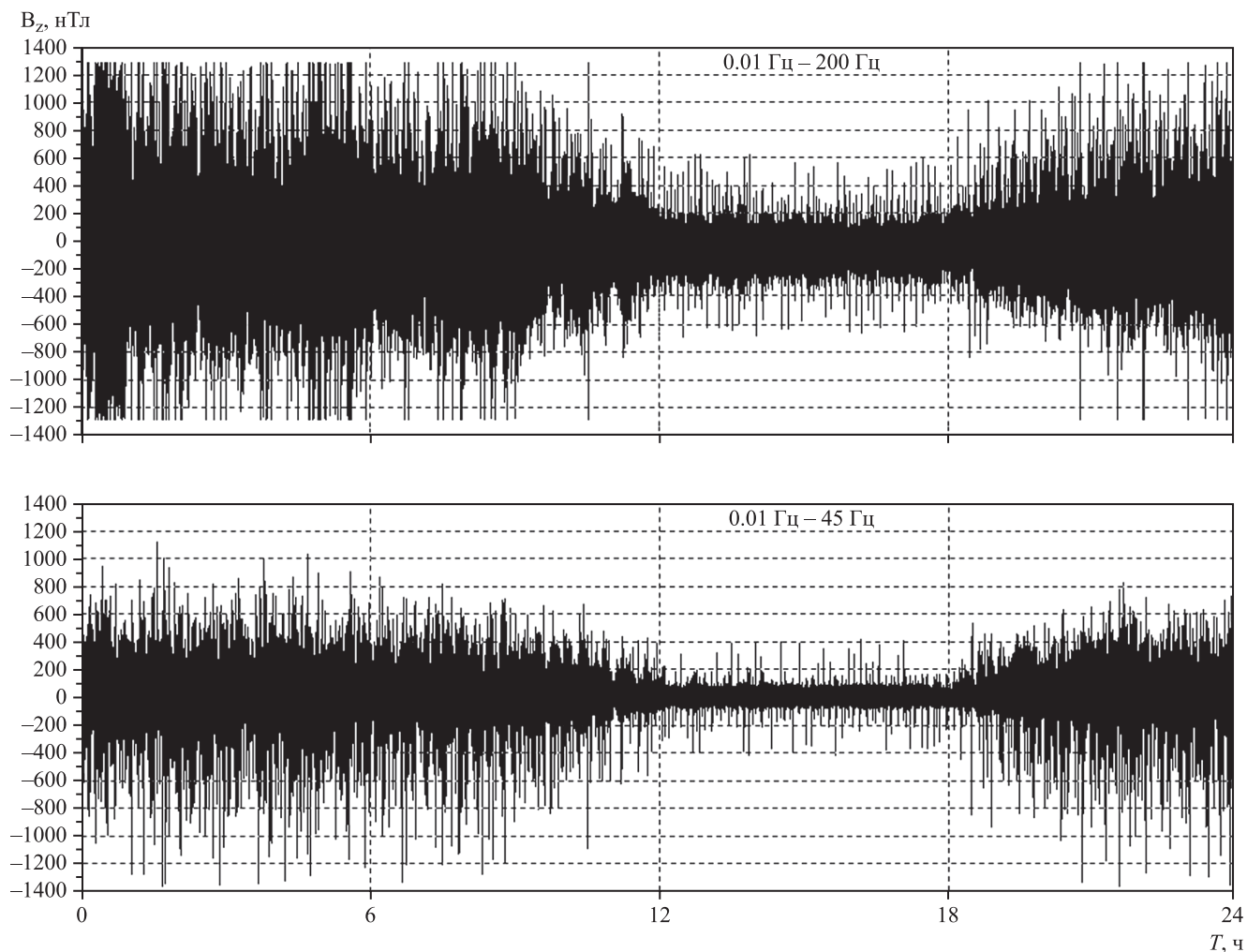


Рис. 1. Суточная запись вертикальной (*a*) и горизонтальной (*б*) составляющих магнитной индукции в центре города в диапазоне частот 0.01÷200 Гц (верхняя кривая) и 0.01÷45 Гц (нижняя кривая). Начало записи соответствует 11⁰⁰ часов местного времени.

Амплитуда V_z магнитного шума на частоте 1 Гц оказалась ~ 20 пТл (рис. 5), что в 50÷100 раз больше геомагнитных вариаций на этой же частоте в спокойном геомагнитном поле на большом удалении от города.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Максимальную амплитуду на рис. 1*a* имеют короткие импульсы, интенсивность которых снижается в несколько раз в ночное время. Но на спектре Фурье короткие импульсы высокой интенсивности не проявляются, а на наблюдаемой записи полного сигнала они присутствуют. Из этого следует, что между этими импульсами нет корреляции ни по частоте их появления, ни по их длительности, в результате чего энергия импульсов распределяется по спектру достаточно равномерно, как для случайных сигналов. При записи и обработке импульсных сигналов следует иметь в виду, что может наблюдаться некоторая асимметрия записыва-

емых или обрабатываемых импульсов, что связано с их длительностью и ограниченной полосой пропускания измерительной аппаратуры.

На записи вертикальной составляющей магнитного шума (рис. 1*a*) хорошо проявляется ночной период (с 12 до 18 час от начала записи), когда амплитуда полного магнитного шума снижается более чем в 3 раза. На записи горизонтальной составляющей полного магнитного шума V_y (рис. 1*б*, верхняя запись) ночное снижение амплитуды не столь велико: с $\pm 500 \div 600$ нТл днем до ± 300 нТл ночью, а без учета сетевой частоты и ее гармоник — практически не заметно (рис. 1*б*, нижняя запись). Амплитуда другой горизонтальной составляющей, V_x , по величине принципиально не отличается от амплитуды V_y .

Из спектров, представленных на рис. 2, видно, что достаточно высокая амплитуда магнитного шума сконцентрирована вблизи частоты 50 Гц и ее первых гармоник.

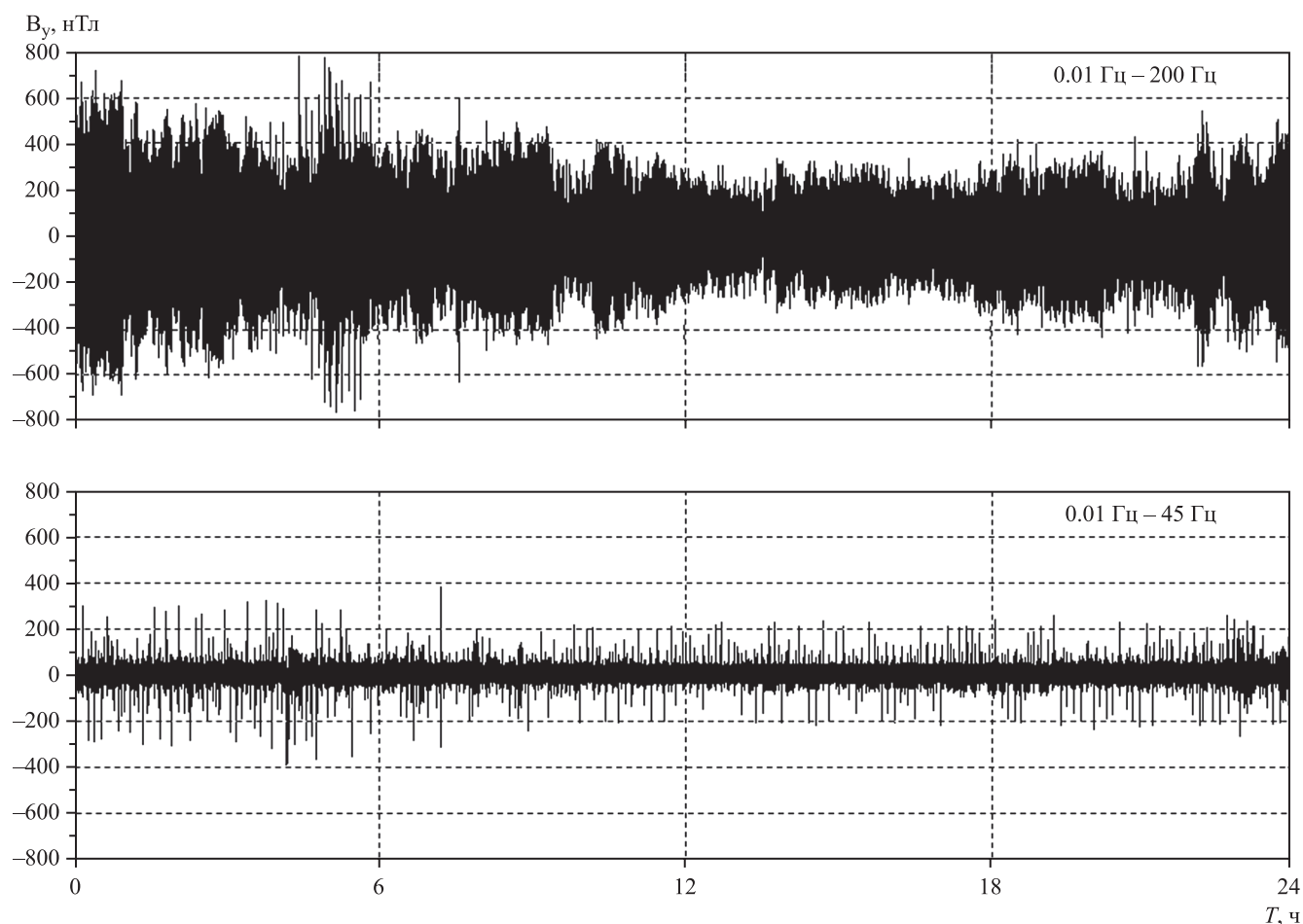


Рис. 1. Окончание

В таблице приведены усредненные амплитуды магнитного поля сетевой частоты 50 Гц и ее гармоник 100 и 150 Гц, полученные в каждом 6-часовом фрагменте суточной записи в центре города и вблизи его окраины. Из представленных данных

следует, что амплитуда сетевой частоты и ее гармоник явно не достигает до амплитуды шумовой дорожки, показанной на рис. 1а, даже если не учитывать импульсный магнитный шум. По-видимому, это объясняется тем, что энергия магнитного шума

Амплитуда городского магнитного шума на частоте 50 Гц и ее первых гармониках (среднее значение за 6 ч)

В центре города												
Время	11–17 ч			17–23 ч			23–05 ч			05–11 ч		
Частота Гц	50	100	150	50	100	150	50	100	150	50	100	150
B_{yz} , нТл	28.9	0.17	2.71	24.1	0.3	3.04	17.8	0.4	1.4	10	0.4	0.94
B_{zs} , нТл	34.6	1.85	2.16	36.8	0.96	1.92	11.5	0.83	1.28	8.85	0.74	0.92
На окраине города												
Время	16–22 ч			22–04 ч			04–10 ч			10–16 ч		
Частота Гц	50	100	150	50	100	150	50	100	150	50	100	150
B_{yz} , нТл	2.63	0	0.11	1.27	0	0.1	1.6	0	0.12	2	0	0
B_{zs} , нТл	2.66	0.3	0.1	1.9	0.3	0.12	1.89	0.3	0.12	1.63	0.28	0.04

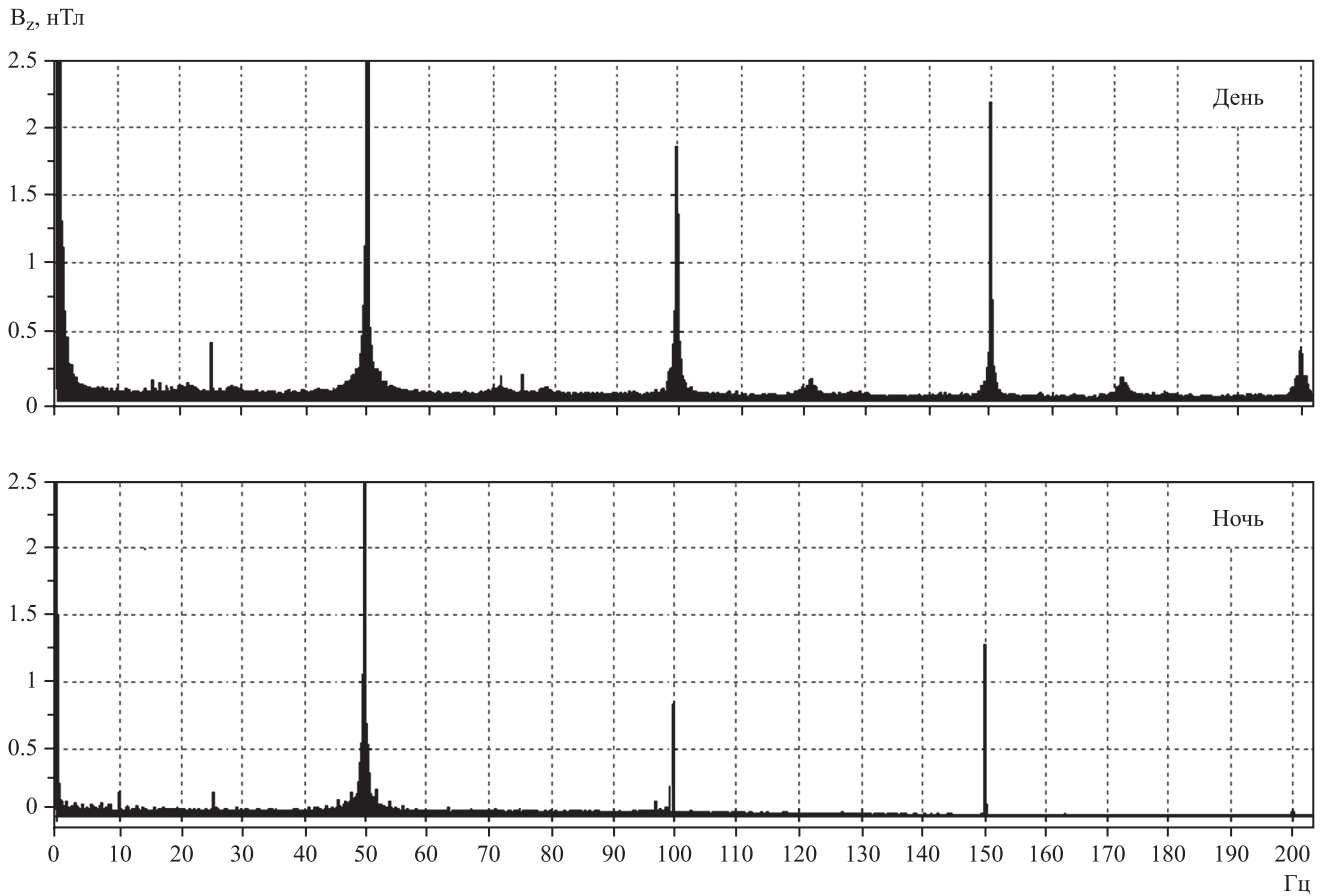


Рис. 2. Спектральное распределение вертикальной составляющей магнитного шума, показанного на записи на рис. 1а, в дневное время (вверху) и ночью (нижний спектр).

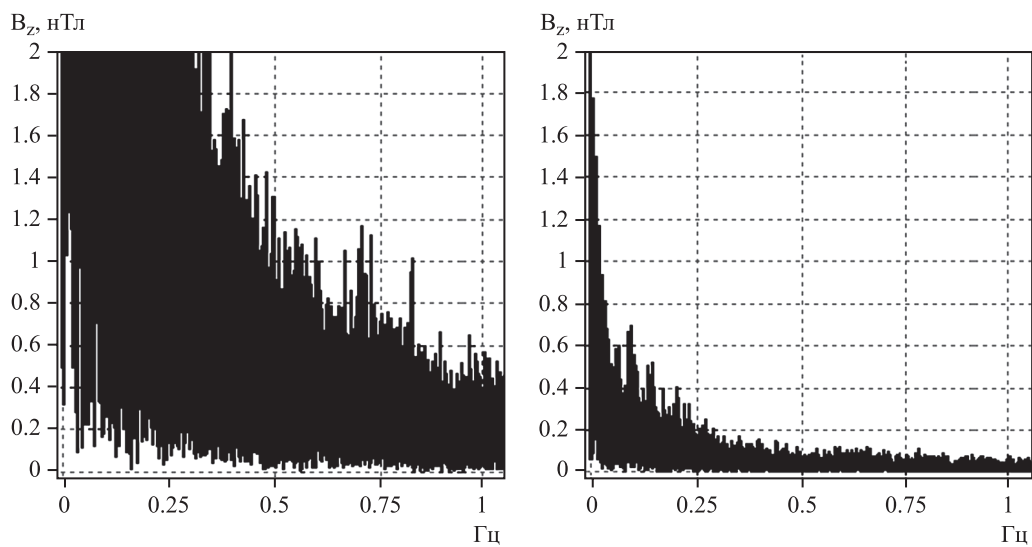


Рис. 3. Фрагменты спектров вертикальной составляющей дневного (слева) и ночного (справа) магнитного шума в диапазоне от 0.01 Гц до 1 Гц в центре города.

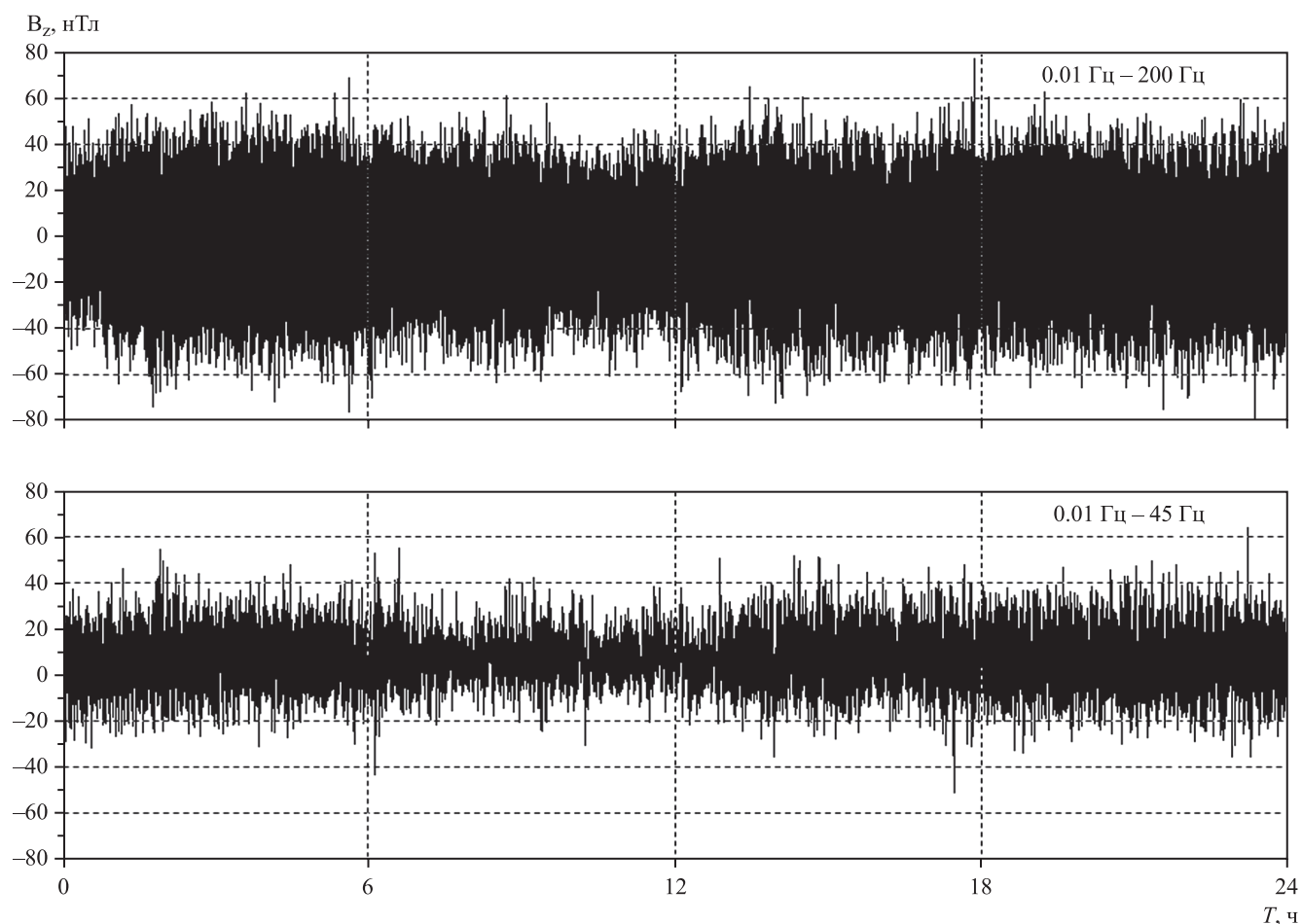


Рис. 4. Суточная запись вертикальной составляющей магнитной индукции в 7.5 км от центра города около ИГФ УрО РАН в диапазоне частот 0.01÷200 Гц (верхняя кривая) и в диапазоне частот 0.01÷45 Гц (нижняя кривая). Начало записи соответствует 16⁰⁰ часов местного времени.

на сетевой частоте и ее гармониках сосредоточена не только точно на этих частотах, но и вблизи них.

На рис. 6 показаны участки спектра вблизи частоты 50 Гц. Хорошо видно, что магнитный шум, сосредоточенный около сетевой частоты, состоит из серии близко расположенных пиков и сплошь заполненных участков, т.е. имеет достаточно сложную структуру. Суперпозиция сигналов магнитного поля близких частот (отдельные пики на этом участке спектра) дают суммарную амплитуду сигнала, намного превышающую ту, что лежит строго на данной частоте. То же наблюдается и на гармониках сетевой частоты. В таблице же дана усредненная амплитуда единичных пиков сетевой частоты и ее гармоник, поэтому единичные измерения амплитуды сетевой частоты и ее гармоник в узкой полосе спектра могут не соответствовать реальной амплитуде магнитного шума, который проявляется на шумовой дорожке при записи в широком диапазоне частот.

Из спектров, показанных на рис. 2, следует, что амплитуда магнитной индукции в низкочастотной части исследованного спектра представляет собой практически сплошной шумовой спектр, поэтому она также может иметь достаточно высокую интенсивность. Фрагменты низкочастотной части спектра отдельно показаны на рис. 3.

Амплитуда магнитного шума на окраине города существенно ниже, чем в центре (см. рис. 4, 5). На суточной записи, выполненной возле ИГФ УрО РАН, вертикальная составляющая магнитного шума составляет около 120 нТл от пика до пика во всем исследуемом диапазоне частот и около 70 нТл — в диапазоне частот ниже 45 Гц. Почти двукратное увеличение шума в высокочастотной части спектра объясняется линией электропередач, проходящей менее чем в 100 м от точки измерения. Уменьшение амплитуды магнитного шума в ночной период на этой суточной записи выражено слабо.

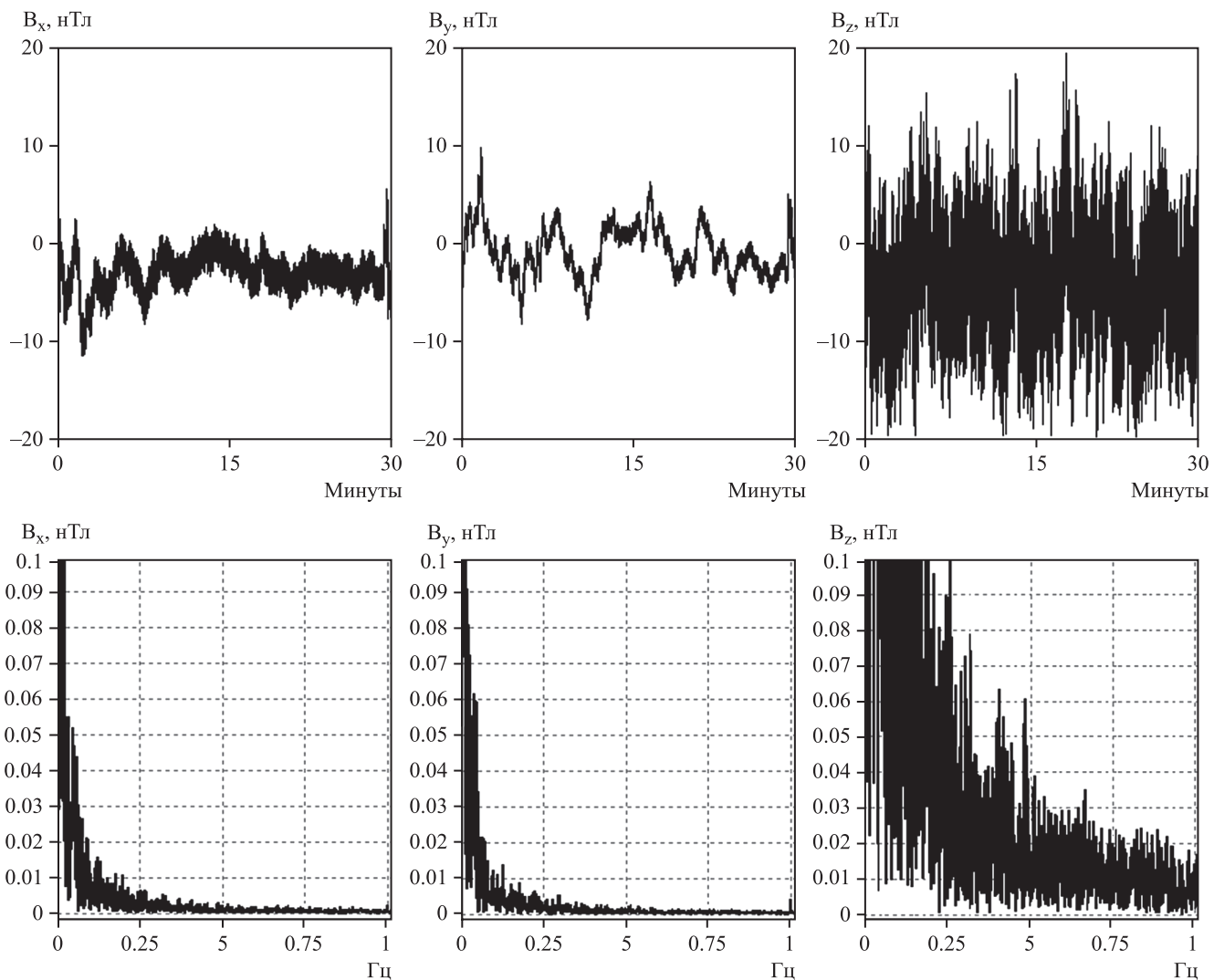


Рис. 5. Фрагменты записи составляющих магнитной индукции V_x , V_y и V_z в лесопарке на окраине города в дневное время (вверху) и соответствующие им низкочастотные спектры магнитного шума (внизу).

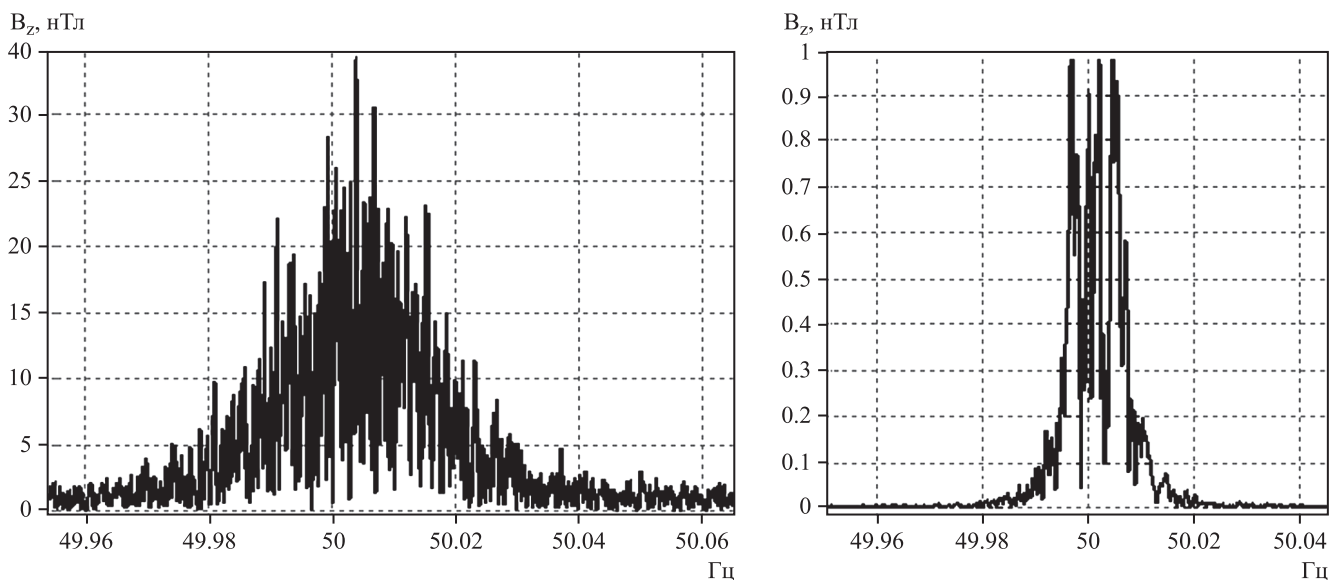


Рис. 6. Спектры вблизи сетевой частоты 50 Гц в высоком разрешении, полученные в центре города (слева) и на окраине города в районе лесопарка (справа).

Фрагменты записи трех компонент магнитной индукции в лесопарковой зоне на окраине Екатеринбурга и соответствующие им спектры в области частот до 1 Гц показаны на рис. 5. Ближайшая линия электропередач находилась на расстоянии более 500 м и не вносила заметного вклада в измеряемый магнитный шум. Амплитуда V_z магнитного шума во всей полосе измеряемых частот составила около 40 нТл от пика до пика, амплитуды V_x , V_y — около 15 нТл от пика до пика. Это примерно в 100 раз меньше, чем амплитуда магнитного шума в центре города, но в то же время в $80 \div 100$ раз больше геомагнитных вариаций в том же диапазоне частот в спокойном геомагнитном поле на большом удалении от города.

ВЫВОДЫ

Городской магнитный шум преимущественно сконцентрирован вблизи промышленной частоты 50 Гц и ее первых гармоник, а также в диапазоне частот менее 1 Гц. Отдельные короткие импульсы большой амплитуды наблюдаются в центральных районах города в зоне передвижения электрического транспорта (метро, трамваи, троллейбусы).

Вертикальная составляющая магнитного шума в центре города днем выше по сравнению с ночным периодом во всем частотном диапазоне измерений. Амплитуда вертикальной составляющей полного магнитного шума в центральных районах города в дневное время в полосе частот $0.01 \div 200$ Гц достигает 4000 нТл (от пика до пика), а амплитуда горизонтальных составляющих достигает 1500 нТл (от пика до пика). В ночное время амплитуда снижается до 500 нТл (от пика до пика) как для вертикальной, так и для горизонтальных составляющих магнитного шума. При этом магнитный шум горизонтальных составляющих в диапазоне частот до 45 Гц в течение суток в центре города значительных изменений не претерпевает, и лишь на частотах выше 45 Гц амплитуда магнитного шума днем несколько выше, чем ночью. На окраине города амплитуда магнитного шума примерно в 100 раз меньше.

Короткие импульсы магнитного шума высокой интенсивности, создаваемые преимущественно электротранспортом, не отображаются в спектре магнитного шума в виде отдельных линий или областей спектра, так как они не синхронизированы между собой и имеют различную длительность.

При сложной спектральной структуре сигналов единичные измерения амплитуды магнитного шума в узкой полосе частот могут значительно (в десятки и сотни раз) отличаться от реальной амплитуды магнитного шума, полученного при запи-

си шумового сигнала в широкой полосе частот или при анализе шумовой дорожки. Следовательно, единичные измерения магнитного шума в узкой полосе частот могут дать искаженное представление о величине магнитного шума.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-35-60004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев Г.Г., Чмырев В.М., Клейменова Н.Г., Козырева О.В. Электромагнитный ультранизкочастотный фон мегаполиса (г. Москва) // Геомагнетизм и аэронавигация. 2003. Т. 43. № 5. С. 697–701.
2. Сокол-Кутыловский О.Л. Автопараметрический датчик магнитной индукции // Датчики и системы. 2009. № 1. С. 37–39.
3. Сокол-Кутыловский О.Л., Тягунов Д.С. Влияние техногенных магнитных полей на геомагнитные измерения в обсерваториях // Измерительная техника. 2012. № 9. С. 58–60.
4. Уткин В.И., Тягунов Д.С., Сокол-Кутыловский О.Л., Сенина Т.Е. Загрязнение окружающей среды в связи с воздействием электромагнитного поля на частотах 0.05–20 Гц // Геоэкология. 2010. № 4. С. 106–112.
5. Фалей М.И., Масленников Ю.В., Кошелец В.П. Измерительные системы на ВТСП СКВИДах // Радиотехника. 2004. № 8–9. С. 82–87.

REFERENCES

1. Belyaev, G.G., Chmyrev, V.M., Kleimenova, N.G., Kozyreva, O.V. *Elektromagnitnyi ultranizkochastotnyi fon megapolisa (g. Moskva)*. [Electromagnetic ultra low frequency megacity background]. *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2003, vol. 43, no. 5, pp. 697–701 (in Russian).
2. Sokol-Kutylovskii, O.L. *Avtoparametricheskii datchik magnitnoi induktsii* [Autoparametric sensor of magnetic induction]. *Datchiki i sistemy*, 2009, no. 1, pp. 37–39 (in Russian).
3. Sokol-Kutylovskii, O.L., Tyagunov, D.S. *Vliyanie tekhnogennykh magnitnykh polei na geomagnitnye izmereniya v observatoriyakh* [The effect of technogenic magnetic fields on geomagnetic measurements in observatories]. *Izmeritel'naya tekhnika*, 2012, no. 9, pp. 58–60 (in Russian).
4. Utkin, V.I., Tyagunov, D.S., Sokol-Kutylovskii, O.L., Senina, T.E. *Zagryaznenie okruzhayushchei sredy v svyazi s vozdeistviem elektromagnitnogo polya na chastotakh 0.05–20 Gts*. [Environment contamination under the electromagnetic field impact at 0.05–20 Hz frequencies]. *Geoekologiya*, 2010, no. 4, pp. 106–112 (in Russian).
5. Falei, M.I., Maslennikov, Yu.V., Koshelets, V.P. *Izmeritel'nye sistemy na VTSP SKVIDah* [Measurement systems on VTSP SKVIDs]. *Radiotekhnika*, 2004, no. 8–9, pp. 82–87 (in Russian).

SPECTRUM OF LOW FREQUENCY MAGNETIC NOISE IN A CITY**D.S. Tyagunov, O.L. Sokol-Kutylovskii**

*Institute of Geophysics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, ul. Amundsena 100, Yekaterinburg, 620016
Russia. E-mail: tds-07@mail.ru*

The spectral composition of human-induced magnetic noise was investigated in the frequency range of 0.01–200 Hz in a large industrial center. The magnetic noise in the city is shown to be mainly concentrated in the frequency of about 50 Hz and its harmonics, as well as in the frequency range of less than 1 Hz. In addition, the central city areas show short pulses of high amplitude, which are mainly related to the movement of electric transport. The higher amplitude of magnetic random noise (represented by a continuous spectrum) in the day time (as compared to the night period) is observed at all frequencies up to 200 Hz. The vertical component amplitude of the magnetic noise usually exceeds the amplitude of the horizontal components of magnetic noise. During the day it can reach ~ 4000 nT (peak to peak) in the central areas of the city and it is reduced almost four times at night. The horizontal components amplitude of the magnetic noise in the city center reaches 1000 nT (peak to peak), and the amplitude decreases almost twice at night. Single measurements of the amplitude of the magnetic noise in a narrow frequency band may differ significantly from the actual amplitude of the magnetic noise obtained from the noise signal record in a wide frequency band or at analysis of width of the noise track.

Key words: *human-induced magnetic noise, industrial noise, electromagnetic noise.*