

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 537.636 : 550.385

ИСТОЧНИКИ ТЕХНОГЕННОГО МАГНИТНОГО ШУМА НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

© 2018 г. Д. С. Тягунов^{1,*}

¹Институт геофизики Уральского отделения РАН, ул Амундсена, 100, Екатеринбург, 620016, Россия

*E-mail: tds-07@mail.ru

Поступила в редакцию 16.02.2018 г.

После исправления 24.04.2018 г.

В статье представлены результаты исследования интенсивности источников городского техногенного магнитного шума в частотном диапазоне 0.01–200 Гц, проведенные в дневное время в пределах Екатеринбурга. Определен модуль магнитной индукции источников магнитного шума. Описаны аппаратура, методика измерений и обработки результатов. Проведено разделение источников техногенного магнитного шума (на первичные и вторичные) по значимости вклада каждого из них в общий магнитный шум города. Показано, что большие значения амплитуды техногенного магнитного шума в городской черте возникают, преимущественно, за счет первичных источников, магнитный шум от которых в исследуемом диапазоне частот может составлять 1000 нТл и более, особенно в “часы пик”, а также на небольших расстояниях от источника. С увеличением расстояния от источника амплитуда магнитного шума быстро снижается до среднего уровня (200–300 нТл) для данного участка города. Индукционные эффекты в металлических проводниках и движение немагнитных металлических проводников в магнитном поле оказывают наименьшее влияние на общий городской магнитный шум и проявляются только на относительно малом расстоянии. Амплитуда регистрируемого сигнала магнитного поля от таких источников магнитного шума составляет до 100 нТл.

Ключевые слова: техногенный магнитный шум, магнитная индукция, промышленные помехи, электромагнитное поле

DOI: 10.1134/S0869780318050083

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что в крупных городах уровень магнитного шума техногенного происхождения в тысячи раз превышает геомагнитные вариации [1, 3, 6, 9]. Это обусловлено тем, что в таких городах сосредоточено огромное количество источников магнитного шума, которые крайне разнообразны и, в свою очередь, отличаются по амплитуде, частоте и фазе [6, 7].

Согласно работам [2, 4, 8, 9], основными источниками техногенного магнитного шума низких частот в крупных промышленных городах считаются силовые линии электропередач, потребители энергии промышленной частоты, железнодорожный и городской электротранспорт. Обычно предполагают, что основные источники магнитного шума лежат в области частот 50 Гц. Однако любое изменение токовой нагрузки потребителями электрического тока с частотой 50 Гц вызывает не менее интенсивное изменение электромагнитного поля во всем диапазоне частот, в том числе и на частотах ниже 50 Гц, что необходимо учитывать при оценке общей электромагнит-

ной обстановки в крупных промышленных городах.

Цель статьи – попытка рассмотреть интенсивность источников городского техногенного магнитного шума в диапазоне частот 0.01–200 Гц и систематизировать их на примере Екатеринбурга.

Под техногенным магнитным шумом в статье понимаются нерегулярные низкочастотные магнитные колебания.

ИСПОЛЬЗУЕМАЯ АППАРАТУРА

Для измерения переменного магнитного поля техногенного происхождения был применен трехкомпонентный магнитометр. В качестве датчиков магнитного поля использованы магнитомодуляционные преобразователи магнитной индукции, выполненные на основе аморфных ферромагнитных сердечников, работающих в режиме автопараметрического усиления. Собственный магнитный шум датчиков составляет 0.1 пТл * Гц^{-1/2}, коэффициент преобразования без внешнего усиления 31.8 мВ/нТл, диапазон частот измеряемого сигнала 0.01–200 Гц. Аналоговый электрический сигнал с датчиков поступает на 24-х разрядный

программируемый аналого-цифровой преобразователь (АЦП) AD7734EBZ, выход которого соединен с переносным компьютером, управляющим работой АЦП и сохраняющим данные измерений в цифровом виде в отдельном текстовом файле [5].

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ

При проведении измерений для исключения внешней вибрационной помехи датчик устанавливался на немагнитный штатив и на расстоянии несколько метров от источников магнитного шума (дороги для автомобильного транспорта, линия электропередач (ЛЭП), линия и станции метрополитена, электротранспорт). Выравнивание составляющих магнитной индукции V_x и V_y относительно горизонтальной плоскости осуществлялось при помощи уровня, встроенного в корпус датчика. При этом горизонтальная компонента V_x была направлена по магнитному меридиану, горизонтальная компонента V_y ортогональна магнитному меридиану, компонента V_z устанавливалась вертикально. Продолжительность записи шумового сигнала в каждой точке измерения составляла 30 мин. Средние значения модуля магнитной индукции $|\mathbf{V}|$ каждой точки измерения определялись по средним значениям амплитуд компонент магнитной индукции V_x , V_y , V_z :

$$|\mathbf{V}| = \sqrt{\overline{V_x^2} + \overline{V_y^2} + \overline{V_z^2}}$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Анализ низкочастотных источников техногенного магнитного шума, проведенный автором данной работы, показал, что такие источники можно разделить на первичные и вторичные. К первичным источникам следует отнести те источники, которые сами создают электромагнитное поле: все линии электропередач постоянного и переменного тока любой частоты; движущиеся электромагнитные и ферромагнитные источники (электропоезда, трамваи, троллейбусы и т.п.), имеющие свой собственный магнитный момент, который при перемещении в пространстве или вращении создает изменение магнитного поля, влияющее на магнитное поле в данной точке на поверхности Земли. К вторичным источникам техногенного магнитного шума низких частот относятся источники, преобразующие изменение воздействующего на них электромагнитного поля во вторичное магнитное поле, которое складывается с первичным. Источники такого вида связаны с проявлением эффектов и явлений электромагнитной индукции и самоиндукции в металлических немагнитных проводниках при движении их во внешнем магнитном поле.

Первичные источники техногенного магнитного шума

На рис. 1 представлены фрагменты записи амплитуды магнитного шума создаваемого ЛЭП напряжением 500 кВ.

Помехи от ЛЭП возникают в основном за счет частоты 50 Гц и ее гармоник. Поскольку ЛЭП можно отнести к локальным источникам, то магнитный шум, как правило, сосредоточен вблизи них. На рис. 1 *а* видно, что на расстоянии ~5 м от ЛЭП амплитуда магнитного шума от пика до пика по горизонтальным составляющим магнитной индукции составляет $V_x = 300$ нТл, $V_y = 900$ нТл, вертикальной $V_z = 2500$ нТл, $|\mathbf{V}| = 2700$ нТл. С увеличением расстояния до 150 м (рис. 1 *б*) амплитуда магнитного шума, создаваемая ЛЭП, резко спадает и составляет по горизонтальным составляющим $V_x = 10$ нТл, $V_y = 45$ нТл, по вертикальной $V_z = 100$ нТл, $|\mathbf{V}| = 110$ нТл. Надо отметить, что близкие значения $|\mathbf{V}|$ (2500 нТл) были получены в работе [4], определенные по измерению составляющих магнитной индукции под линиями высоковольтных передач и вблизи кабельных сооружений, расположенных в южной части г. Томска.

Помехи, создаваемые движущимся городским транспортом в данной точке измерения, рассмотрены на примере регистрации шумового сигнала от проезжающего электротранспорта и автотранспорта. На рис. 2 показан фрагмент записи амплитуды магнитного шума, зарегистрированный вблизи станции метро “Машиностроителей”. Точка измерения располагалась ~20 м от линии метрополитена.

Видно, что магнитный шум, создаваемый электропоездами метро, имеет импульсный характер, амплитуда которого от пика до пика по горизонтальным составляющим магнитной индукции V_x и V_y может составлять 3000–4000 нТл, вертикальной $V_z = 6500$ нТл, $|\mathbf{V}| = 8200$ нТл. Средняя амплитуда шумовой дорожки для $V_x = 100$ нТл, $V_y = 200$ нТл, $V_z = 500$ нТл, $|\mathbf{V}| = 540$ нТл. В утреннее время электропоезда Екатеринбургского метро движутся с четырехминутным интервалом и временем стоянки на станциях ~1–2 мин. На представленном фрагменте записи (см. рис. 2) можно четко заметить, что за 30 мин измерений проявились импульсные сигналы от шести поездов, подходящих к станции и отходящих от нее. На компонентах магнитной индукции эти сигналы отображаются в виде тонких линий высокой амплитуды. Если детализировать запись шумовой дорожки, то форма этих сигналов будет иметь более сложную структуру (рис. 3).

Приведенные фрагменты записи амплитуды магнитного шума от электропоездов метро, зарегистрированного вблизи станции метро “Машиностроителей”, аналогичны записям магнитного

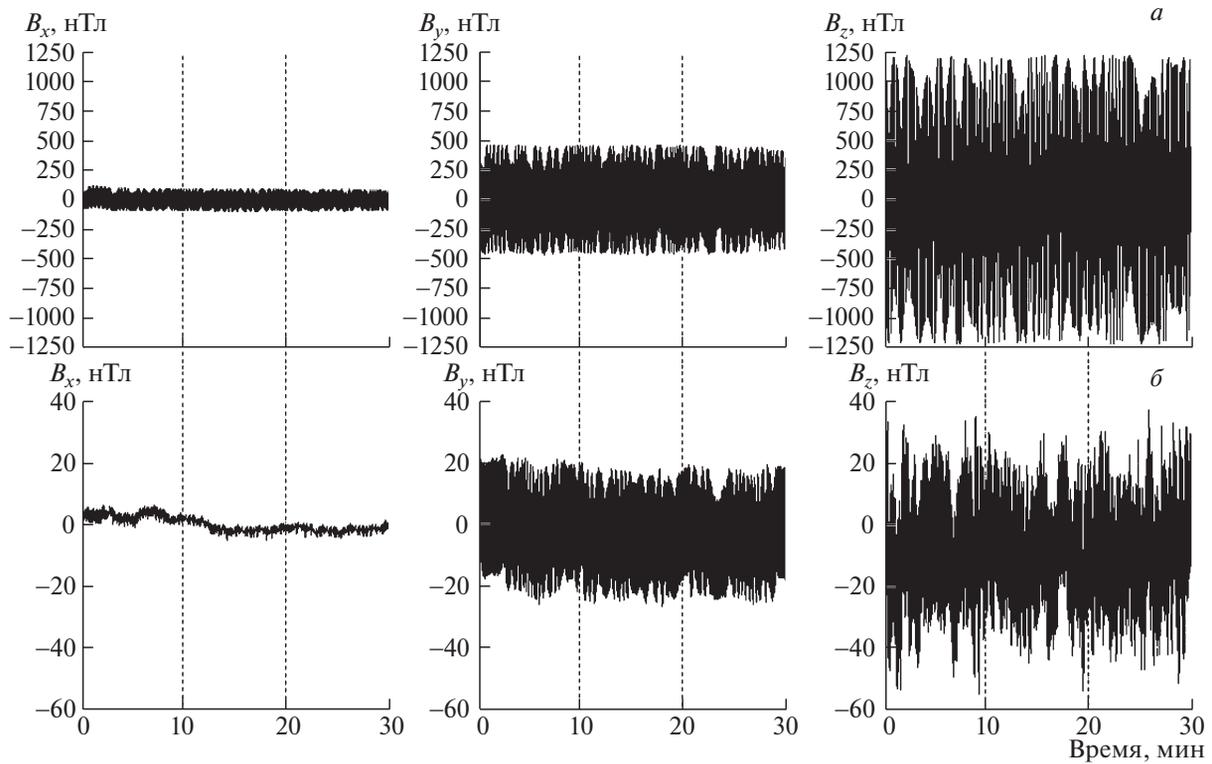


Рис. 1. Магнитограммы составляющих магнитной индукции, зарегистрированные в дневное время на расстоянии от ЛЭП: а – ~5 м; б – ~150 м.

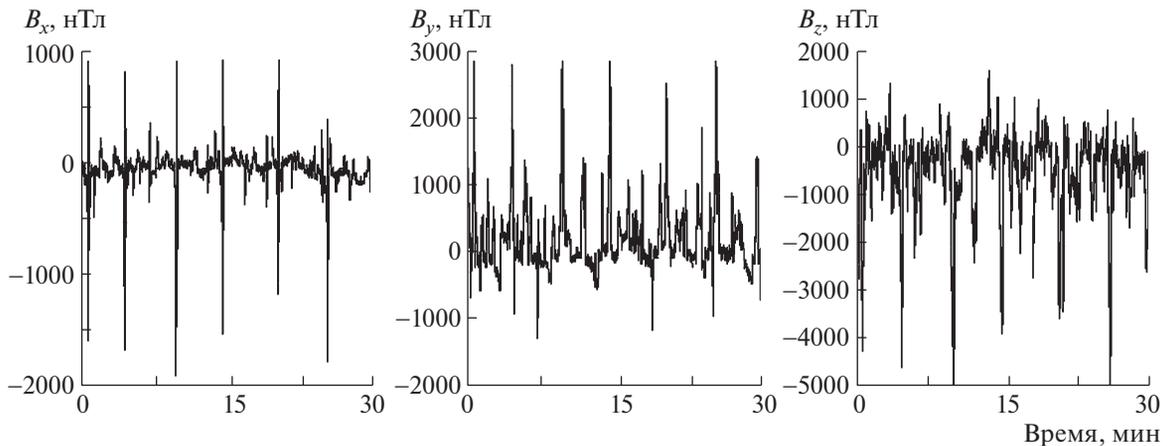


Рис. 2. Фрагмент утренней записи амплитуды составляющих магнитного шума, зарегистрированного вблизи станции метро “Машиностроителей”.

шума для других станций Екатеринбургского метрополитена [8].

На рис. 4а показан фрагмент записи амплитуды магнитного шума, зарегистрированного вблизи троллейбусной остановки. Точка измерения располагалась ~20 м от питающей троллейбусной линии.

Начальные моменты движения троллейбусов (включение электродвигателей) наблюдаются на 190, 415, 450, 620 и 720 секундах измерения и созда-

ют изменение амплитуды магнитного поля от пика до пика около 220–260 нТл по горизонтальным составляющим и 180 нТл по вертикальной составляющей (см. рис. 4). Надо заметить, что непосредственно большие изменения амплитуды магнитного поля наблюдаются в пределах пассажирских мест троллейбуса, где значение $|\mathbf{B}| = 600–850$ нТл и имеют наиболее выраженные моды магнитной индукции в области частот 2–2.5 Гц [4].

Техногенный магнитный шум, создаваемый трамваями, представлен на рис. 4б. Точка измере-

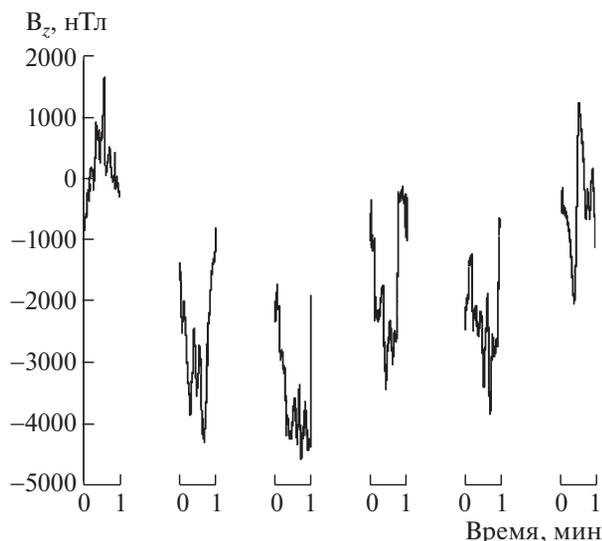


Рис. 3. Детализация минутных импульсных сигналов вертикальной составляющей фрагмента записи, полученной вблизи станции метро “Машиностроителей”.

ния располагалась ~ 50 м от питающей трамвайной линии. На магнитограммах видно, что за 30 мин измерений магнитометр в точке измерения зафиксировал изменение магнитного поля от проходящих 10 трамваев. Импульсные сигналы амплитудой 15–100 нТл четко проявились по горизонтальным составляющим магнитной индукции V_x и V_y . По вертикальной составляющей магнитного поля V_z импульсные сигналы явно не проявились. Это связано с тем, что амплитуда общего магнитного шума вертикальной составляющей оказалась более чем в 2 раза больше амплитуды магнитного шума самого источника. Поэтому магнитометр в точке измерения не разрешил импульсный сигнал, создаваемый трамваями, из этого общего шума.

К сожалению, в литературе не имеется достаточного описания о проведенных аналогичных измерениях магнитного шума, поэтому для выявления влияния мощных импульсов электрического тока, создаваемых непосредственно внутри городского электротранспорта, необходимы дополнительные исследования.

Помехи, создаваемые автомобильным транспортом, представлены на рис. 4в. Чтобы оценить влияние магнитного шума, создаваемого исключительно городским автотранспортом, точка измерения была выбрана таким образом, чтобы в радиусе ~ 1 км от нее не было высоковольтных ЛЭП и электрифицированных линий для наземного и подземного электротранспорта. Кроме этого учитывалось и расстояние между автомобилями и измерительным прибором, на котором автотранспорт мог исказить магнитное поле в данной точке на поверхности Земли.

На расстоянии ~ 150 м от проезжей части проезд грузовых и легковых автомобилей вызвал изменение амплитуды магнитного поля 150–200 нТл по горизонтальным составляющим V_x , V_y и до 300 нТл по вертикальной составляющей V_z , значение $|V|$ составило 390 нТл (см. рис. 4е). При проезде единичного грузового автомобиля на расстоянии ~ 5 м от датчика изменение амплитуды магнитного поля составило 1200 нТл по горизонтальным составляющим V_x , V_y и около 1000 нТл по вертикальной составляющей V_z , значение $|V| = 1960$ нТл. Проезд единичного легкового автомобиля на расстоянии ~ 5 м от датчика вызвало изменение поля до 600–800 нТл по всем составляющим магнитной индукции V_x , V_y , V_z , а значение $|V|$ составило 1118 нТл.

Приведенные результаты показывают, что постоянно движущийся городской транспорт является распределенным генератором непрерывных вариаций магнитного поля низких частот, ампли-

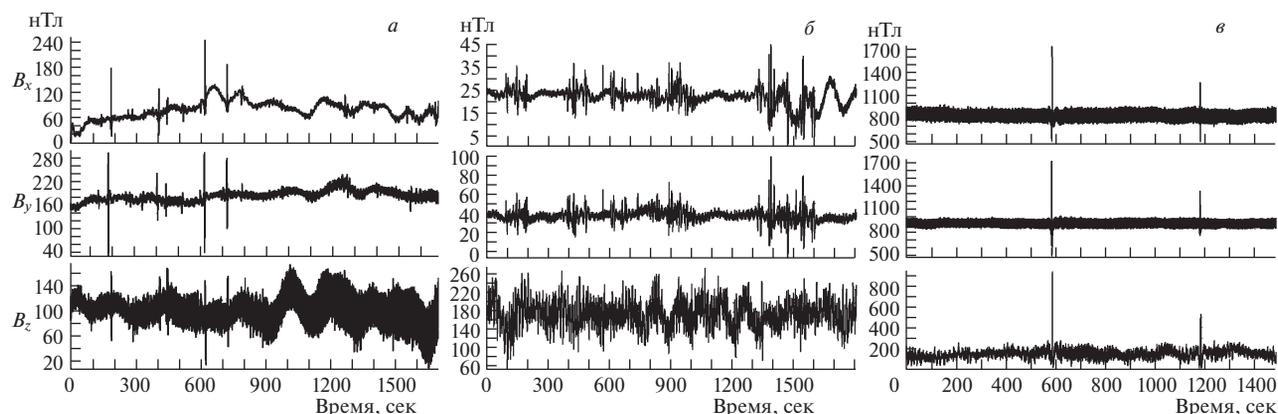


Рис. 4. Фрагмент дневной записи магнитного шума, создаваемого: а — троллейбусами, б — трамваями, в — движущимся автомобильным транспортом.

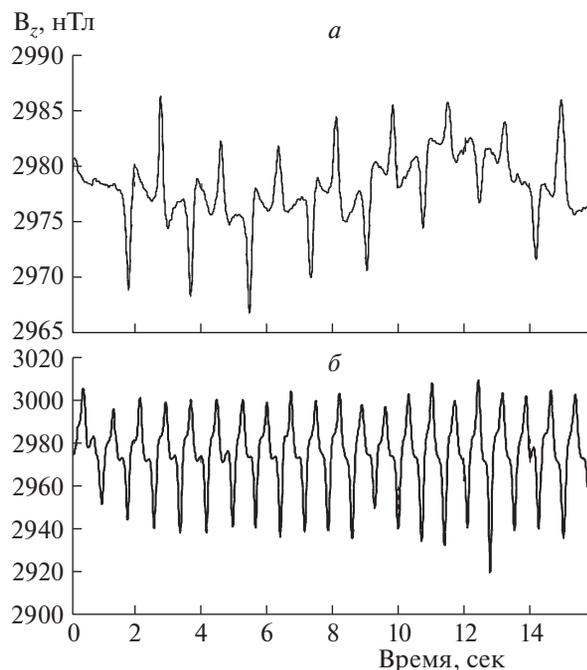


Рис. 5. Фрагменты записей изменения амплитуды магнитного поля, вызванного движением немагнитных пластин.

туда которого может достигать величины 1000 нТл и более, особенно на небольших расстояниях от источника, а также в “часы пик”.

Вторичные источники техногенного магнитного шума

Изменения вторичного магнитного поля, вызванные движением проводника, рассмотрены на примере движения металлических немагнитных пластин в магнитном поле. Чтобы убедиться, что пластины выполнены из немагнитного материала (алюминиевый сплав), использовался магнит. Датчик магнитной индукции располагался на расстоянии 0.1 м от пластин. В эксперименте оценивалось влияние немагнитных пластин на вертикальную составляющую магнитной индукции V_z при их неподвижном и подвижном состоянии. При неподвижном состоянии пластин регистрировался только общий магнитный шум.

При горизонтальном движении с периодом 1–2 с расположенной вертикально немагнитной пластины (параметры пластины: ширина 16 см, высота 26 см, толщина 4 мм) так, что ее плоскость пересекает линии магнитной индукции, максимальная амплитуда сигнала, вызванного движением пластины, от пика до пика составила 20 нТл (рис. 5а). При больших геометрических размерах пластины (параметры пластины: ширина 45 см, высота 40 см, толщина 1 мм), амплитуда регистрируемого сигнала магнитного поля возросла до 90 нТл (рис. 5б). Таким образом, наведенное

вторичное магнитное поле быстро убывает с расстоянием от проводящей движущейся пластины, а при расстояниях, в несколько раз превышающих максимальные линейные размеры пластины, индуцируемое ею магнитное поле пренебрежимо мало.

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

1. Вблизи линий электропередач, вдоль всей их протяженности, создается повышенное магнитное поле промышленной частоты, которое на расстоянии ~150 м от линии электропередач быстро снижается до среднего уровня магнитного шума для данного участка города.

2. В городской черте большие значения амплитуды техногенного магнитного шума наблюдаются, преимущественно, за счет передвижения автотранспорта и электротранспорта, магнитный шум от которых в исследуемом диапазоне частот может составлять 1000 нТл и более, особенно в “часы пик”, а также на небольших расстояниях от источника.

3. Индукционные эффекты в металлических проводниках и движение немагнитных металлических проводников в магнитном поле оказывают наименьшее влияние на общий городской магнитный шум низких частот и проявляются только на относительно малом расстоянии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев Г.Г., Чмырев В.М., Клейменова Н.Г., Козырева О.В. Электромагнитный ультранизкочастотный фон мегаполиса (г. Москва) // Геомagnetизм и аэрономия. 2003. Т. 43. № 5. С. 697–701.
2. Вишнев В.С. Некоторые характеристики техногенного электромагнитного импульсного поля тяговой сети железной дороги // Уральский геофизический вестник. (сб. статей). Екатеринбург: УрО РАН. 2003. № 5. С. 16–23.
3. Владимиров Н.П., Клейменова Н.Г. О структуре естественного электромагнитного поля Земли в диапазоне 0.5–100 Гц // Известия АН СССР. Сер. геофиз. 1962. № 10. С. 1368–2374.
4. Колесник А.Г., Колесник С.А., Бородин А.С., Шошин Е.Л., Федичев М.А. Электромагнитный фон городских территорий диапазона промышленных частот // Вестн. Том. гос. ун-та. 2007. № 297. С. 161–164.
5. Сокол-Кутыловский О.Л., Тягунов Д.С. Аппаратура для регистрации магнитного поля низких частот // Уральский геофизический вестник. 2007. № 4 (13). С. 69–73.
6. Спивак А.А., Локтев Д.Н., Рыбнов Ю.С., Соловьев С.П., Харламов В.А. Геофизические поля мегаполиса // Геофизические процессы и биосфера. 2016. Т. 15. № 2. С. 39–54.
7. Тягунов Д.С., Сокол-Кутыловский О.Л. Спектральное распределение городского магнитного шума в диапазоне низких частот // Вестник. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 3 (31). С. 58–64.

8. Тягунов Д.С. Метрополитен как один из источников электромагнитного шума // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 7-4 (49). С. 159–163.
9. Уткин В.И., Тягунов Д.С. Пространственное распределение городского техногенного магнитного шума в частотном диапазоне 0.01–30 Гц // Доклады Академии наук. 2013. Т. 453. № 3. С. 334–336.

SOURCES OF HUMAN-INDUCED MAGNETIC NOISE IN THE URBANIZED TERRITORIES

D. S. Tyagunov^{a,#}

^a*Institute of Geophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. Amundsena 100, Yekaterinburg, 620016, Russia*

[#]*E-mail: tds-07@mail.ru*

The article presents the research results on the intensity of sources of urban human-induced magnetic noise in the frequency range of 0.01–200 Hz, conducted in the daytime within Yekaterinburg. The magnetic induction module of magnetic noise sources is determined on the basis of these measurements. The equipment, methods of measurement and processing of results are described. The sources of human-induced magnetic noise were subdivided into primary and secondary ones according to the importance of their contribution to the total magnetic noise in the city. The primary sources of human-induced magnetic noise of low frequencies include sources that create their own electromagnetic field (power lines, moving electromagnetic and ferromagnetic sources). These secondary sources of human-induced magnetic noise of low frequencies include sources, which transform the electromagnetic field influencing them into the secondary magnetic field, which folds with the primary sources (effects and phenomena of electromagnetic induction and self-induction in metallic non-magnetic conductors when moving them in an external magnetic field). It is shown that large values of the amplitude of human-induced magnetic noise within the city arise mainly due to primary sources, magnetic noise from which in the investigated frequency range can be 1000 nTl and more, especially in the “peak hours” and also at small distances from the source. With increasing distance from the source the amplitude of the magnetic noise is rapidly reduced to an average level (200–300 nTl) for this section of the city. The induction effects in metallic conductors and the movement of non-magnetic metallic conductors in the magnetic field have the least impact on the overall urban magnetic noise and are only manifested at a relatively small distance. The amplitude of the recorded magnetic field signal from such sources of magnetic noise from peak to peak is up to 100 nTl.

Key words: *human-induced magnetic noise, magnetic induction, industrial interference, electromagnetic field*

REFERENCES

1. Belyaev, G.G., Chmyrev, V.M., Kleimenova, N.G., Kozyreva, O.V. *Elektromagnitnyi ultranizkочастотnyi fon megapolisa (g. Moskva)*. [Electromagnetic ultra low frequency megacity background]. *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2003, vol. 43, no. 5, pp. 697–701 (in Russian)
2. Vishnev, V.S. *Nekotorye kharakteristiki tekhnogenogo elektromagnitnogo impul'snogo polya tyagovoi seti zheleznoi dorogi*. [Some characteristics of man-made electromagnetic pulsed field of traction network railway]. *Ural'skii geofizicheskii vestnik*, 2003, no. 5, pp. 16–23 (in Russian)
3. Vladimirov, N.P., Kleimenova, N.G. *O strukture estestvennogo elektromagnitnogo polya Zemli v diapazone 0.5–100 Gts*. [About the structure of the natural electromagnetic field of the Earth in the range 0.5–100 Hz]. *Izv. AN SSSR. Ser. geofiz.* 1962, no.10, pp. 1368–2374 (in Russian)
4. Kolesnik, A.G., Kolesnik, S.A., Borodin, A.S., Shoshin, E.L., Fedichev, M.A. *Elektromagnitnyi fon gorodskikh territorii diapazona promyshlennykh chastot*. [The electromagnetic background of urban areas in the range of industrial frequencies]. *Vestn. Tom. gos. un-ta*. 2007, no. 297, pp. 161–164 (in Russian)
5. Sokol-Kutylovskii, O.L., Tyagunov, D.S. *Apparatura dlya registratsii magnitnogo polya nizkikh chastot*. [Instrumentation for registering magnetic fields at low frequencies]. *Ural'skii geofizicheskii vestnik*. 2007, no. 4(13), pp. 69–73 (in Russian)
6. Spivak, A.A., Loktev, D.N., Rybnov, Yu.S., Solov'ev, S.P., Kharlamov, V.A. *Geofizicheskie polya megapolisa*. [Geophysical fields in the megacity]. *Geofizicheskie protsessy i biosfera*. 2016, vol. 15, no. 2, pp. 39–54 (in Russian)
7. Tyagunov, D.S., Sokol-Kutylovskii, O.L. *Spektral'noe raspredelenie gorodskogo magnitnogo shuma v diapazone nizkikh chastot*. [Spectral distribution of urban magnetic noise in the low frequency range]. *Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle*. 2016, no. 3(31), pp. 58–64 (in Russian)
8. Tyagunov, D.S. *Metropliten kak odin iz istochnikov elektromagnitnogo shuma*. [Metro as one of the sources of electromagnetic noise]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*. 2016, no. 7(49), pp. 159–163 (in Russian)
9. Utkin, V.I., Tyagunov, D.S. *Prostranstvennoe raspredelenie gorodskogo tekhnogenogo magnitnogo shuma v chastotnom diapazone 0.01–30 Gts*. [The spatial distribution of urban man-made magnetic noise in the frequency range 0.01–30 Hz]. *Doklady RAN*, 2013, vol. 453, no. 3, pp. 334–336 (in Russian)