

На правах рукописи



Тягунов Дмитрий Сергеевич

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ГОРОДСКОГО ТЕХНОГЕННОГО МАГНИТНОГО ШУМА
В ЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ 0,01 – 30 ГЦ**

Специальность: 25.00.10 –
Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук

Научный руководитель

заслуженный деятель науки России,
член-корреспондент РАН,
доктор технических наук, профессор

Уткин Владимир Иванович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук

Сенин Лев Николаевич

доктор технических наук

Чеботина Маргарита Яковлевна

Ведущая организация:

Институт промышленной экологии УрО РАН, Екатеринбург.

Защита состоится «9» ноября 2012 г. в 14⁰⁰ часов на заседании Диссертационного Совета Д 004.009.01 в Институте геофизики УрО РАН по адресу: 620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 100.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института геофизики УрО РАН.

Автореферат разослан «5» октября 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, профессор



Ю.В. Хачай

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Общепринято, что наибольший вклад в электромагнитный шум на низких частотах вносят основные потребители электрического тока промышленной частоты. Это так, но при этом практически не рассматривается вопрос о генерации магнитного шума в области частот 0,01 – 30 Гц, например, движущимися ферромагнитными и электромагнитными источниками, имеющие свой собственный магнитный момент, который, при перемещении в пространстве или при вращении, создает изменение геомагнитного поля. Кроме того, имеются источники, связанные с проявлением эффектов и явлений электромагнитной индукции и самоиндукции в металлических проводниках, а также эффекты, возникающие при движении проводников во внешнем магнитном поле. Поскольку систематические исследования электромагнитного поля, создаваемого такими техногенными источниками, практически не проводятся, представляется актуальной оценка эффективных значений магнитной индукции для типичных источников в диапазоне частот 0,01 – 30 Гц и определение спектральных характеристик генерируемого ими магнитного поля.

Особенно это актуально в связи с непрерывно возрастающей интенсивностью техногенных электромагнитных полей по причине увеличения энергоемкости промышленного и бытового секторов мегаполиса, существенного увеличения транспортных потоков городского и пригородного сообщения. В таких сложившихся условиях усложняются работы с применением геофизических методов поисков и разведки, которые играют значительную роль в решении широкого круга геологических, инженерно- и гидрогеологических задач. Например, имеется сложность применения электромагнитных методов в геофизике, проводимые в сильно зашумленных техногенным электромагнитным шумом районах. Изучение структуры магнитных полей, создаваемых различными техногенными установками, исследование слабых магнитных полей космического пространства, магнитная дефектоскопия и т.д. – становится более трудным без развития и совершенствования средств измерений, способствующих работе в условиях повышенного магнитного шума.

Помимо перечисленных факторов в настоящее время становятся все более сложными задачи геологоразведочных работ, поскольку запасы неглубоко залегающих месторождений практически исчерпаны, а для поиска и разведки залегающих объектов необходима более чувствительная аппаратура, в том числе измеряющая электромагнитные поля, работа которой в условиях электромагнитных шумов сильно затруднена. Особенно это относится к горно-обогатительным комбинатам, на территории которых, в первую очередь, осуществляется разведка глубоких горизонтов. Поэтому необходимо знать и контролировать техногенную электромагнитную обстановку в местах проведения геологоразведочных работ.

Под техногенным электромагнитным шумом в диссертационной работе понимаются нерегулярные низкочастотные электромагнитные колебания. В работе исследовались магнитные составляющие шумового электромагнитного поля в диапазоне частот 0,01 – 30 Гц.

Цель работы – выявление основных источников техногенного электромагнитного шума и определение интенсивности создаваемых ими вариаций магнитного поля в диапазоне частот 0,01 – 30 Гц; изучение динамики низкочастотных возмущений источников техногенного происхождения; сравнение величины техногенного магнитного шума с величиной геомагнитных вариаций в исследуемом диапазоне частот и определение критериев различия этих магнитных полей.

Основные задачи исследований

В соответствии с поставленной целью в работе решены следующие основные задачи:

1. Исследована интенсивность магнитного поля в области низких частот, вызываемого техногенными причинами.
2. Показаны основные особенности различных источников электромагнитного шума.
3. Произведена оценка возможного искажения геомагнитного поля создаваемого техногенными источниками.

Научная новизна работы

1. Количественно исследованы шумы основных типов источников техногенного электромагнитного шума в диапазоне низких частот в г.Екатеринбурге (линии электропередач, движение автомобильного и городского пассажирского транспорта и т.д.) и оценен вклад каждого из них в общий электромагнитный шум города.
2. Показано, что ввиду непрерывно увеличивающейся электроэнергетической насыщенности городов техногенный электромагнитный шум многократно возрастает в пределах города и становится значимым фактором риска с точки зрения экологической безопасности.
3. Впервые получены представительные данные о вариациях магнитного шума в г.Екатеринбурге в зависимости от времени суток и расстояния от мегаполиса. В течение суток городской техногенный магнитный шум имеет периодический характер с ярко выраженным минимумом. Показано, что городской техногенный магнитный шум неравномерно распределен по площади города. От центральных районов города к его окраинам наблюдается значительный спад магнитного шума, который при условии отсутствия мощных локальных источников плавно уменьшается и выходит на уровень геомагнитных вариаций за пределами порядка 20-ти километровой зоны от городской черты.
4. Показано, что население крупных промышленных городов постоянно находится под влиянием низкочастотного техногенного магнитного шума, вариации которого сопоставимы по амплитуде с геомагнитными бурями средней величины.

Защищаемые положения

1. Количественно показано, что магнитный шум техногенного происхождения, превышающий геомагнитные вариации, распространяется на расстояние до 20 – 40 км от г.Екатеринбурга, при этом максимальный уровень техногенного магнитного шума в центральной части мегаполиса изменяется циклически в течение суток и превышает уровень геомагнитных вариаций в исследуемом диапазоне частот в тысячи раз.

2. Определены основные критерии различия техногенного магнитного шума от геомагнитных вариаций, основанные на анализе соотношения амплитуд короткопериодных вариаций вертикальной и горизонтальных составляющих вектора магнитной индукции и суточной цикличности амплитуды низкочастотных шумов вертикальной составляющей магнитного поля.

Практическая значимость работы

1. Впервые применен малогабаритный аппаратно-методический комплекс, обеспечивающий оперативное, автономное, одновременное измерение и регистрацию в цифровом виде трех компонент магнитного поля, обладающий повышенной чувствительностью в диапазоне частот 0,01-30 Гц.

2. Определены критерии, позволяющие отличить геомагнитные вариации от техногенного магнитного шума при сопоставимых амплитудах изменения магнитного поля и которые дают возможность оценить условия работы магнитных обсерваторий.

3. Результаты проведенных исследований электромагнитного шума могут использоваться: при комплексных высокочувствительных электромагнитных измерениях в геофизике (электроразведке, магнитных наблюдениях и магниторазведке) для учета техногенного влияния на результаты измерений в зоне интенсивных промышленных помех; для рекомендаций по выполнению обсерваторских наблюдений в зоне действия техногенного магнитного шума.

4. Полученные результаты измерений магнитного шума могут иметь большое значение для мониторинга загрязнения окружающей среды электромагнитными помехами низких частот, что является одной из проблем экологической геофизики.

Личный вклад автора

Работа подготовлена по результатам исследований, начатых автором в 2007 г. в составе лаборатории ядерной геофизики (ныне лаборатория геодинамики) под научным руководством член-корреспондента РАН, д.т.н. В.И. Уткина.

В процессе подготовки выполнен большой объем экспериментальных исследований, результаты которых отражены автором как самостоятельно, так и в совместных публикациях с сотрудниками, участвовавшими в работе на различных ее стадиях: О.Л. Сокол-Кутыловским, Т.Е. Сениной, В.И. Уткиным. Кроме того, личный вклад автора заключался в постановке и решении ряда задач, тестировании аппаратуры, непосредственном участии в проведении полевых измерений, разработке методики для измерения

вариаций электромагнитного шума в диапазоне частот 0,01 – 30 Гц, обработке полученных материалов.

Апробация работы

Основные положения и результаты работы докладывались на: XV и XVI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (Москва, 2008, 2009); Конференции, посвященной 50-летию Института геофизики УрО РАН (Екатеринбург 2008); «Десятых геофизических чтениях имени В.В. Федынского» (Москва 2008); «Пярых научных чтениях памяти Ю.П. Булашевича» (Екатеринбург 2009); Уральской молодежной научной школе по геофизике (Екатеринбург-Пермь 2008, 2009, 2010, 2011).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения. Содержит 119 страниц печатного текста и сопровождается списком литературы из 90 наименований. Текст иллюстрирован 58 рисунками и 1 таблицей.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю д.т.н., профессору, член-корр. РАН В.И. Уткину, предложившему заняться тематикой техногенного электромагнитного шума и с которым автор имел возможность обсуждать направление исследований и их результат. Автор также признателен сотрудникам лаборатории электрометрии Института геофизики УрО РАН д.т.н. О.Л. Сокол-Кутыловскому и инженеру А.И. Сарвартинову, непосредственное участие которых позволило выполнить эту работу.

Автор благодарит сотрудников Института геофизики УрО РАН член-корр. РАН, д.ф.-м.н. П.С. Мартышко, д.ф.-м.н. В.Т. Беликова, д.ф.-м.н. Ю.В. Хачай, д.ф.-м.н. А.Ф. Шестакова, д.т.н. А.И. Человечкова, д.г.-м.н. Д.Ю. Демежко, к.г.-м.н. А.К. Юркова, к.г.-м.н. И.А. Казлову, к.т.н. В.С. Вишнева за ценные советы при написании диссертации; к.т.н. Е.Н. Рыбакова за помощь в проведении полевых измерений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследований, приведены защищаемые положения, охарактеризованы научная новизна, практическая значимость работы и личный вклад автора.

В первой главе дан анализ ранее выполненных работ по изучению влияния электромагнитного шума техногенного происхождения и некоторые теоретические положения, примененные в диссертационной работе.

На основе анализа современного состояния работ по изучению вариаций техногенного магнитного поля, показана необходимость детального изучения источников техногенного электромагнитного шума и определение интенсивности создаваемых ими вариаций магнитного поля в пределах

крупных промышленных центров (на примере Екатеринбурга) в диапазоне частот 0,01-30 Гц, вызванного техногенными причинами.

В теоретическом обосновании проблемы показано, что в сумме полей наблюдаемого магнитного поля (по Яновскому) не учитывается магнитное поле техногенного происхождения, которое с каждым годом увеличивается и, в районах сплошной индустриализации и крупных мегаполисах уже заметно превышает поле геомагнитных вариаций. Условно, эту сумму полей можно представить в виде относительно постоянной части $H_0 + H_m + H_a + H_e$ плюс магнитного поля вариаций $\delta H + H_n$ (δH – поле геомагнитных вариаций; H_n – поле техногенного происхождения).

Во второй главе описывается аппаратура и методика измерений. Даны основные технические характеристики преобразователя магнитной индукции, блок-схема калибровки датчиков магнитного поля, проверка линейности зависимости аппаратуры по переменному магнитному полю.

С целью оптимизации измерений индукции магнитного поля в области низких частот (0,01 – 30 Гц) проанализированы: возможности различных типов существующих на настоящее время магнитометрических преобразователей и измерителей магнитной индукции в области частот от 0 Гц до 70 Гц; требования к измерителям магнитной индукции для измерения уровня магнитного шума (динамический диапазон измерений, чувствительность, порог чувствительности).

На основе проведенного анализа сделан вывод, что наиболее подходящим для изучения вариаций магнитного поля техногенного происхождения в диапазоне частот 0,01 – 30 Гц оказывается магнитометр с магнитомодуляционным датчиком (измерение компонент с достаточно низким уровнем шума, высокой чувствительностью, и т.п.).

В лабораторных условиях автором была проведена калибровка аппаратуры по стандартной методике с использованием калечной системы Гельмгольца. В результате калибровки аппаратуры были получены следующие данные:

- динамический диапазон измеряемого поля – ± 50 мкТл;
- линейность в диапазоне частот 0,01 – 30 Гц не хуже 1%;
- коэффициент преобразования в диапазоне частот 0,01 – 30 Гц – 60мВ/нТл;
- приведенная цена деления АЦП 7734ЕВZ – 1/163 нТл;
- нелинейность преобразования АЦП 7734ЕВZ – $\pm 0,0015$ %;
- шум-фактор магнитометра в диапазоне от 1 Гц и выше – порядка 1 пТл/Гц^{1/2}.

После того, как прибор был откалиброван, проводились комплексные измерения. Длительность времени записи определялась минимальным периодом регистрируемой частоты и количеством периодов. Для измерений шумового сигнала измерения проводятся пять минут, для измерения длинных сигналов – несколько суток.

Для обработки полученных результатов измерений из массива данных выбирался наиболее типичный участок (без момента включения и выключения магнитометра), учитывался калибровочный коэффициент и строилась магнитограмма.

В третьей главе рассмотрены основные источники техногенного электромагнитного шума низких частот, дающие основной вклад в общий техногенный электромагнитный шум мегаполиса.

Все источники техногенного электромагнитного шума низких частот были условно разделены на две группы: первичные и вторичные. К первичным источникам были отнесены источники, которые сами создают электромагнитное поле (линии электропередач постоянного и переменного тока любой частоты; электротранспорт; движущиеся ферромагнитные и электромагнитные источники), имеющие свой собственный магнитный момент, который при перемещении в пространстве или при вращении создает изменение магнитного поля, влияющее на магнитное поле в данной точке на поверхности Земли. К вторичным источникам были отнесены источники, связанные с проявлением эффектов и явлений электромагнитной индукции и самоиндукции в металлических проводниках, а также источники вторичного магнитного поля, возникающие при движении металлических немагнитных проводников во внешнем магнитном поле.

Наибольший вклад в электромагнитный шум, в том числе на исследуемых частотах вызывают токовые переключения потребителей электрического тока промышленной частоты. Но кроме этого, к основному вкладу следует отнести и движение магнитных масс, в частности автомобильный транспорт.

Помехи, создаваемые движущимися ферромагнитными массами в данной точке измерения, рассмотрены на примере регистрации сигнала магнитного поля от проезжающего электротранспорта и автотранспорта.

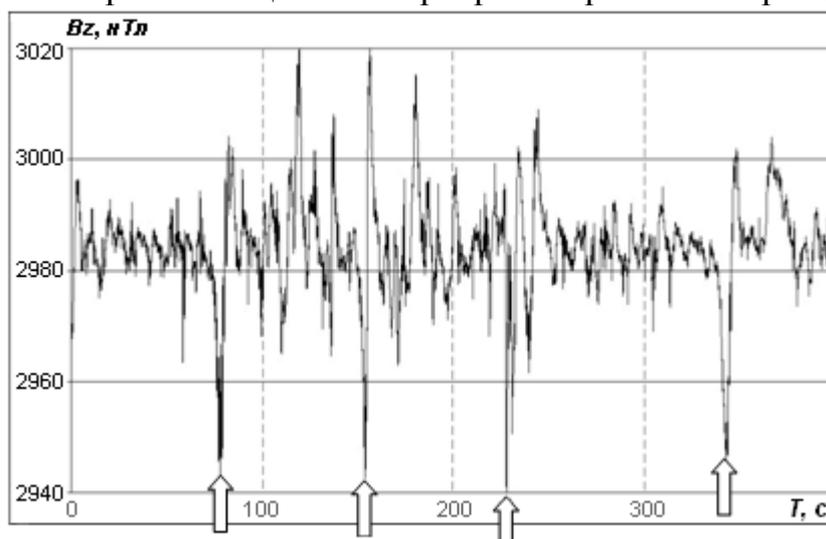


Рис. 1. Запись вертикальной составляющей магнитного поля, создаваемого троллейбусами вблизи троллейбусной остановки

На рис. 1 стрелками показаны начальные моменты движения троллейбусов (включение и выключение электродвигателей) которые наблюдались на 90,

150, 230 и 350 секундах измерения и вызвали изменение магнитного поля амплитудой около 80 нТл на расстоянии примерно 10 м от проезжей части.

Для уточнения пространственных изменений электромагнитных помех, вызванных движущимся автотранспортом, были проведены измерения электромагнитных помех на различных расстояниях от автотрассы (рис. 2).

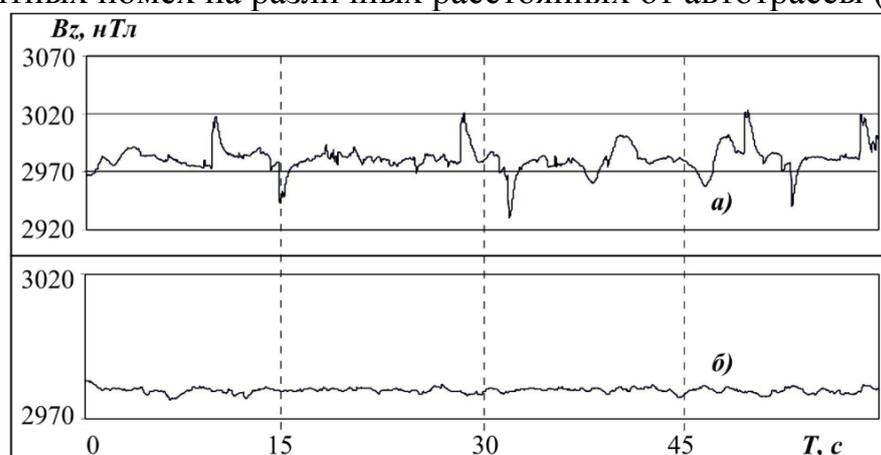


Рис. 2. Диаграммы записи вертикальной составляющей индукции магнитного поля: а) на расстоянии 15 м от проезжей части; б) на расстоянии 150 м от проезжей части

Вблизи проезжей части (рис. 2, а) максимальная амплитуда вариаций вертикальной составляющей индукции магнитного поля составляет 80 нТл, при средней величине около 40 нТл. При этом пиковые предельные значения вариаций однозначно связаны с движением магнитных масс, каковыми являются грузовые автомобили. При удалении от проезжей части на расстояние 150 м (рис. 2, б), наблюдается только общий фоновый уровень шума, при котором явного влияния автотранспорта не отмечается.

Проезд единичного грузового автомобиля вызывает изменение магнитного поля амплитудой 250 нТл (рис. 3).

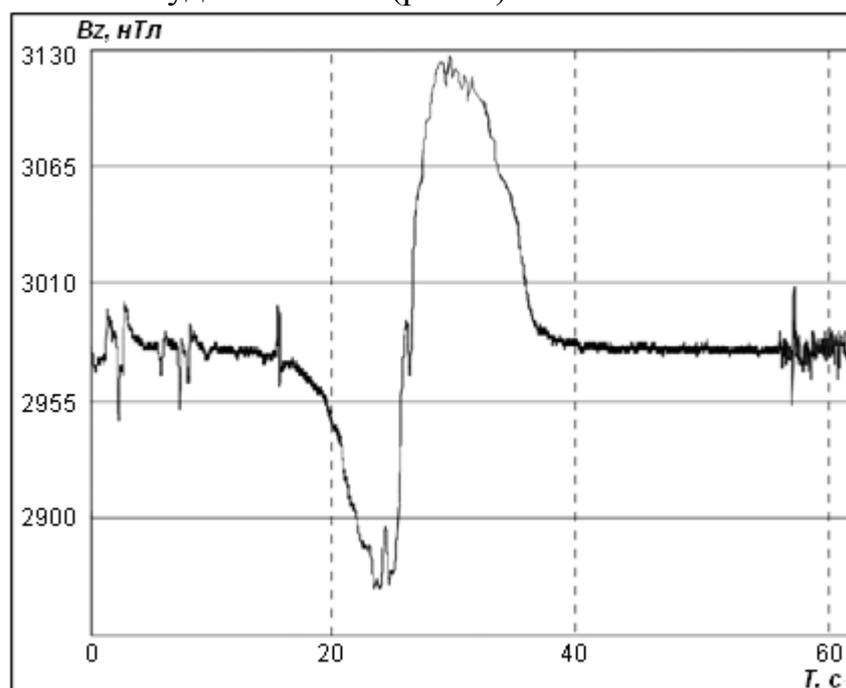


Рис. 3. Изменение вертикальной составляющей индукции магнитного поля, создаваемого единичным грузовым автомобилем.

Приведенные данные показывают, что постоянное движение городского автотранспорта создает два вида аномальных изменений геомагнитного поля:

- порядка 50 – 100 нТл, вызванное движением относительно малых магнитных масс;
- максимальное возмущение до 300 – 500 нТл, вызываемое большегрузным автотранспортом и городским электротранспортом.

Не менее интересны вариации магнитного поля вблизи жилых домов, из-за высокой энергонасыщенности жилого сектора (рис. 4).

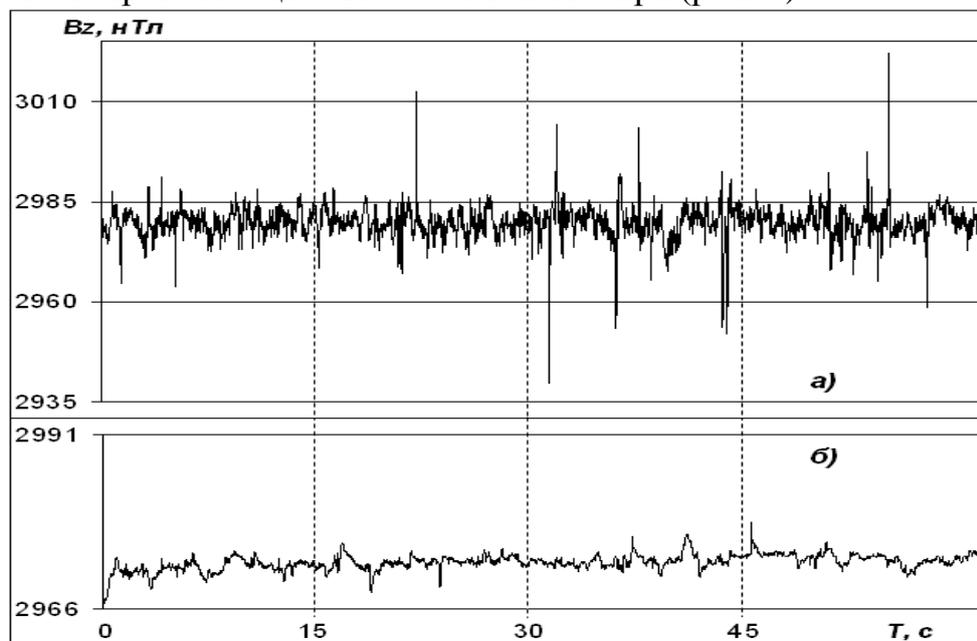


Рис. 4. Пример диаграммы записи вертикальной составляющей индукции магнитного поля: а) в пяти метрах от девятиэтажного дома; б) в 35 метрах от девятиэтажного дома

Из представленных магнитограмм рис. 4 следует, что максимальная амплитуда вариаций на расстоянии пяти метров от девятиэтажного жилого здания составляет около 25 нТл. При удалении от девятиэтажного дома на расстояние 35 м значения вариаций снижаются до 4 нТл. Характер вариаций поля показывает, что вблизи жилых домов наблюдаются резкие скачки и перепады магнитного поля, что связано, вероятно, с эксплуатацией мощных электробытовых приборов и электрооборудования внутри этих зданий.

Вторичное магнитное поле при движении проводника во внешнем магнитном поле рассмотрено на примере движения металлических немагнитных пластин в магнитном поле Земли. При горизонтальном движении с периодом 1-2 секунды немагнитной пластины (ширина 16 см, высота 26 см, толщина 4 мм), максимальная амплитуда сигнала, вызванного движением пластины, составляет 16 нТл. При больших геометрических размерах пластины (ширина 45 см, высота 40 см, толщина 1 мм), амплитуда регистрируемого сигнала магнитного поля возрастает и составляет 70 нТл.

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.

В четвертой главе показаны результаты измерения техногенного электромагнитного шума, выполненные в пределах центральной части Екатеринбурга, в его окрестностях, а так же на значительных расстояниях от мегаполиса.

На рис. 5 показан пример вариаций техногенного магнитного поля шумов измеренного в Екатеринбурге на пересечении улиц Ленина-Репина-Мальшева.

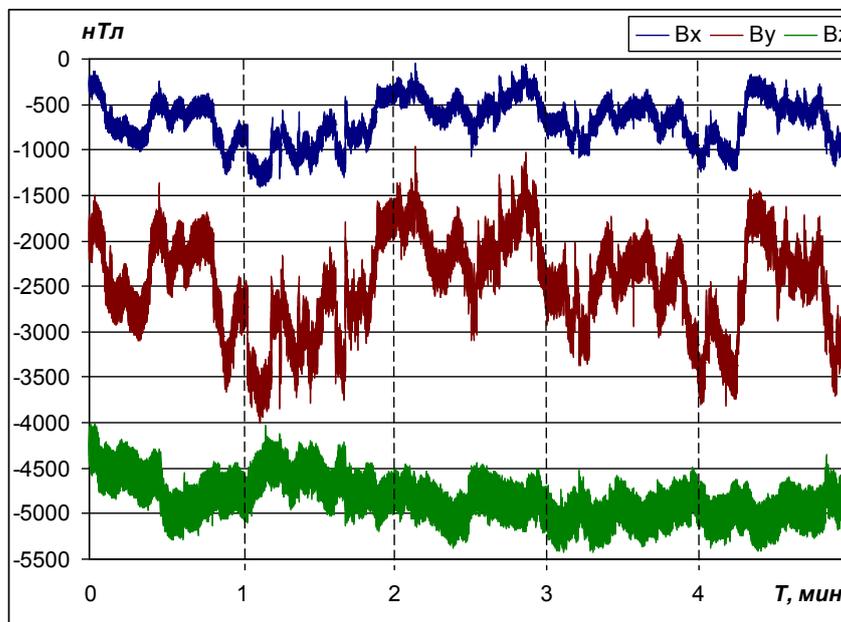


Рис. 5. Диаграммы записи составляющих индукции магнитного поля на ул. Репина в Екатеринбурге. Направление оси X по магнитному меридиану

На магнитограммах рис. 5 видно, что максимальная амплитуда вариаций горизонтальных составляющих B_x и B_y достигает величины $B_x - 1400$ нТл и $B_y - 3000$ нТл. Максимальная амплитуда вариаций вертикальной составляющей $B_z - 1250$ нТл. Можно сказать, что это сразу накладывает соответствующие ограничения на возможную точность измерений магнитного поля в пределах центральной части мегаполиса.

При удалении от центральной части города к его окраинам уровень максимальных значений вариаций техногенного магнитного поля заметно снижается и достигает величины по горизонтальным компонентам $B_x \sim 17$ нТл и $B_y \sim 20$ нТл, вертикальной ~ 150 нТл.

Чтобы оценить влияние техногенного электромагнитного шума с увеличением расстояния, были проведены измерения в зависимости от расстояния от мегаполиса.

Оценка производилась на примере двух профилей, выполненных в южном и западном направлении от центральной части Екатеринбурга. При этом опорная точка в центральной части города была взята на пересечении улиц Ленина-Репина-Мальшева.

На рис. 6 представлена диаграмма изменения усредненной величины техногенного магнитного шума, выполненного на расстоянии 40 км в южном направлении от центральной части Екатеринбурга. Видно, что спад амплитуды магнитного шума от центральной части города в сторону выезда

из города происходит неравномерно. На расстоянии 10 км от центральной части города амплитуда техногенного магнитного шума существенно снижается и составляет $B_x - 20$ нТл, $B_y - 18$ нТл, $B_z - 25$ нТл. На расстоянии от 10 км до 35 км амплитуда горизонтальных составляющих индукции магнитного поля плавно спадает, вертикальной составляющей поля имеет явные отклонения. Такое изменение компоненты связано из-за неравномерного распределения техногенных источников, а так же параллельно находившейся примерно на расстоянии 500 м от точки измерения электрифицированной железнодорожной линии. На всем последующем расстоянии амплитуда техногенного магнитного шума по горизонтальным компонентам составляет 2 нТл, по вертикальной – 5 нТл.

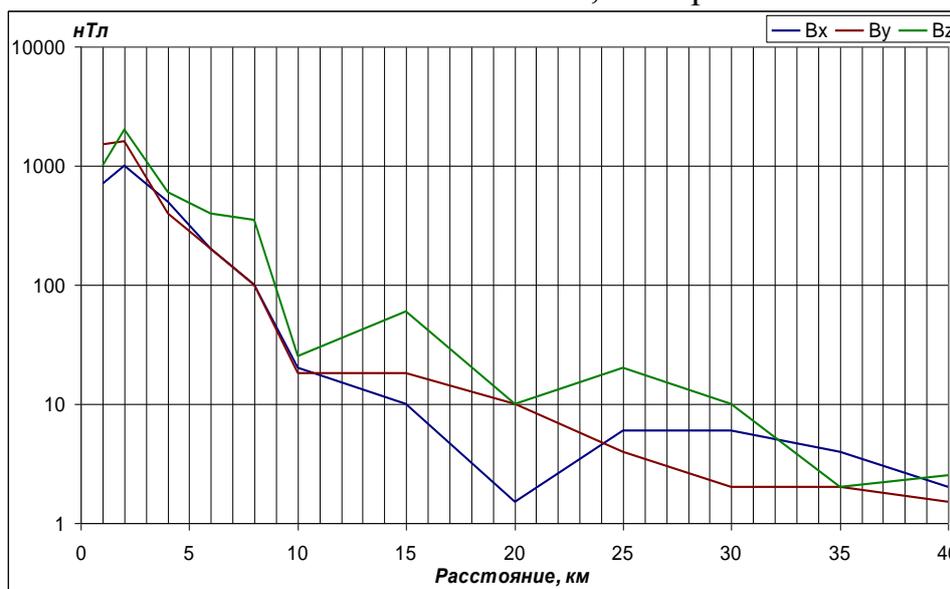


Рис. 6. Изменение усредненной амплитуды техногенного магнитного шума на расстоянии 40 км в южном направлении от центра Екатеринбурга

Результаты измерений усредненной величины магнитного шума по профилю, выполненному на расстоянии 100 км в западном направлении от центральной части Екатеринбурга (рис. 7) показывают равномерный спад техногенного магнитного шума по всем составляющим индукции магнитного поля на протяжении всего исследуемого профиля за исключением двух точек измерения на расстоянии 26 км и 90 км от центральной части Екатеринбурга.

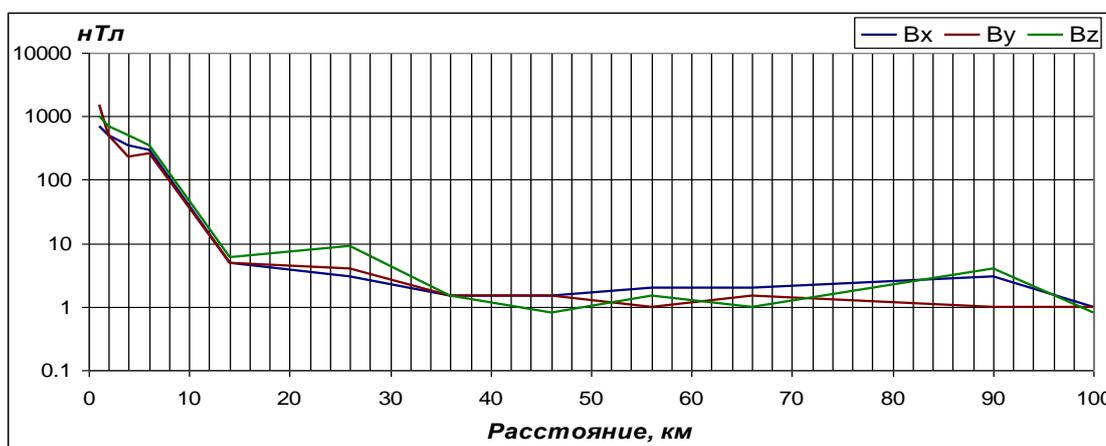


Рис. 7. Изменение усредненной амплитуды техногенного магнитного шума на расстоянии 100 км в западном направлении от центра Екатеринбурга

На расстоянии 26 км и 90 км наблюдается небольшое отклонение в виде аномального всплеска. В первом случае аномальный всплеск вызван мощным распределенным источником от Среднеуральского металлургического завода, который находился в 10 км севернее от измеряемой точки. Во втором случае аномальный всплеск возможен из-за близко расположенных источников, которые нам не известны.

Проанализировав профили в двух направлениях можно сказать, что амплитуда техногенного магнитного шума от центральной части Екатеринбурга в сторону западного профиля сопоставима с амплитудой геомагнитных вариаций на расстоянии 35 км, в сторону южного направления – на расстоянии 40 км. За пределами города уровень техногенного магнитного шума в первом приближении убывает по экспоненциальному закону.

Помимо пространственного распределения техногенный электромагнитный шум имеет и временное распределение. На рис. 8 представлены суточные измерения вариаций амплитуды магнитного поля, вызванные проезжающим автотранспортом на расстоянии 15 м от проезжей части на юго-западной окраине Екатеринбурга.

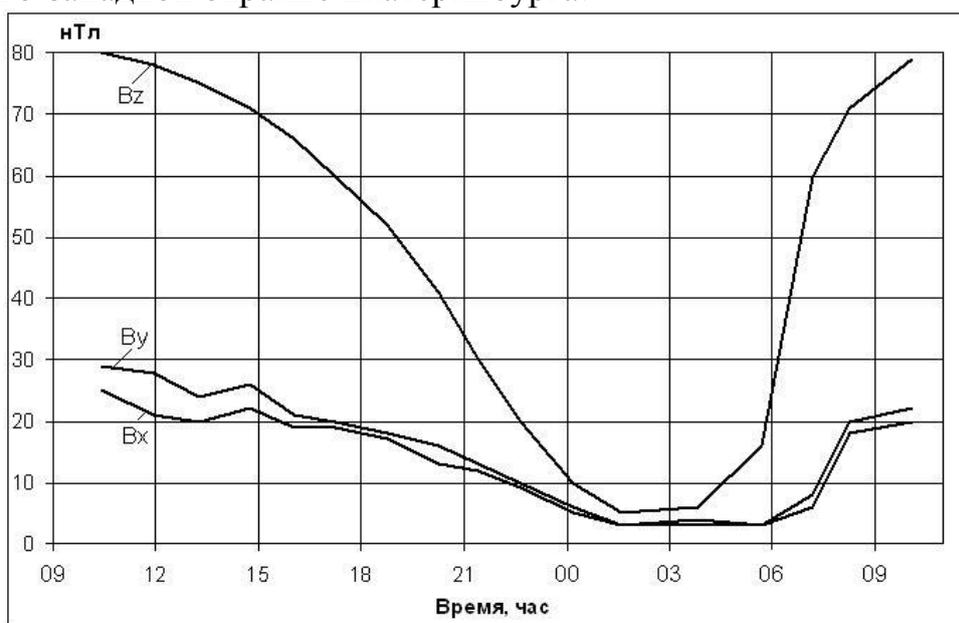


Рис. 8. Усредненные суточные измерения величины шумовых вариаций магнитного поля

Как видно из рис. 8, вблизи проезжей части максимальная амплитуда вариаций вертикальной составляющей индукции магнитного поля V_z достигает величины 80 нТл и соответствует местному времени 10ч30м. В течение светлого времени суток средняя величина вариаций вертикальной составляющей равна 50 – 80 нТл. В дальнейшем амплитуда вариаций ее уменьшается и достигает своего минимума 5 – 8 нТл в интервале времени от 01ч20м до 02ч15м. Максимальная амплитуда вариаций горизонтальных составляющих индукции магнитного поля (рис. 8, V_x , V_y) достигает величины V_x , V_y – 20–30 нТл, что соответствует интервалу местного времени для V_x , V_y – от 10ч30м до 18ч. Минимальная величина амплитуды горизонтальных

составляющих 3 – 4 нТл и соответствует интервалу времени от 01ч25м до 06ч. Видно, что уровень техногенного магнитного шума по ул. Амундсена в выбранной точке измерения в течение суток плавно увеличивается примерно с 03ч утра. В течение дня, примерно с 05ч до 24ч, уровень шума находится в пределах от 10 нТл до 80 нТл и только в ночное время, после 24ч плавно спадает и достигает минимального значения.

Такая обстановка магнитного шума вблизи проезжей части в данной точке измерения вызвана тем, что на трассе наблюдается интенсивное движение автомобильного транспорта, включая общегородской (автобусы, троллейбусы, маршрутные такси), который (транспорт) является фактически распределенным источником малых и больших магнитных масс.

Для оценки уровня вариаций геомагнитного поля и сравнения результатов с ранее полученными данными также были проведены комплексные измерения трех взаимно-ортогональных составляющих магнитного поля в разных населенных пунктах Свердловской области, на различных расстояниях и направлениях от Екатеринбурга. Амплитуда вариаций поля в этих пунктах измерения составляет 0,2 – 0,5 нТл.

Критерии различия геомагнитного и техногенного магнитного поля. Из проделанных работ можно выделить критерии, по которым возможно отличить техногенный магнитный шум от геомагнитных вариаций. Во-первых, это можно сделать по соотношению амплитуд вертикальной и горизонтальных составляющих вектора магнитной индукции, а во-вторых – по суточной цикличности амплитуды низкочастотных шумов вертикальной составляющей магнитного поля. Поскольку основным источником геомагнитных вариаций является магнитосфера Земли, то на любую часть поверхности Земли наибольшее влияние оказывают электромагнитные волны, направление распространения которых ортогонально этой поверхности. Этому же способствует некоторая круговая симметрия магнитосферы относительно вертикали к выбранному участку поверхности. В падающей сверху электромагнитной волне горизонтальные составляющие вектора магнитной индукции, как правило, должны превышать по амплитуде вертикальную составляющую вектора магнитной индукции или, в предельном случае, могут быть примерно равны ей. Техногенные же источники электромагнитного поля низких частот такие, как электрический ток в линиях электропередач, блуждающие токи электротранспорта и трубопроводов расположены по большей части по поверхности Земли. Создаваемая ими магнитная индукция всегда имеет вертикальную составляющую (B_z), поскольку одна из горизонтальных составляющих (вдоль направления электрического тока, (B_x)) практически отсутствует, а вторая горизонтальная составляющая (B_y), ортогональная первой, на поверхности Земли сравнительно невелика. В результате, в суммарном техногенном магнитном поле множества источников амплитуда вертикальной составляющей, как правило, превышает амплитуду горизонтальных составляющих магнитной индукции. Подобный критерий применялся для автоматического выделения геомагнитных вариаций (короткопериодических

колебаний естественного поля типа $P_c-2 - P_c-4$, период которых составляет 5 – 150 сек) от техногенного магнитного поля при магнитотеллурических исследованиях [Вишневу, Иванов, Измайлов, 1998], однако там анализировались не только отношения магнитных компонент поля, но и отношения магнитных и электрических компонент. Кроме этого, данный критерий применялся для достаточно большого периода электромагнитных колебаний, который характеризует только ближнюю (индукционную) зону излучения электромагнитных волн. То есть, характеризует колебания самой магнитосферы, а не электромагнитных волн, формируемых в магнитосфере.

Система токов, излучающая электромагнитные волны, характеризуется типичными размерами областей распределения тока, l , расстоянием r от условного центра излучающей токовой системы до точки поверхности Земли, на которой производится измерение магнитной индукции, и длиной волны электромагнитных колебаний, λ . Из соотношения между этими величинами можно выделить ближнюю (индукционную) и дальнюю (волновую) зоны для каждой данной длины волны электромагнитных колебаний. Отношение r/λ определяет характер поля в зависимости от его удаления от области источника излучения. На расстояниях $r < \lambda$, в зоне индукции, магнитное поле представлено в основном квазистатическими полями индукции, быстро убывающими с расстоянием, пропорционально r^2 и r^3 . На расстояниях $r > \lambda$, в волновой зоне, практически остаются лишь бегущие электромагнитные волны, поля которых убывают обратно пропорционально первой степени расстояния. Причем при $r > \lambda$ и $l > \lambda$ можно пренебречь различием амплитуд сферических волн, приходящих от разных участков излучающей системы токов, а при $r > \lambda$ и $l \ll r$ можно пренебречь и разностью фаз сферических волн, исходящих из равноудаленных областей. При неизменном r и уменьшении l интенсивность излучения длинноволновых колебаний должна снижаться как в результате обратной пропорциональности амплитуды от расстояния, так и по причине интерференции из-за разности фаз волн, идущих от различных участков токовой системы. Поэтому, за верхний предел эффективно действующих электромагнитных волн можно принять частоту $\sim 20-30$ Гц. С дневной стороны расстояние до магнитосферы зависит от интенсивности солнечного ветра и составляет 10-12 радиусов Земли (~ 70000 км). Излучение электромагнитных волн в дальней зоне начинается на расстоянии $r > \lambda$. Следовательно, нижняя граница частот электромагнитных волн, падающих на земную поверхность, составляет около 4 Гц. С ночной стороны магнитосфера Земли вытягивается длинным расширяющимся цилиндрическим хвостом, радиус которого достигает до 40 радиусов Земли. Следовательно, верхняя граница длин волн, падающих на земную поверхность с неосвещенной Солнцем стороны, может составлять 300000 – 600000 км, что соответствует нижней границе частот электромагнитных колебаний порядка 1 Гц.

Кроме того, у амплитуды техногенного магнитного шума существует суточная цикличность, особенно хорошо выраженная на вертикальной составляющей магнитной индукции. Это связано с суточной цикличностью

энергопотребления большинства основных источников техногенного электромагнитного шума, минимум которого приходится на интервал от полуночи до четырех часов утра по местному времени [Сокол-Кутыловский, Тягунов, 2011].

Дополнительными критериями определения сигнала магнитного поля техногенного происхождения могут служить фурье-спектр этого сигнала и измерения градиента магнитного поля, который имеет более высокое значение для близко расположенных источников.

Применение критериев различия было рассмотрено на примере данных по геомагнитной активности, публикуемые «Институтом земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн» (ИЗМИРАН) и данных геофизических наблюдений, публикуемые «Геофизической лабораторией-обсерваторией Арти» филиала Института геофизики УрО РАН, а также на данных, зарегистрированных на участке расположения бывшей обсерватории «Высокая Дубрава». Несмотря на то, что полоса пропускания при записи магнитограмм, полученных этими обсерваториями ограничена сверху частотой ~ 0.1 Гц, тем не менее, на магнитограммах ИЗМИРАН амплитуда короткопериодных вариаций вертикальной составляющей магнитной индукции на фоне суточных вариаций достигает 10 нТл (от пика до пика), что в два-три раза выше, чем амплитуда короткопериодных вариаций горизонтальных составляющих. На магнитограммах обсерватории Арти амплитуда короткопериодных вариаций составляет в среднем 0,2 – 0,5 нТл.

Следует отметить, что при расширении полосы пропускания магнитометров до единиц-десятков герц амплитуда вертикальной составляющей во много раз возрастет, что существенно затруднит запись короткопериодных геомагнитных вариаций.

На рис. 9 показан фрагмент записи вариаций геомагнитного поля, записанный в Артинском районе в 150 км от Екатеринбурга. Амплитуда короткопериодных вариаций вертикальной составляющей (B_z) здесь явно меньше амплитуды короткопериодных вариаций горизонтальных составляющих (B_x , B_y). Аналогичная картина наблюдается и в других местах, значительно удаленных от городов.

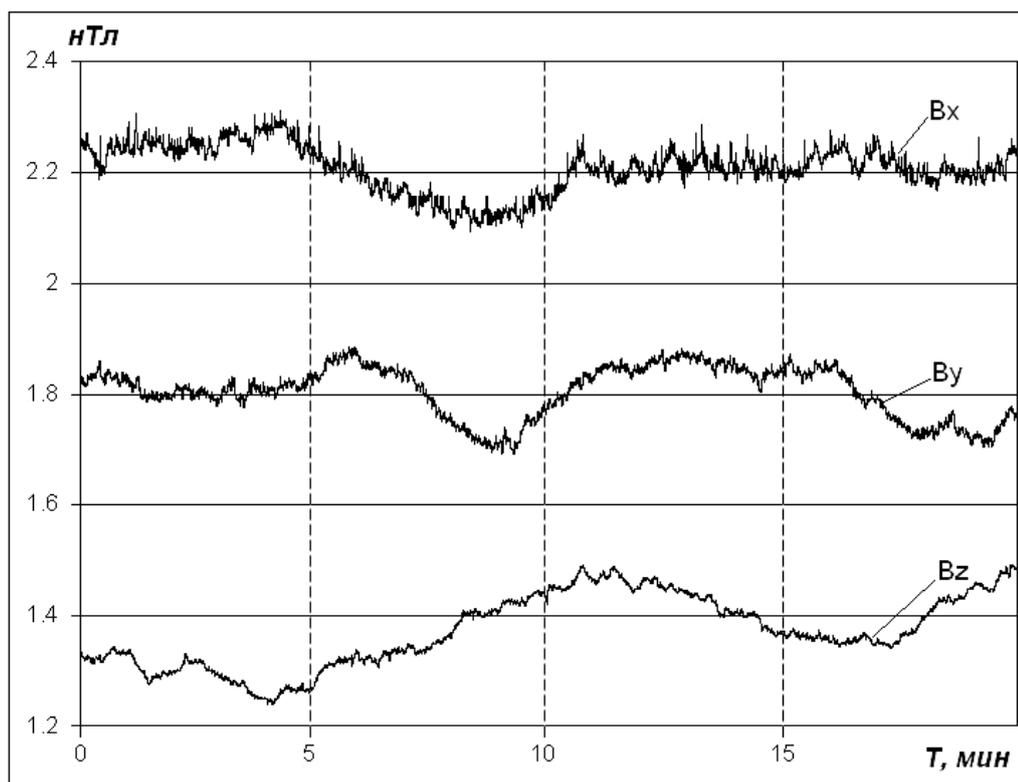


Рис. 9. Фрагмент записи ночных измерений вариаций геомагнитного поля в 150 км от Екатеринбурга

Таким образом, можно сказать, что в пределах обсерватории Арти и всего Артинского района, вблизи которых не имеется мощных источников промышленных помех, отмечается только геомагнитный шум, амплитуда вариаций которого в диапазоне частот 0,01 – 30 Гц в среднем от 0,03 – 0,06 нТл.

Следует отметить, что магнитная обсерватория, которая в настоящее время находится в Арти, до 1970 г. была расположена в пос. Верхнее Дуброво (30 км от Екатеринбурга). Перенос обсерватории «Высокая Дубрава» из пос. Верхнее Дуброво в Арти был связан с тем, что обсерватория с одной стороны оказалась в 300 м от автотрассы «Екатеринбург – Тюмень», в 1,5 км от электрифицированной железной дороги «Екатеринбург – Тюмень», а с другой стороны – в 6 км от электрифицированной железной дороги «Екатеринбург – Каменск-Уральский», наличие которых создает электромагнитные помехи и влияет на достоверность наблюдений геомагнитного поля.

На рис. 10 представлены записи трех составляющих магнитной индукции, выполненные в пос. Верхнее Дуброво (на участке, где ранее располагалась обсерватория «Высокая Дубрава»).

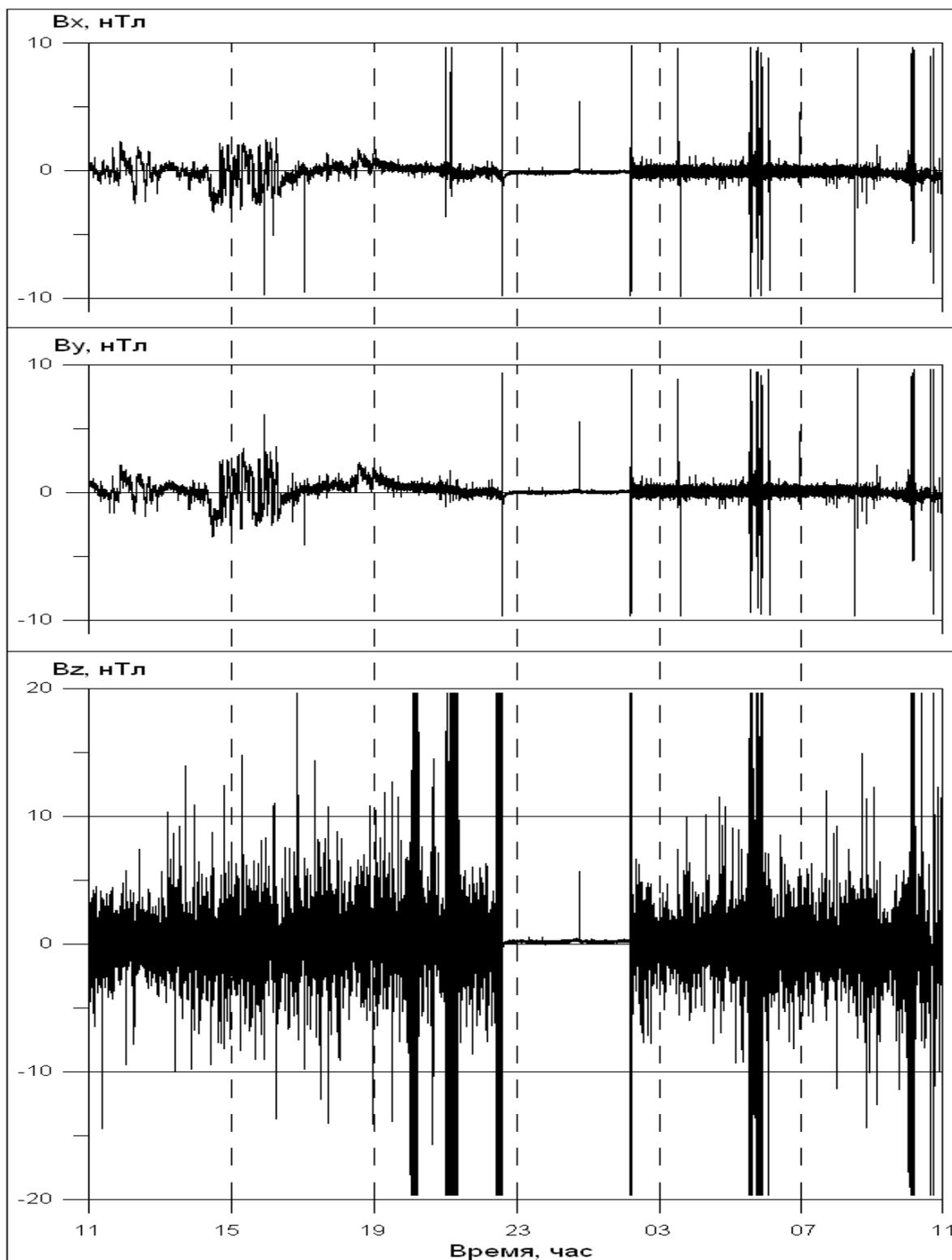


Рис. 10. Магнитограммы трех составляющих магнитной индукции за сутки.

Окно магнитограммы горизонтальных составляющих магнитного поля сверху и снизу на рис. 10 ограничено величиной 10 нТл, вертикальной составляющей – 20 нТл. Максимальная величина горизонтальных составляющих достигает 160 нТл, вертикальной составляющей – 200 нТл. В течение суток на магнитограмме четко прослеживается влияние техногенного магнитного шума, вызванного в основном железнодорожной сетью и максимальной загруженностью автотрассы и, только лишь в небольшой ночной промежуток времени (примерно от полуночи до двух

часов ночи) величина магнитного шума спадает до 0,4 нТл. Если на записях магнитограммы исключить величину техногенного магнитного шума создаваемого железнодорожным транспортом и автотранспортом, то амплитуда шума составит 5-7 нТл, что все равно не позволит производить достоверные наблюдения за геомагнитным полем. Такая же величина техногенного магнитного шума присутствует на записях магнитограмм ИЗМИРАН. Таким образом, решение о переносе обсерватории «Высокая Дубрава» из пос. Верхнее Дуброво в Арти было вполне обоснованным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Определены источники техногенного электромагнитного шума в диапазоне частот 0,01 – 30 Гц, дающие основной вклад в общий электромагнитный шум города.

2. Показано, что движущийся городской транспорт является распределенным генератором непрерывных вариаций электромагнитного поля низких частот, дающий существенный вклад в общий шум города, особенно в «часы пик».

3. Установлено, что уровень техногенного магнитного шума в центральной части г.Екатеринбурга примерно в 20 раз превышает уровень шума на окраинах города.

4. Установлено, что максимальный уровень городского техногенного магнитного шума превышает геомагнитные вариации в диапазоне частот 0,01 – 30 Гц более чем в 5000 раз, минимальный уровень – в 1000 раз.

5. Установлено, что городской техногенный магнитный шум имеет периодический характер с ярко выраженным минимумом в течение суток.

6. Показано, что городской техногенный магнитный шум неравномерно распределен по площади города. Ближе к окраине города, при условии отсутствия мощных локальных источников магнитного шума, наблюдается его спад, продолжающийся на расстояния до 20 – 40 км от центра.

7. Определены критерии, позволяющие отличить геомагнитные вариации от техногенного магнитного шума при сопоставимых амплитудах изменения магнитного поля. Данные критерии применены для оценки качества информации, получаемой магнитными обсерваториями.

Публикации по теме диссертации

1. Сокол-Кутыловский О.Л., **Тягунов Д.С.** Аппаратура для регистрации магнитного поля низких частот. // Уральский геофизический вестник, № 4(13) (сб. статей) Екатеринбург: УрО РАН, 2007. с. 69 – 73.

2. Сокол-Кутыловский О.Л., **Тягунов Д.С.** // Об источниках городского низкочастотного электромагнитного шума. Уральский геофизический вестник, № 1(14) (сб. статей) Екатеринбург: УрО РАН, 2009. с. 59 – 64.

3. Сокол-Кутыловский О.Л., **Тягунов Д.С.** Влияние техногенного магнитного шума на геомагнитные измерения. // Уральский геофизический вестник, № 1(19) (сб. статей) Екатеринбург: УрО РАН, 2012. с. 44 – 51.

4. Сокол-Кутыловский О.Л., **Тягунов Д.С.** Влияние техногенных магнитных полей на геомагнитные измерения в обсерваториях. // Измерительная техника. М., № 9, 2012. с. 58 – 60.

5. **Тягунов Д.С.** Техногенный магнитный шум в пределах некоторых фешенебельных районов Среднего Урала. Геофизические исследования Урала и сопредельных регионов. Материалы Международной конференции, посвященной 50-летию Института геофизики УрО РАН. Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2008, 337 с. ISBN 5-7691-1919-5.

6. **Тягунов Д.С.** Изучение электромагнитного шума на Среднем Урале. Десятые геофизические чтения имени В.В. Федынского. Тезисы докладов. – М., 2008, с. 76 – 77.

7. **Тягунов Д.С.** Техногенный магнитный шум в пределах мегаполиса и удалении от него на Урале. www.lomonosov-msu.ru/2008/06_9.pdf.

8. **Тягунов Д.С.** Техногенный электромагнитный шум низких частот. www.lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2009/06_4.pdf.

9. **Тягунов Д.С.** Суточные вариации низкочастотного электромагнитного шума техногенного происхождения. XI Уральская молодежная научная школа по геофизике. Сборник докладов. – Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2010, с. 239 – 241.

10. **Тягунов Д.С.** Техногенное электромагнитное поле как экологический фактор. // Экология урбанизированных территорий. М., № 2, 2011. с. 45 – 50.

11. Уткин В.И., Сокол-Кутыловский О.Л., **Тягунов Д.С.** Низкочастотный электромагнитный шум техногенного происхождения. Геодинамика. Глубинное строение. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических полей. Пятые научные чтения Ю.П. Булашевича. 2009, с. 487 – 492.

12. Уткин В.И., Белоусова А.А., **Тягунов Д.С.**, Баландин Д.В. Исследование геодинамики северного и среднего Урала по данным GPS. // Доклады Академии Наук, 2010, том 431, № 2, с. 246 – 251.

13. Уткин В.И., **Тягунов Д.С.**, Сокол-Кутыловский О.Л., Сенина Т.Е. Искажение геомагнитного поля электромагнитным шумом низких частот техногенного происхождения. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010, №1. Выпуск № 15. с. 231 – 237.

14. 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. Инженерная экология. Гидроэкология. Геокриология. 2010, № 4, с. 328 – 336.