

УДК 504.055

ТЕХНОГЕННЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ НА ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЯХ И ПОДХОДЫ К ИХ КАРТОГРАФИРОВАНИЮ

© 2022 г. В. И. Стурман^а, *, А. Н. Логиновская^а

^аСанкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций имени проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: st@izh.com

Поступила в редакцию 13.08.2020 г.

После доработки 16.10.2021 г.

Принята к публикации 15.12.2021 г.

Электромагнитные поля – фактор окружающей среды, состояние которого продолжает ухудшаться по мере роста распространенности и мощности электрических приборов и устройств. Обращено внимание на необходимость изучения, наряду с медико-биологическими и физико-техническими аспектами техногенных электромагнитных полей, также их пространственной и временной изменчивости. Для этого необходимо использование картографирования и мониторинга. Статья посвящена анализу первых опытов картографического представления характеристик электромагнитных полей в России и в других странах. Представлены осредненные по городам характеристики магнитной индукции и распределение ее значений по функциональным зонам и типам застройки. Установлено, что наиболее высокие значения напряженности магнитного поля промышленной частоты, порядка сотен нанотесла, как в России, так и в зарубежных странах Европы, свойственны историческим центрам городов. Рассчитана достоверность полученных значений. Отмечено, что достоверности результатов, наряду с объемами выборок, способствуют контрастность и внутренняя однородность выделяемых таксонов. Выполнено сравнение доступных в настоящее время данных о степени остроты проблем электромагнитного загрязнения в городах России и зарубежных стран. Полученные данные свидетельствуют о сопоставимости уровней электромагнитного загрязнения. Охарактеризованы аномалии техногенных магнитных полей урбанизированных территорий и факторы, влияющие на распространение аномалий. Обоснована предпочтительность организации измерений с пространственной привязкой каждого замера, а также изолинейной формы картографического представления результатов.

Ключевые слова: электромагнитные поля, электрические поля, напряженность, магнитные поля, низкочастотные и высокочастотные поля, мониторинг, картографирование, Россия, страны мира

DOI: 10.31857/S2587556622020091

ВВЕДЕНИЕ

Изучению медико-биологических аспектов проблемы электромагнитных полей посвящена многочисленная литература; в числе возможных последствий их воздействия указываются: нарушения функционирования сердечно-сосудистой системы, обмена веществ, эндокринной, иммунной и репродуктивной систем (Сподобаев, Кубанов, 2000; Яковлева, 1973; d'Amore et al., 1999; Gajšek et al., 2016)¹. Однако, несмотря на большое количество исследований и публикаций, данная

проблема в целом остается относительно слабо изученной.

Электромагнитные поля – едва ли не единственный фактор окружающей среды, состояние которого в настоящее время продолжает ухудшаться по мере роста распространенности и мощности электрических приборов и устройств различного назначения. Так, за последние 10–15 лет XX в. токовые номиналы предохранителей в квартирах увеличились с 5–6 до 20–25 ампер, что означает увеличение потребляемой мощности в 10–25 раз и, как следствие, электромагнитных полей в квартирах в 5–6 раз (Сподобаев, Кубанов, 2000). Пониманию проблем электромагнитной экологии и поиску путей их решения препятствуют очень глубокий междисциплинарный разрыв между медико-биологическими и физико-техническими подходами, а также отрыв

¹ См. также: Current Status of Research on Extremely Low Frequency Electric and Magnetic Fields and Health. Seacoast Reliability Project. Submitted to: New Hampshire Public Utilities Commission September 4, 2015. <https://www.semanticscholar.org/paper/Current-Status-of-Research-on-Extremely-Low-and-and/41b39ada44ab7405cf8475f762f83fafdea20a70?p2df> (дата обращения 16.07.2020).

их обоих от немногочисленных пока исследований реального состояния электромагнитной среды на тех или иных территориях. Электромагнитным (электрическим и магнитным) полям свойственна сильно выраженная пространственная изменчивость и временная динамика. Поэтому для понимания реального состояния электромагнитной среды требуется использование отработанных на примере других факторов окружающей среды, методов картографирования и мониторинга (географических в своей основе). Это означает для географической науки наличие новых возможностей и потенциальной “точки роста”.

Наибольшее внимание, в том числе в плане картографирования, привлекают магнитные поля промышленной частоты (50 или 60 Гц в разных странах) от линий и сетей электропередачи, промышленного и бытового оборудования, а также высокочастотные поля мобильных телефонов и станций сотовой связи. Электрические поля обладают в сравнении с магнитными многократно меньшей проникающей способностью и в силу этого достигают значимых и потенциально опасных величин только в непосредственной близости от высоковольтных линий и других мощных объектов электросетевого хозяйства. Соответственно, картографирование электрических полей промышленной частоты практически сводится к картографированию линий электропередачи и трансформаторных подстанций (Экологический ..., 1992; Электромагнитная ..., 2009). Магнитные поля промышленной частоты формируются не только линиями электропередачи, но и многообразными другими источниками, обладают высокой проникающей способностью и в силу этого представлены на урбанизированных территориях повсеместно.

Действующие в России нормативы электромагнитных полей были установлены в 1980-х годах и с тех пор не пересматривались. До недавнего времени российские нормативы относились к числу наиболее строгих в мире. Однако к настоящему времени 12 стран, преимущественно из числа высокоразвитых, ввели в действие более жесткие, чем в России, нормативы электромагнитных полей радиочастотного диапазона (Григорьев, 2019). Что касается низкочастотных полей (включая промышленный диапазон частот), то в большинстве экономически развитых стран их негативное воздействие на здоровье до недавнего времени считалось недоказанным. В настоящее время общепринятые нормативы отсутствуют, но в качестве примерного безопасного уровня магнитной индукции (измеряется в тесла-единицах и производных величинах — таких, как микротесла — μT , мкТл, или нанотесла — нТл) на основании результатов новейших исследований указываются величины 0,4 мкТл (400 нТл) (Paniagua et al., 2007) и даже 0,2 мкТл (200 нТл) (Muller, 1996). Это на по-

рядок ниже наиболее жестких из действующих в России нормативов магнитных полей (5 мкТл в жилых зданиях, детских, дошкольных, школьных, общеобразовательных учреждениях, согласно СанПиН 1.2.3685-21) и на три порядка ниже безопасного уровня для населения, рекомендованного Всемирной организацией здравоохранения (100 мкТл), а также Международной комиссией по защите от неионизирующих излучений (ICNIRP) в (ICNIRP ..., 2010) и Консультативным советом Европейского союза в (Directive ..., 2004). Переход к нормативам магнитного поля промышленной частоты на уровне 0,2–0,4 мкТл рассматривается в странах Европейского Союза как перспективная цель на ближайшие годы². Однако в целом ситуация, когда по странам стандарты различаются на три порядка, говорит сама за себя. Не выявлены и экологические последствия ожидаемого (а в ряде стран и уже происшедшего) перехода к стандарту телекоммуникаций 5G.

Работа по совершенствованию гигиенических нормативов радиочастотного диапазона получила на ближайшие годы наивысший приоритет и ведется очень активно, так что основной разработчик — IARC (Международное агентство по исследованию рака Всемирной организации здравоохранения) временно (на 2020–2024 гг.) отложило совершенствование нормативов электромагнитных полей промышленного диапазона. При этом важно отметить, что разработчики “международных” нормативов — общественные профессиональные объединения, которые не регулируются национальными законодательствами или межгосударственными соглашениями и не несут юридической или финансовой ответственности перед национальными системами здравоохранения за последствия использования рекомендованных ими стандартов (Григорьев, 2019). Есть основания полагать, что при принятии решений об установлении новых стандартов будут учитываться не только результаты экспериментов с биологическими объектами (существуют определенные проблемы в том, что касается интерпретации в отношении человека наблюдений за лабораторными животными, преимущественно мелкими, с иной глубиной расположения в теле жизненно важных органов), но и данные натурных исследований полей, присутствующих в окружающей среде. Это породило определенный интерес к изучению пространственного распределения электромагнитных полей, в том числе с созданием карт. Однако работы подобного рода пока остаются

² Opinion on Possible effects of Electromagnetic Fields (EMF), Radio Frequency Fields (RF) and Microwave Radiation on human health Expressed at the 27th CSTE plenary meeting Brussels, 30 October 2001. http://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/sct/documents/out128_en.pdf (дата обращения 16.07.2020).

ся достаточно редкими, методы их выполнения не унифицированы, а результаты неоднозначны.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

С 2016 г. нами выполнены исследования техногенных электромагнитных полей промышленной частоты в ряде городов России (Стурман, 2019; Стурман, Широков, 2018; и др.). Исследования включали:

- мониторинг электрических и магнитных полей ЛЭП непосредственно под проводами в местах их наибольшего провисания и на удалении от них 10, 15, 20 м и т.д. (4 профиля в Санкт-Петербурге и окрестностях, периодичность в среднем 1 раз в неделю);

- однократные измерения электрических и магнитных полей ЛЭП по аналогичной методике (30 профилей в Санкт-Петербурге и окрестностях, по 1–2 профиля в перечисляемых ниже городах, где выполнялись также точечные однократные замеры в целях создания карт);

- мониторинг магнитных полей от совокупности источников в жилых зонах в 4 точках в Санкт-Петербурге – около 70 измерений в 2017 г.;

- однократные измерения в отдельных точках городских территорий, на удалении от воздушных ЛЭП (Москва, Санкт-Петербург, Казань, Ижевск, Калининград, Петрозаводск, Белгород).

Во всех случаях использовался прибор Giga-hertz Solutions ME 3830 В М/Е Analyser, позволяющий измерять для промышленной частоты 50 Гц напряженность электрического поля в диапазоне от 1 до 2000 В/м и интенсивность магнитного поля (магнитную индукцию) в пределах от 1 до 2000 нТл. Поскольку прибор имеет однокоординатный датчик магнитного поля, в каждой точке путем изменения положения прибора (вращение вокруг горизонтальной и вертикальной оси) находилось положение, при котором ось датчика совпадала с ориентацией полного вектора магнитного поля, и величина магнитной индукции достигала максимума для данной точки. Измерения выполнялись на стандартной высоте 1.8 м от поверхности земли. Для единообразия условий и облегчения последующей интерпретации мониторинговые измерения, по возможности, проводились в точках, фиксирующихся по местным ориентирам (приметные деревья, особенности микрорельефа, элементы ограждений, скамейки), а однократные измерения на городских территориях – по возможности, в условиях однородного использования территории и характера застройки.

При обработке результатов выделялись аномальные значения на основе общепринятой формулы среднего квадратического отклонения, с использованием программного продукта Excel, а

также выполнялся пространственный анализ в программном комплексе ArcGIS ArcMap.

Сравнение существующих подходов к организации измерений и картографирования техногенных электромагнитных полей. В целом в мире в настоящее время сложились следующие подходы к изучению техногенных электромагнитных полей.

Детальное сплошное картографирование на основе применения автоматизированных комплексов, позволяющих проводить измерения через заданный интервал времени (порядка секунд) или расстояния (порядка нескольких метров). Элементарные замеры, число которых достигает многих тысяч, фиксируются на входящем в состав комплекса электронном носителе, осуществляющем также и обработку результатов. Показателем объема работы становится не столько число замеров, сколько протяженность или площадь пройденных тротуаров и пешеходных улиц. Результаты (показатели магнитной индукции) выдаются в виде линейных и отчасти площадных обозначений, относящихся к соответствующим участкам улиц. Такие работы проводились в нескольких городах Западной Европы (d'Amore et al., 1999; d'Amore et al., 2001; Lindgren et al., 1999; Lindgren et al., 2001; Paniagua et al., 2007; Straume et al., 2008). Измерения выполнялись на высоте 1 м от поверхности земли. К сожалению, в упомянутых зарубежных исследованиях содержались лишь сведения о марке использованного прибора (Emdex II) (d'Amore et al., 1999; d'Amore et al., 2001), о калибровке оборудования в системе ISO 9001 (Paniagua et al., 2007), либо вообще не содержалось сведений о средствах измерения и погрешностях.

Как видно из рис. 1, представляющего результаты исследования в историческом центре г. Кассерос (Испания), при высокой детальности исследования в пределах улично-дорожной сети и площадей, внутриквартальные пространства в рамках данного подхода не охарактеризованы. В отдельных случаях дают о себе знать такие “издержки осреднения”, как резкие перепады значений, с выпадением промежуточных интервалов значений и неестественно прямолинейные границы.

Измерения и картографирование при помощи ручных приборов, по заданной сетке или без нее, с более традиционными способами фиксации и последующей обработки данных замеров. Результаты выдаются в виде изолинейных карт, построенных автоматически или вручную, с учетом принципа географической интерполяции. Такой подход применен нами в ряде городов России; основные результаты представлены ниже. В этом случае, как видно из примера (рис. 2), представляющего территорию г. Москвы (МГУ и близлежащие кварталы), изолинии передают постепенность изменений уровней магнитной индукции, а



Рис. 1. Пример картографического представления результатов изучения техногенного магнитного поля в пределах улично-дорожной сети путем непрерывных замеров автоматизированным комплексом (Paniagua et al., 2007).

не выражающиеся в масштабе карты аномалии отображаются посредством значков. Данный район характеризуется сравнительно невысокими значениями магнитной индукции, близкими (за редкими исключениями) к значениям рекреационных зон и площадей. Расположение небольших участков повышенных значений с высокой вероятностью отражает наличие мощного или работающего с повышенной нагрузкой электрооборудования. Судя по низким значениям магнитной индукции, представленные в близлежащих кварталах многоэтажные здания, как постройки 1950-х годов, так и современные, оснащены системами электропроводки, успешно справляющимися с нагрузками от современной бытовой и прочей техники.

Измерения в отдельных, сравнительно немногочисленных точках, с составлением схематических карт, либо без публикации картографических материалов. Учет характера застройки не предусматривается. Результаты обычно ограничиваются констатацией наличия или отсутствия превышения гигиенических стандартов. Такого рода измерения проводятся как в России, так и за рубежом, освещение их результатов является до сих пор преобладающим типом публикаций по проблемам электромагнитных полей (Васильев и др., 2012; Ивлева, 2016).

Мониторинг, т.е. более или менее регулярно повторяющиеся измерения в одних и тех же точках, с последующим построением и анализом графиков, в целях выявления роли сезонных и иных факторов динамики электромагнитных по-

лей. Примеры реализации мониторинга единичны (Стурман, 2019).

Методические подходы к изучению и оценке высокочастотных электромагнитных полей радиочастотного диапазона. В данной области до сих пор не достигнуто понимание взаимоотношений между расчетными и инструментальными методами. Среди специалистов преобладает мнение о предпочтительности расчетных методов на стадии проектирования и телеметрической информации в сетях сотовой связи на этапе эксплуатации (Мордачев, 2019; Сподобаев, Кубанов, 2000). Расчетные методы в целом преобладают, они реализуются преимущественно в форме оценок допустимости установки базовых станций мобильной связи в тех или иных точках жилых зон, с учетом мощности и конфигурации конкретных антенных устройств (например, [Stacenko, 2020]). Но в целом, оценки воздействия базовых станций мобильной связи выполняются в форме санитарно-эпидемиологических экспертиз передающих радиотехнических объектов как рутинные операции, число которых в крупнейших городах России достигает тысяч ежегодно. Опыты картографирования высокочастотных полей от объектов мобильной связи на основе инструментальных данных пока единичны.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основные результаты исследований магнитных полей промышленной частоты (показатели магнитной индукции) представлены в табл. 1.

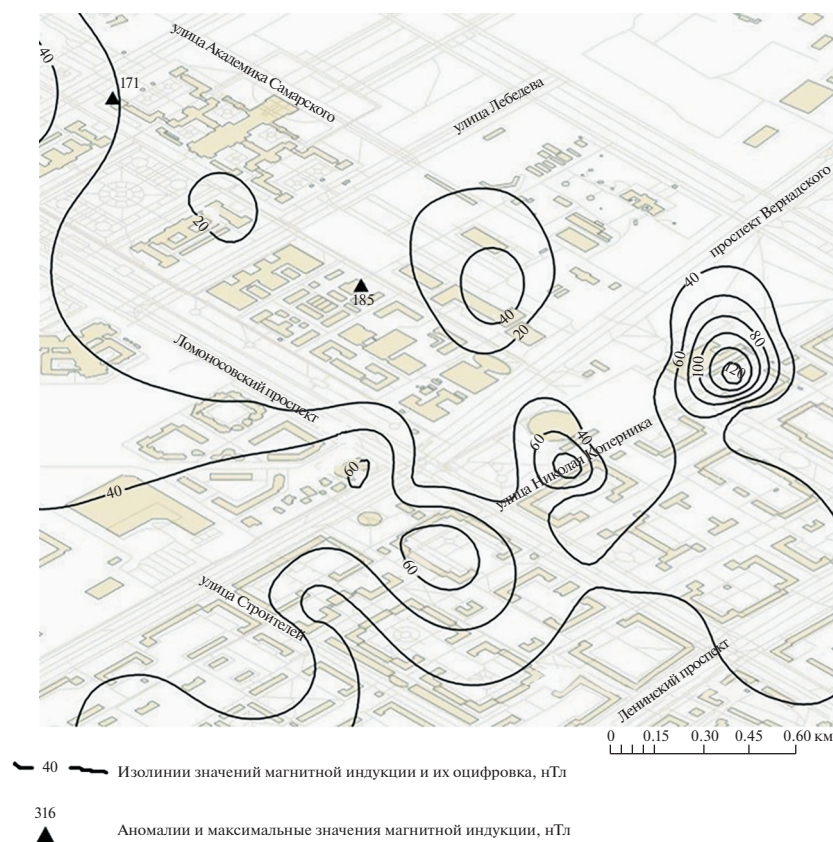


Рис. 2. Пример изотопической карты техногенного магнитного поля промышленной частоты.

Как видно из таблицы, средние значения магнитной индукции в российских городах сопоставимы и ниже, чем в западноевропейских и китайском. Однако за средними характеристиками для городов в целом скрываются значительные различия между функциональными зонами городов и типами застройки. Распределение точек измерения по функциональным зонам и типам застройки не может не сказываться на средних характеристиках. Характеристики магнитной индукции, осредненные по типам использования территории и характеру застройки, представлены в табл. 2. Схожий характер распределения показателей магнитной индукции (максимумы в исторических центрах, более низкие значения в районах современной застройки, минимумы в рекреационных зонах и на площадях) выявлен во всех указанных в табл. 2 городах, хотя в каждом из них есть специфические особенности (Стурман, 2019; Стурман, Широков, 2018).

Для оценки достоверности полученных результатов, были выполнены расчеты критерия Стьюдента. Как следует из представленных в табл. 3 результатов, достоверные значения удалось получить далеко не во всех случаях. На результатах сказались как объемы выборок, так и

степень их внутренней однородности. Достоверные значения получались для парков и других рекреационных территорий, контрастирующих с остальными функциональными зонами, и при объединении относительно близких типов застройки (Санкт-Петербург, Белгород). Выявляются достаточно значимые различия между крупными таксонами: историческая застройка — застройка второй половины XX в. — рекреационные зоны и площади. Низкая достоверность получалась при дроблении выборок по функциональным зонам и типам застройки (районы современной застройки в Санкт-Петербурге, Ижевск, Калининград), а также при значительном распространении аномальных значений (Москва, Калининград, Петрозаводск).

Показатели магнитной индукции по типам застройки отражают состояние электропроводки (повышенные значения обычно бывают, когда электропроводка устраивалась в прошедшие десятилетия и не соответствует нагрузкам от современной бытовой и прочей техники), а также насыщенность жилых домов электрическими бытовыми приборами. В целом, по данным исследований в российских городах, сопоставимые с западноевропейскими характеристики магнитной индукции

Таблица 1. Результаты исследований магнитных полей промышленной частоты в городах России и зарубежных стран

Территория исследования	Объем исследования	Среднее значение магнитной индукции, нТл	Коэффициент вариации, %	Максимум, нТл	Источники
г. Касерес, Испания	27743 измерений, 140 км тротуаров	105	15.6	7300	Paniagua et al., 2007
г. Гетеборг, Швеция	0.5 км ² вдоль канала Vallgraven	340		5900	Lindgren et al., 1999; Lindgren et al., 2001
г. Турин, Италия	~ 120000 измерений	190	152.6	5730	d' Amore et al., 1999; d' Amore et al., 2001
г. Тронхейм, Норвегия	17 км тротуаров	130 (лето), 850 (зима, мороз), 900 (зима, снег)		37000	Straume et al., 2008
г. Сямынь, Китай		От 110 до 500 (по функциональным зонам)			Tang et al., 2019
г. Москва (отдельные микрорайоны)	194 измерения	94/57*	179.7	Более 2000**	Данные автора
г. Санкт-Петербург	330 измерений	163/133*	138.6	Более 2000**	Данные автора
Центральный район Санкт-Петербурга	648 измерений; 17.2 км ²	215	127.3	Более 2000**	Стурман, Широков, 2018
МО “Город Пушкин” (Санкт-Петербург)	160 измерений	37/28*	185.0	Более 2000**	Данные автора
г. Казань	115 измерений	86/77*	113.7	Более 2000**	Данные автора
г. Ижевск	217 измерений	37/24*	192.4	Более 2000**	Данные автора
г. Калининград	163 измерения	50/36*	139.3	Более 2000**	Данные автора
г. Белгород	103 измерения	66/46*	101.6	Более 2000**	Данные автора
г. Петрозаводск	146 измерений	70/53*	120.7	Более 2000**	Данные автора

Примечания. *Первые цифры означают средние значения с учетом аномалий, обусловленных кабелями подземной прокладки, вторые — при их исключении; **одинаковые для всех изученных городов максимумы “более 2000 нТл” относятся к аномалиям, они обусловлены возможностями использовавшегося прибора и не учитывались при расчете средних характеристик.

Таблица 2. Средние характеристики магнитной индукции (нТл) по функциональным зонам городов и типам застройки

Функциональные зоны и типы застройки	С учетом аномальных значений			При исключении аномальных значений			Города
	от	до	среднее	от	до	среднее	
Исторические центры	113	321	206	100	255	167	Москва, Санкт-Петербург, Казань
Многоэтажная застройка 1950–70-х годов (7 этажей и более)	42	73	59	26	58	44	Москва, Санкт-Петербург, Казань, Петрозаводск, Ижевск, Калининград
Многоэтажная 2000–2010-х годов	23	73	47	11	41	33	Москва, Санкт-Петербург, Казань, Ижевск, Калининград
Многоэтажная панельная 1970–90-х годов			29			27	Ижевск
Кирпичная среднеэтажная застройка 1950–60-х годов (3–6 этажей)	42	99	74	36	79	60	Москва, Санкт-Петербург, Казань, Белгород, Петрозаводск, Ижевск, Калининград
Немецкая довоенная			60			38.5	Калининград
Деревянная двухэтажная			58			43	Петрозаводск
Малоэтажная частная усадебная			21			17	Белгород
Малоэтажная современная (коттеджи)			29				Петрозаводск
Территории вузов	5	27	16				Москва, Санкт-Петербург (Пушкин), Ижевск
Площади и другие разрывы застройки			55			39	Санкт-Петербург
Рекреационные зоны	4	22	11	4	19	9	Москва, Санкт-Петербург, Казань, Петрозаводск, Белгород

Таблица 3. Оценка характеристик магнитной индукции (нТл) для функциональных зон и типов застройки по критерию Стьюдента

Город, критические значения	Функциональные зоны и типы застройки	Расчетные значения <i>t</i> -критерия Стьюдента
Санкт-Петербург $p \leq 0.05$ (1.96) $p \leq 0.01$ (2.58)	Историческая застройка	5.4
	Современная застройка, всего	3.4
	в том числе 4–5 этажей	1.6
	в том числе 7–14 этажей	2.5
	в том числе 15 этажей и более	1.7
	Парки	4.6
Москва $p \leq 0.05$ (1.96) $p \leq 0.01$ (2.58)	Историческая застройка	3.3
	Площади	1.4
	Многоэтажная 1950–80-х годов	1.3
	Среднеэтажная 1950–60-х годов	0.3
	Многоэтажная современная	1.5
	Учебные заведения	1.7
	Рекреационная	1.8
Пушкин (Санкт-Петербург) $p \leq 0.05$ (1.96) $p \leq 0.01$ (2.58)	Историческая застройка	1.1
	Среднеэтажная 1950–60-х годов	0.3
	Малоэтажная современная	2.3
	Рекреационная	2
Калининград $p \leq 0.05$ (1.97) $p \leq 0.01$ (2.61)	Среднеэтажная 1950–70-х годов	0.7
	Среднеэтажная немецкая	1.0
	Многоэтажная современная	1.2
	Площади	1.6
	Рекреационная	2.2
Петрозаводск $p \leq 0.05$ (1.97) $p \leq 0.01$ (2.61)	Многоэтажная 1950–70-х годов	0.3
	Среднеэтажная 1950–70-х годов	1.7
	Малоэтажная деревянная	0.5
Казань $p \leq 0.05$ (1.97) $p \leq 0.01$ (2.61)	Историческая застройка	1.7
	Парки, скверы	3.4
	Современная среднеэтажная	0.5
	Среднеэтажная 1960–80-х годов	0.1
Ижевск $p \leq 0.05$ (1.96) $p \leq 0.01$ (2.58)	Среднеэтажная 1950–60-х годов кирпичная	0.4
	Среднеэтажная 1970–80-х годов кирпичная	0.3
	Среднеэтажная 1950–60-х годов панельная	1.0
	Многоэтажная блочная 1970–80-х годов	0.6
	Рекреационная	1.5
	Многоэтажная современная	0.5
	Среднеэтажная 1930–50-х годов	0.6
Белгород $p \leq 0.05$ (1.99) $p \leq 0.01$ (2.63)	Средне- и многоэтажная 1960–80-х годов	3.1
	Рекреационная	2.5
	Малоэтажная частная	1.6
	Многоэтажная современная	2.1

Примечания. Рассчитанные значения *t*-критерия Стьюдента, превышающие критические значения для 95 и 99% доверительного уровня, выделены соответственно **полужирным курсивом** и **прямым полужирным** шрифтом.

отмечены только в исторических центрах. В особенности это относится к Санкт-Петербургу, где индустрия туризма развита более чем где-либо в России. Указанные выше относительно высокие показатели для городов Западной Европы с высокой вероятностью отражают то, что исследования целиком или в значительной степени охватывали районы с исторической застройкой, как и в Санкт-Петербурге, насыщенные предприятиями общественного питания, создающими повышенную нагрузку на системы электроснабжения. В российских городах в районах современной застройки показатели магнитной индукции существенно ниже; аналогичные данные по зарубежным городам нам неизвестны.

Выявлять и картировать (значковым способом) аномалии, обусловленные кабелями подземной прокладки, позволила организация измерений, предполагающая фиксацию каждой отдельно взятой точки. При непрерывной системе измерений аномальные значения “растворяются” в общем фоне. Тем не менее, в двух из четырех указанных в табл. 1 западноевропейских городов авторами отмечено влияние подземных кабелей (Lindgren et al., 1999; Lindgren et al., 2001; Straume et al., 2008). О количественной характеристике такого влияния речь не идет. Аномалии, обусловленные недостаточно экранированными подземными кабелями, выявлены нами во всех изученных городах России. В их распространенности прослеживается зависимость от степени влажности климата и, соответственно, от трудностей при прокладке подземных кабелей: 6.0% точек измерений в Ижевске, 7.8% — в Казани, по 10.8% — в Москве и Белгороде, 11.0% — в Петрозаводске, 12.2% — в Калининграде, 13.9% — в Санкт-Петербурге.

В табл. 1 также обращают на себя внимание выявленные в г. Тронхейм значительные сезонные различия значений магнитной индукции. Обнаружившие это явление норвежские авторы (Straume et al., 2008) высказали пожелание выполнить подобные исследования в других городах с холодным климатом. Представленные в табл. 1 города России данному критерию вполне отвечают, по крайней мере зимой. Однако результаты мониторинга электрических и магнитных полей в Санкт-Петербурге (Стурман, 2019) предположение о прямом влиянии погодных условия на магнитную индукцию не подтверждают. Если электрические поля высоковольтных линий практически не зависят от их нагрузки и полностью определяются напряжением, то магнитные поля существенным образом зависят от нагрузки (от силы тока) (Электромагнитная ..., 2009). Поэтому колебания напряженности магнитного поля в тех или иных точках зависят от диэлектрических свойств воздуха и через них — от метеоусловий, тогда как характеристики магнитных полей — в

большей мере от социально-экономических факторов. Выявлена (Стурман, 2019) прямая зависимость напряженности электрических полей в одних и тех же точках вблизи высоковольтных линий от относительной и абсолютной влажности и обратная — от атмосферного давления. Это отражает ослабление диэлектрических свойств воздуха с увеличением его влажности, а также снижение влажности с ростом атмосферного давления. Магнитные поля, отличающиеся значительно более высокой проникающей способностью в сравнении с электрическими, зависимости от метеоусловий не обнаруживают, и мониторинг вблизи высоковольтных линий в Санкт-Петербурге и окрестностях (Стурман, 2019) это подтвердил. Однако отсутствие прямого влияния не исключает косвенного, через сезонную динамику потребления электроэнергии и, соответственно, нагрузки на электросети и оборудование. Так, выявляющаяся в жилой зоне “спального” района Санкт-Петербурга слабая обратная зависимость магнитной индукции от абсолютной влажности и температуры отражает отток части населения в летнее время на дачи и уменьшение пользования бытовыми электроприборами и освещением (Стурман, 2019). Норвегия, по данным специализированного сайта³, отличается низкими тарифами на электроэнергию, в связи с чем до 70% жителей страны используют электричество в качестве основного источника тепла, и это объясняет отмеченную выше сезонную динамику. Таким образом, использование для отопления домов “экологически чистого” электричества, снижая химическое загрязнение атмосферного воздуха, влечет за собой электромагнитное загрязнение, что иллюстрирует закон неустранимости отходов и/или побочных воздействий производства (Реймерс, 1990).

Из обобщения результатов представленных в табл. 1 исследований в западноевропейских городах был сделан вывод о том, что преобладающие значения магнитной индукции составляют от 10 до 100 нТл, а продолжительному воздействию потенциально опасных полей более 200 нТл подвержено примерно 0.5% населения (Gajšek et al., 2016). Это вполне сопоставимо с результатом исследования в Москве и Московской области (Прокофьева, Григорьев, 2019), где определено число жителей, подвергающихся воздействию магнитных полей от высоковольтных линий более 300 нТл, составляющее от 100 до 300 тысяч (от 0.5 до 1.5%). Таким образом, несмотря на отсутствие единства подходов к методам измерения и интерпретации результатов, в итоге получаются достаточно близкие средние характеристики. Это едва ли отражает что-то иное, нежели сходство

³ Системы отопления в различных странах мира — что используют? <https://faneraosbl.com/kak-otaplivayut-doma-v-norvegii/> (дата обращения 05.08.2020).

средних уровней электромагнитных полей в городах, находящихся на сопоставимых уровнях социально-экономического развития и оснащенности хозяйств электрическими приборами и устройствами, а также достаточно высокую надежность использованных средств измерения.

Что касается подходов к интерпретации результатов, то здесь существуют разные варианты решения задач, зависящие от технической оснащенности исследователей и географических особенностей изучаемой территории. В работах западноевропейских исследователей, использующих автоматизированные измерительные комплексы, город (не столько город в целом, сколько его исторический центр) рассматривается как единое целое (d'Amore et al., 1999; d'Amore et al., 2001; Lindgren et al., 1999; Lindgren et al., 2001; Paniagua et al., 2007; Straume et al., 2008). Получение результатов на основе осреднения большого количества единичных замеров и не предполагает иного подхода. В наиболее объемном исследовании в г. Турине (Италия), основанном примерно на 120000 элементарных измерений (d'Amore et al., 1999; d'Amore et al., 2001), характеристики магнитного поля определены не только для города в целом, но и для образующих его 10 городских районов. Однако ввиду функциональной и градостроительной неоднородности внутригородских административно-территориальных образований, такой принцип осреднения трудно признать удачным.

Наш подход, основанный на использовании ручных приборов, делает неизбежным осознанный выбор точек измерения, что предполагает учет зонирования городской территории и особенностей ее застройки. Осреднение проводится по типам использования территории и застройки, по возможности, на основе репрезентативных выборок. Аномальные значения, обусловленные кабелями подземной прокладки, рассматривались отдельно и из выборок исключались. Тем не менее ввиду ограниченности объемов выборок показатели изменчивости всякий раз получаются высокими.

Учет зонирования городской территории реализован также в работе группы китайских авторов (Tang et al., 2019) по картографированию (посредством изолиний с послойной окраской) электрических и магнитных полей промышленной частоты, а также высокочастотных полей от объектов мобильной связи. В этом исследовании, в отличие от упомянутых выше западноевропейских, характеристики электрических и магнитных полей дифференцированы по функциональным зонам. При этом максимальное среднее значение магнитной индукции отмечено в жилом районе, тогда как наибольшая интенсивность высокочастотных полей от объектов мобильной связи — в

районе размещения образовательных учреждений, где концентрация пользователей достигает максимума.

ВЫВОДЫ

Несмотря на отмеченные различия в подходах к организации измерений, в изученных городах России и Западной Европы средние значения магнитной индукции промышленной частоты изменяются в пределах одного порядка, от 37 до 340 нТл. Преобладающие значения в городах как России, так и Западной Европы, составляют от 10 до 100 нТл. Однако за средними величинами скрываются многократные различия между функциональными зонами городов и типами застройки, а также сезонные колебания (в случае массового использования электрических отопительных приборов). Еще более значительные отличия от усредненных характеристик (локальные аномалии) формируют кабели подземной прокладки. Поэтому для адекватного картографического представления результатов предпочтительна организация измерений с пространственной привязкой каждого конкретного результата, без их осреднения.

Наиболее высокие значения магнитной индукции свойственны историческим центрам городов, где многочисленны предприятия общественного питания, создающие нагрузку на электросеть, а электропроводка выполнялась в стесненных условиях существующей старинной застройки. Наиболее высокие показатели высокочастотных электромагнитных полей от объектов сотовой связи, по данным единичного пока исследования в Китае, свойственны местам максимальной концентрации наиболее активных пользователей, т.е. образовательным учреждениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Васильев А.В., Бухонов В.О., Васильев В.А. Особенности и результаты мониторинга электромагнитных полей в условиях территории Самарской области // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2013. Т. 15. № 3 (1). С. 585–590.
- Григорьев О.А. Актуальные вопросы радиобиологии и гигиены неионизирующих излучений в связи с развитием новых технологий: Всероссийская конференция “Актуальные проблемы радиобиологии и гигиены неионизирующих излучений” (Москва, 12–13 ноября 2019 г.). М., 2019. С. 63–65.
- Григорьев Ю.Г. Значимость адекватной информации об опасности ЭМП сотовой связи для здоровья населения в 21 веке: Всероссийская конференция “Актуальные проблемы радиобиологии и гигиены неионизирующих излучений” (Москва, 12–13 ноября 2019 г.). М., 2019. С. 12–15.
- Ивлева Я.С. Мониторинг и составление карт электромагнитных полей в условиях города Оренбурга //

- Достижения вузовской науки. 2016. № 25 (2). С. 183–188.
- Мордачев В.И. Оценка электромагнитного фона, создаваемого системами сотовой (мобильной) связи: Всероссийская конференция “Актуальные проблемы радиобиологии и гигиены неионизирующих излучений” (Москва, 12–13 ноября 2019 г.). М., 2019. С. 76–79.
- Прокофьева А.С., Григорьев О.А. Оценка численности населения, проживающего вблизи воздушных линий электропередачи, по критерию экспозиции магнитным полем промышленной частоты (на примере Московского региона): Всероссийская конференция “Актуальные проблемы радиобиологии и гигиены неионизирующих излучений” (Москва, 12–13 ноября 2019 г.). М., 2019. С. 109–110.
- Реймерс Н.Ф. Природопользование: Словарь-справочник. М.: Мысль, 1990. 637 с.
- Сподобаев Ю.М., Кубанов В.П. Основы электромагнитной экологии. М.: Радио и связь, 2000. 240 с.
- Стурман В.И. Электромагнитные поля промышленного диапазона частот в условиях городской среды как объект эколого-географического исследования // География и природные ресурсы. 2019. № 1. С. 21–28. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2019-1\(21-28\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2019-1(21-28))
- Стурман В.И., Широков М.В. Электрические и магнитные поля населенных пунктов с плотной застройкой (на примере Центрального района Санкт-Петербурга) // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2018). VII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция. СПб., 2018. С. 410–414.
- Экологический атлас Санкт-Петербурга. СПб.: Изд-во Биомонитор, 1992. 10 л. карт.
- Электромагнитная безопасность элементов энергетических систем: Монография / В.Н. Довбыш, М.Ю. Маслов, Ю.М. Сподобаев. Самара: ООО “ИПК “Содружество”, 2009. 198 с.
- Яковлева М.И. Физиологические механизмы действия электромагнитных полей. Л.: Медицина, 1973. 175 с.
- d’Amore G., Anglesio L., Benedetto A., Tasso M. Background ELF magnetic fields in a great urban area // Bersani F. (Eds). Electricity and Magnetism in Biology and Medicine. Boston: Springer, 1999. P. 327–328.
- d’Amore G., Anglesio L., Tasso M., Benedetto A., Roletti S. Outdoor background ELF Magnetic fields in an urban environment // Radiat. Prot. Dosim. 2001. № 94 (4). P. 375–380.
- Directive 2004/40/EC of the European Parliament and of the Council, “The Minimum Health and Safety Requirements Regarding the Exposure of Workers to the Risks Arising from Physical Agents (Electromagnetic Fields)” // Official J. Europ. Union. 2004. L184. Vol. 30. № 4. P.1–9.
- Gajšek P., Ravazzani P., Grellier J., Samaras T., Bakos J., Thuróczy G. Review of Studies Concerning Electromagnetic Field (EMF) Exposure Assessment in Europe: Low Frequency Fields (50 Hz–100 kHz) // Int. J. Environ. Res. and Publ. Health. 2016. Vol. 13 (9). 875. <https://doi.org/10.3390/ijerph13090875>
- ICNIRP. “Guidelines for Limiting Exposure to Time Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz – 100 kHz)” // Health Physics. 2010. Vol. 99. № 6. P. 818836.
- Lindgren M., Gustavsson M., Hamnerius Y., Galt S. ELF magnetic fields in a city environment // Bioelectromagnetics. 2001. № 22. P. 87–90.
- Lindgren M., Gustavsson M., Hamnerius Y., Galt S. Mapping of Magnetic Fields in City Environment // Bersani F. (Ed.). Electricity and Magnetism in Biology and Medicine. Boston: Springer, 1999. P. 821–822. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4867-6_196
- Muller B. Electrosmog. Hausgemachtes Problem // Bild Wiss. 1996. № 4. P. 12–14.
- National precautionary policies on magnetic fields from power lines in Belgium, France, Germany, the Netherlands, and the United Kingdom. RIVM Report 2017–0118. P. 56. <https://doi.org/10.21945/RIVM-2017-0118>
- Paniagua J.M., Jiménez A., Rufo M. et al. Exposure to extremely low frequency magnetic fields in an urban area // Radiat. Environ. Biophys. 2007. № 46. P. 69–76. <https://doi.org/10.1007/s00411-006-0081-0>
- Stacencko L.G., Bakhvalova A.A. Assessment of Electromagnetic Background Levels from Base Stations of Mobile Networks from the Point of View of Technosphere Safety // Int. science and technology conference “EarthScience”. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2020. № 459. 052090. P. 1–7. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/5/05209>
- Straume A., Johnsson A., Oftedal G. ELF-magnetic flux densities measured in a city environment in summer and winter // Bioelectromagnetics. 2008. Vol. 29 (1). P. 20–28. <https://doi.org/10.1002/bem.20357>
- Tang C., Yang C., Cai R.S. et al. Analysis of the relationship between electromagnetic radiation characteristics and urban functions in highly populated urban areas // Sci. of The Total Environ. 2019. Vol. 654. P. 535–540. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.143>

Technogenic Electromagnetic Fields on Urban Areas and Approaches to Their Mapping

V. I. Sturman¹, * and A. N. Loginovskaya¹

¹Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, Russia

*e-mail: st@izh.com

Electromagnetic fields—an environmental factor which condition continues to worsen because of growth of prevalence and power of electric devices. The attention to the need of studying, along with medical and biological and physics and technology aspects of a problem of technogenic electromagnetic fields, also their spatial and temporary variability is paid what requires the use of geographical methods—mapping and monitor-

ing. The article is devoted to the analysis of the first experiences of cartographical submission of characteristics of electromagnetic fields in Russia and other countries. Characteristics of magnetic induction, average on the whole cities, and distribution of its values into functional zones and kinds of buildings are submitted. It is established that the highest values of the magnetic field intensity of industrial frequency, about hundreds of nanotesla, both in Russia and in foreign European countries, are characteristic of historical city centers. The reliability of the received values is calculated. It is noted that the reliability of results, along with volumes of sections is promoted by contrast and internal uniformity of the allocated taxons. Comparison of data on the degree of sharpness of problems of electromagnetic pollution available now in the cities of Russia and foreign countries is executed. The data obtained indicate the comparability of the levels of electromagnetic pollution. Anomalies of technogenic magnetic fields of the urbanized territories and the factors influencing the distribution of anomalies are characterized. The preference for the organization of measurements with a spatial binding of each measurement, and an isolinear form of cartographical representation of results is proved.

Keywords: electromagnetic fields, electric fields, strength, magnetic fields, magnetic induction, low-frequency fields, high-frequency fields, monitoring, mapping

REFERENCES

- d'Amore G., Anglesio L., Benedetto A., Tasso M. Background EMF magnetic fields in a great urban area. In *Electricity and Magnetism in Biology and Medicine*. Bersani F., Ed. Boston: Springer, 1999, pp. 327–328.
- d'Amore G., Anglesio L., Tasso M., Benedetto A., Roletti S. Outdoor background EMF magnetic fields in an urban environment. *Radiat. Prot. Dosim.*, 2001, vol. 94, no. 4, pp. 375–380.
- Directive 2004/40/EC of the European Parliament and of the Council, “The Minimum Health and Safety Requirements Regarding the Exposure of Workers to the Risks Arising from Physical Agents (Electromagnetic Fields)”. *Official Journal of the European Union*, 2004, L184, vol. 30, no. 4, pp. 1–9.
- Dovbysh V.N., Maslov M.Yu., Spodobaev Yu.M. *Elektromagnitnaya bezopasnost' elementov energeticheskikh sistem* [Electromagnetic Safety of Elements of Power Systems]. Samara: IPK Sodruzhestvo Publ., 2009. 198 p.
- Ekologicheskii atlas Sankt-Peterburga* [Environmental Atlas of St. Petersburg]. Biomonitor Publ., 1992.
- Gajšek P., Ravazzani P., Grellier J., Samaras T., Bakos J., Thuróczy G. Review of studies concerning electromagnetic field (EMF) exposure assessment in Europe: low frequency fields (50 Hz–100 kHz). *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2016, vol. 13, 875. <https://doi.org/10.3390/ijerph13090875>
- Grigor'ev O.A. Topical issues of radiobiology and hygiene of non-ionizing radiation in connection with development of new technologies. In *Vseross. konf. “Aktual'nye problemy radiobiologii i gigieny neioniziruyushchikh izluchenii”* [All-Russian Conf. “Current Problems of Radiobiology and Hygiene of Non-Ionizing Radiation”]. Moscow, 2019, pp. 63–65. (In Russ.).
- Grigor'ev Yu.G. The importance of adequate information on danger of EMF of mobile communication to health of the population in the 21st century. In *Vseross. konf. “Aktual'nye problemy radiobiologii i gigieny neioniziruyushchikh izluchenii”* [All-Russian Conf. “Current Problems of Radiobiology and Hygiene of Non-Ionizing Radiation”]. Moscow, 2019, pp. 12–15. (In Russ.).
- ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz – 100 kHz). *Health Physics*, 2010, vol. 99, no. 6, pp. 818–836.
- Ivleva Ya.S. Monitoring and mapping of electromagnetic fields in the conditions of the city of Orenburg. *Dostizheniya Vuzovskoi Nauki*, 2016, no. 25-2, pp. 183–188. (In Russ.).
- Lindgren M., Gustavsson M., Hamnerius Y., Galt S. EMF magnetic fields in a city environment. *Bioelectromagnetics*, 2001, vol. 22, pp. 87–90.
- Lindgren M., Gustavsson M., Hamnerius Y., Galt S. Mapping of magnetic fields in city environment. In *Electricity and Magnetism in Biology and Medicine*. Bersani F., Ed. Boston: Springer, 1999, pp. 821–822. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4867-6_196
- Mordachev V.I. Assessment of the electromagnetic background created by the systems of cellular (mobile) communication. In *Vseross. konf. “Aktual'nye problemy radiobiologii i gigieny neioniziruyushchikh izluchenii”* [All-Russian Conf. “Current Problems of Radiobiology and Hygiene of Non-Ionizing Radiation”]. Moscow, 2019, pp. 76–79. (In Russ.).
- Muller B. Electrosmog. Hausgemachtes Problem. *Bild Wiss.*, 1996, no. 4, pp. 12–14.
- National Precautionary Policies on Magnetic Fields from Power Lines in Belgium, France, Germany, the Netherlands and the United Kingdom*. RIVM Report 2017-0118. 56 p. <https://doi.org/10.21945/RIVM-2017-0118>
- Paniagua J.M., Jiménez A., Rufo M. et al. Exposure to extremely low frequency magnetic fields in an urban area. *Radiat. Environ. Biophys.*, 2007, vol. 46, pp. 69–76. <https://doi.org/10.1007/s00411-006-0081-0>
- Prokof'eva A.S., Grigor'ev O.A. Assessment of population, living near electricity transmission air-lines, by criterion of an exposition magnetic field of power frequency (the Moscow region as example). In *Vseross. konf. “Aktual'nye problemy radiobiologii i gigieny neioniziruyushchikh izluchenii”* [All-Russian Conf. “Current Problems of Radiobiology and Hygiene of Non-Ionizing Radiation”]. Moscow, 2019, pp. 109–110. (In Russ.).
- Reimers N.F. *Prirodopol'zovanie: Slovar'-spravochnik*. [Environmental Management: Dictionary Reference]. Moscow: Mysl' Publ., 1990. 637 p.
- Spodobaev Yu.M., Kubanov V.P. *Osnovy elektromagnitnoi ekologii* [Fundamentals of Electromagnetic Ecology]. Moscow: Radio i Svyaz' Publ., 2000. 240 p.

- Stacenko L.G., Bakhvalova A.A. Assessment of electromagnetic background levels from base stations of mobile networks from the point of view of technosphere safety. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 459, no. 5, 052090.
- Straume A., Johnsson A., Oftedal G. ELF-magnetic flux densities measured in a city environment in summer and winter. *Bioelectromagnetics*, 2008, vol. 29, no. 1, pp. 20–28.
<https://doi.org/10.1002/bem.20357>
- Sturman V.I. Power frequency electromagnetic fields in the urban environment as the object of ecological-geographical research. *Geogr. Nat. Resour*, 2019, vol. 40, no. 1, pp. 15–21.
- Sturman V.I., Shirokov M.V. Electric and magnetic fields of dense build settlements (the Central district of St. Petersburg as example). In *Aktual'nye problemy infotele-kommunikatsii v nauke i obrazovanii (APINO 2018). VII Mezhdunar. nauchn.-tekhn. i nauchn.-metod. Konf.* [Current problems of Infotelekkommunikation in Science and Education. VII Int. Sci., Techn. and Methodical Conf.]. St. Petersburg, 2018, pp. 410–414. (In Russ.).
- Tang C., Yang C., Cai R.S. et al. Analysis of the relationship between electromagnetic radiation characteristics and urban functions in highly populated urban areas. *Sci. Total Environ.*, 2019, vol. 654, pp. 535–540.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.143>
- Vasil'ev A.V., Bukhonov V.O., Vasil'ev V.A. Features and results of monitoring of electromagnetic fields in the conditions of Samara region. *Izv. Samar. Nauchn. Tsentra RAN*, 2013, vol. 15, no. 3 (1), pp. 585–590. (In Russ.).
- Yakovleva M.I. *Fiziologicheskie mekhanizmy deistviya elektromagnitnykh polei* [Physiological Mechanisms of Action of Electromagnetic Fields]. Leningrad: Meditsina Publ., 1973. 175 p.