

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОГО И РАДИОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНОВ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОЙ ЖИЛОЙ ЗАСТРОЙКИ ВЫСОКОЙ ЭТАЖНОСТИ

© 2024 г. В. И. Стурман<sup>1,\*</sup>, А. Д. Пищугина<sup>1</sup>, В. А. Черкасов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

\*E-mail: st@izh.com

Поступила в редакцию 07.08.2023 г.

После доработки 26.12.2023 г.

Принята к публикации 24.04.2024 г.

Выполнено инструментальное исследование электромагнитных полей промышленной частоты и радиочастотного диапазона в г. Мурино Ленинградской области. Выявлены устойчивые превышения допустимого уровня напряженности на границы санитарного разрыва высоковольтной линии 330 кВ. Не обнаружено превышений допустимых уровней магнитной индукции и в радиочастотном диапазоне – плотности потока энергии. Установлено, что разница значений напряженности электрического поля в 1.8 м от поверхности и на высоте 72 м достигает 1–2 порядков, что может быть объяснено только заземляющей ролью поверхности земли. Выявлены значительные расхождения расчетных и измеренных значений напряженности и магнитной индукции, что означает недостаточный учет при расчетах электрофизических свойств воздуха. Созданы детальные карты плотности потока энергии, показывающие сложную, но устойчивую картину распределения значений. Выявлены некоторые элементы территориальной структуры электромагнитных полей радиочастотного диапазона: фрагменты колец вокруг базовых станций сотовой связи, и ореолы, приуроченные к отдельным домам.

**Ключевые слова:** электромагнитные поля, промышленная частота, радиочастотный диапазон, напряженность электрического поля, магнитная индукция, плотность потока энергии, инструментальное исследование, мониторинг, картографирование, Мурино

DOI: 10.31857/S0869803124030086, EDN: MBVBPIN

Геоэкологические аспекты проблемы электромагнитных полей (ЭМП), т.е. особенности пространственной изменчивости и временной динамики фактических уровней их проявления, зависимости их от техногенных и природных факторов, привлекают меньше внимания, чем аспекты медико-биологические и физико-технические. Однако на стадии принятия решений об установлении нормативов и вытекающих из них ограничений именно масштабы проявления проблем и, соответственно, стоимость тех или иных вариантов их решения становится, как минимум, одним из важнейших факторов.

Расчетные методы, преобладающие в области нормирования и мониторинга электромагнитных полей, основываются на предельно упрощенном учете электрофизических свойств

воздуха, подстилающей поверхности и окружающих объектов урбанизированной среды. По мере научно-технического прогресса изменяются как свойства источников ЭМП, так и характеристики среды их распространения. Поэтому измеренные значения могут существенным образом отличаться от расчетных, и систематическое выполнение измерений (картографирование и мониторинг ЭМП) необходимо в т.ч. для совершенствования расчетных методов и контроля их результатов. Число геоэкологических исследований ЭМП в последние годы постепенно растет, и в отношении ЭМП промышленной частоты (ПЧ) измеряется десятками, что позволяет обобщать и систематизировать методы и результаты картографирования [1], тогда как для высокочастотных ЭМП речь пока идет о первых опытах [2, 3, 4].

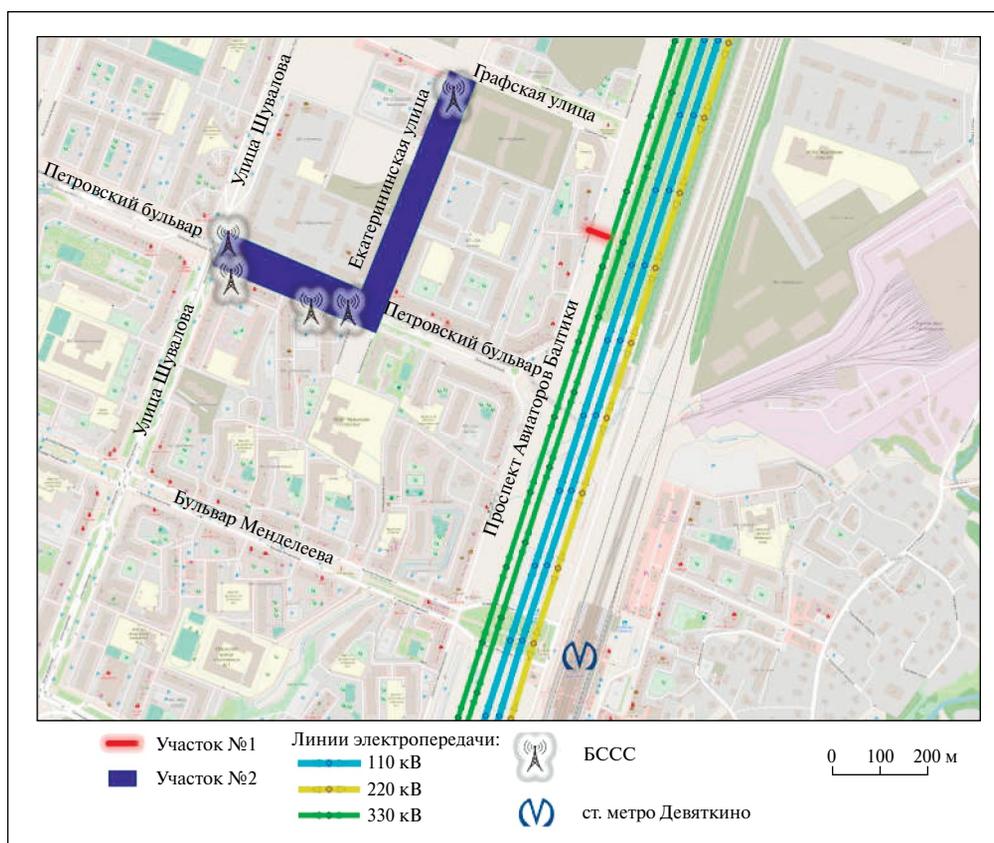


Рис. 1. Расположение участков мониторинга и картографирования ЭМП в г. Мурино.

Fig. 1. Location of sites of monitoring and mapping of electromagnetic fields in Murino.

Статья содержит результаты локального исследования, выполненного в г. Мурино Ленинградской области – пригороде Санкт-Петербурга, стремительно выросшем за последние годы, застроенном жилыми комплексами высокой этажности (преимущественно 24–25 этажей), пересекаемого созданной ранее системой из 5 высоковольтных линий (ВЛ), и населенного более чем 100 тысячами жителей – преимущественно молодых, экономически активных пользователей мобильных телефонов и других радиотехнических устройств. Сочетание указанных обстоятельств формирует в городе специфическую электромагнитную обстановку, ставшую объектом данного исследования.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Для мониторинга электромагнитного фона в г. Мурино было выбрано два участка, соответственно для исследования ЭМП ПЧ и ЭМП радиочастотного диапазона (РЧ). Расположение участков показано на рис. 1.

**Первый участок** расположен между ВЛ-330 кВ “Восточная-Выборгская I цепь” и домом по адресу: проспект Авиаторов Балтики 17, включая квартиру на 24-м этаже (высота 72 м) с окнами, выходящими в сторону данной ВЛ-330 кВ. Параллельно последней проходят еще одна ВЛ-330 кВ, две ВЛ-110 кВ и одна ВЛ-220 кВ (рис. 1). На этом участке измерения проводились на высоте 1.8 м вдоль поперечника, длина которого составляет около 40 м, в девяти точках с расстоянием между ними по 5 м. Также выполнялись замеры в квартире на 24-м этаже, где было выбрано две точки: непосредственно около окна и на расстоянии 2.0 м от оконного проема. Измерения проводились на высоте 1.8 м от поверхности пола, с открытыми и закрытыми окнами, выходящими на ВЛ-330 кВ. В каждой точке измерения проводились 3 раза, после чего записывалось среднее арифметическое значение. Мониторинг ЭМП ПЧ за пределами квартиры проводили с сентября 2022 г. по май 2023 г., всего было выполнено по 792 измерения напряженности электрического поля и магнитной индукции.

Мониторинг электромагнитного фона в квартире проводился с октября 2022 г. по май 2023 г., всего было выполнено по 64 измерения напряженности электрического поля и магнитной индукции.

Для измерения эффективных значений индукции магнитного поля и напряженности электрического поля промышленной частоты использовали индикатор электромагнитных полей ВЕ-50И (ООО “НТМ-Защита”, Россия). Верхний предел измеряемых эффективных значений индукции магнитного поля составляет 5000 мкТл, напряженности электрического поля – 50 кВ/м.

При обработке результатов измерений ЭМП ПЧ все данные были занесены в программу Microsoft Excel, после чего с помощью встроенных инструментов проведен статистический анализ, подсчитаны средние значения, построены графики и определены особенности изменений показателей. Кроме этого, была проведена статистическая оценка тесноты связи показателей ЭМП с метеорологическими характеристиками методом ранговой корреляции Спирмена [5]. Метеорологические характеристики были взяты из источника [7]. Полученные результаты оценивались на достоверность по табличному критическому значению коэффициента корреляции при уровне значимости  $p = 0.01$ , это означает, что вероятность получения результата случайно, не в связи с исследуемым фактором, составляет менее 1%. Далее, для прошедших проверку значений, была проведена оценка силы связи по шкале Чеддока [5].

**Второй участок** включает расположенные западнее смежные отрезки улиц Петровский бульвар и Екатерининская, протяженностью 365 и 470 м, шириной 70 и 55 м соответственно (рис. 1). В пределах участка и в непосредственной близости от него располагаются пять базовых станций сотовой связи (БССС), установленных на крышах зданий и мачтах. На этом участке замеры проводились согласно методике [6] в апреле–мае 2023 г. на частотах 2000 МГц (стандарт 3G IMT-2000) и 1800 МГц (стандарт 4G LTE1800), на высоте 1.8 м от поверхности земли, в 183 точках с интервалом 10 м при удалении до 100 м от излучающей антенны и с интервалом 20 м при удалении от 100 до 300 м от излучающей антенны. Всего было выполнено 1098 измерений.

Для измерения показателей ЭМП РЧ использовался измеритель уровня электромагнитного излучения МЕГЕОН 07300 (ООО “МЕГЕОН”,

Россия), предназначенный для изотропных измерений и измерения по осям X, Y, Z уровня электромагнитного излучения в диапазоне от 50 МГц до 3.5 ГГц. Пределы измерения напряженности электрического поля 108 В/м, напряженности магнитного поля – 286.4 мА/м, плотности потока энергии – 30.93 Вт/м<sup>2</sup>.

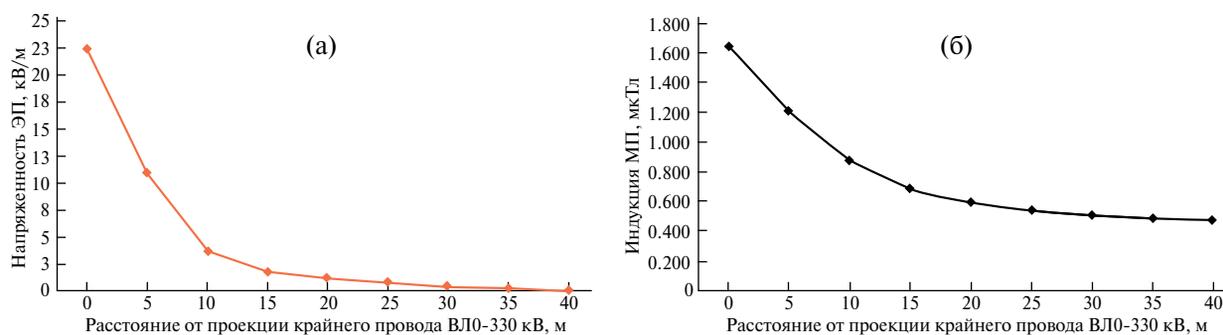
Обработка результатов измерений ЭМП РЧ проводилась в программе QGIS 3.16.11. Была выбрана географическая система координат WGS 84, в качестве базовой карты использовалась Open StreetMap (OSM) к которой в дальнейшем привязывали фрагмент карты из портала Яндекс.Карты в проекции системы координат EPSG:3857 – WGS 84/Pseudo-Mercator. Каждой точке были присвоены координаты, импортированы значения показателей ЭМП, нанесены границы исследуемых участков и отображены БССС. Далее с помощью внутренних инструментов программы была выполнена интерполяция методом TIN (Triangular Irregular Network), визуализация значений, благодаря чему появилась возможность провести оценку и изучить особенности формирования ЭМП в городской среде.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты мониторинга ЭМП ПЧ показывают простую картину убывания значений напряженности и магнитной индукции по мере удаления от проводов (рис. 2). При этом значения магнитной индукции убывают более плавно. Среднее значение напряженности на границе зоны санитарного разрыва (20 м) составило 1229.6 В/м, что превышает установленный ПДУ; в зоне инженерной и транспортной инфраструктуры значения существенно выше, до 22.5 тыс. В/м под проводами. На границе жилебной территории средние значения ЭМП составляют 431.5 В/м и 0.506 мкТл, что находится в пределах допустимого.

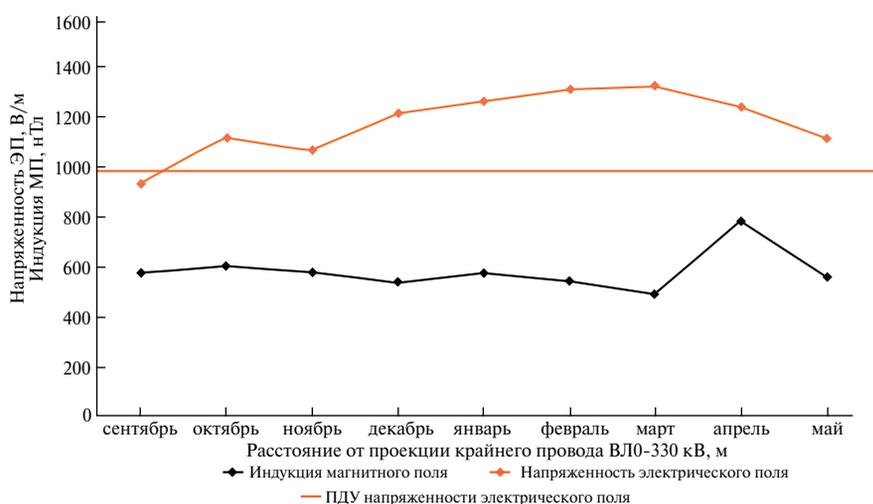
Изменчивость среднемесячных значений напряженности электрического поля и магнитной индукции представлена на рис. 3. Как видно из него, значения напряженности в течение периода наблюдений довольно устойчиво превышали допустимый уровень.

Измерения в квартире на 24-м этаже показали, что наибольшие значения напряженности электрического поля и магнитной индукции формируются на расстоянии 0.5 м от открытого окна и составляют 325.5 В/м и 453 нТл соответственно, что не превышает допустимых уровней.



**Рис. 2.** Изменения средних значений напряженности электрического поля (а) и магнитной индукции (б) по мере удаления от проводов ВЛ-330 кВ в г. Мурино.

**Fig. 2.** Changes of average values of electric field strength (a) and magnetic induction (b) in process of removal from wires of high-voltage line 330 kV in Murino.



**Рис. 3.** Динамика среднемесячных значений напряженности электрического поля и магнитной индукции на границе санитарного разрыва в 2022–2023 гг.

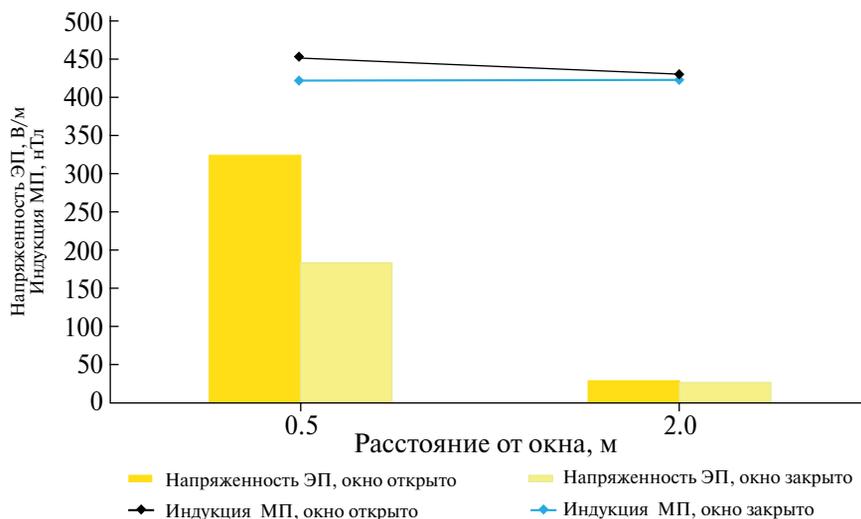
**Fig. 3.** Dynamics of average monthly values of electric field strength and magnetic induction on border of a sanitary zone in 2022–2023.

Значения напряженности электрического поля уменьшаются с увеличением расстояния от окна. Также закрытое окно снижает значения напряженности электрического поля около окна в 1.8 раза. Магнитная индукция в помещении практически не меняется, и это означает, что электромагнитное поле в квартире формируется не от ВЛ-330 кВ, а за счет домашних коммуникаций и бытовой техники (рис. 4).

С учетом характера застройки и расположения жилых домов, в данных условиях экспозиции (в сторону ВЛ) проживают примерно от 100 человек (если принимать во внимание только 24-е этажи) до 3000 человек, если считать, начиная с 1-го этажа. Наиболее реалистичное

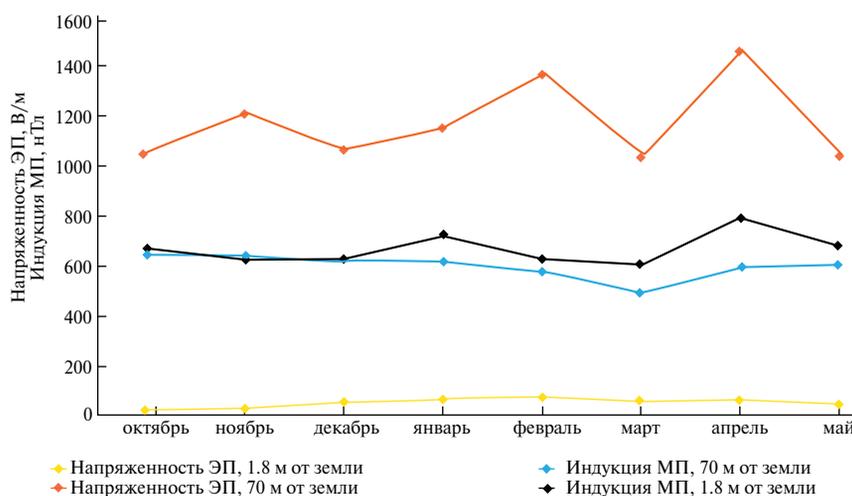
количество – 1700 проживающих на 10-м и более высоких этажах. При этом доля детей до 6 лет составляет 10%, а до 17 лет – 22% населения г. Мурино [8] (данные неофициальные).

Важно отметить, что по результатам мониторинга показателей ЭМП ПЧ за окном на 24-м этаже ближайшей линии застройки оказалось, что значения на высоте ~72 м, в зависимости от месяца, были в 18–68 раз больше, чем у дома на 1.8 м от поверхности земли (рис. 5). В апреле 2023 г. среднемесячное значение напряженности превышало предельно допустимый уровень. В отношении магнитной индукции разница между значениями на 1.8 м от поверхности земли и на 24-м этаже незначительная.



**Рис. 4.** Средние значения показателей ЭМП ПЧ в квартире ближайшей застройки от ВЛ-330 кВ.

**Fig. 4.** Average values of indicators of electromagnetic fields of industrial frequency in the apartment of the next building from high-voltage line 330 kV.



**Рис. 5.** Среднемесячные значения ЭМП на высоте 1.8 и 72 м (24-й этаж) от земли.

**Fig. 5.** Electromagnetic fields average monthly values at the height of 1.8 and 72 meters (the 24-th floor) from the earth.

Для оценки влияния метеорологических характеристик на формирование электромагнитного фона ПЧ были посчитаны коэффициенты корреляции методом Спирмена. После выполнения расчетов была проведена проверка коэффициентов на достоверность при уровне значимости  $p = 0.01$ , путем сравнения с критическим табличным значением ( $r_t = 0.28$ , при  $n = 88$ ). Результаты представлены в табл. 1 и 2.

То есть связи слабые и средней силы являются для температуры и давления. Для

напряженности электрического поля связи обратные, для магнитной индукции – прямые.

Результаты мониторинга ЭМП РЧ представлены в виде карт значений плотности потока энергии (рис. 6, 7). Как следует из них, превышений ПДУ ЭМП РЧ обнаружено не было. Максимальное зафиксированное разовое значение составляло  $9.650 \text{ мкВт/см}^2$  (10 мая – на частоте 2000 МГц).

Из сравнения рис. 6 и 7 видно, что, хотя значения плотности потока энергии в зависимости от частоты формируются по-разному, сохраняется приуроченность максимальных значений к одним

**Таблица 1.** Коэффициенты корреляции между напряженностью электрического поля и климатическими параметрами для полных выборок за 2022–2023 гг.**Table 1.** Correlation coefficients between electric field strength and climatic parameters for complete samples for 2022–2023.

Климатические параметры	Значение коэффициента корреляции напряженности электрического поля								
	Расстояние от проекции крайнего провода ВЛ-330 кВ, м								
	0	5	10	15	20	25	30	35	40
$T, ^\circ\text{C}$	-0.253	-0.151	-0.092	-0.225	0.023	<b>-0.285</b>	<b>-0.422</b>	0.201	-0.265
$U, \%$	-0.062	-0.007	0.010	0.135	-0.035	-0.063	0.175	<b>-0.326</b>	-0.177
$P, \text{мм рт. ст.}$	-0.236	-0.088	-0.044	<b>-0.420</b>	<b>-0.486</b>	-0.183	<b>-0.296</b>	-0.123	-0.170

Примечание: жирным шрифтом выделены достоверные значения при 1%-ном уровне значимости.

Обозначения:  $T$  – температура,  $U$  – относительная влажность,  $P_1$  – давление атмосферного воздуха на уровне метеостанции,  $P_2$  – давление, приведенное к уровню моря.

**Таблица 2.** Коэффициенты корреляции между индукцией магнитного поля и климатическими параметрами для полных выборок за 2022–2023 гг.**Table 2.** Correlation coefficients between induction of magnetic field and climatic parameters for complete samples for 2022–2023

Климатические параметры	Значение коэффициента корреляции индукции магнитного поля								
	Расстояние от проекции крайнего провода ВЛ-330кВ, м								
	0	5	10	15	20	25	30	35	40
$T, ^\circ\text{C}$	0.256	0.151	0.089	0.122	0.095	0.102	0.025	0.180	-0.132
$U, \%$	-0.277	-0.232	-0.21	-0.260	-0.189	-0.060	-0.124	-0.208	-0.181
$P, \text{мм рт. ст.}$	<b>0.378</b>	<b>0.346</b>	<b>0.453</b>	<b>0.432</b>	<b>0.462</b>	<b>0.408</b>	<b>0.509</b>	<b>0.361</b>	<b>0.307</b>

Примечание. Жирным шрифтом выделены достоверные значения при 1%-ном уровне значимости.

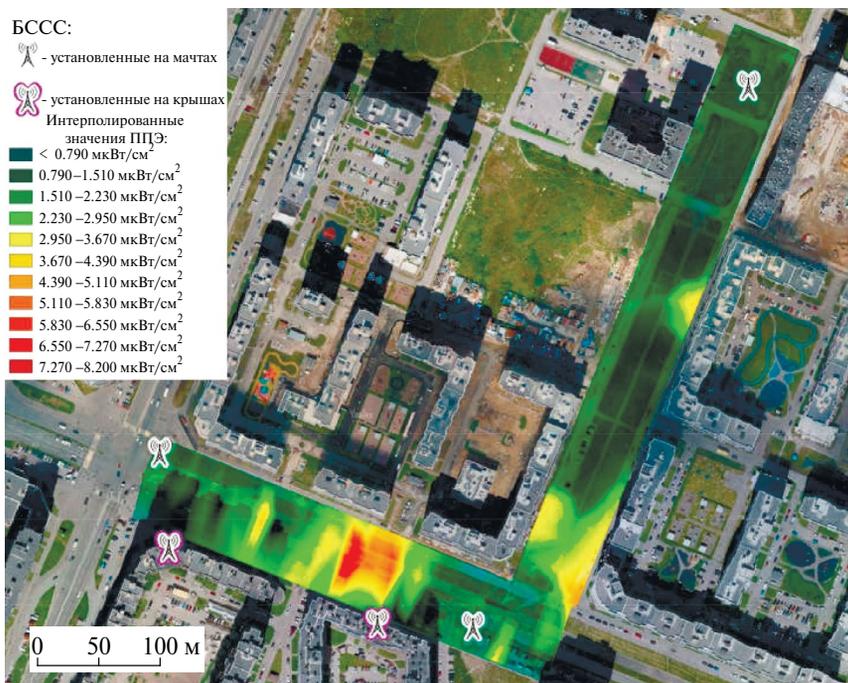
и тем же областям. Наибольшие значения приурочены к одной и той же БССС, на участке, куда были направлены антенны БССС, установленные на крыше. Значения плотности потока энергии на частоте 2000 МГц больше, чем на частоте 1800 МГц; разница составляет примерно 12%. Поскольку выбранный участок мониторинга представляет собой типичную часть г. Мурино, приведенные на рис. 6 и 7 изменчивые, но не превышающие величину ПДУ ЭМП РЧ значения можно экстраполировать на все население этого города, составлявшее на начало 2023 г. 104 611 человек (данные официальные) [9], включая в том числе по неофициальным данным [8] 22% несовершеннолетних до 17 лет (включая 10% детей до 6 лет).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наиболее неожиданным результатом исследования следует признать большую (от 18 до 68 раз) разницу между значениями напряженности электрического поля у поверхности земли (1.8 м) и на уровне 24-го этажа (примерно 72 м), на

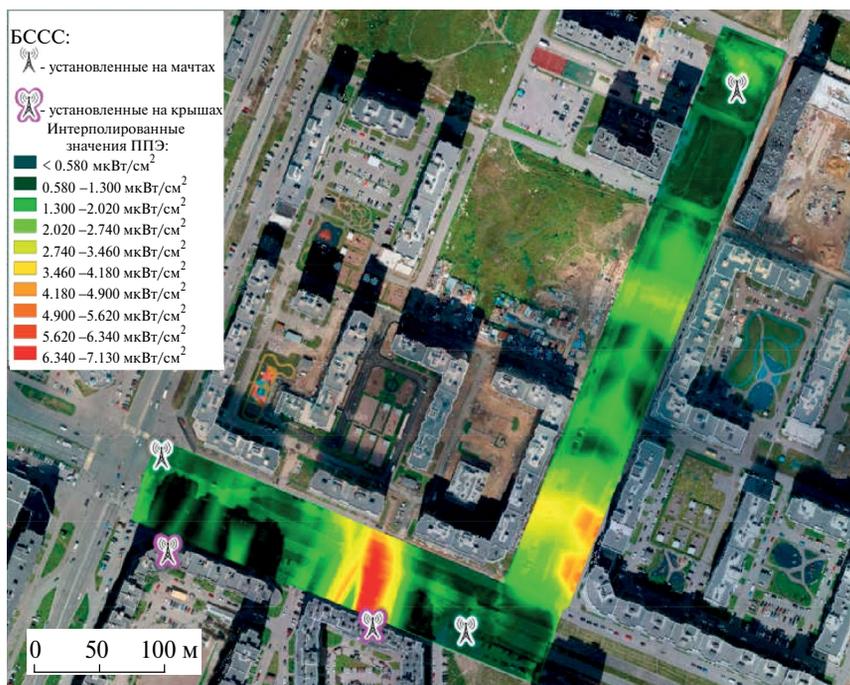
одинаковом расстоянии от ВЛ, при отсутствии существенной разницы между величинами магнитной индукции. Временная разница между проведением измерений на 24-м этаже и на земле была не более 10 мин, кроме этого, такая большая разница значений была зафиксирована каждый раз, поэтому, изменяющаяся токовая нагрузка и параметры атмосферного воздуха вряд ли могли стать причиной в таком отличии значений. Скорее всего, разница значений объясняется характером подстилающей поверхности, так как на высоте 72 м ее как таковой нет, все пространство занимает воздух с текущими однородными электрофизическими свойствами. А на высоте 1.8 м земля выступает структурой с отличными от воздуха диэлектрическими характеристиками, благодаря которым она может “заземлять” электрические поля и снижать напряженность, как следует из полученных данных на 1–2 порядка на 70 м вертикали.

Основным методом изучения распределения характеристик ЭМП по высоте является расчетный



**Рис. 6.** Интерполированные усредненные значения плотности потока энергии на частоте 2000 МГц за весь период измерений.

**Fig. 6.** The interpolated average values of density of a stream of energy at a frequency of 2000 MHz for the entire period of measurements.



**Рис. 7.** Интерполированные усредненные значения плотности потока энергии на частоте 1800 МГц за весь период измерений.

**Fig. 7.** The interpolated average values of density of a stream of energy at a frequency of 1800 MHz for the entire period of measurements.

[10], с учетом таких параметров как расстояние от источника, фазовое напряжение, токовая нагрузка, технические характеристики провода, электрофизические коэффициенты атмосферного воздуха и подстилающей поверхности.

Для описания электрического поля системы проводов ВЛ использовалась модель, основанная на принципе суперпозиции. Влияние подстилающей поверхности учтено введением зеркального изображения проводников, при этом делается предположение о металлическом характере электропроводности почвы. Расчет напряженности электрического поля был выполнен по формулам [10]:

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^N (\vec{E}_i + \vec{E}'_i), \quad (1)$$

где  $N = 3$  – число проводов, соответствующее типу опоры ЛЭП (опора типовая промежуточная ПЗ30-2Т);  $E_i$  – первичное поле  $i$ -го провода над поверхностью Земли;  $E'_i$  – вторичное поле  $i$ -го провода над поверхностью Земли.

Первичное поле  $i$ -го провода над поверхностью Земли определяется выражением:

$$E_i = \frac{q_i}{2\pi\epsilon_0 R_i} = \frac{C_i \cdot U_\Phi \cdot e^{j(i-1)\Delta}}{2\pi\epsilon_0 R_i}, \quad (2)$$

где  $C_i$  – погонная емкость системы провод–Земля;  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная (учтено, что поле определяется в воздухе);  $U_\Phi = 330$  кВ – класс напряжения ВЛ;  $\Delta = 120^\circ$  – фазовый сдвиг,  $j$  – мнимая единица;  $R_i = \sqrt{(x - d_i)^2 + (h_i - z_0)^2}$  – расстояние от фазного провода до расчетной точки.

Погонная емкость провода ЛЭП относительно Земли определяется следующим образом:

$$C_i = \frac{\pi\epsilon_0}{\ln \frac{2h_i}{\alpha}}. \quad (3)$$

Выражение (2) с учетом (3) принимает вид:

$$E_i = \frac{U_\Phi \cdot e^{j(i-1)\Delta}}{2 \ln \frac{2h_i}{\alpha} \sqrt{(x - d_i)^2 + (h_i - z_0)^2}}, \quad (4)$$

где  $z_0 = 1.8$  м – высота точки наблюдения;  $h_i = 24.5$  м; 31 м; 38.5 м расстояние от земли до

фазного провода;  $\alpha = 26.8$  мм диаметр поперечного сечения провода;  $(x - d_i)$  – расстояние от расчетной точки до проекции фазного провода;

Аналогичным образом находится вторичное поле провода над поверхностью Земли:

$$E'_i = \frac{q_i}{2\pi\epsilon_0 R'_i}, \quad (5)$$

где  $R'_i = \sqrt{(x - d_i)^2 + (h_i + z_0)^2}$  – расстояние от фазного провода до расчетной точки.

С учетом (3) можно переписать (5) в виде:

$$E'_i = \frac{U_\Phi \cdot e^{j(i-1)\Delta}}{2 \ln \frac{2h_i}{\alpha} \sqrt{(x - d_i)^2 + (h_i + z_0)^2}}. \quad (6)$$

Модуль вектора, стоящего под знаком суммы в (1), находится по формуле:

$$|\vec{E}_i + \vec{E}'_i| = \frac{U_\Phi \cdot e^{j(i-1)\Delta}}{2 \ln \frac{2h_i}{\alpha}} \sqrt{\frac{1}{R_i^2} + \frac{1}{(R'_i)^2} + \frac{2}{R_i R'_i} \cos \Psi}. \quad (7)$$

То есть учет электрофизических свойств воздуха сводится к одной величине – электрической постоянной  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$  Ф/м.

По результатам расчетов (табл. 3) напряженности электрического поля расчетное значение на высоте 1.8 м на границе селитебной зоны составляет 5457 В/м, что больше измеренного в 10 раз и в 5.5 раз превышает предельно допустимый уровень. На высоте 72 м расчетное значение составляет 3516 В/м, что больше усредненного эмпирического в 4 раза, и превышает ПДУ в 3.5 раза. В рассматриваемом случае все параметры, кроме реальных электрофизических свойств воздуха и подстилающей поверхности идентичны, и только их некорректность может объяснить столь большое и устойчивое отличие измеренных значений от расчетных.

То обстоятельство, что по мере удаления от проводов разница между расчетными и эмпирическими значениями меняет знак и стремительно нарастает, и реальное снижение напряженности на расстоянии 40 м составляет более 700 раз, тогда как расчетное – всего 1.55, трудно объяснить чем-либо иным, кроме как значительно большей заземляющей ролью приземного воздуха и поверхности земли, нежели это предусмотрено в расчетной методике.

**Таблица 3.** Расчетные и эмпирические значения напряженности электрического поля на высотах 1.8 м и 72 м  
**Table 3.** Calculated and empirical values of electric field strength at the heights of 1.8 m and 72 m

На высоте 1.8 м, В/м:									
X, м	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Расчетные	7161	7747	7895	7287	6579	5973	5457	5010	4619
Эмпирические (усредненные)	22519	10974	3652	1782	1230	825	431	128	36
На высоте 72 м, В/м:									
Расчетные	5113	5139	5033	4827	4567	4287	4013	3754	3516
Эмпирические (усредненные)	-	-	-	-	-	-	-	-	847

Реальные электрофизические характеристики воздуха изменяются с погодными условиями. Следствием этого являются зависимости показателей ЭМП от метеорологических характеристик и, в частности, отмеченные выше слабые и средней силы достоверные зависимости от температуры и давления. Для напряженности электрического поля связи обратные, для магнитной индукции – прямые. Поскольку электрическое поле ВЛ практически не зависит от нагрузки и полностью определяется напряжением, а магнитное существенно зависит от нагрузки [10], обратная зависимость напряженности от температуры может быть интерпретирована как следствие повышенного потребления электричества для обогрева помещений и уличного освещения при более низких температурах. Сложнее обстоит дело с интерпретацией зависимостей от атмосферного давления. Влияние давления может быть как косвенным, так и прямым. Косвенное влияние связано с тем, что высокому давлению (антициклональные условия) соответствует пониженная влажность (и более сильное электрическое сопротивление воздуха), а также повышенные температуры летом и пониженные зимой. То и другое влечет за собой повышенное энергопотребление и рост нагрузки ВЛ в сочетании с падением напряжения. С другой стороны (прямое влияние), при повышении давления воздух сжимается, что приводит к уменьшению объема межмолекулярного пространства, увеличению концентрации газов и повышению электрической активности частиц, из-за чего проводимость увеличивается, что может быть причиной более низких значений напряженности при повышенном атмосферном давлении.

Оценивая территориальное распределение плотности потока энергии ЭМП РЧ (рис. 6, 7), следует отметить, что участки повышенных значений

располагаются в виде криволинейных полос, образующих фрагменты колец вокруг источников – БССС, в определенных интервалах расстояний от них (порядка десятков метров), что образует концентрический тип территориальной структуры загрязнения [11]. Более четко это выражено на частоте 1800 МГц (рис. 7). Определенный вклад могут давать и устройства в домах, формируя прилегающие непосредственно к ним ореолы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам инструментального исследования в жилой зоне г. Мурино Ленинградской области значения магнитной индукции ПЧ и плотности потока энергии РЧ не превышали допустимых уровней. Значения напряженности электрического поля на границе зоны санитарного разрыва ВЛ-330 кВ устойчиво превышали допустимый уровень. Установлено, что значения напряженности электрического поля ПЧ на уровне 24-го этажа (примерно 72 м) на 1–2 порядка превышают аналогичные величины на уровне 1.8 м от поверхности. Эта разница может быть объяснена только заземляющей ролью поверхности земли. Существующие расчетные методы не вполне учитывают электрофизические свойства реального воздуха и их изменчивость. Установлено, что по мере удаления от проводов разница между расчетными и эмпирическими значениями меняет знак и стремительно нарастает, и это трудно объяснить чем-либо иным, кроме как значительно большей заземляющей ролью приземного воздуха и поверхности земли, нежели это предусмотрено в расчетной методике.

Электрофизические свойства воздуха изменяются с погодными условиями, вследствие чего выявляются зависимости показателей ЭМП от метеорологических характеристик и,

в частности, слабые и средней силы достоверные зависимости от температуры и давления.

Закрытое окно снижает значения напряженности электрического поля в помещении почти в 1.8 раза.

Значения плотности потока энергии в зависимости от частоты (2000 МГц и 1800 МГц) формируются по-разному, хотя сохраняется приуроченность максимальных значений к одним и тем же участкам. В рамках территориальной структуры ЭМП РЧ могут быть выделены фрагменты колец, окружающих БССС на определенных расстояниях от них (десятки метров), и ореолы, непосредственно прилегающие к соответствующим домам (метры – первые десятки метров).

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Стурман Владимир Ицхакович, доктор географических наук, профессор, профессор кафедры экологической безопасности телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. <https://orcid.org/0000-0003-2467-9997>. Вклад в статью: научное руководство исследованием, написание разделов: введение, результаты (за исключением графиков и карт), обсуждение результатов (за исключением расчетов), заключение. Итого 50%.

Пищугина Александра Дмитриевна, магистрант Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. Вклад в статью: выполнение измерений, раздел материалы и методика, оформление графиков и карт. Итого 30%.

Черкасов Владимир Алексеевич, магистрант Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета “ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина). Вклад в статью: расчеты, представленные в разделе обсуждение результатов. Итого 20%.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стурман В.И., Логиновская А.Н. Техногенные электромагнитные поля на городских территориях и подходы к их картографированию. *Изв. РАН. Серия географическая*. 2022;86(2):255–267. [Sturman V.I., Loginovskaya A.N. Technogenic electromagnetic fields on urban areas and approaches to their mapping. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 2022;86(2):255–267. (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2587556622020091>. – EDN HVQNYJ.
2. Потапов А.А. Мониторинг электромагнитной безопасности урбанизированных территорий с применением широкополосных частотно-нeselectивных измерений и систем геопространственного моделирования. IV Всерос. конф. “Радиолокация и радиосвязь” – ИРЭ РАН, 29 ноября–3 декабря 2010 г. М., 2010. С. 141–154. [Potapov A.A. Monitoring elektromagnitnoj bezopasnosti urbanizirovannyh territorij s primeneniem shirokopolosnyh chastotno-neselektivnyh izmerenij i sistem geopros-transtvennogo modelirovaniya. IV Vserossijskaya konferenciya “Radiolokacija i radiosvyaz”. (Conference proceedings). Moscow, 2010. P. 141–154. (in Russ.)]
3. Chao Tang, Chuanjun Yang, Hong Ye et al. Analysis of the relationship between electromagnetic radiation characteristics and urban functions in highly populated urban areas. *Sci. Total Environ.* V. 654, 1 March 2019. P. 535–540. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.143>
4. Jesús M. Paniagua-Sánchez, Francisco J. García-Cobos, Montaña Rufo-Pérez, Antonio Jiménez-Barco. Large-area mobile measurement of outdoor exposure to radio frequencies. *Sci. Total Environ.* 877 (2023) 162852.
5. Пузаченко Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях. М.: Академия, 2004. 416 с. [Puzachenko Yu.G. Matematicheskie metody v ekologicheskikh i geograficheskikh issledovaniyah. Moscow: Izdatel'stvo Akademiya, 2004. 416 p. (in Russ.)]
6. МУК 4.3.1167-02 Определение плотности потока энергии электромагнитного поля в местах размещения радиосредств, работающих в диапазоне частот 300 МГц – 300 ГГц. Доступно по: <https://docs.cntd.ru/document/1200030406> Ссылка активна на 23.07.2023 г.
7. Архив погоды в Санкт-Петербурге. Доступно по: <https://rp5.ru>. Ссылка активна на 23.07.2023 г.
8. VDEx. Население Мурино. Доступно по: <https://bdex.ru/naselenie/leningradskaya-oblast/murino/> Ссылка активна на 16.08.2023 г.
9. Численность постоянного населения Российской Федерации по муниципальным образованиям на 1 января 2023 г. Доступно по: [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/chisl\\_MO\\_Site\\_01-01-2023.xlsx](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/chisl_MO_Site_01-01-2023.xlsx). Ссылка активна на 16.08.2023 г.
10. Электромагнитная безопасность элементов энергетических систем: Монография. В.Н. Довбыш, М.Ю. Маслов, Ю.М. Сподобаев. Самара: ООО “ИПК “Содружество”, 2009. 198 с. [Electromagnetic Safety of power systems elements: Monograph. V.N. Dovbish, M.Yu. Maslov, Yu.M. Spodobaev. Samara: “IPK Sodrujestvo”; 2009. 198 p. (in Russ.)]
11. Стурман В.И. Экологическое картографирование: Учебное пособие. М.: Аспект Пресс, 2003. 251 с. [Sturman V.I. Ekologicheskoe kartografirovanie. Uchebnoe posobie. Moscow: Izdatel'stvo “Aspekt Press”; 2003. 251 p. (in Russ.)]

## Features of Formation of Electromagnetic Fields of Industrial and Radio-Frequency Ranges in the Conditions of the Modern Residential Development of High Number of Storeys

V. I. Sturman<sup>1, \*</sup>, A. D. Pishchugina<sup>1</sup>, V. A. Cherkasov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The Bonch-Bruевич St. Petersburg State University of Telecommunications, Saint Peterburg, Russia

<sup>2</sup>St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Peterburg, Russia

\*E-mail: st@izh.com

The tool research of electromagnetic fields of industrial frequency and radio-frequency range in by Murino of the Leningrad Region is executed. Steady excesses of admissible level of tension on borders of a sanitary rupture of the high-voltage line of 330 kV are revealed. Excesses of admissible levels of magnetic induction and in the radio-frequency range – energy stream density are not revealed. It is established that the difference of values of electric field strength in 1.8 m from a surface and at the height of 72 m reaches 1–2 orders that can be explained only with the grounding Earth's surface role. Considerable divergences of the settlement and measured values of tension and magnetic induction are revealed that means insufficiently correct account when calculating electrophysical properties of air. The detailed cards of density of a stream of energy showing a difficult, but steady picture of distribution of values are created. Some elements of territorial structure of electromagnetic fields of radio-frequency range – fragments of rings around base stations of cellular communication, and the auras dated for certain houses are revealed.

**Keywords:** electromagnetic fields, industrial frequency, radio-frequency range, electric field strength, magnetic induction, energy stream density, tool research, monitoring, mapping, Murino