

Разработка вычислительных моделей для анализа магнитного поля в помещениях медицинских учреждений и госпиталей с целью нормализации его уровня. I. Искажение геомагнитного поля

Ш. Я. Дион^{1,2}, *М. В. Капаркова*³, *В. П. Кухтин*³, *А. А. Макаров*³, *И. Ю. Родин*³, *С. Е. Сычевский*^{1,3}, *А. А. Фирсов*³

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

² Министерство здравоохранения и социальной деятельности, Фанн резиденц, Республика Сенегал, Дакар, ул. Айме Цезаре

³ НИИ электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова, Российская Федерация, 196641, Санкт-Петербург, Дорога на Металлострой, 3

Для цитирования: *Дион Ш. Я., Капаркова М. В., Кухтин В. П., Макаров А. А., Родин И. Ю., Сычевский С. Е., Фирсов А. А.* Разработка вычислительных моделей для анализа магнитного поля в помещениях медицинских учреждений и госпиталей с целью нормализации его уровня. I. Искажение геомагнитного поля // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2022. Т. 18. Вып. 3. С. 365–378. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu10.2022.306>

Предложена методика численного моделирования искажения геомагнитного поля в помещениях медицинских госпиталей. Приведены конкретные результаты моделирования изменения магнитного поля Земли, вызванные ферромагнитной стальной арматурой в стенах защитного бункера медицинского радиационного центра в Сенегале. Цель работы состоит в обеспечении электромагнитной совместимости нового сенегальского медицинского учреждения. Используются архитектурные и металлоконструктивные чертежи бункера, комплексы вычислительных программ KLONDIKE, КОМПОТ, а также российский ГОСТ. Изложены основания для сравнения полученных результатов с данными, которые могут быть рассчитаны другим комплексом программ (COMSOL Multiphysics и др.).

Ключевые слова: радиотерапия, магнитное поле Земли, численное моделирование поля.

1. Введение. Здания и сооружения, предназначенные для медицинских учреждений и госпиталей, содержат порождающее электромагнитное поле (ЭМП) и подверженное его действию электрофизическое оборудование, такое как магниторезонансные и позитронно-эмиссионные томографы, рентгенотерапевтические комплексы, комплексы лучевой терапии и некоторые другие, устанавливаемые в операционных залах и палатах пациентов.

Современные строения содержат арматуру, массивные элементы и оболочки, выполненные из конструкционной стали, которая часто обладает магнитными свойствами. Это может приводить к искажению магнитных полей, в частности естественного геомагнитного поля (ГМП) Земли. Во внимание необходимо принимать поля, создаваемые токами, протекающими в магнитных системах оборудования медицинского и общего назначения, а также поля, вызванные остаточной намагниченностью конструктивных элементов зданий.

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2022

В ряде случаев методики и алгоритмы решения аналогичных задач разработаны в [1–5]. Например, бетонные конструкции здания токамака, входящие в состав комплекса Международного экспериментального термоядерного реактора (ИТЭР) [6], содержат стальную арматуру с определенной пространственной структурой [3, 4]. При этом содержание стали в данных конструкциях варьируется от 1.5 до 12 % [7]. Внутренние элементы здания частично располагаются на сравнительно небольших (5–10 м) расстояниях от токамака. Стальные стержни арматуры могут намагничиваться полями рассеяния электромагнитной системы ИТЭР и плазмы, вплоть до насыщения. Актуальным является вопрос электромагнитной совместимости оборудования в рабочих помещениях здания ИТЭР [8]. В подобных расчетах использовались глобальные и достаточно детальные вычислительные модели комплекса ИТЭР, которые включали как элементы, изготовленные полностью из стали или с ее высоким объемным коэффициентом заполнения, так и бетонные элементы, армированные стальными стержнями.

Следует отметить, что при анализе магнитных полей в зданиях и помещениях, специфичных для целей функционирования токамаков, ситуация представляется другой, поскольку диапазон изменений уровней ЭМП в них на несколько порядков превышает уровень изменений полей в жилых помещениях (лечебных палатах) или операционных (манипуляционных) залах.

Использование в последние десятилетия при строительстве производственных и жилых зданий большого объема металлических ферромагнитных конструкций может приводить к изменению (в том числе и снижению) уровня естественного ГМП. Характерным примером конструкций этого типа являются современные каркасно-монолитные здания, в том числе здания высотного исполнения [1]. Для домов такого типа применяются железобетонные колонны и межэтажные перекрытия, содержащие до 15 % конструкционной стали в их объеме, которые существенно превышают аналогичные объемы стали, использовавшиеся в распространенных ранее конструкциях зданий из сборного железобетона [2].

Предложенные методы нормализации ГМП в стандартных жилых помещениях [2] базируются на применении методов математического моделирования с использованием упрощенных физических моделей железобетонных строительных конструкций и экспериментальных данных. Эти методы реализуются на этапах проектирования и строительства без специальных конструктивных элементов.

Синтез предложенных ранее подходов позволит решить проблему анализа и нормализации магнитных полей, распределенных в помещениях медицинских учреждений с учетом специфики их конструкций и установленного специального оборудования.

До недавнего времени исследования в основном фокусировались на влиянии повышенного ЭМП на человека. Сегодня можно отметить рост интереса к изучению влияния ослабления уровня ГМП на человеческий организм и биологические объекты (см. данные, например, [9–22]).

На Земле формы жизни постоянно подвергаются воздействию слабого магнитного поля самой планеты, которое колеблется примерно от 25 мкТл на экваторе до 65 мкТл на полюсах. Измерения магнитного поля Земли, проведенные Европейским космическим агентством (ЕКА), показывают, что оно снижается и за последние 200 лет уменьшилось на 9 %. По оценкам ЕКА, поле теряет примерно 5 % своей мощности каждые 10 лет. Это явление более выражено в районе Южной Атлантики между Южной Америкой и Африкой [14]. Вот почему в последние годы было прове-

дено множество исследований, посвященных влиянию такого уменьшения на живые существа, в частности на людей.

Из-за возможного отрицательного влияния ослабления ГМП на жизнедеятельность людей [1] (см. результаты медико-статистических исследований [23, 24]) в Российской Федерации был принят нормативный документ, который вводит предельно допустимый уровень ослабления естественного ГМП [1, 25].

Для обеспечения безопасности персонала разработаны ГОСТ Р-51724–2001 и Санитарные правила, а также требования к условиям труда работающих, подвергающихся в процессе трудовой деятельности профессиональному воздействию ЭМП различных частотных диапазонов и интенсивности (СанПин 2.1.8/2.2.4.2490-09). Эти Санитарные правила устанавливают предельно допустимые уровни (ПДУ) ЭМП.

При ослаблении ГМП для оценки обстановки введен коэффициент ослабления интенсивности ГМП (K_O), который рассчитывается по формуле [26]

$$K_O = |B_O/B_B|.$$

Здесь B_O — модуль вектора магнитной индукции в открытом пространстве в предположении отсутствия объекта, B_B — модуль вектора магнитной индукции на рабочем месте (в той же точке пространства) в помещении с учетом:

- ГМП, ослабленного объектом;
- поля остаточной намагниченности ферромагнитных конструкций;
- поля постоянного тока, протекающего по шинам и частям конструкции объекта.

Временный допустимый коэффициент ослабления интенсивности геомагнитного поля K_O на рабочих местах персонала в помещениях (объектах, технических средствах) в течение смены не должен превышать величины 2 ПДУ ($K_O < 2$).

Для того, чтобы сократить технологический разрыв в обеспечении больниц, Республика Сенегал приступила к реализации проектов по строительству больничных комплексов и оснащению их оборудованием последнего поколения и передовыми технологиями. В этом контексте были приобретены линейные ускорители частиц, комплексы для брахитерапии (кюритерапии), магниторезонансные томографы и т. п.

В больнице в связи с условиями эксплуатации высокотехнологичного электрофизического оборудования возникает необходимость бороться с повышенным уровнем ЭМП и с различными излучениями. При расчете (проектировании) таких мер обычно учитываются только защита от повышенного ЭМП для медицинского персонала, пациентов, а также условия эксплуатации. При проектировании инфраструктуры медицинских учреждений и интерьера и исследовании воздействия ЭМП на окружающую среду вопросы электромагнитной совместимости и гипомagnetизма практически не рассматривались.

Расположенные вблизи рабочих помещений ферромагнитные массы (оборудование из стали, арматура зданий и т. д.) могут искажать магнитное поле Земли. Магнитные силовые линии стремятся сконцентрироваться вблизи ферромагнетиков, поэтому вполне возможна ситуация, когда перераспределение поля на расстоянии от масс сталей приводит к возникновению зон с низким уровнем поля.

В данной работе исследуется искажение уровня поля Земли в конкретном помещении госпиталя (Сенегал, Медицинский центр радиотерапии [27]), которое является за счет наведенной намагниченности применяемой стальной ферромагнитной арматуры. Работа представляет часть общей вычислительной модели для описания электромагнитной обстановки в медицинских учреждениях и госпиталях. Эта общая

математическая модель должна позволять учитывать все значимые источники магнитного поля, определяя, таким образом, распределение полного поля.

В целях безопасности помещение с излучающим оборудованием размещается в специальном бункере, толщина потолка, стен, крыши и перегородок которого составляет 1.3 м. Стены заполнены арматурой с объемным коэффициентом заполнения (т. е. объемной долей стали) $k = 0.25\text{--}1\%$. Сталь арматуры втягивает в себя силовые линии магнитного поля, ослабляя поле в центре помещений.

Значение интенсивности поля в Сенегале получено через данные National Centers for Environmental Information (США), которые представлены в приложении IAGA [28]. В точке локации бункера на территории Сенегала B_0 составляет 32.788 мкТл [28].

2. Изотропная модель арматуры. Глобальная достаточно подробная вычислительная модель здания [29–31] включает массивные ферромагнитные элементы, которые описываются с той или иной степенью детализации «как есть». Ферромагнитные оболочки крыш, межэтажных перекрытий и фасадов [32] также обычно задаются с достаточной степенью приближения. Кроме того возможен учет компактных ферромагнитных объектов [33, 34].

Построение детальной модели, учитывающей положение каждого стержня, представляется нецелесообразным, с физической точки зрения, поскольку исследуются возмущения поля на расстояниях, которые существенно превышают характерные размеры поперечного сечения стержня. Дополнительно численная модель будет весьма громоздкой. При этом имеет смысл принимать во внимание направление укладки стержней в арматуре для выделения направлений анизотропии и построения соответствующих усредненных моделей, которые используют информацию о коэффициентах заполнения объема арматурой [3–5]. Предельным случаем такой анизотропной модели является изотропная модель [29–31].

Полная трехмерная модель должна обеспечивать, как показали проведенные ранее расчеты ИТЭР, инженерную точность в несколько процентов для оценки магнитных полей с учетом эффекта усиления конструкций стальной арматурой. Следует отметить, что после проведения вычислительного эксперимента и анализа результатов с изотропной моделью в случае необходимости может быть применена анизотропная модель.

В изотропной модели решетка арматуры заменяется эквивалентным однородным изотропным материалом, магнитные свойства которого описываются зависимостью магнитной индукции $B = 0.5k \cdot f(H)$ от напряженности поля H . Здесь $f(H)$ — кривая намагниченности арматуры, k — коэффициент объемного заполнения бетона арматурой. Коэффициент 0.5 отражает типичную схему размещения стальных стержней арматуры в двух взаимно перпендикулярных направлениях, когда 50 % стержней арматуры могут эффективно пропускать магнитный поток от внешнего поля, ориентированного вдоль стержней. Это происходит, когда направление поля параллельно плоскости стальной решетки. В перпендикулярном направлении к данной плоскости нет стержней, эффективно проводящих магнитный поток. Как следствие, намагниченность в перпендикулярном направлении должна быть слабой, и влияние соответствующей компоненты поля проявляется относительно слабо.

Численное моделирование электромагнитного поля опирается на систему уравнений Максвелла в дифференциальной форме, которая связывает векторы напряженностей электрического \mathbf{E} и магнитного \mathbf{H} полей, векторы электрической \mathbf{D} и магнитной \mathbf{B} индукций между собой, а также с объемной плотностью свободных электрических

зарядов ρ и вектором объемной плотности электрического тока (тока проводимости) \mathbf{j} . К этим уравнениям добавляются материальные уравнения, характеризующие среду. Для описания плотности тока та же степень приближения дается законом Ома в дифференциальной форме в рассматриваемой точке пространства с использованием удельной электрической проводимости среды σ .

Для стационарных магнитных полей система уравнений $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j}$, $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ дополняется уравнениями, описывающими нелинейную связь \mathbf{B} и \mathbf{H} в изотропных и безгистерезисных средах $\mathbf{B} = \mu\mu_0\mathbf{H} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$, где магнитная проницаемость μ и вектор намагничения \mathbf{M} являются известными функциями \mathbf{H} , различными для разных материалов элементов конструкции магнитной системы. Поле вектора плотности тока \mathbf{j} в данном случае известно до начала решения задачи. Необходимость анализа подробных пространственных распределений диктует выбор для численного решения задачи магнитостатики проекционно-сеточного метода (в форме метода конечных элементов). Для уменьшения размерности задачи эффективным является применение модифицированного скалярного магнитного потенциала [35, 36], известного как «метод сведения вихревого магнитного поля к потенциальному полю источников» или в англоязычной литературе как метод векторного электрического потенциала. В таком случае для скалярного потенциала число неизвестных минимально и совпадает с числом узлов сетки. Определив векторный электрический потенциал \mathbf{P} так, что $\nabla \times \mathbf{B} = \mathbf{j}$, для описания поля $(\mathbf{H} - \mathbf{P})$ можно ввести скалярный потенциал φ : $\mathbf{H} - \mathbf{P} = -\nabla\varphi$. Распределение этого модифицированного потенциала может быть найдено из решения краевой задачи для уравнения $\nabla \cdot \mu_0\mu(-\nabla\varphi + \mathbf{P}) = 0$. Физический смысл вектора \mathbf{P} заключается в том, что он является удельным магнитным моментом магнитного двойного слоя, эквивалентного в магнитном отношении при известных условиях замкнутым токам [36]. Выбор формы построения векторного электрического потенциала определяется особенностями каждой конкретной задачи, принципами оптимизации алгоритма и возможностями программного обеспечения [35].

Работоспособность изотропной модели была проверена в работах [3–5]. Для нескольких сравнительно простых конструкций была разработана детальная модель, в которой учитывалась раскладка каждого стержня арматуры. Перекрестные вычисления [4], проведенные комплексами программ КОМПОТ [5, 35], имеющем в основе дифференциальную постановку задач магнитостатики, и KLONDIKE [7, 35], основанном на численном решении интегральных уравнений магнитостатики, подтвердили применимость изотропной модели.

Для расчетов статических магнитных полей в зданиях [37] в рассматриваемом случае укладки арматуры можно предположить, что сравнительно простая изотропная модель [29] здания вполне применима.

3. Расчетная модель. В расчетах были приняты следующие допущения.

1. Отличие раскладки арматуры в здании медицинского центра от укладки в здании ИТЭР [3–5] состоит в равномерной укладке стержней во всех трех направлениях. Тогда объемный коэффициент заполнения стержней каждого направления будет составлять треть от полного коэффициента заполнения: $k_X = k_Y = k_Z = k/3$. Поэтому в соответствующей формуле для вычисления поля, $B = k \cdot f(H)/3$, должен стоять коэффициент $1/3$, а не $1/2$, как в [29].

2. Поскольку величина намагничивающего поля мала, можно принять линейную зависимость $f(H) = \mu_0\mu \cdot H$ для кривой намагничивания. Для оценки сверху принято, что сталь обладает типичной относительной магнитной проницаемостью магнитной стали в слабых полях: $\mu_{Fe} \approx 1000$.

3. На рис. 1 показано расположение бункера на плане больницы. Направлению на географический север на рисунке соответствует направление влево. Направления осей локальной системы координат: ось X — вправо, ось Y — вверх.

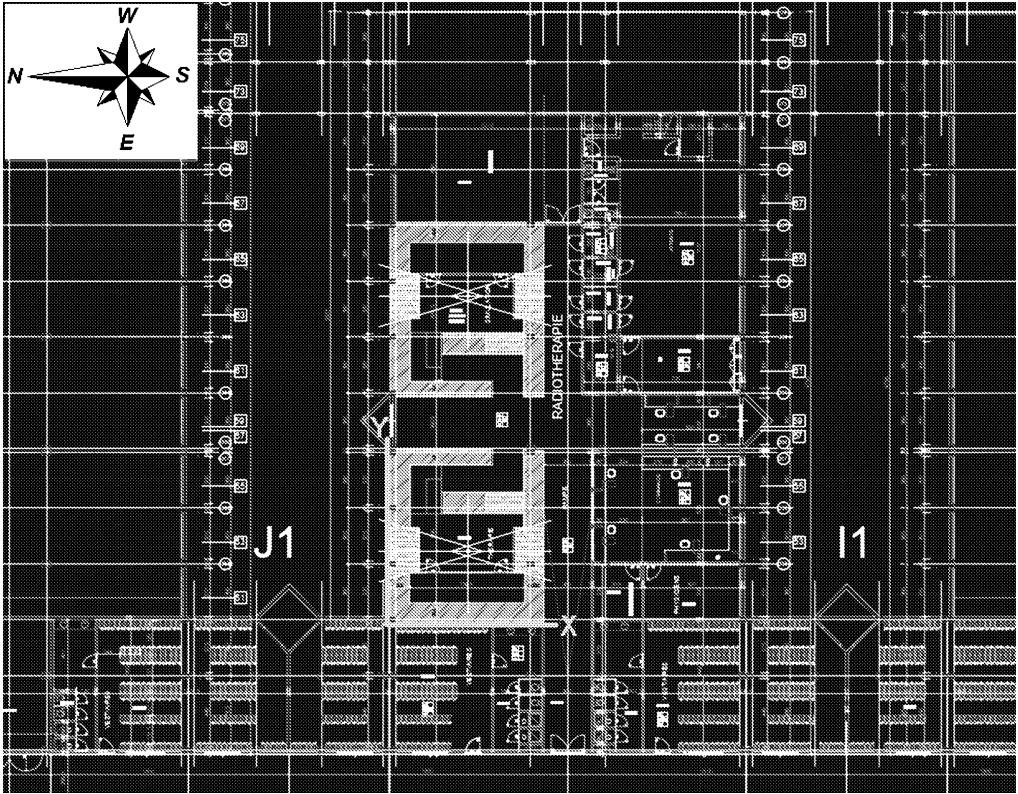


Рис. 1. План больницы (показаны система координат (рядом с бункером) и ориентация относительно сторон света)

4. В географической точке расположения медицинского комплекса поле Земли имеет компоненты: на север — 32 243 нТл, на запад — 3902 нТл и вертикально вниз — 3851 нТл [28]. Отсюда внешнее намагничивающее поле в выбранной системе координат имеет компоненты: $B_x = -32.2$ мкТл, $B_y = -3.9$ мкТл, $B_z = -3.9$ мкТл, $|B| = 32.67$ мкТл.

Задача решалась с использованием как конечно-элементного, так и интегрального метода (с помощью комплексов программ КОМПОТ и KLONDIKE) соответственно. На рис. 2 и 3 показаны построенные конечно-элементная и интегральная расчетные модели здания.

4. Результаты расчетов. На рис. 4, а, б представлены расчетные распределения поля внутри здания в горизонтальной плоскости на высоте 1 м от пола, полученные соответственно с помощью кодов КОМПОТ и KLONDIKE. Расхождение результатов не превосходит 5 % вблизи стен и 1 % на удалении от стен на расстояние 1 м и более.

Получено, что в центре зоны гантри внешнее поле ослабляется примерно на 10 %. Вблизи стен возмущение поля может составлять $\pm 20\%$ и более.

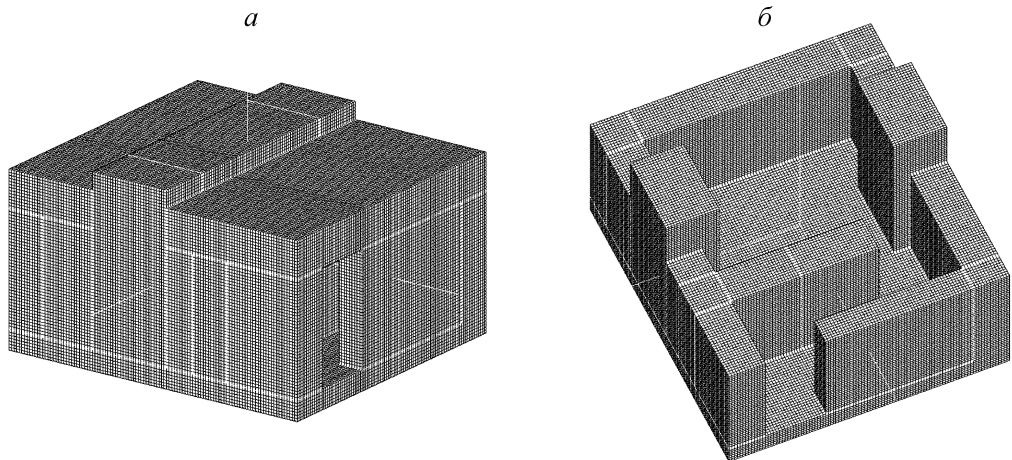


Рис. 2. Конечно-элементная модель здания (KOMPOT)
 а – общий вид; б – вид со снятой крышей

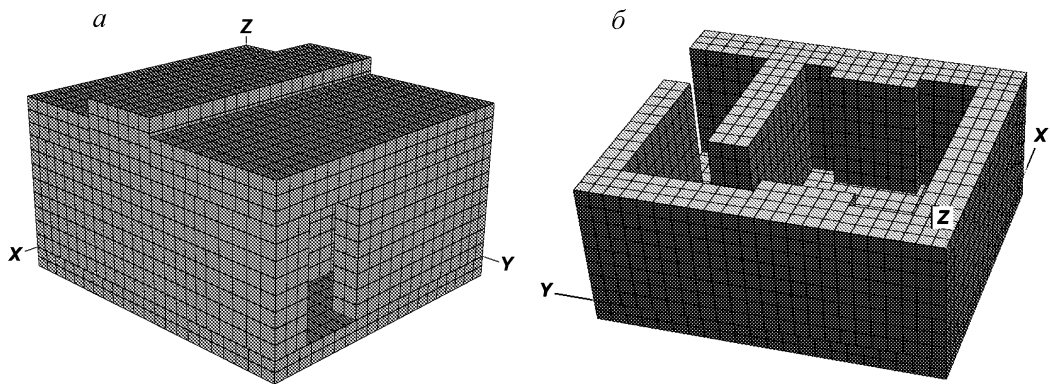


Рис. 3. Модель здания для интегрального метода (KLONDIKE)
 а – общий вид; б – вид со снятой крышей

Следует отметить, что расчет выполнен при консервативной оценке величины магнитной проницаемости $\mu_{Fe} \approx 1000$. Более типичным значением проницаемости в слабых полях можно считать $\mu_{Fe} \approx 400$. Соответственно возмущение поля при этом уменьшится в 2–3 раза.

5. Заключение. На основе анализа предложенных подходов к определению степени искажения магнитного поля Земли ферромагнитными элементами зданий и сооружений разработаны математические модели бункера госпиталя в Республике Сенегал, которые позволяют выявить искажение ГМП стальной арматурой и оценить необходимость его нормализации.

Сопоставление результатов численного моделирования с использованием пространственной модели (различие оценивается величиной не более 1 %), проведенное двумя независимыми комплексами программ, базирующимися на двух различных подходах (дифференциальном и интегральном), дает возможность считать, что полученные результаты достоверны.

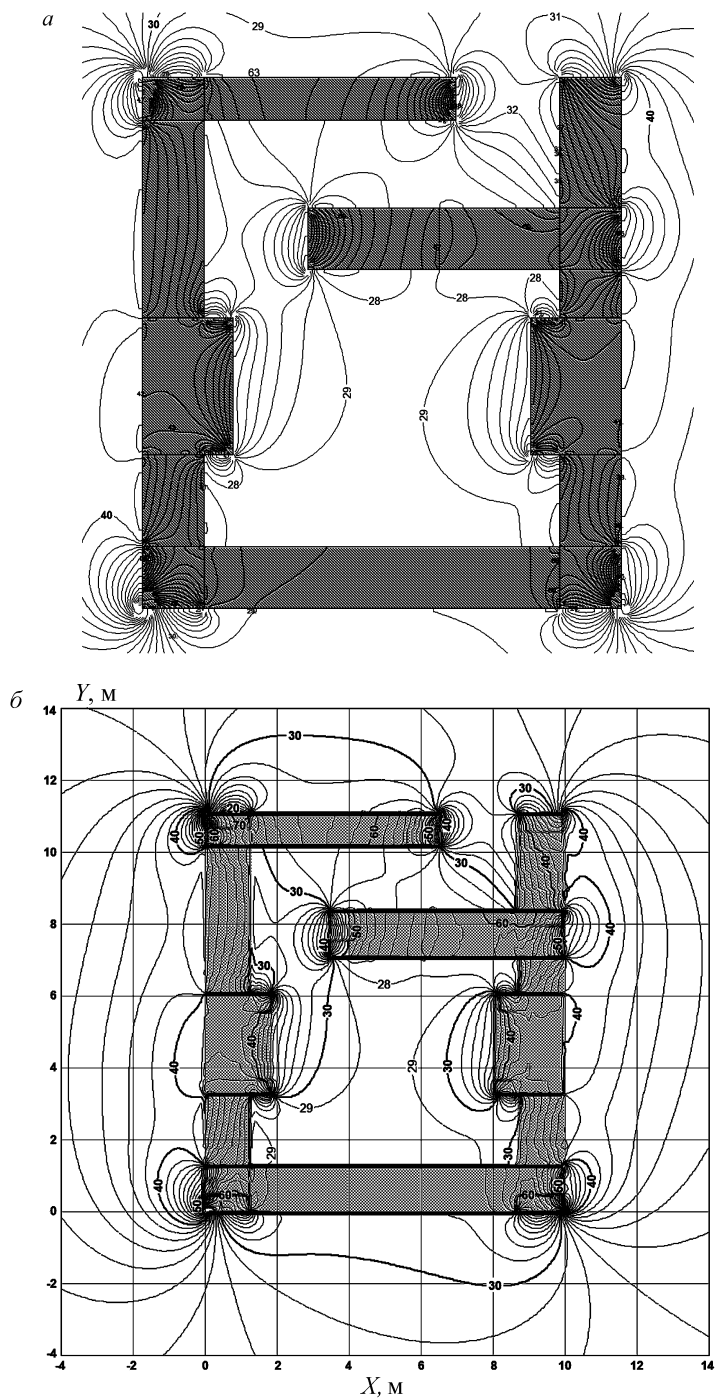


Рис. 4. Изолинии модуля магнитной индукции $|B|$ (в мкТл) в здании на высоте $Z = 1$ м над полом
 а – KOMPOT; б – KLONDIKE

Следующий шаг в развитии модели — оценить влияние остаточной намагниченности стержней арматуры на распределение ГМП.

Разработанная модель должна входить составной частью в глобальную модель бункера медицинского комплекса с установленным в нем оборудованием, которое может порождать поля рассеяния.

Литература

1. Резинкина М. М., Ерисов А. В., Пелевин Д. Е., Лобжанидзе Л. Э. Экспериментальное исследование влияния индуцированной и остаточной намагниченности ферромагнитных конструкций на ослабление геомагнитного поля в жилых помещениях // Вестник Харьковск. политехнич. ин-та. 2009. Вып. 41. С. 111–120.
2. Розов В. Ю., Завальный А. В., Золотов С. М., Грецкий С. В. Методы нормализации статического геомагнитного поля в жилых домах // Электротехника і електромеханіка. 2015. Вып. 2. С. 35–40.
3. Amoskov V. M., Bazarov A. M., Belyakov V. A., Gapionok E. I., Kaparkova M. V., Kukhtin V. P., Lamzin E. A., Lyublın B. V., Sytchevsky S. E. Modelling of magnetic field perturbations in electrophysical devices due to the steel reinforcement of buildings // Technical Physics. 2017. Vol. 62. N 10. P. 1466–1472. <https://doi.org/10.1134/S1063784217100048>
4. Amoskov V., Bazarov A., Kaparkova M., Kukhtin V., Lamzin E., Lyublın B., Belyakov V., Sytchevsky S., Gribov Y. Modeling magnetic effects of steel rebar of concrete surroundings for electrophysical apparatus // RuPAC. 2016. THPSC007. С. 553–555. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2016-THPSC007>
5. Amoskov V., Bazarov A., Belyakov V., Gapionok E., Gribov Y., Kaparkova M., Kukhtin V., Lamzin E., Lyublın B., Ovsyannikov D., Sytchevsky S. Calculation of magnetic field from steel rebar of building with machine producing high stray field // Fusion Eng. Des. 2018. Vol. 135. P. 165–173. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.07.026>
6. Официальный сайт ИТЭР 26.06.2021 г. URL: www.iter.org (дата обращения: 26.06.2021 г.).
7. Amoskov V. M., Belov A. V., Belyakov V. A., Gapionok E. I., Gribov Y. V., Kukhtin V. P., Lamzin E. A., Mita Y., Ovsyannikov A. D., Ovsyannikov D. A., Patisson L., Sytchevsky S. E., Zavadskiy S. V. Magnetic model ММТС-2.2 of ITER tokamak complex // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2019. Т. 15. Вып. 1. С. 5–21. <https://doi.org/10.21638/11702/spbu10.2019.101>
8. Amoskov V., Belov A., Belyakov V., Gribov Y., Kukhtin V., Lamzin E., Maximenkova N., Sytchevsky S. Stray magnetic field produced by ITER Tokamak Complex // Plasma Devices Oper. 2009. Vol. 17. N 4. P. 230–237.
9. Conley C. C. A review of the biological effects of very low magnetic fields: Report NASA TN D-5902. Washington, D. C.: National Aeronautics and Space Administration, 1970. N 20546. 25 p.
10. Wang X., Li B., Xu M., Li D., Jiang J. Long-term memory was impaired in one-trial passive avoidance task of day-old chicks hatching from hypomagnetic field space // China Sci. Bull. 2003. Vol. 48. N 22. P. 2454–2457. <https://doi.org/10.1360/03wc0231>
11. Zhang B., Lu H., Xi W., Zhou X., Xu S., Zhang K., Jiang J., Li Y., Guo A. Exposure to hypomagnetic field space for multiple generations causes amnesia in *Drosophila melanogaster* // Neuroscience Letters. 2004. Vol. 371. N 2–3. P. 190–195. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2004.08.072>
12. Zhang X., Li J.-F., Wu Q.-J., Li B., Jiang J. Effects of hypomagnetic field in noradrenergic activities in the brainstem of golden hamster // Bioelectromagnetics. 2007. Vol. 28. P. 155–158. <https://doi.org/10.1002/bem.20290>
13. Binhi V. N., Prato F. S. Biological effects of the hypomagnetic field. An analytical review of experiments and theories // PLoS One. 2017. Vol. 12. N 6. P. 1–51. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179340>
14. Johnson-Groh M., Merzdorf J. NASA's Goddard Space Flight Center, Greenbelt. URL: <https://www.nasa.gov/feature/nasa-researchers-track-slowly-splitting-dent-in-earth-s-magnetic-field> (дата обращения: 19.08.2020 г.).
15. Ahmad M., Galland P., Ritz T., Wiltshcko R., Wiltshcko W. Magnetic intensity affects cryptochrome-dependent responses in *Arabidopsis thaliana* // Planta. 2007. Vol. 225. P. 615–624. <https://doi.org/10.1007/s00425-006-0383-0>
16. Buchachenko A. L., Kuznetsov D. A. Magnetic field affects enzymatic ATP synthesis // Journal of Amer. Chem. Soc. 2008. Vol. 130. N 39. P. 12868–12869. <https://doi.org/10.1021/ja804819k>

17. Hore P. J. Are biochemical reactions affected by weak magnetic fields? // *Proceedings Natl. Acad. Sci. USA*. 2012. January 31. Vol. 109. N 5. P. 1357–1358. <https://doi.org/10.1073/pnas.1120531109>
18. Servick K. Humans — like other animals — may sense Earth's magnetic field // *Science*. 2019. Vol. 363. Iss. 6433. P. 1257–1258. <https://doi.org/10.1126/science.363.6433.1257>
19. Sarimov R. M., Binhi V. N., Milyaev V. A. The influence of geomagnetic field compensation on human cognitive processes // *Biophysics*. 2008. Vol. 53. P. 433–441. <https://doi.org/10.1134/S0006350908050205>
20. Van Huizen A. V., Morton J. M., Kinsey L. J., Von Kannon D. G., Saad M. A., Birkholz T. R., Czajka J. M., Cyrus J., Barnes F. S., Beane W. S. Weak magnetic fields alter stem cell-mediated growth // *Science Advances*. 2019. Vol. 5. Iss. 1. Article N 7201. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aau7201>
21. Shimojo S., Wu D.-A., Kirschvink J. New evidence for a human magnetic sense that lets your brain detect the Earth's magnetic field // *The Conversation*. URL: <https://theconversation.com/new-evidence-for-a-human-magnetic-sense-that-lets-your-brain-detect-the-earths-magnetic-field-113536> (дата обращения: 18.03.2019 г.).
22. Thoss F., Bartsch B. The human visual threshold depends on direction and strength of a weak magnetic field // *Journal of Comparative Physiology A*. 2003. Vol. 189. P. 777–779. <https://doi.org/10.1007/s00359-003-0450-y>
23. Походзей Л. В. Гипогеомагнитные условия как фактор риска для здоровья человека // Труды II Междунар. конференции «Электромагнитные поля и здоровье человека». М., 1999. С. 135–136.
24. Нахильнищкая З. Н., Мاستрюкова В. М., Андрианова Л. А., Бородкина А. Т. Реакция организма на воздействие «нулевого» магнитного поля // *Космическая биология и авиакосмическая медицина*. 1978. № 2. С. 74–76.
25. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. СанПиН 2.1.8/2.2.4.2490-09 «Электромагнитные поля в производственных условиях». Утв. Глав. гос. сан. врачом Российской Федерации 2 марта 2009 г.; введ. 15 марта 2009 г. М.: Роспотребнадзор, 2009. 1 с.
26. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.1.8/2.2.4.2489-09 «Гипогеомагнитные поля в производственных, жилых и общественных зданиях и сооружениях». Утв. Глав. гос. сан. врачом Российской Федерации 2 марта 2009 г.; введ. 15 марта 2009 г. М.: Роспотребнадзор, 2009. 13 с.
27. Korovkin N., Diop C. Y. Minimization of electromagnetic fields intensity and optimization of electrical wiring networks in healthcare facilities // 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EConRusNW). 2016. P. 604–607. <https://doi.org/10.1109/EConRusNW.2016.7448255>
28. World magnetic model calculator. URL: www.geomag.bgs.ac.uk/data_service/models_compass/igrf_calc.html (дата обращения: 26.06.2021 г.).
29. Amoskov V., Belov A., Belyakov V., Gribov Y., Kukhtin V., Lamzin E., Maximenkova N., Sytchevsky S. Assessment of error field from ferromagnetic surrounding of ITER tokamak: ferromagnetic rebar of Tokamak Complex building // *Plasma Devices Oper*. 2008. Vol. 16. N 4. P. 225–233. <https://doi.org/10.1080/10519990802433875>
30. Amoskov V., Belov A., Belyakov V., Gribov Y., Kukhtin V., Lamzin E., Maximenkova N., Sytchevsky S. Stray magnetic field produced by ITER tokamak complex // *Plasma Devices Oper*. 2009. Vol. 17. P. 230–237. <https://doi.org/10.1080/10519990903043599>
31. Amoskov V., Belov A., Belyakov V., Gribov Y., Kavin A., Kukhtin V., Lamzin E., Lobanov K., Maximenkova N., Mineev A., Sytchevsky S. Stray magnetic field at plasma initiation produced by ferromagnetic elements of the ITER Tokamak Complex // *Plasma Devices Oper*. 2009. Vol. 17. N 4. P. 238–249. <https://doi.org/10.1080/10519990903043623>
32. Карауш С. А., Кузнецов А. В. Влияние металлических фасадных систем на геомагнитное поле внутри помещений // *Вестник Томск. гос. архитектурно-строит. ун-та*. 2013. Т. 38. № 1. С. 83–87.
33. Amoskov V., Belov A., Belyakov V., Gribov Y., Kukhtin V., Lamzin E., Maximenkova N., Sytchevsky S. Assessment of error field from solitary ferromagnetic elements located outside of ITER tokamak // *Plasma Devices Oper*. 2008. Vol. 16. P. 171–179. <https://doi.org/10.1080/10519990802249289>
34. Amoskov V., Gribov Y., Lamzin E., Sytchevsky S. Assessment of $n = 1$ “overlap” error field produced by localized steel objects placed at different levels of ITER Tokamak building // *Fusion Eng. Des*. 2019. Vol. 148. Article N 111271. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.111271>
35. Amoskov V. M., Belov A. V., Belyakov V. A., Belyakova T. F., Gribov Yu. A., Kukhtin V. P., Lamzin E. A., Sytchevsky S. E. Computation technology based on KOMPOT and KLONDIKE codes for magnetostatic simulations in tokamaks // *Plasma Devices Oper*. 2008. Vol. 16. P. 89–103. <https://doi.org/10.1080/10519990802018023>

36. *Беляков В. А., Сычевский С. Е.* Особенности технологии численного моделирования электромагнитных полей термоядерных реакторов на основе токамаков // *Известия Рос. академии наук. Энергетика.* 2014. № 1. С. 141–149.

37. *Розов В. Ю., Левина С. В.*, Моделирование статического геомагнитного поля внутри помещений современных жилых домов // *Технічна Електродинаміка.* 2014. № 4. С. 8–10.

Статья поступила в редакцию 11 мая 2022 г.

Статья принята к печати 21 июня 2022 г.

Контактная информация:

Диоп Шейх Ятма — аспирант; cheikhyatma@gmail.com

Капаркова Марина Викторовна — kaparkova-sci@yandex.ru

Кухтин Владимир Петрович — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.; kykhtin-sci@yandex.ru

Макаров Анатолий Александрович — makarov@sintez.niiefa.spb.ru

Родин Игорь Юрьевич — канд. техн. наук, зам. ген. директора по термоядерным и магнитным технологиям; rodin@sintez.niiefa.spb.ru

Сычевский Сергей Евгеньевич — д-р физ.-мат. наук; sytch@sintez.niiefa.spb.ru

Фирсов Алексей Анатольевич — firsov-sci@yandex.ru

Numerical models for analysis and adjustment of magnetic field in medical centers. I. Simulation of geomagnetic field disturbances

C. Y. Diop^{1,2}, *M. V. Kaparkova*³, *V. P. Kukhtin*³, *A. A. Makarov*³, *I. Y. Rodin*³,
S. E. Sytchevsky^{1,3}, *A. A. Firsov*³

¹ St Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya nab., St Petersburg, 199034, Russian Federation

² Ministry of Health and Social Action, Fann Residence, ul. Aime Cesaire, Dakar, Republic Senegal

³ D. V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus, 3, Doroga na Metallostroy, St Petersburg, 196641, Russian Federation

For citation: Diop C. Y., Kaparkova M. V., Kukhtin V. P., Makarov A. A., Rodin I. Y., Sytchevsky S. E., Firsov A. A. Numerical models for analysis and adjustment of magnetic field in medical centers. I. Simulation of geomagnetic field disturbances. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*, 2022, vol. 18, iss. 3, pp. 365–378. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu10.2022.306> (In Russian)

The study investigates possible disturbances of the Earth's geomagnetic field associated with ferromagnetic structures of clinical buildings. An original methodology has been applied for 3D field mapping of hospital areas in the Senegalese Radiotherapy (RT) Centre. The RT unit will be located in a bunker with thick steel walls to ensure safety of patients and staff. Steel reinforcement will provide the shielding effect lowering the field level in the therapy room. A detailed numerical model has been created to simulate an expected field map in the RT bunker. The model reflects the actual geometry and reinforcement pattern of the building as well as adopted national standards for hypomagnetic field environment. The field maps generated with the EM codes KLONDIKE and KOMPOT form a basis for validation in comparative computations with the other codes (COMSOL Multiphysics, etc).

Keywords: Earth's geomagnetic field, steel magnetization, field simulation.

References

1. Rezinkina M. M., Erisov A. V., Pelevin D. E., Lobjanidze L. E. Experimentalnoe issledovanie vliyaniya indutsirovannoj i ostatochnoj namagnichennosti ferromagnitnyh konstruksij na oslablenie geomagnitnogo polya v zhilyh pomesheniyah [Experimental researches of influence of induced and residual

- magnetizing in ferromagnetic constructions on weakening of geomagnetic field in dwellings apartments]. *Vestnik of Khar'kov Polytechnical Institute*, 2009, iss. 41, pp. 111–120. (In Russian)
2. Rozov V. Yu., Zavalnyi A. V., Zolotov S. M., Gretsikh S. V. Metody normalizatsii staticheskogo geomagnitnogo polyav zhilyh gomah [The normalization methods of the static geomagnetic field inside houses]. *Elektrotehnika i elektromekhanika [Electrotechnics and Electromechanics]*, 2015, iss. 2, pp. 35–40. (In Russian)
 3. Amoskov V. M., Bazarov A. M., Belyakov V. A., Gapionok E. I., Kaparkova M. V., Kukhtin V. P., Lamzin E. A., Lyublin B. V., Sytchevsky S. E. Modelling of magnetic field perturbations in electrophysical devices due to the steel reinforcement of buildings. *Technical Physics*, 2017, vol. 62, no. 10, pp. 1466–1472. <https://doi.org/10.1134/S1063784217100048>
 4. Amoskov V., Bazarov A., Kaparkova M., Kukhtin V., Lamzin E., Lyublin B., Belyakov V., Sytchevsky S., Gribov Y. Modeling magnetic effects of steel rebar of concrete surroundings for electrophysical apparatus. *Proceedings RuPAC*, 2016, THPSC007, pp. 553–555. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2016-THPSC007>
 5. Amoskov V., Bazarov A., Belyakov V., Gapionok E., Gribov Y., Kaparkova M., Kukhtin V., Lamzin E., Lyublin B., Ovsyannikov D., Sytchevsky S. Calculation of magnetic field from steel rebar of building with machine producing high stray field. *Fusion Eng. Des.*, 2018, vol. 135, pp. 165–173. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.07.026>
 6. Official cite of ITER organization. Available at: www.iter.org (accessed: June 26, 2021).
 7. Amoskov V. M., Belov A. V., Belyakov V. A., Gapionok E. I., Gribov Y. V., Kukhtin V. P., Lamzin E. A., Mita Y., Ovsyannikov A. D., Ovsyannikov D. A., Patisson L., Sytchevsky S. E., Zavadskiy S. V. Magnetic model MMTC-2.2 of ITER tokamak complex. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*, 2019, vol. 15, iss. 1, pp. 5–21. <https://doi.org/10.21638/11702/spbu10.2019.101>
 8. Amoskov V., Belov A., Belyakov V., Gribov Y., Kukhtin V., Lamzin E., Maximenkova N., Sytchevsky S. Stray magnetic field produced by ITER Tokamak Complex. *Plasma Devices Oper.*, 2009, vol. 17, no. 4, pp. 230–237.
 9. Conley C. C. *A review of the biological effects of very low magnetic fields*. Report NASA TN D-5902. Washington, D. C., National Aeronautics and Space Administration Publ., 1970, no. 20546, 25 p.
 10. Wang X., Li B., Xu M., Li D., Jiang J. Long-term memory was impaired in one-trial passive avoidance task of day-old chicks hatching from hypomagnetic field space. *China Sci. Bull.*, 2003, vol. 48, no. 22, pp. 2454–2457. <https://doi.org/10.1360/03wc0231>
 11. Zhang B., Lu H., Xi W., Zhou X., Xu S., Zhang K., Jiang J., Li Y., Guo A. Exposure to hypomagnetic field space for multiple generations causes amnesia in *Drosophila melanogaster*. *Neuroscience Letters*, 2004, vol. 371, no. 2–3, pp. 190–195. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2004.08.072>
 12. Zhang X., Li J.-F., Wu Q.-J., Li B., Jiang J. Effects of hypomagnetic field in noradrenergic activities in the brainstem of golden hamster. *Bioelectromagnetics*, 2007, vol. 28, pp. 155–158. <https://doi.org/10.1002/bem.20290>
 13. Binhi V. N., Prato F. S. Biological effects of the hypomagnetic field. An analytical review of experiments and theories. *PLoS One*, 2017, vol. 12, no. 6, pp. 1–51. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179340>
 14. Johnson-Groh M., Merzdorf J. NASA's Goddard Space Flight Center, Greenbelt. Available at: <https://www.nasa.gov/feature/nasa-researchers-track-slowly-splitting-dent-in-earth-s-magnetic-field> (accessed: August 19, 2020).
 15. Ahmad M., Galland P., Ritz T., Wiltshcko R., Wiltshcko W. Magnetic intensity affects cryptochrome-dependent responses in *Arabidopsis thaliana*. *Planta*, 2007, vol. 225, pp. 615–624. <https://doi.org/10.1007/s00425-006-0383-0>
 16. Buchachenko A. L., Kuznetsov D. A. Magnetic field affects enzymatic ATP synthesis. *Journal of Amer. Chem. Soc.*, 2008, vol. 130, no. 39, pp. 12868–12869. <https://doi.org/10.1021/ja804819k>
 17. Hore P. J. Are biochemical reactions affected by weak magnetic fields? *Proceedings Natl. Acad. Sci. USA*, 2012, January 31, vol. 109, no. 5, pp. 1357–1358. <https://doi.org/10.1073/pnas.1120531109>
 18. Servick K. Humans — like other animals — may sense Earth's magnetic field. *Science*, 2019, vol. 363, iss. 6433, pp. 1257–1258. <https://doi.org/10.1126/science.363.6433.1257>
 19. Sarimov R. M., Binhi V. N., Milyaev V. A. The influence of geomagnetic field compensation on human cognitive processes. *Biophysics*, 2008, vol. 53, pp. 433–441. <https://doi.org/10.1134/S0006350908050205>
 20. Van Huizen A. V., Morton J. M., Kinsey L. J., Von Kannon D. G., Saad M. A., Birkholz T. R., Czajka J. M., Cyrus J., Barnes F. S., Beane W. S. Weak magnetic fields alter stem cell-mediated growth. *Science Advances*, 2019, vol. 5, iss. 1, Article no. 7201. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aau7201>
 21. Shimojo S., Wu D.-A., Kirschvink J. New evidence for a human magnetic sense that lets your brain detect the Earth's magnetic field. *The Conversation*. Available at: <http://theconversation.com/new>

- evidence-for-a-human-magnetic-sense-that-lets-your-brain-detect-the-earths-magnetic-field-113536 (accessed: March 18, 2019).
22. Thoss F., Bartsch B. The human visual threshold depends on direction and strength of a weak magnetic field. *Journal of Comparative Physiology A*, 2003, vol. 189, pp. 777–779. <https://doi.org/10.1007/s00359-003-0450-y>
23. Pokhodzey L. V. Hipogeomagnitnye usloviya kak faktor riska dlya zdoroviya cheloveka [Hypogeomagnetic field as health hazard]. *Trudy II Mezhduнародnoi konferentsii “Elektromagnitnie polya i zdorovie cheloveka”* [Transactions of II Intern. Conference “Electromagnetic fields and health to means”]. Moscow, 1999, pp. 135–136. (In Russian)
24. Nakhilnitskaya Z. N., Mastryukova V. M., Andrianova L. A., Borodkina A. T. Reaktsiya organizma na vozdejsvie “nulevogo” magnitnogo polya [Biological response to the “zero” magnetic field]. *Kosmicheskaya biologiya i aviakosmicheskaya meditsina* [Cosmical Biology and Aviacosmical Medicine], 1978, no. 2, pp. 74–76. (In Russian)
25. *Sanitarno-epidemiologicheskie pravila i normativy* [National hygienic and sanitary standards and codes], SanPiN 2.1.8/2.2.4.2490-09. *Elektromagnitnye polya v proizvodstvennykh usloviyakh* [Industrial environment. Electromagnetic fields]. Moscow, Rospotrebnadzor Publ., 2009, 1 p. (In Russian)
26. *Sanitarno-epidemiologicheskie pravila i normativy* [National hygienic and sanitary standards and codes], SanPiN 2.1.8/2.2.4.2489-09. *Gipogeomagnitnye polya v proizvodstvennykh, zhilykh i obshchestvennykh zdaniyakh i sooruzheniyakh* [Hypomagnetic field in industrial, dwelling and public buildings]. Moscow, Rospotrebnadzor Publ., 2009, 13 p. (In Russian)
27. Korovkin N., Diop C. Y. Minimization of electromagnetic fields intensity and optimization of electrical wiring networks in healthcare facilities. *2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW)*, 2016, pp. 604–607. <https://doi.org/10.1109/EIconRusNW.2016.7448255>
28. *World magnetic model calculator*. Available at: www.geomag.bgs.ac.uk/data_service/models_compass/igrf_calc.html (accessed: June 26, 2021).
29. Amoskov V., Belov A., Belyakov V., Gribov Y., Kukhtin V., Lamzin E., Maximenkova N., Sytchevsky S. Assessment of error field from ferromagnetic surrounding of ITER tokamak: ferromagnetic rebar of Tokamak Complex building. *Plasma Devices Oper.*, 2008, vol. 16, no. 4, pp. 225–233. <https://doi.org/10.1080/10519990802433875>
30. Amoskov V., Belov A., Belyakov V., Gribov Y., Kukhtin V., Lamzin E., Maximenkova N., Sytchevsky S. Stray magnetic field produced by ITER tokamak complex. *Plasma Devices Oper.*, 2009, vol. 17, pp. 230–237. <https://doi.org/10.1080/10519990903043599>
31. Amoskov V., Belov A., Belyakov V., Gribov Y., Kavin A., Kukhtin V., Lamzin E., Lobanov K., Maximenkova N., Mineev A., Sytchevsky S. Stray magnetic field at plasma initiation produced by ferromagnetic elements of the ITER Tokamak Complex. *Plasma Devices Oper.*, 2009, vol. 17, no. 4, pp. 238–249. <https://doi.org/10.1080/10519990903043623>
32. Karaush S. A., Kuznetsov A. V. Vliyanie metallicheskih fasadnykh sistem na geomagnitnoe pole vnutri pometshenij [Effect of metal facade systems on geomagnetic field of indoors]. *Vestnik of Tomsk State Architectural and Building University*, 2013, vol. 38, no. 1, pp. 83–87. (In Russian)
33. Amoskov V., Belov A., Belyakov V., Gribov Y., Kukhtin V., Lamzin E., Maximenkova N., Sytchevsky S. Assessment of error field from solitary ferromagnetic elements located outside of ITER tokamak. *Plasma Devices Oper.*, 2008, vol. 16, pp. 171–179. <https://doi.org/10.1080/10519990802249289>
34. Amoskov V., Gribov Y., Lamzin E., Sytchevsky S. Assessment of $n = 1$ “overlap” error field produced by localized steel objects placed at different levels of ITER Tokamak building. *Fusion Eng. Des.*, 2019, vol. 148, Article no. 111271. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.111271>
35. Amoskov V. M., Belov A. V., Belyakov V. A., Belyakova T. F., Gribov Yu. A., Kukhtin V. P., Lamzin E. A., Sytchevsky S. E. Computation technology based on KOMPOT and KLONDIKE codes for magnetostatic simulations in tokamaks. *Plasma Devices Oper.*, 2008, vol. 16, pp. 89–103. <https://doi.org/10.1080/10519990802018023>
36. Belyakov V. A., Sytchevsky S. E. Osobennosti tekhnologii chislennogo modelirovaniya elektromagnitnykh polej termoyadernykh reaktorov na osnove tokamakov [Aspects of EM field simulations for designing, analyzing and optimizing the tokamak-type fusion reactors]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Energetika* [Proceedings of Russian Academy of Sciences. Energetics], 2014, no. 1, pp. 141–149. (In Russian)
37. Rozov V. Y., Levina S. V. Modelirovanie staticheskogo geomagnitnogo polya vnutri pometshenij sovremennykh zhilykh domov [Modeling of the static geomagnetic field indoor dwelling houses]. *Tekhnichna Elektrodinamika*, 2014, no. 4, pp. 8–10. (In Russian)

Received: May 11, 2022.

Accepted: June 21, 2022.

Authors' information:

Cheikh Yatma Diop — Postgraduate Student; cheikhyatma@gmail.com

Marina V. Kaparkova — kaparkova-sci@yandex.ru

Vladimir P. Kukhtin — PhD in Physics and Mathematics, Senior Scientist; kukhtin-sci@yandex.ru

Anatoly A. Makarov — makapov@sintez.niiefa.spb.ru

Igor Yu. Rodin — PhD in Engineering Sciences, Deputy Director General; rodin@sintez.niiefa.spb.su

Sergey E. Sytchevsky — Dr. Sci. in Physics and Mathematics; sytch@sintez.niiefa.spb.su

Alexey A. Firsov — firsov-sci@yandex.ru