НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
сентябрь–октябрь 2026 Том 26 № 5 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
September–October 2026 Vol. 26 No 5 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-5-954-962
УДК 004.95

Программно-аппаратный комплекс краудсорсингового мониторинга и картографирования геомагнитного поля

Гульнара Равилевна Воробьева[1]✉, Андрей Владимирович Воробьев[2]

[1,2] Уфимский университет науки и технологий, Уфа, 450000, Российская Федерация
[2] Геофизический центр РАН, Москва, 119296, Российская Федерация

[1] Gulnara.vorobeva@gmail.com✉, https://orcid.org/0000-0001-7878-9724
[2] geomagnet@list.ru, https://orcid.org/0000-0002-9680-5609

Аннотация

Введение. Рассмотрена проблема организации высокодетальной геомагнитной съемки в городской среде на основе краудсорсингового подхода с использованием мобильных устройств. Существующие решения, такие как CrowdMag, ориентированы преимущественно на глобальный сбор данных и не обеспечивают возможностей оперативного картографирования локальных техногенных аномалий. Остается открытым вопрос о достоверности выявления аномалий по данным массовых измерений, выполненных различными непрофессиональными устройствами в реальных условиях. **Метод.** Для решения поставленных задач разработан программно-аппаратный комплекс Ground Monitoring, архитектура которого построена по трехуровневой модели и включает клиентское мобильное приложение для Android, серверную часть на базе PostgreSQL/PostGIS и веб-ГИС с модулями визуализации и интерполяции. Приложение обеспечивает регистрацию всех трех компонент вектора магнитной индукции с частотой до 5 Гц, разрешением 0,25 мкТл и погрешностью не более ±5 %. Экспериментальная апробация проведена в августе прошедшего года на территории Уфы с участием нескольких сотен студентов-добровольцев. **Основные результаты.** Собрано более 50 000 пространственно-привязанных измерений, достигнута плотность покрытия до 1500 точек/км^2. Установлено, что несмотря на разброс единичных измерений, среднее по массиву отличается от эталонного обсерваторского измерения менее, чем на 0,15 %. При этом выявлено, что 87 % аномалий локализованы вблизи техногенных объектов. Статистический анализ также подтвердил высокую достоверность обнаружения аномалий, а результаты применения пространственной интерполяции подтвердили устойчивость на зашумленных данных. **Обсуждение.** Полученные результаты подтвердили возможность применения краудсорсингового подхода для решения задач геофизического картирования с высокой пространственной детализацией и измерениями, согласующимися с эталонными обсерваторскими измерениями. Разработанный комплекс может служить экспериментальной основой для систем мониторинга городской среды. Перспективы работы связаны с интеграцией подхода в проекты гражданской науки.

Ключевые слова

геомагнитное поле, магнитная съемка, краудсорсинг, мобильное приложение, веб-ГИС, картографирование, мониторинг, программно-аппаратный комплекс, визуализация данных

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-77-30010-П).

Ссылка для цитирования: Воробьева Г.Р., Воробьев А.В. Программно-аппаратный комплекс краудсорсингового мониторинга и картографирования геомагнитного поля // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2026. Т. 26, № 5. С. 954–962. doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-5-954-962

© Воробьева Г.Р., Воробьев А.В., 2026

Hardware-Software system for crowdsourced monitoring and mapping of the geomagnetic field

Gulnara R. Vorobeva[1]✉, Andrei V. Vorobev[2]

[1,2] Ufa University of Science and Technology, Ufa, 450008, Russian Federation
[2] Geophysical Center of the RAS, Moscow, 119296, Russian Federation

[1] Gulnara.vorobeva@gmail.com✉, https://orcid.org/0000-0001-7878-9724
[2] geomagnet@list.ru, https://orcid.org/0000-0002-9680-5609

Abstract
This paper addresses the problem of conducting high-resolution geomagnetic surveys in urban environments using a crowdsourced approach based on mobile devices. Existing solutions, such as CrowdMag, are primarily focused on global data collection and do not provide capabilities for operational mapping of local technogenic anomalies. The question of the reliability of anomaly detection based on mass measurements performed by various non-professional devices under real-world conditions remains open. To solve these problems, a hardware-software system called Ground Monitoring has been developed. Its architecture is built on a three-tier model and includes a client mobile application for Android, a server part based on PostgreSQL/PostGIS, and a web-GIS with visualization and interpolation modules. The application records all three components of the magnetic induction vector at a frequency of up to 5 Hz, with a resolution of 0.25 μT and an error not exceeding ±5 %. Experimental validation was conducted in last August in the territory of Ufa with the participation of several hundred student volunteers. Over 50,000 spatially referenced measurements were collected, achieving a coverage density of up to 1500 points/km^2. It was found that, despite the scatter of individual measurements, the average for the dataset differs from the reference observatory measurement by less than 0.15 %. Furthermore, it was revealed that 87 % of anomalies are localized near man-made objects. Statistical analysis also confirmed the high reliability of anomaly detection, and the results of spatial interpolation confirmed its robustness to noisy data. The obtained results confirmed the feasibility of using a crowdsourcing approach to solve geophysical mapping problems with high spatial detail and measurements consistent with reference observatory measurements. The developed system can serve as an experimental foundation for urban environment monitoring systems. Future work prospects involve integrating this approach into citizen science projects.

Keywords
geomagnetic field, crowdsourcing, mobile application, web-GIS, spatial interpolation, IDW, kriging, ROC analysis, technogenic anomalies, citizen science

Acknowledgements
This work was funded by the Russian Science Foundation (project No. 21-77-30010-P).

For citation: Vorobeva G.R., Vorobev A.V. Hardware-Software system for crowdsourced monitoring and mapping of the geomagnetic field. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2026, vol. 26, no. 5, pp. 954–962 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-5-954-962

Введение

Современное развитие информационных технологий и повсеместное распространение мобильных устройств открывают новые возможности для организации систем мониторинга окружающей среды на принципах краудсорсинга и гражданской науки [1]. Геомагнитное поле Земли является важнейшим параметром окружающей среды, характеризующим как глобальные процессы космической погоды, так и локальные техногенные воздействия [2]. Регистрация пространственного распределения геомагнитного поля с высоким разрешением актуальна для решения широкого круга задач: от картирования подземных инженерных коммуникаций и выявления зон техногенного влияния до верификации глобальных магнитных моделей [3]. В качестве дополнительных перспективных направлений рассматривается мониторинг геомагнитной активности при условии повышения чувствительности встроенных датчиков.

Традиционные методы магнитной съемки предполагают использование специализированного оборудования (протонных, квантовых, феррозондовых магнитометров), стоимость которых ограничивает возможность проведения массовых синхронных измерений и построения детальных карт магнитного поля на значительных территориях [4]. Альтернативным подходом является использование встроенных магнитометров современных смартфонов, которые, несмотря на более низкие метрологические характеристики, позволяют реализовать краудсорсинговый сбор данных с участием добровольцев [5].

Наиболее известным проектом в этом направлении является разработка Национального управления океанических и атмосферных исследований США (Национальное управление океанических и атмосферных исследований — National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) — приложение CrowdMag, позволяющее измерять компоненты геомагнитного поля с помощью смартфона и передавать анонимизированные данные для совершенствования глобальных магнитных моделей [6, 7]. Приложение измеряет вертикальную (Z), горизонтальную (H) компоненты и полный вектор (F) с возможностью настройки частоты записи и экспорта данных. CrowdMag активно используется не только в научных целях, но и в прикладных задачах, где показана принципиальная возможность выделения геологических аномалий по данным мобильных измерений [8].

Параллельно развиваются проекты создания специализированных низкобюджетных магнитометров для краудсорсинговых сетей, такие как HamSCI Personal Space Weather Station, обеспечивающая разрешение

около 3 нТл при частоте опроса 1 Гц [9]. Данные таких сетей сопоставимы с показаниями существующих магнитометров и признаны пригодными для научных исследований, что демонстрирует потенциал развития распределенных систем мониторинга с уникальным пространственным разрешением.

Проведенный анализ известных исследований в данной области (в частности, [10]), позволил сделать вывод об особых возможностях использования гражданской науки в задачах мониторинга окружающей среды. При этом участие добровольцев не ограничено только сбором данных, а может быть расширено как на отдельные коллаборативные проекты, так и на полностью совместные исследования.

Несмотря на успешное развитие краудсорсинговых проектов в области геомагнитного мониторинга, известные решения все еще ориентированы только на глобальный сбор данных и не обеспечивают возможности картографирования с высоким пространственным разрешением в масштабах городской среды. Открытым также остается вопрос достоверности выявления аномалий по данным массовых измерений, выполненных с помощью различных мобильных устройств.

Целью настоящей работы является разработка программно-аппаратного комплекса для краудсорсингового мониторинга и картографирования геомагнитного поля на платформе Android, обеспечивающего регистрацию всех компонент поля с разрешением до 0,25 мкТл и частотой до 5 Гц в диапазоне ±5000 мкТл. Основное внимание уделяется выявлению локальных аномалий, связанных с подземными инженерными коммуникациями и другими скрытыми техногенными объектами.

Архитектура программно-аппаратного комплекса

Разработанный программно-аппаратный комплекс представляет собой законченное решение для краудсорсингового сбора, хранения и картографической визуализации данных геомагнитного поля. Архитектура комплекса построена по трехуровневой модели [11] и включает клиентское мобильное приложение, серверное приложение с базой данных и веб-геоинформационную систему (веб-ГИС) (рис. 1).

С формальной точки зрения, комплекс реализует преобразование потока первичных измерений в интерполированное поле. Пусть в момент времени t в точке с координатами (φ, λ) произведено измерение вектора магнитной индукции $\mathbf{B} = (Bx, By, Bz)$. Тогда результат i-го измерения можно представить как кортеж:

$$M_i = (t_i, \varphi_i, \lambda_i, Bx_i, By_i, Bz_i, |B|_i, d_i),$$

где $|\mathbf{B}|_i = \sqrt{Bx_i^2 + By_i^2 + Bz_i^2}$ — модуль полного вектора; d_i — метаданные (тип устройства, статус калибровки).

Задача комплекса — по множеству $\{M_i\}$ восстановить непрерывное поле $F(\varphi, \lambda)$ в заданной области Ω и визуализировать его пространственное распределение.

Мобильное приложение Ground Monitoring разработано для устройств под управлением операционной системы Android [12] (рис. 2). Выбор платформы обусловлен ее распространенностью и открытостью для разработки нативных приложений с прямым доступом к аппаратным датчикам. Приложение реализовано на языке Java с использованием Android SDK [13]. Ключевой функциональностью является взаимодействие с встроенным магнитометром устройства через стандартный API SensorManager [14, 15], что обеспечивает совместимость с подавляющим большинством моделей смартфонов, оснащенных магнитометрами на основе эффекта Холла или магниторезистивными датчиками.

Приложение реализует процедуру калибровки, инициируемую пользователем перед началом измерений. В ходе калибровки производится сбор данных при вращении устройства по трем осям, что позволяет компенсировать систематические искажения, вносимые ферромагнитными материалами корпуса и электроникой. После успешной калибровки приложение обеспечивает регистрацию всех трех компонент вектора магнитной индукции (Bx, By, Bz) с частотой опроса датчика до 5 Гц. Диапазон регистрируемых значений составляет ±5000 мкТл при разрешающей способности 0,25 мкТл. Относительная погрешность каждого измерения не превышает ±5 %, что соответствует техническим характеристикам датчиков, используемых в мобильных устройствах, и является приемлемым для задач обна-

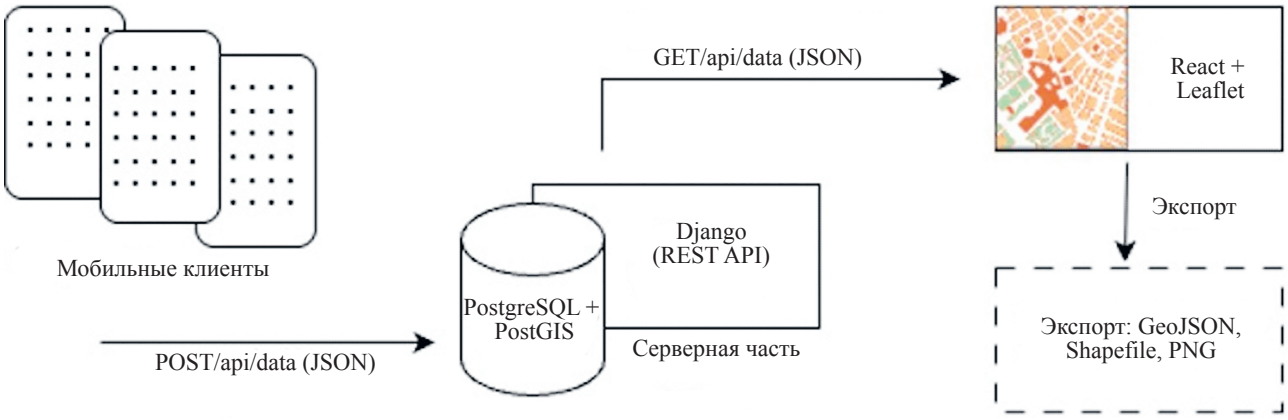

Рис. 1. Архитектура программно-аппаратного комплекса краудсорсингового мониторинга геомагнитного поля Ground Monitoring

Fig. 1. Architecture of the hardware and software system for crowdsourcing geomagnetic field monitoring “Ground Monitoring”

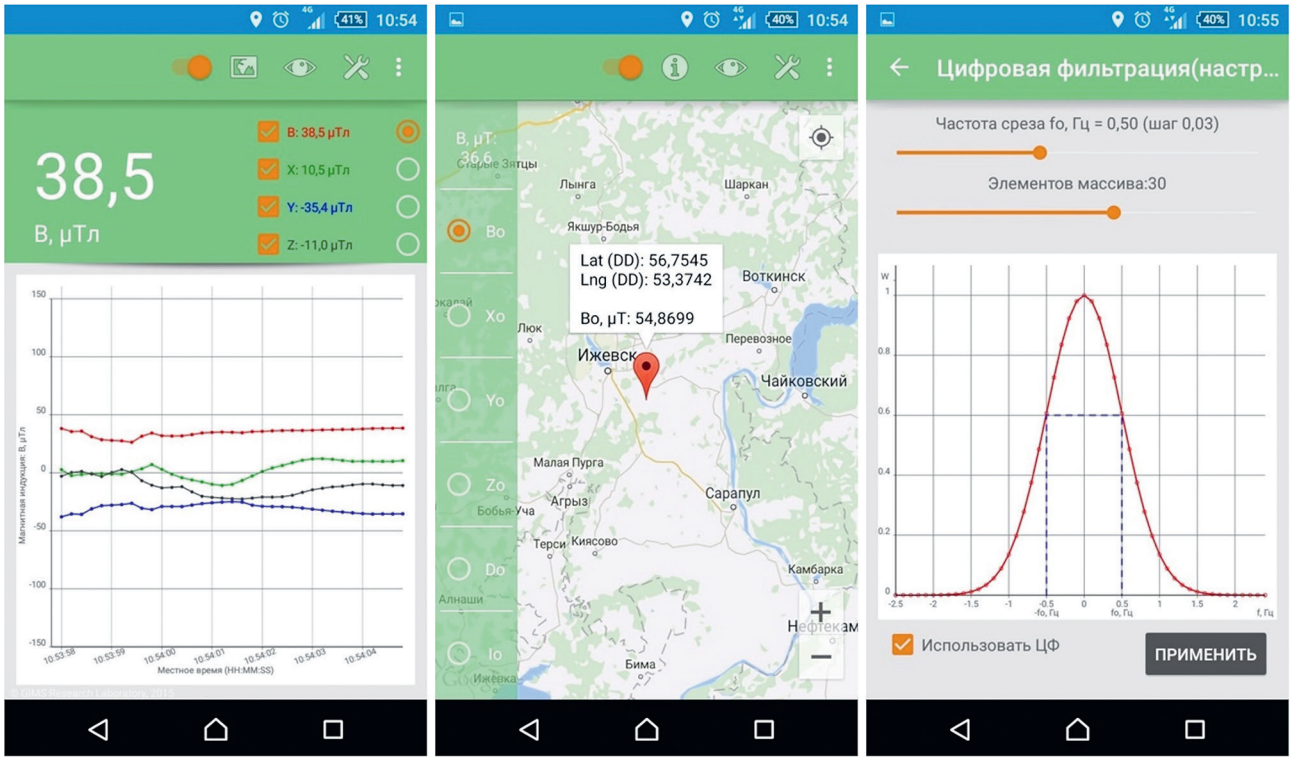

Рис. 2. Экранные формы мобильного приложения

Fig. 2. Screenshots of the mobile application

ружения локальных аномалий амплитудой от 1 мкТл и выше. Калибровка производится однократно перед началом измерений путем вращения устройства по трем осям, что позволяет компенсировать систематические искажения, вносимые ферромагнитными материалами корпуса и электроникой телефона.

Отметим, что несмотря на регистрацию всех компонент вектора магнитной индукции в настоящей работе для построения карт используется модуль полного вектора как инвариант относительно ориентации смартфона в пространстве. Выделение отдельных компонент предполагает вычисление точной матрицы поворота устройства относительно географической системы координат с использованием данных акселерометра и магнитометра. В условиях городской застройки это сопряжено с дополнительными погрешностями из-за искажения показаний компаса ферромагнитными материалами. Компоненты вектора могут быть уточнены и использованы в дальнейших исследованиях, но на данном этапе картографирование выполняется по скалярной величине $|B|$ как наиболее робастной к ошибкам определения ориентации.

Параллельно с магнитными измерениями осуществляется сбор данных с GPS/ГЛОНАСС модуля для определения географических координат точки замера и фиксация временной метки. Каждое измерение сохраняется в структурированном виде в локальной базе данных SQLite [16], что обеспечивает возможность временного хранения информации при отсутствии сетевого подключения. При появлении соединения с интернетом данные автоматически передаются на сервер через REST API [17].

Серверная часть комплекса реализована на языке Python с использованием фреймворка Django REST Framework [18], что обеспечивает масштабируемость и безопасность обработки входящих запросов. Для хранения данных выбрана объектно-реляционная система управления базами данных PostgreSQL с пространственным расширением PostGIS [19], непосредственно предназначенным для работы с пространственными данными. В PostGIS обеспечивается поддержка специализированных типов данных, пространственных индексов, а также функций для выполнения геопространственных запросов. В базе данных проекта центральным элементом является таблица «measurements», в которой содержатся поля для хранения временной метки, географических координат, компонент поля и вычисляемого полного вектора. Дополнительно предусмотрены поля для хранения метаданных — параметров мобильного устройства, версии приложения и статуса калибровки датчика.

Прикладной программный интерфейс серверной составляющей предусматривает точки входа для приема данных от мобильных устройств по POST-методу, получения списка пространственно-временных измерений по GET-методу, а также для управления пользователями и проектами. Непосредственно аутентификация пользователей реализована с помощью применения токенов, что позволяет идентифицировать источники данных и предотвратить несанкционированную запись.

Веб-геоинформационная система представляет собой клиентское веб-приложение, разработанное с использованием современных веб-технологий. Интерфейс построен на фреймворке React.js, что обеспечивает

высокую интерактивность и отзывчивость. Для отображения картографической основы применена библиотека Leaflet.js с подложками от OpenStreetMap и других открытых картографических сервисов. Визуализация точек измерений реализована в виде интерактивных маркеров, цвет которых кодирует величину полного вектора геомагнитного поля (от синего для минимальных значений до красного для максимальных). При нажатии на маркер отображается всплывающее окно с полной информацией о замере: координаты, время, значения всех компонент поля и модуль полного вектора.

Ключевой функцией веб-ГИС является модуль построения карт с изолиниями, реализованный на языке JavaScript с использованием библиотеки D3.js для математических вычислений и визуализации. Задача интерполяции формулируется следующим образом: по известным значениям поля $F_i = |B|_i$ в точках (φ_i, λ_i) требуется оценить значение $F(\varphi, \lambda)$ в произвольной точке области Ω. Для решения этой задачи в системе применены два классических метода пространственной интерполяции — обратно взвешенных расстояний (Inverse Distance Weighting, IDW) [20] и кригинг [21].

Выбор методов IDW и кригинга для интерполяции данных краудсорсинговой съемки требует обоснования, поскольку исходные измерения характеризуются повышенным уровнем инструментального шума (до ±5 %), неоднородностью пространственного распределения и возможными систематическими ошибками, связанными с различием калибровок устройств. В связи с этим в настоящей работе выполнена оценка, насколько классические методы пространственной интерполяции, разработанные для точных инструментальных данных, сохраняют работоспособность в условиях «зашумленного» краудсорсингового эксперимента. Критериями оценки выступают: устойчивость выделения локальных аномалий, сходимость с эталонными измерениями Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН) (Москва) и визуальное качество реконструкции поля.

Результат интерполяции отображается в виде изолиний (линий равного уровня поля) или цветных растровых поверхностей, накладываемых на картографическую подложку. Система поддерживает экспорт полученных карт в растровые форматы (PNG, JPEG) для использования в публикациях, а также экспорт исходных точек и интерполированных поверхностей в геопространственные форматы GeoJSON и Shapefile для дальнейшего анализа в профессиональных ГИС-приложениях (QGIS, ArcGIS).

Результаты экспериментальной апробации

Экспериментальная апробация предложенного решения была проведена в августе прошедшего года на территории Уфы и в агломерациях. В эксперименте приняли участие несколько сотен добровольцев, что обеспечило высокую плотность пространственного покрытия измерений (около 1500 точек/км^2 в городской черте). Единое время старта эксперимента (10:00 UTC+5) для всех участников обеспечило синхронность измерений и позволило минимизировать влияние временных вариаций геомагнитного поля.

Геомагнитная обстановка в период эксперимента характеризовалась слабой активностью (значение Kp-индекса (Planetary K-index) составило 3), а эталонное значение модуля полного вектора — $B_0 = 54\,900 \pm \pm 40$ нТл. Последнее было получено на основе данных обсерватории ИЗМИРАН, скорректированных на разницу координат с учетом модели International Geomagnetic Reference Field (IGRF-13). Использование только модели IGRF без обсерваторских наблюдений было расценено как нецелесообразное, поскольку глобальные модели сглаживаю локальные вариации и не учитывают важные техногенные искажения.

В полученном массиве пространственных данных было представлено более 50 000 отдельных измерений, статистический анализ которых показал, что зарегистрированные различными устройствами значения модуля полного вектора поля находятся в диапазоне от 52 100 до 58 400 нТл. При этом разброс этих значений относительно эталонного значения B_0 находится в диапазоне от –2800 до +3500 нТл, что соответствует относительному отклонению в пределах ±6,4 %. Среднеквадратическое отклонение единичных измерений составило 1180 нТл, что значительно превышает инструментальную погрешность обсерваторского оборудования, но является приемлемым для задач обнаружения локальных аномалий с амплитудой выше 2000 нТл. Отметим, что несмотря на значительный разброс отдельных измерений, среднее значение по всему массиву составило около 54 820 нТл, что отличается от эталонного значения менее, чем на 0,15 %. Это показывает, что при статистическом усреднении большого массива данных возможна взаимная компенсация систематических ошибок отдельных устройств, что в совокупности позволяет получить оценку, близкую к истинному значению (эффект «мудрость толпы»).

На рис. 3, *а* представлена интерполированная карта пространственного распределения аномалий геомагнитного поля на территории Уфы. Визуальный анализ карты позволяет обнаружить, что аномалии не распределены по территории случайным образом, а образуют четкие пространственные кластеры, приуроченные к техногенным объектам. При наложении на карту объектов инфраструктуры выясняется, что 87 % аномальных точек локализованы в радиусе 50 м от линий электропередач (ЛЭП), вышек сотовой связи, трансформаторных подстанций и промышленных объектов, что убедительно свидетельствует о техногенной природе выявляемых аномалий.

Центральным исследовательским вопросом работы являлась проверка гипотезы о том, что классические методы пространственной интерполяции, разработанные для точных инструментальных данных, сохраняют работоспособность в условиях «зашумленного» краудсорсингового эксперимента. Для проверки этой гипотезы был проведен детальный анализ данных площадной съемки на ограниченной территории — площади перед главным корпусом Уфимского университета науки и технологий, где добровольцы были расставлены с равными интервалами, образуя регулярную сеть точек

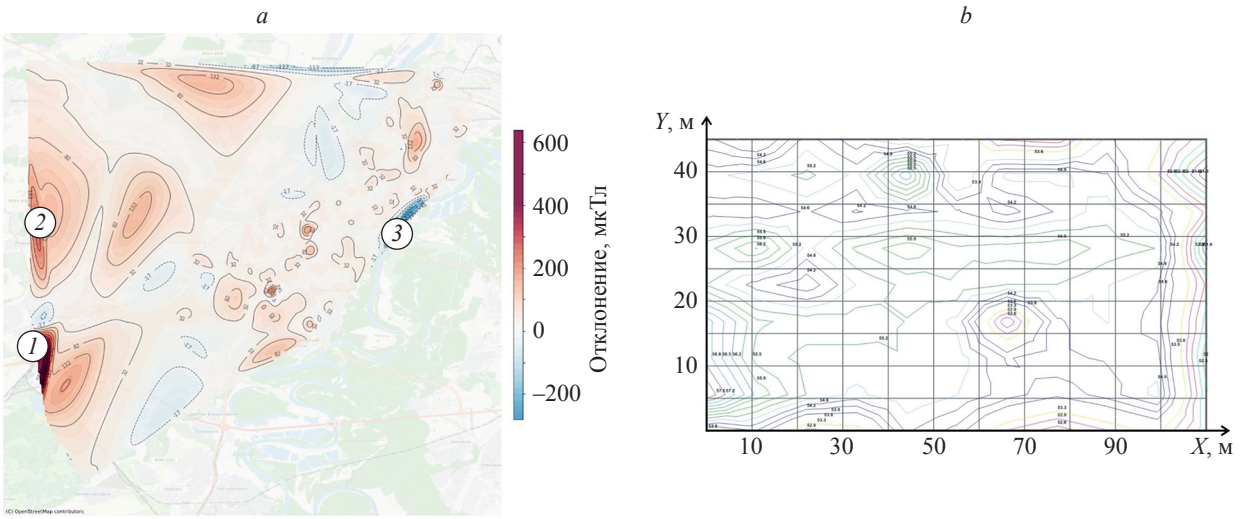

Рис. 3. Результаты краудсорсинговой геомагнитной съемки на территории Уфы: интерполированная карта пространственного распределения аномалий геомагнитного поля (*a*); результат интерполяции данных на площади перед главным корпусом Уфимского университета науки и технологий методом кригинга с перепадом поля 5000 нТл на 50 м (*b*).

Цветовая шкала отражает усредненные отклонения: отрицательные (синий цвет) и положительные (красный цвет) аномалии от фонового уровня B_0 = 54 900 нТл. Зоны на карте: *1* — железнодорожная станция; *2* — промышленная зона (производство строительных материалов); *3* — деревообрабатывающее предприятие

Fig. 3. Results of a crowdsourced geomagnetic survey in Ufa: interpolated map of the spatial distribution of geomagnetic field anomalies (*a*); result of data interpolation in the area in front of the main building of Ufa University of Science and Technology using the kriging method with a field difference of 5000 nT per 50 m (*b*).

The colour scale shows averaged deviations: negative (blue) and positive (red) anomalies from the background level B_0 = 54,900 nT. Areas on the map: *1* is railway station; *2* is industrial area (production of building materials); *3* is timber-processing plant

наблюдения с шагом примерно 5 м, после чего произвели синхронные измерения. На рис. 3, *b* представлен результат интерполяции методом кригинга. Перепад поля составляет около 5000 нТл, что более чем в четыре раза превышает среднеквадратическое отклонение единичных измерений и, следовательно, не может быть объяснен случайными флуктуациями. Наиболее вероятной причиной наблюдаемой неоднородности является наличие подземных инженерных коммуникаций и особенности конструкции самого здания университета, содержащего значительные массы ферромагнитных материалов.

Отметим, что идентичная пространственная структура поля была получена при интерполяции методом IDW. Оба метода воспроизводят одну и ту же ориентацию градиента поля с юго-запада на северо-восток и близкое положение экстремумов — расхождение в координатах максимума и минимума не превысило 5 м. Устойчивое воспроизведение структуры поля двумя различными методами интерполяции свидетельствует о том, что наблюдаемая неоднородность не является артефактом выбранного метода обработки. Вместе с тем окончательное подтверждение физической природы выявленных аномалий требует сопоставления с независимыми данными (например, планами подземных коммуникаций или результатами инструментальных измерений эталонным оборудованием), что определяет направление дальнейших исследований.

Отметим, что в ходе проведения эксперимента были выявлены несколько выраженных локальных аномалий, идентифицированных как техногенные. Установлено, что при удалении от высоковольтной ЛЭП на расстояние около 50 м значения поля составляли 54 800–55 200 нТл, что в целом близко к региональному фону. В непосредственной близости от опоры ЛЭП (менее 10 м) был зафиксирован скачок значения поля до 67 800 нТл, что значительно превышает фоновый уровень.

Протяженность выявленных аномалий составила 25 м, что согласуется с теоретическими оценками для воздушных ЛЭП класса 110–220 кВ. Похожие, менее выраженные аномалии были выявлены около вышек сотовой связи и трансформаторных подстанций.

Пространственная протяженность зарегистрированных аномалий составила 30–40 м, что обусловлено ограниченной чувствительностью встроенных магнитометров смартфонов. Достигнутая плотность покрытия (1500 точек/км^2, шаг около 25 м) соответствует масштабу детальных геофизических работ 1:2500–1:5000 и является критически важной для выделения локальных аномалий на зашумленных данных.

Обсуждение результатов

Полученные в ходе экспериментальной апробации результаты позволяют не только оценить эффективность разработанного комплекса, но и осмыслить его место в контексте мировых исследований в области краудсорсингового геомагнитного мониторинга. Прежде всего, следует подчеркнуть, что гипотеза о работоспособности классических методов пространственной интерполяции на зашумленных данных массовых

измерений получила экспериментальное подтверждение. Устойчивое воспроизведение одной и той же структуры поля двумя независимыми методами (IDW и кригинг) свидетельствует о том, что выявленная пространственная неоднородность не является артефактом выбранного метода обработки. Однако окончательное подтверждение ее физической природы требует сопоставления с независимыми данными, что составляет перспективу дальнейших исследований.

Для количественной оценки достоверности выделения техногенных аномалий был проведен Receiver Operating Characteristic (ROC) анализ. В качестве положительного класса рассматривались точки в радиусе 50 м от заведомо известных источников (ЛЭП, вышки сотовой связи), всего 247 точек. Отрицательный класс составили 712 точек, отобранных методом стратифицированной случайной выборки на удалении более 200 м от известных источников. Площадь под ROC-кривой (Area Under the Curve, AUC) достигла значения 0,93 (95 % доверительный интервал (ДИ): 0,91–0,95), что характеризует «отличное» качество классификации. Оптимальный порог отклонения, максимизирующий индекс Юдена, составил 2300 нТл — при этом чувствительность метода равна 0,91 (95 % ДИ: 0,87–094), а специфичность — 0,94 (95 % ДИ: 0,91–0,96). В результате разработанный комплекс позволяет обнаруживать техногенные магнитные аномалии амплитудой от 2,3 мкТл с вероятностью правильного обнаружения 91 % при уровне ложных тревог 6 %.

На рис. 4, *b* приведен характерный профиль геомагнитного поля при пересечении высоковольтной ЛЭП класса 110 кВ с фоновым уровнем 54 900 нТл и максимальным значением 67 800 нТл вблизи опоры. Форма аномалии близка к гауссовой с шириной на полувысоте около 25 м и амплитудой 12 900 нТл (23 % от фонового уровня). Эти значения хорошо согласуются с теоретическими оценками для воздушных ЛЭП данного класса и с данными натурных измерений, полученными традиционными методами. Аналогичные, хотя и менее контрастные, аномалии были зафиксированы вблизи вышек сотовой связи (превышение фона на 9–14 %) и трансформаторных подстанций (до 18 %). Во всех случаях пространственная протяженность аномалий не превышала 30–40 м, что объясняет, почему они остаются незамеченными при традиционных разреженных сетях наблюдений, но уверенно выявляются при краудсорсинговой съемке с высокой плотностью покрытия.

Сопоставление полученных результатов с мировыми аналогами показывает как сходства, так и принципиальные различия. Наиболее близким по инструментальной реализации является проект CrowdMag NOAA, также использующий встроенные магнитометры смартфонов для сбора геомагнитных данных. Однако CrowdMag ориентирован преимущественно на глобальный сбор данных для совершенствования мировой магнитной модели и не включает специализированных средств для картирования локальных аномалий с высоким разрешением.

В области гражданской науки для изучения полярных сияний наиболее известным проектом является Aurorasaurus, собирающий сообщения от верифицированных наблюдателей через мобильное приложение и веб-интерфейс. Однако, в отличие от представленной работы, Aurorasaurus требует активного участия обученных наблюдателей, что ограничивает объем собираемых данных. Использование же спонтанных публикаций в социальных сетях, как показано в недавних исследованиях, открывает возможность привлечения на порядки более широкой аудитории без необходимости специального обучения.

Отметим ограничения предложенного метода. Во-первых, точность единичных измерений (±5 %) остается существенно ниже, чем у профессиональных феррозондовых или протонных магнитометров. Однако, как показано в настоящей работе, это ограничение компен-

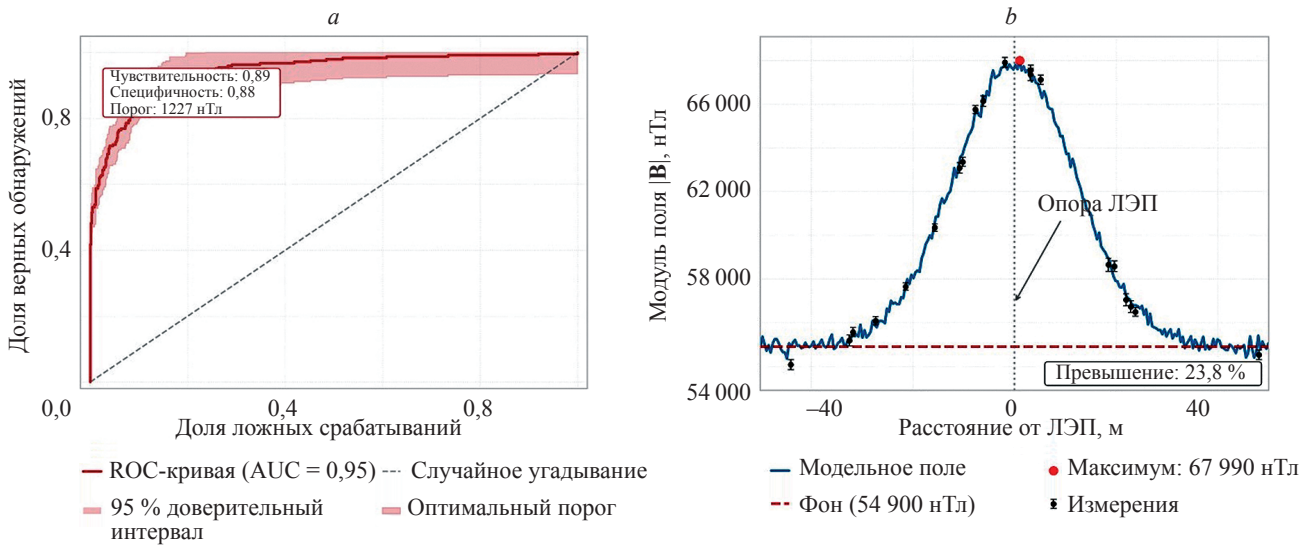

Рис. 4. Количественная оценка достоверности (*a*); профиль геомагнитного поля при пересечении высоковольтной линии электропередачи (*b*)

Fig. 4. Quantitative assessment of reliability (*a*); geomagnetic field profile at the crossing of a high-voltage power line (*b*)

сируется массовостью измерений — статистическое усреднение позволяет снизить погрешность оценки фонового поля до 0,15 %. Во-вторых, качество данных зависит от правильности калибровки устройств пользователями, что вносит элемент неопределенности. Реализованная в приложении процедура калибровки минимизирует этот риск, но не устраняет его полностью. В-третьих, пространственное покрытие остается неравномерным и определяется плотностью населения и активностью добровольцев — центральные районы городов оказываются изучены детальнее, чем окраины и пригороды. Достигнутая плотность измерений (до 1500 точек/км^2, шаг около 25 м) сопоставима с масштабом детальных геофизических работ 1:2500. Однако, в отличие от профессиональных съемок, распределение точек неравномерно, а точность единичных измерений ограничена, что требует пространственного усреднения для выделения аномалий. Тем не менее, полученная плотность достаточна для картирования локальных техногенных аномалий в городской среде.

Заключение

Представлен программно-аппаратный комплекс краудсорсингового мониторинга и картографирования геомагнитного поля, включающий мобильное приложение для платформы Android, серверную часть на базе PostgreSQL/PostGIS и веб-геоинформационную систему с модулями визуализации и интерполяции данных. Разработанное приложение обеспечивает регистрацию трех компонент вектора магнитной индукции с частотой до 5 Гц, разрешением 0,25 мкТл и относительной погрешностью не более ±5 % в диапазоне ±5000 мкТл, что соответствует техническим характеристикам магнитометров, устанавливаемых в современных мобильных устройствах. Пространственная привязка выявленных аномалий к промышленным объектам (железнодорожная станция, предприятия строительной и деревообрабатывающей промышленности) подтверждает их техногенную природу и демонстрирует практическую ценность разработанного подхода для мониторинга городской среды. Экспериментальная апробация комплекса проведена в августе прошедшего года на территориях Уфы и Кумертау с участием нескольких сотен студентов-добровольцев. В ходе пешей маршрутной съемки собрано более 50 000 пространственно-привязанных измерений, что обеспечило плотность покрытия, значительно превышающую традиционные методы (до 1500 точек/км²). Статистический анализ массива данных показал, что несмотря на значительный разброс единичных измерений (среднеквадратическое отклонение 1180 нТл), среднее значение по всей выборке (54 820 нТл) отличается от эталонного значения ИЗМИРАН (54 900 ± 40 нТл) всего на 80 нТл, что составляет менее 0,15 %. Этот результат демонстрирует проявление эффекта коллективного измерения, известного как «мудрость толпы»: массовость данных компенсирует инструментальные погрешности отдельных устройств. Пространственный анализ выявил, что 87 % аномальных отклонений локализованы в радиусе 50 м от техногенных объектов — линий электропередач, вышек сотовой связи и трансформаторных подстанций, что подтверждает их техногенную природу. Применение методов пространственной интерполяции (IDW и кригинг) позволило восстановить непрерывное поле и выявить устойчивые пространственные неоднородности, неразличимые на уровне сырых данных. В частности, на участке площадной съемки в Уфе зафиксирован градиент поля с перепадом 5000 нТл на 50 м, предположительно связанный с подземными инженерными коммуникациями. Количественная оценка достоверности обнаружения аномалий с помощью ROC-анализа показала высокое качество классификации (AUC = 0,93; 95 % ДИ: 0,91–0,95). Оптимальный порог обнаружения, обеспечивающий баланс чувствительности и специфичности, составил 2300 нТл; при этом чувствительность метода равна 0,91 (95 % ДИ: 0,87–0,94), специфичность — 0,94 (95 % ДИ: 0,91–0,96). Дальнейшее развитие работы видится в адаптации разработанной методологии для проектов гражданской науки, включая сбор данных в периоды повышенной геомагнитной активности (при условии повышения чувствительности датчиков), а также в оценке потенциала предложенного подхода для задач детальной магнитной съемки на ограниченных площадях (в том числе в археологической геофизике). Для применения метода в указанных областях требуются дополнительные исследования с привлечением эталонного оборудования и разработка методов повышения точности измерений.

Литература

1. Fraisl D., See L., MacFeely S., Moorthy I., Ulrich G.-S., Seidu O., et al. Why citizen science is now essential for official statistics // Communications Sustainability. 2026. V. 1. P. 2. doi: 10.1038/s44458-025-00008-4
2. Воробьев А.В., Воробьева Г.Р. Оценка влияния геомагнитной активности на метрологические характеристики инклинометрических информационно-измерительных систем // Измерительная техника. 2017. № 6. С. 21–24.
3. Воробьев А.В., Пилипенко В.А. Подход к восстановлению геомагнитных данных на базе концепции цифровых двойников // Солнечно-земная физика. 2021. Т. 7. № 2. С. 53–62. doi: 10.12737/szf-72202105
4. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khramshin V.R., Gasiyarov V.R., Erdakov I.N. Fluxgate magnetometers based on new physical principles // Sensors. 2025. V. 25. N 13. P. 3893. doi: 10.3390/s25133893

References

1. Fraisl D., See L., MacFeely S., Moorthy I., Ulrich G.-S., Seidu O., et al. Why citizen science is now essential for official statistics. *Communications Sustainability*, 2026, vol. 1, pp. 2. doi: 10.1038/s44458-025-00008-4
2. Vorob'ev A.V., Vorob'eva G.R. Evaluation of the influence of geomagnetic activity on metrological characteristics of inclinometric information measuring systems. *Measurement Techniques*, 2017, vol. 60, no. 6, pp. 546–551. doi: 10.1007/s11018-017-1232-1
3. Vorobev A., Pilipenko V. Geomagnetic data recovery approach based on the concept of digital twins. *Solar-Terrestrial Physics*, 2021, vol. 7, no. 2, pp. 48–56. doi: 10.12737/stp-72202105
4. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khramshin V.R., Gasiyarov V.R., Erdakov I.N. Fluxgate magnetometers based on new physical principles. *Sensors*, 2025, vol. 25, no. 13, pp. 3893. doi: 10.3390/s25133893

5. Odenwald S.F. Can smartphones detect geomagnetic storms? // Space Weather. 2022. V. 20. N 3. P. e2020SW002669. doi: 10.1029/2020SW002669
6. Jufri L.R.F., Naston L. Predicting the effect of magnetic acquisition using CrowdMag Android App on fundamental magnetic concepts mastery in basic physics // Jurnal Penelitian Pendidikan IPA. 2024. V. 10. N 12. P. 10677–10691. doi: 10.29303/jppipa.v10i12.9131
7. O'Hanlon L. Smartphone app seeks to make navigation safer // EOS. 2015. V. 96. doi: 10.1029/2015EO021603
8. Grandin M., Ledvina V.E., Musset S., Partamies N., Frissell N.A., Bruus E., et al. Citizen science in space and atmospheric sciences: opportunities and challenges // Surveys in Geophysics. 2025. P. 1–35. doi: 10.1007/s10712-025-09888-6
9. Kim H., Witten D., Madey J., Frissell N., Gibbons J., Engelke W., et al. Citizen science: Development of a low-cost magnetometer system for a coordinated space weather monitoring // HardwareX. 2024. V. 20. P. e00580. doi: 10.1016/j.ohx.2024.e00580
10. Thompson M.M., Moon K., Woods A., Rowley J.J.L., Poore A.G.B., Kingsford R.T., et al. Citizen science participant motivations and behaviour: Implications for biodiversity data coverage // Biological Conservation. 2023. V. 282. P. 110079. doi: 10.1016/j.biocon.2023.110079
11. Abdelrahman M.M., Zhan S., Chong A. A three-tier architecture visual-programming platform for building-lifecycle data management // Proc. of the 11th Annual Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design. 2020. P. 1–8.
12. Krajci I., Cummings D. History and Evolution of the Android OS // Android on x86. 2013. P. 1–8. doi: 10.1007/978-1-4302-6131-5_1
13. Wu D., Gao D., Lo D. Scalable online vetting of Android apps for measuring declared SDK versions and their consistency with API calls // Empirical Software Engineering. 2021. V. 26. N 1. P. 7. doi: 10.1007/s10664-020-09897-6
14. Ala-Laurinaho R., Autiosalo J., Tammi K. Open sensor manager for IIoT // Journal of Sensor and Actuator Networks. 2020. V. 9. N 2. P. 30. doi: 10.3390/jsan9020030
15. Lee H., Park J., Lee U. A systematic survey on Android API usage for data-driven analytics with smartphones // ACM Computing Surveys. 2022. V. 55. N 5. P. 104 doi: 10.1145/3530814
16. Gaffney K.P., Prammer M., Brasfield L., Hipp D.R., Kennedy D., Patel J.M. SQLite: past, present, and future // Proceedings of the VLDB Endowment. 2022. V. 15. N 12. P. 3535–3547. doi: 10.14778/3554821.3554842
17. Karlsson S., Jongeling R., Čaušević A., Sundmark D. Exploring behaviours of RESTful APIs in an industrial setting // Software Quality Journal. 2024. V. 32. N 3. P. 1287–1324. doi: 10.1007/s11219-024-09686-0
18. Patil G. Django REST Framework // Django REST APIs Demystified. 2025. P. 19–22. doi: 10.1007/979-8-8688-1850-9_4
19. Lizardo L.E.O., Davis C.A. A PostGIS extension to support advanced spatial data types and integrity constraints // Proc. of the 25th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems. 2017. P. 33. doi: 10.1145/3139958.3140020
20. Benmoshe N. A simple solution for the Inverse Distance Weighting snterpolation (IDW) clustering problem // Sci. 2025. V. 7. N 1. P. 30. doi: 10.3390/sci7010030
21. Kleijnen J.P.C. Kriging: methods and applications // SSRN Electronic Journal. 2017. P. 1–36. doi: 10.2139/ssrn.3075151

5. Odenwald S.F. Can smartphones detect geomagnetic storms? *Space Weather*, 2022, vol. 20, no. 3, pp. e2020SW002669. doi: 10.1029/2020SW002669
6. Jufri L.R.F., Naston L. Predicting the effect of magnetic acquisition using CrowdMag Android App on fundamental magnetic concepts mastery in basic physics. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 2024, vol. 10, no. 12, pp. 10677–10691. doi: 10.29303/jppipa.v10i12.9131
7. O'Hanlon L. Smartphone app seeks to make navigation safer. *EOS*, 2015, vol. 96. doi: 10.1029/2015EO021603
8. Grandin M., Ledvina V.E., Musset S., Partamies N., Frissell N.A., Bruus E., et al. Citizen science in space and atmospheric sciences: opportunities and challenges. *Surveys in Geophysics*, 2025, pp. 1–35. doi: 10.1007/s10712-025-09888-6
9. Kim H., Witten D., Madey J., Frissell N., Gibbons J., Engelke W., et al. Citizen science: Development of a low-cost magnetometer system for a coordinated space weather monitoring. *HardwareX*, 2024, vol. 20, pp. e00580. doi: 10.1016/j.ohx.2024.e00580
10. Thompson M.M., Moon K., Woods A., Rowley J.J.L., Poore A.G.B., Kingsford R.T., et al. Citizen science participant motivations and behaviour: Implications for biodiversity data coverage. *Biological Conservation*, 2023, vol. 282, pp. 110079. doi: 10.1016/j.biocon.2023.110079
11. Abdelrahman M.M., Zhan S., Chong A. A three-tier architecture visual-programming platform for building-lifecycle data management. *Proc. of the 11th Annual Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design*, 2020, pp. 1–8.
12. Krajci I., Cummings D. History and Evolution of the Android OS. *Android on x86*, 2013, pp. 1–8. doi: 10.1007/978-1-4302-6131-5_1
13. Wu D., Gao D., Lo D. Scalable online vetting of Android apps for measuring declared SDK versions and their consistency with API calls. *Empirical Software Engineering*, 2021, vol. 26, no. 1, pp. 7. doi: 10.1007/s10664-020-09897-6
14. Ala-Laurinaho R., Autiosalo J., Tammi K. Open sensor manager for IIoT. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 2020, vol. 9, no. 2, pp. 30. doi: 10.3390/jsan9020030
15. Lee H., Park J., Lee U. A systematic survey on Android API usage for data-driven analytics with smartphones. *ACM Computing Surveys*, 2022, vol. 55, no. 5. pp. 104 doi: 10.1145/3530814
16. Gaffney K.P., Prammer M., Brasfield L., Hipp D.R., Kennedy D., Patel J.M. SQLite: past, present, and future. *Proceedings of the VLDB Endowment*, 2022, vol. 15, no. 12, pp. 3535–3547. doi: 10.14778/3554821.3554842
17. Karlsson S., Jongeling R., Čaušević A., Sundmark D. Exploring behaviours of RESTful APIs in an industrial setting. *Software Quality Journal*, 2024, vol. 32, no. 3, pp. 1287–1324. doi: 10.1007/s11219-024-09686-0
18. Patil G. Django REST Framework. *Django REST APIs Demystified*, 2025, pp. 19–22. doi: 10.1007/979-8-8688-1850-9_4
19. Lizardo L.E.O., Davis C.A. A PostGIS extension to support advanced spatial data types and integrity constraints. *Proc. of the 25th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*, 2017, pp. 33. doi: 10.1145/3139958.3140020
20. Benmoshe N. A simple solution for the Inverse Distance Weighting snterpolation (IDW) clustering problem. *Sci*, 2025, vol. 7, no. 1, pp. 30. doi: 10.3390/sci7010030
21. Kleijnen J.P.C. Kriging: methods and applications. *SSRN Electronic Journal*, 2017, pp. 1–36. doi: 10.2139/ssrn.3075151

Авторы

Воробьева Гульнара Равилевна — доктор технических наук, доцент, профессор, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, 450000, Российская Федерация, SC 57189275619, https://orcid.org/0000-0001-7878-9724, Gulnara.vorobeva@gmail.com

Воробьев Андрей Владимирович — доктор технических наук, доцент, профессор, заведующий кафедрой, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, 450000, Российская Федерация; старший научный сотрудник, Геофизический центр РАН, Москва, 119296, Российская Федерация, SC 56767909700, https://orcid.org/0000-0002-9680-5609, geomagnet@list.ru

Authors

Gulnara R. Vorobeva — D.Sc., Associate Professor, Professor, Ufa University of Science and Technology, Ufa, 450008, Russian Federation, SC 57189275619, https://orcid.org/0000-0001-7878-9724, Gulnara.vorobeva@gmail.com

Andrei V. Vorobev — D.Sc., Associate Professor, Professor, Head of Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, 450000, Russian Federation; Senior Researcher, Geophysical Center of the RAS, Moscow, 119296, Russian Federation, SC 56767909700, https://orcid.org/0000-0002-9680-5609, geomagnet@list.ru

Статья поступила в редакцию 23.02.2026
Одобрена после рецензирования 24.06.2026
Принята к печати 22.09.2026

Received 23.02.2026
Approved after reviewing 24.06.2026
Accepted 22.09.2026

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»