

УДК: 631.48

DOI: 10.35595/2414-9179-2022-2-28-800-812

А.А. Васильев¹, А.Н. Чащин²

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ПОЧВ г. ЧАЙКОВСКИЙ

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты оценки неоднородности объемной магнитной восприимчивости почв г. Чайковский Пермского края по результатам ее пространственного моделирования. Определение магнитной восприимчивости позволяет оценить концентрацию в городских почвах техногенных магнитных частиц. Их источниками в атмосфере и почвенном покрове урбанизированных ландшафтов являются выбросы транспортных средств, теплоэлектростанций, промышленных предприятий. Нестехиометрический техногенный магнетит-маггемитовый комплекс минералов в составе городских почв обладает аномально высокой магнитной восприимчивостью и содержит в составе кристаллической решетки магнитных частиц потенциально опасные химические элементы, относящиеся к группе тяжелых металлов (ТМ). Картографические материалы позволяют оценить экологический риск для жителей города, выявить неблагоприятные участки и провести пространственный анализ взаимосвязи их местоположения с источниками загрязнения. Цель исследований – пространственное моделирование магнитной восприимчивости почв г. Чайковский. Область исследований охватывает участок города общей площадью 22 км². Пространственное моделирование проведено геостатистическими и детерминационными методами на основе 140 точек. В результате перекрестной проверки установлено, что наиболее точным методом интерполяции является «обычный кригинг», при помощи которого установлены границы загрязненных участков г. Чайковский. В этих границах отобраны почвенные образцы, в которых определено содержание никеля, меди, цинка и свинца. По полученным данным, ареалы с высокой магнитной восприимчивостью почв имеют более высокие концентрации тяжелых металлов. Для доведения результатов исследований до администрации и жителей города разработано веб-ГИС приложение, доступ к которому организован через платформу GitHub.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: магнитная восприимчивость, пространственное моделирование, тяжелые металлы, городские почвы

¹ ФГБОУ ВО Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова, ул. Петропавловская, д. 23, 614990, Пермь, Россия; *e-mail*: a.a.vasilev@list.ru

² ФГБОУ ВО Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова, ул. Петропавловская, д. 23, 614990, Пермь, Россия; *e-mail*: chascshin@mail.ru

Andrey A. Vasiliev¹, Aleksey N. Chashchin²

MAPPING OF THE MAGNETIC SUSCEPTIBILITY OF SOILS OF THE CITY OF CHAYKOVSKIY

ABSTRACT

The article presents the results of an assessment of the heterogeneity of the volumetric magnetic susceptibility of soils in the city of Chaikovsky, Perm Territory, based on the results of its spatial modeling. Determination of magnetic susceptibility makes it possible to estimate the concentration of technogenic magnetic particles in urban soils. Their sources in the atmosphere and soil cover of urbanized landscapes are emissions from vehicles, thermal power plants, and industrial enterprises. The non-stoichiometric technogenic magnetite-maghemite complex of minerals in urban soils has an abnormally high magnetic susceptibility and contains potentially dangerous chemical elements belonging to the heavy metals (HM) group in the composition of the crystal lattice of magnetic particles. Cartographic materials make it possible to assess the environmental risk for city residents, identify unfavorable areas and conduct a spatial analysis of the relationship between their location and pollution sources. The purpose of the research is spatial modeling of the magnetic susceptibility of soils in the city of Chaikovsky. The research area covers a section of the city with a total area of 22 km². Spatial modeling was carried out using geostatistical and deterministic methods based on 140 points. As a result of cross-validation, it was found that the most accurate interpolation method is «Ordinary Kriging» with the help of which the boundaries of the contaminated areas of the city of Chaikovsky are established. Within these boundaries, soil samples were taken, in which the content of nickel, copper, zinc, and lead was determined. According to the data obtained, areas with high magnetic susceptibility of soils have higher concentrations of heavy metals. To bring the research results to the administration and residents of the city, a Web GIS application has been developed, access to which is organized through the GitHub platform.

KEYWORDS: magnetic susceptibility, spatial modeling, heavy metals, urban soils

ВВЕДЕНИЕ

Город Чайковский расположен в подзоне дерново-подзолистых почв южной тайги на юго-западе Пермского края. Он отличается хорошим внешним благоустройством и имеет высокую степень озеленения. Площадь города – 57,4 км². На территории города отсутствуют крупные промышленные предприятия, загрязняющие окружающую среду. Состояние атмосферного воздуха и водных ресурсов на территории города контролируется природоохранными службами и оценивается как хорошее. Однако почвенный покров территории г. Чайковский слабо изучен и не описан в научной литературе, а контроль за его эколого-геохимическим состоянием на регулярной основе не осуществляется. Вместе с тем известно, что в отдельных случаях почвенный покров урбанизированных экосистем хранит следы техногенной нагрузки в виде формирования техногенных геохимических аномалий [Гладышева и др., 2007; Водяницкий, Шоба, 2015; Da Silva Júnior et al., 2021], которые диагностируются по отклонениям концентрации

¹ FSBEI HE Perm State Agro-Technological University named after academician D.N. Pryanishnikov, Petropavlovskaya str., 23, 614990, Perm, Russia; e-mail: a.a.vasilev@list.ru

² FSBEI HE Perm State Agro-Technological University named after academician D.N. Pryanishnikov, Petropavlovskaya str., 23, 614990, Perm, Russia; e-mail: chashchin@mail.ru

отдельных химических элементов от нормальных показателей. На картографических материалах это фиксируется путем выделения цветом отдельных ареалов на фоновой окраске естественных величин.

Для экспресс-оценки магнитного и эколого-геохимического состояния почвенного покрова городских территорий применяется каппаметрия, которая позволяет оценить концентрацию в городских почвах техногенных магнитных частиц. Их источниками в атмосфере и почвенном покрове урбанизированных ландшафтов являются выбросы транспортных средств, теплоэлектростанций, промышленных предприятий. Нестехиометрический техногенный магнетит-маггемитовый комплекс минералов в составе городских почв обладает аномально высокой магнитной восприимчивостью и содержит в составе кристаллической решетки магнитных частиц потенциально опасные химические элементы, относящиеся к группе тяжелых металлов (ТМ). Таким образом, техногенный магнетит является носителем тяжелых металлов. Установление закономерностей пространственного распределения магнитной восприимчивости в почвах городов является актуальной проблемой почвоведения и экологии [Бабанин и др., 1995; Васильев, Лобанова, 2015; Kirana et al., 2021; Scholger et al., 2002; Wang et al., 2021].

Цель исследований – пространственное моделирование магнитной восприимчивости почв г. Чайковский.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследований выбран участок территории г. Чайковский, на котором проживает основная часть населения и расположены промышленные предприятия. Границы обследования с севера, северо-запада, запада, востока и юго-востока совпадают с реальными границами города, в том числе ограничены р. Кама и Воткинским водохранилищем. С юга и юго-запада территория ограничена массивом садово-огородных участков и лесопарковой зоной города. В структуре почвенного покрова г. Чайковский преобладают урбаноземамы и техногенные поверхностные образования. Измерение магнитной восприимчивости почв было проведено на площади 22 км², что составляет 38 % от всей территории города.

Измерение магнитной восприимчивости проводили прибором «Каппаметр КТ-6» на 140 наблюдательных площадках размером 25 м² в июне 2019 г. Территория исследований включала многоэтажную застройку и промышленную зону г. Чайковский и показана на рисунке 1.

Оформление картографических материалов и пространственный анализ выполнены в геоинформационной системе QGIS. Для создания клиентской части веб-ГИС приложения использовались технологии интернет-картографирования [Абдуллин, Пономарчук, 2020].

Для моделирования пространственной неоднородности ОМВ почв города использовались результаты интерполяции с применением двух геостатических (ordinary kriging и simple kriging) и двух детерминационных (RBF и IDW) методов. Инструмент программы ArcGIS «Spatial Analyst» использовался для создания моделей [Мыслова и др., 2017]. Методы бинарной классификации и пространственного оверлея использовались в процессе осуществления анализа закономерностей пространственной неоднородности магнитной восприимчивости почв.

Концентрация тяжелых металлов в почвах была определена рентгенофлуоресцентным методом. Исследовался валовой химический состав объединенных проб почв, отобранных методом конверта из слоя 0–5 см. Образцы отбирались на площадках с разной магнитной восприимчивостью почв. Растительный покров площадок представлен искусственно созданными участками травянистых растений (газоны) без видимых признаков угнетения. Оценка валового содержания ТМ (Ni, Cu, Zn, Pb) проведена по

ГН 2.1.7.2041-06 (ПДК)¹. Выбор для анализа валовой формы тяжелых металлов был обусловлен тем, что данный показатель ранее был представлен в результатах изучения эколого-магнитного состояния почв городов Пермского края [Чащин, 2010; Васильев, Лобанова, 2015].

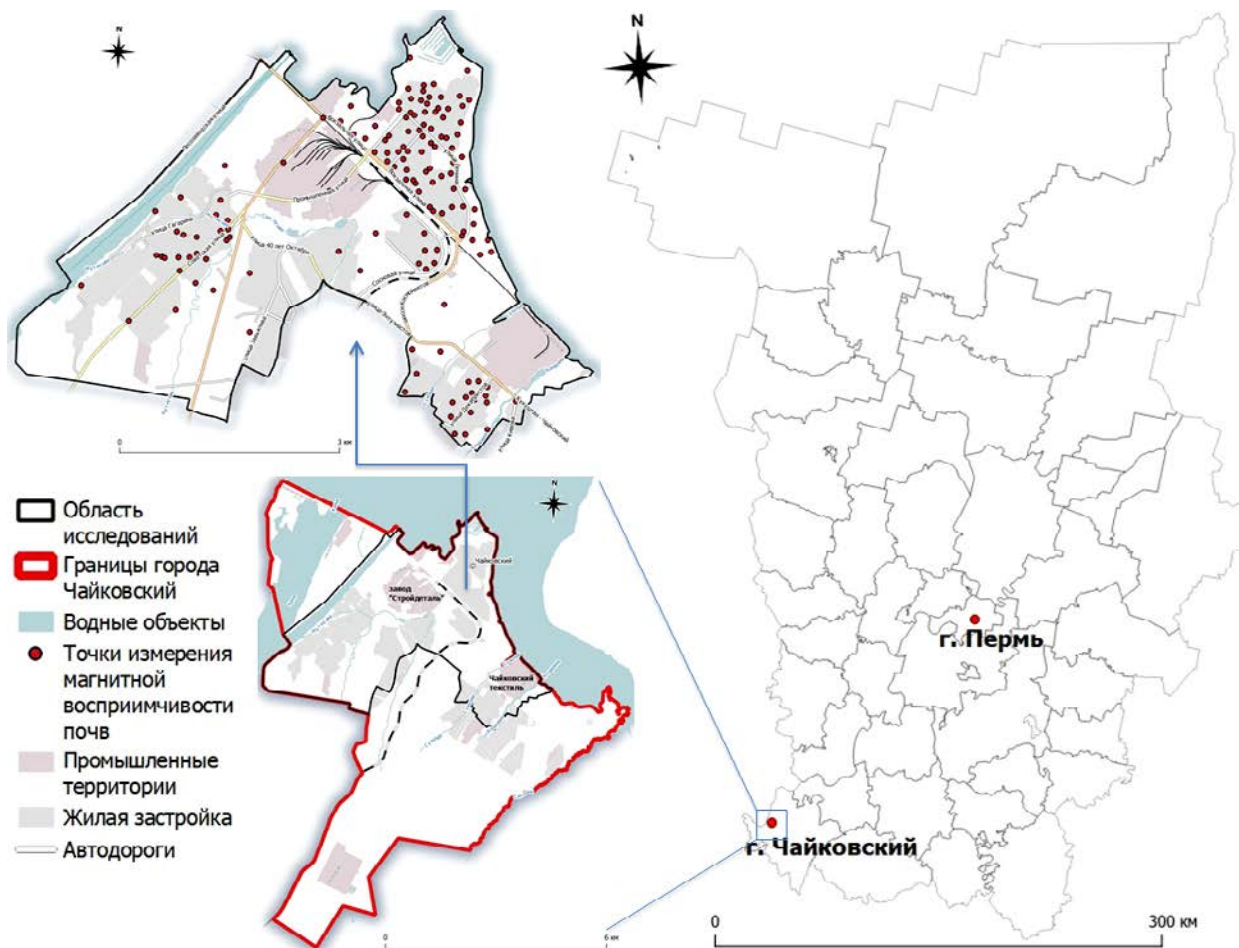


Рис. 1. Местоположение территории исследований

Fig. 1. Location of the study area

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Магнитная восприимчивость почв г. Чайковский варьирует в интервале от $0,20 \times 10^{-3}$ СИ (окрестности территории детского сада № 34, ул. Декабристов, 14/1) до $2,66 \times 10^{-3}$ СИ (окрестности одного из корпусов ООО «Завод Стройдеталь», ул. Советская) (табл. 1). Среднее значение ОМВ изученных почв составляет $0,64 \times 10^{-3}$ СИ, что близко к фоновым значениям для дерново-подзолистых почв Среднего Предуралья [Чащин, 2010]. Статистическое распределение значений магнитной восприимчивости имеет выраженную асимметрию, но в целом переменная имеет примерно нормальное распределение, значения медианы и средней отличаются друг от друга незначительно (табл. 1). В связи с этим, полученный массив данных результатов определения ОМВ не нуждается в дополнительной трансформации по методу нормальных меток.

¹ ГН 2.1.7.2041-06. Почва, очистка населенных мест, отходы производства и потребления, санитарная охрана почвы. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. СПС «Консультант Плюс».

Табл. 1. Описательная статистика магнитной восприимчивости почв, 10^{-3} СИ ($n = 140$)
 Table 1. Descriptive statistics of soil magnetic susceptibility, 10^{-3} СИ ($n = 140$)

Значения статистических показателей				Std. Dev.	Экссесс	Асимметрия
мин.	макс	среднее	медиана			
0,20	2,66	0,64	0,55	0,36	14,05	2,95

Std. Dev. – стандартное отклонение.

Тренд магнитной восприимчивости, обозначенный на рисунке кривой зеленого цвета, имеет изогнутую форму. Он выражен в направлении запад–восток. Линия синего цвета располагается на рисунке 2 почти параллельно оси X и характеризует очень слабую выраженность тренда в направлении север–юг. Для повышения достоверности геостатистической интерполяции данных измерения магнитной восприимчивости был удален тренд второго порядка.

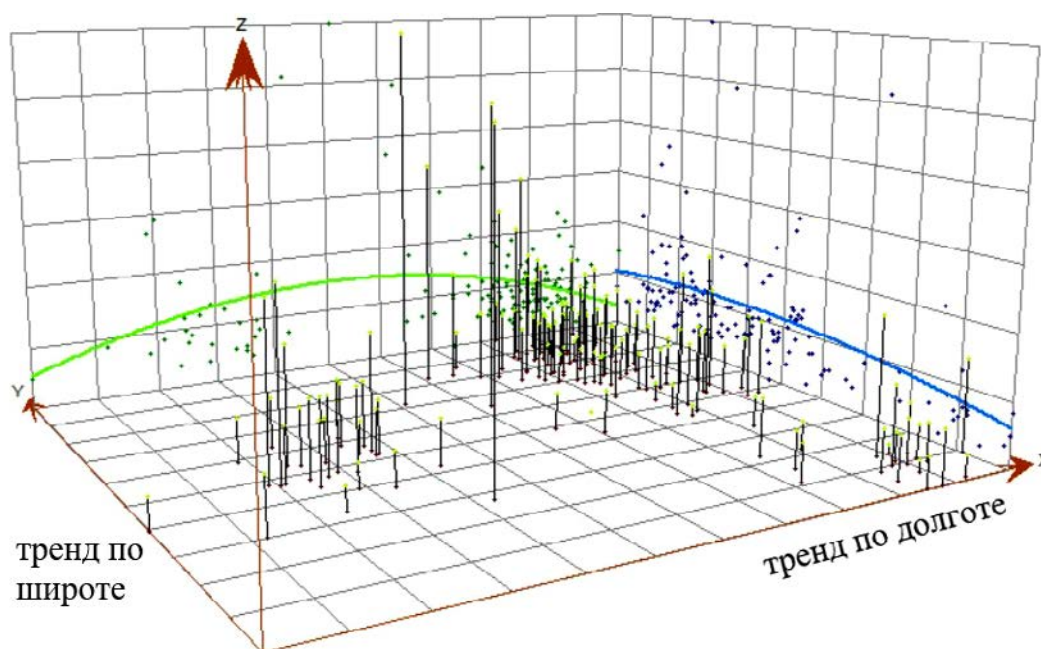


Рис. 2. Тренд пространственного распределения восприимчивости почв
 Fig. 2. Spatial distribution trend of soil susceptibility

Вариограмма позволяет описать характер изменения значений магнитной восприимчивости почв, полученных на отдельных измерительных площадках, в зависимости от удаленности площадок друг от друга. Форма кривой вариограммы показывает, что для данной выборки значений магнитной восприимчивости выражена пространственная автокорреляция (рис. 3).

Использование функции «Оптимизация вариограммы» модуля Geostatistical Analyst ArcGIS позволило автоматически подобрать оптимальную модель вариограммы и осуществить корректную интерполяцию результатов магнитометрической съемки почвенного покрова г. Чайковский.

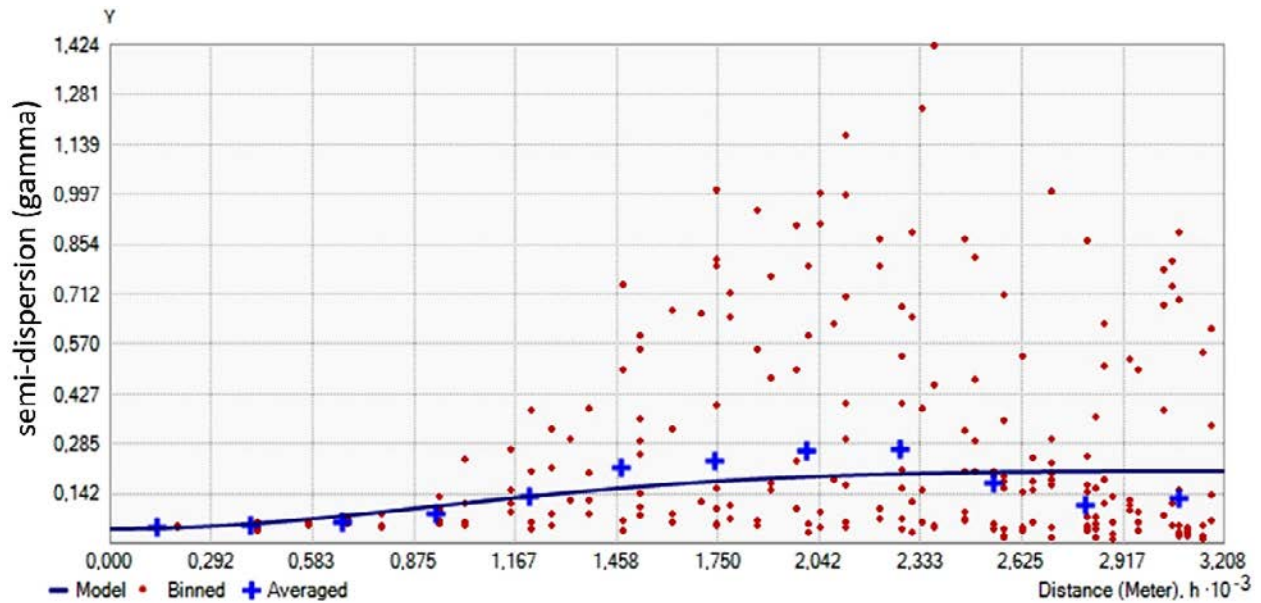


Рис. 3. Вариограмма магнитной восприимчивости почв
 Fig. 3. Soil magnetic susceptibility variogram

Перед созданием картосхемы магнитной восприимчивости почв города геостатистическими методами был проведен подбор их оптимальных параметров. Результаты каждого метода интерполяции характеризуются своими специфическими особенностями (рис. 5). Подбор наиболее объективного геостатистического раstra был осуществлен путем вычисления точности каждой из четырех использованных моделей. Точность была установлена методом кросс-валидации. В качестве критерия оценки были рассчитаны значения усредненной разницы между измерением и проинтерполированным значением (ME), которые приведены в табл. 2. Минимальное значение ME было установлено для метода ordinary kriging, который, следовательно, является в данном случае наиболее точным.

Табл. 2. Результаты перекрестной проверки моделей распределения
 объемной магнитной восприимчивости почв

Table 2. Results of cross-validation of models for the distribution
 of the volumetric magnetic susceptibility of soils

Метод интерполяции	ME*	RMSE**
ordinary kriging	0,00623	0,33
simple kriging	0,0072	0,36
IDW	0,014	0,35
RBF (spline with tension)	0,012	0,34

* – значения усредненной разности между измерением и проинтерполированным значением;
 ** – среднеквадратичная ошибка, указывающая, насколько близко модель прогнозирует измеренные значения.

Для разработки шкалы оценки ОМВ почв г. Чайковский общий массив полученных измерений ОМВ был обработан в программе Statistica 6.0. Предложенная оценочная шкала

создана с использованием центильных интервалов и включает семь градаций [Васильев, Лобанова, 2015]. Границы центильных интервалов для каждой градации шкалы приведены в таблице 3. Среднеарифметические и медианные значения, характеризующие генеральную выборку значений магнитной восприимчивости, соответствуют интервалу шкалы от 0,44 до $0,70 \times 10^{-3}$ СИ и относятся к градации «Средняя». По данным центильного анализа было установлено, что среднее значение магнитной восприимчивости изученного массива почв г. Чайковский составляет $0,63 \times 10^{-3}$ СИ.

Табл. 3. Центильные интервалы объемной магнитной восприимчивости почв г. Чайковский, $\times 10^{-3}$ СИ

Table 3. Centile intervals of the volumetric magnetic susceptibility of soils in the city of Chaikovsky, $\times 10^{-3}$ СИ

Градации центильных интервалов, $n = 140$						
Очень низкая < 5%	Низкая 5–10%	Ниже средней 10–25%	Средняя «норма» 25–75%	Выше средней 75–90%	Высокая 90–95%	Очень высокая >95%
< 0,35	0,35–0,38	0,38–0,44	0,44–0,70	0,70–0,97	0,97–1,30	> 1,30

Шкала была использована для графического оформления результатов интерполяции магнитной восприимчивости почв (табл. 4).

Табл. 4. Группировка почв г. Чайковский по величине объемной магнитной восприимчивости

Table 4. Grouping of soils in the city of Chaikovsky according to the value of volumetric magnetic susceptibility

Номер группы	Рекомендуемый цвет раскраски [Васильев, Лобанова, 2015]	Градации ОМВ почв (площадь, км ²)	Интервалы значений ОМВ, 10^{-3} СИ
1	Зеленый	Очень низкая (0,4757)	< 0,35
2	Темно-зеленый	Низкая (0,3944)	0,35–0,38
3	Желтый	Ниже средней (1,3352)	0,38–0,44
4	Оранжевый	Средняя (10,7392)	0,44–0,70
5	Розовый	Выше средней (3,8749)	0,70–0,97
6	Красный	Высокая (2,2967)	0,97–1,30
7	Черный	Очень высокая (2,9019)	> 1,30

На основе моделей магнитной восприимчивости почв города, созданных геостатистическими и детерминационными методами (рис. 4), и параметров подготовленной нами оценочной шкалы возможно определить площади почв с разным уровнем содержания магнитных соединений. Модель ordinary kriging (рис. 4а) показывает, что в структуре почвенного покрова обследованной части города преобладают почвы со средней магнитной восприимчивостью (табл. 4).

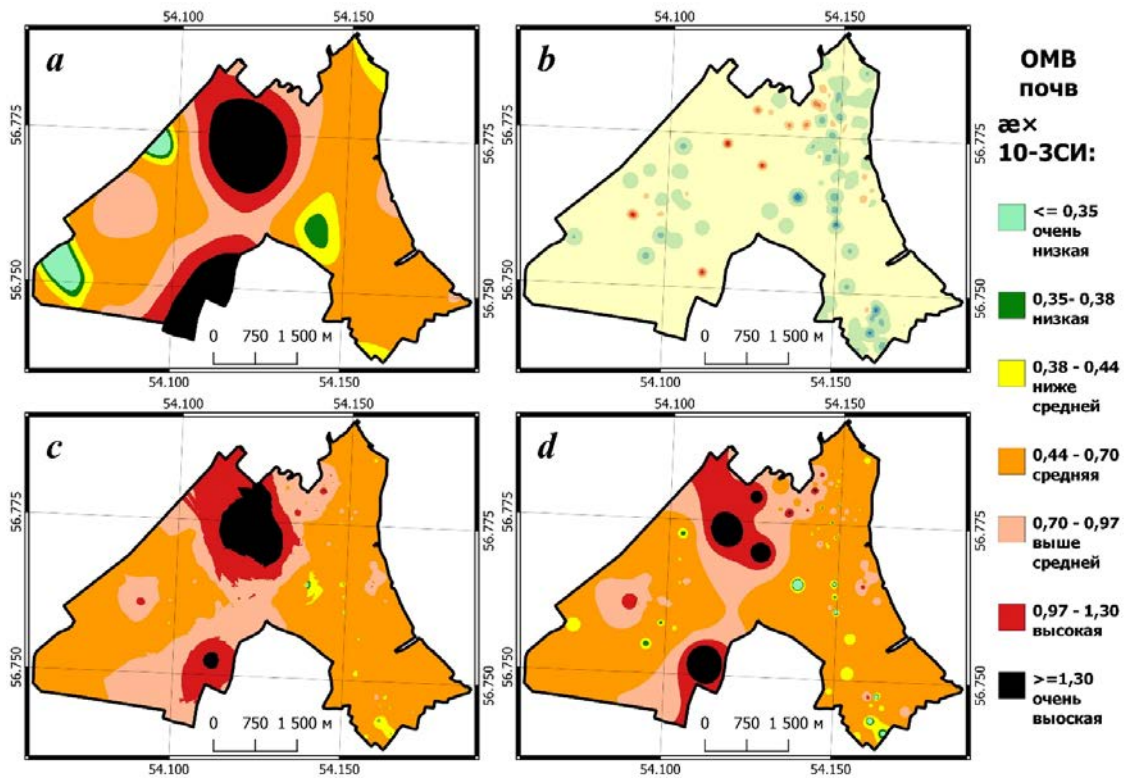


Рис. 4. Пространственные модели магнитной восприимчивости почв:
a – ordinary kriging; *b* – simple kriging; *c* – RBF; *d* – IDW
 Fig. 4. Spatial models of soil magnetic susceptibility:
a – ordinary kriging; *b* – simple kriging; *c* – RBF; *d* – IDW

Методом пространственного анализа «бинарная классификация» были выделены ареалы почв со средней и выше ОМВ (рис. 5), которым была присвоена категория «загрязненные участки» (диапазон ОМВ от $0,7 \times 10^{-3}$ СИ («среднее») до максимального значения ОМ).

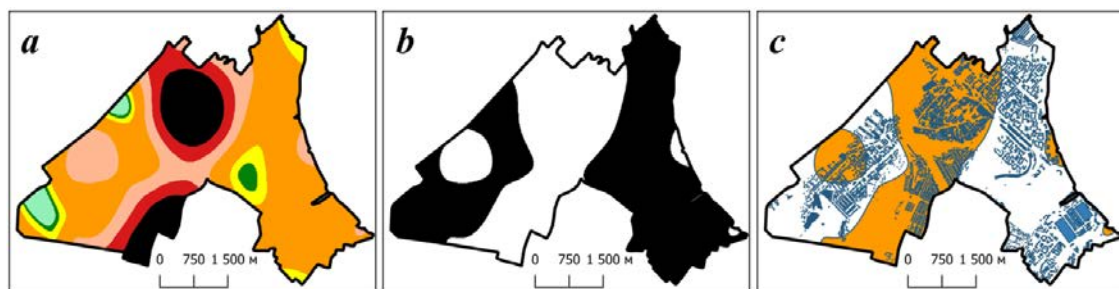


Рис. 5. Этапы проведения бинарной классификации слоя восприимчивости почв:
a – растр ordinary kriging; *b* – бинарный растр значений «выше средней»; *c* – результат преобразования бинарного растра в полигональные участки с наложением на слой зданий

Fig. 5. Stages of binary classification of the soil susceptibility layer:
a – ordinary kriging raster; *b* – binary raster of “above average” values; *c* – the result of converting a binary raster into polygonal areas with an overlay on the layer of buildings

Картограмма загрязненных участков представлена на рисунке 6.

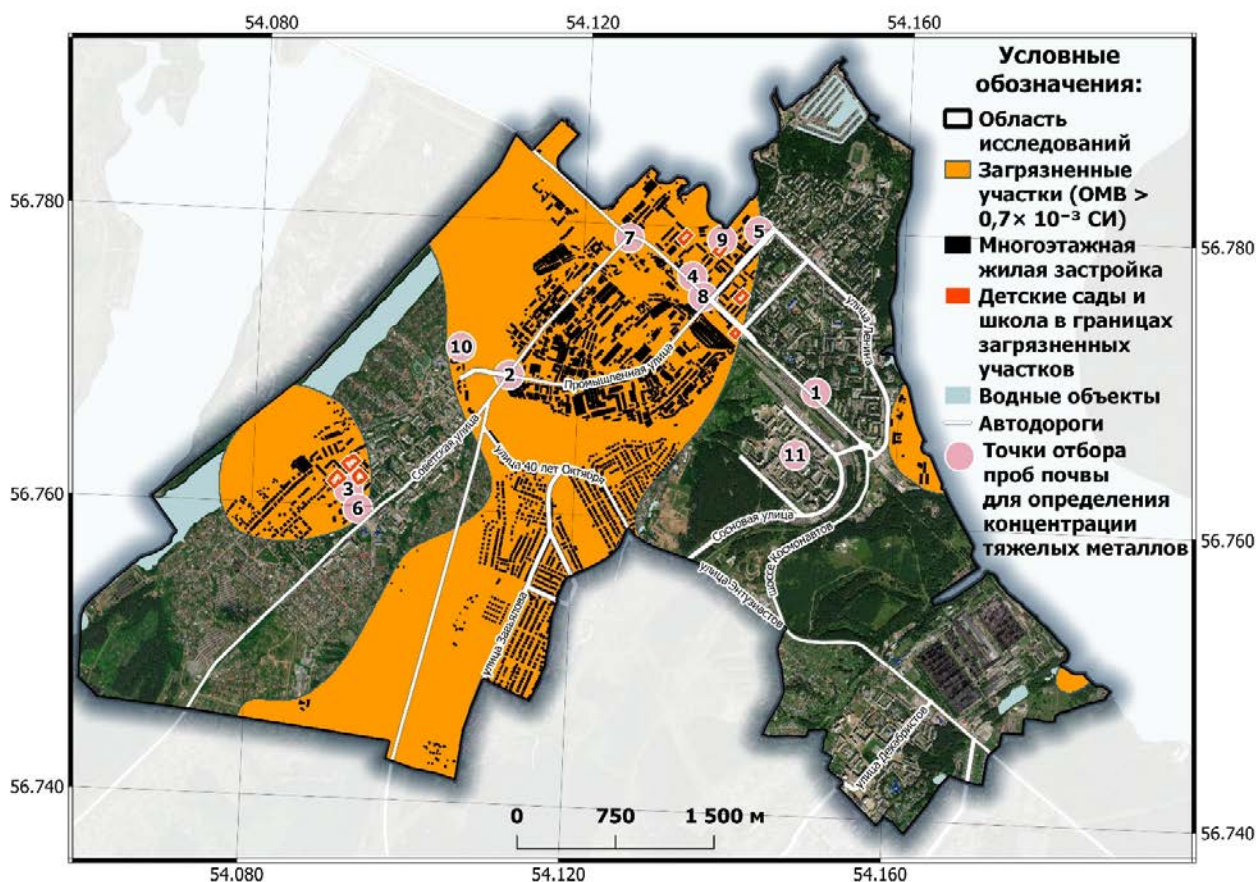


Рис. 6. Результаты наложения тематических слоев «Загрязненные участки» и «Здания» на территории г. Чайковский

Fig. 6. The results of overlaying thematic layers "Contaminated areas" and "Buildings" on the territory of the city of Chaikovsky

Из открытых источников OpenStreetMap был экспортирован слой «Здания». Наложение слоя «Загрязненные участки» на слой «Здания» позволило выявить на изученной территории 2115 объекта, в том числе шесть детских садов и одну общеобразовательную школу.

В границах выделенных «загрязненных участков» на территории обследования было отобрано девять объединенных образцов почв, которые по предложенной шкале магнитной восприимчивости соответствуют градации «средняя» – №№ 2–9 (рис. 6). Два образца – № 10 и № 11 – имеют магнитную восприимчивость ниже среднего и очень низкую – $0,4 \times 10^{-3}$ СИ и $0,2 \times 10^{-3}$ СИ соответственно. Результаты определения валовой концентрации тяжелых металлов в образцах приведены в таблице 5.

Из данных таблицы 5 видно, что почвы на загрязненных техногенными магнитными частицами участках города, границы которых были установлены по значениям магнитной восприимчивости, характеризуются относительно повышенными концентрациями некоторых тяжелых металлов. В почвах с магнитной восприимчивостью от $1,4$ до $1,9 \times 10^{-3}$ СИ выявлена аномально высокая концентрация Zn, которая превышает ПДК в 2,6 раза.

Табл. 5. Валовое содержание тяжелых металлов (мг/кг) в слое 0–5 см почв с разной объемной магнитной восприимчивостью (ОМВ), $\times 10^{-3}$ СИ
 Table 5. Gross content of heavy metals (mg/kg) in the 0–5 cm layer of soils with different volumetric magnetic susceptibility

Элемент/ОМВ	Номер образца											ПДК
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
ОМВ	0,6	0,6	0,5	1,4	0,5	0,7	0,9	0,6	0,5	0,4	0,2	–
Ni	43	50	28	50	41	54	45	42	39	45	11	85,0
Cu	41	27	29	93	37	39	50	23	31	25	11	55,0
Zn	52	50	89	260	81	96	85	96	44	73	13	100,0
Pb	10	16	16	51	9	11	20	0	7	17	3	30,0

Наиболее эффективным средством для доведения результатов картографирования магнитной восприимчивости почв до администрации и жителей г. Чайковский является веб-ГИС. Результат преобразования ГИС-проекта, созданного в QGIS, в веб-карту позволяет специалистам без IT-подготовки использовать геоинформационную технологию для решения природоохранных задач. Разработка клиентского веб-приложения с использованием интерфейсов Leaflet [Абдуллин, Пономарчук, 2020] реализована при помощи модуля qgis2web и универсального редактора кода Brackets, при помощи которого вписан заголовок HTML-документа (<title>), улучшен интерфейс всплывающего окна для отображения химического состава почв в точках отбора и добавлены блочные элементы оформления сайта (рис. 7).

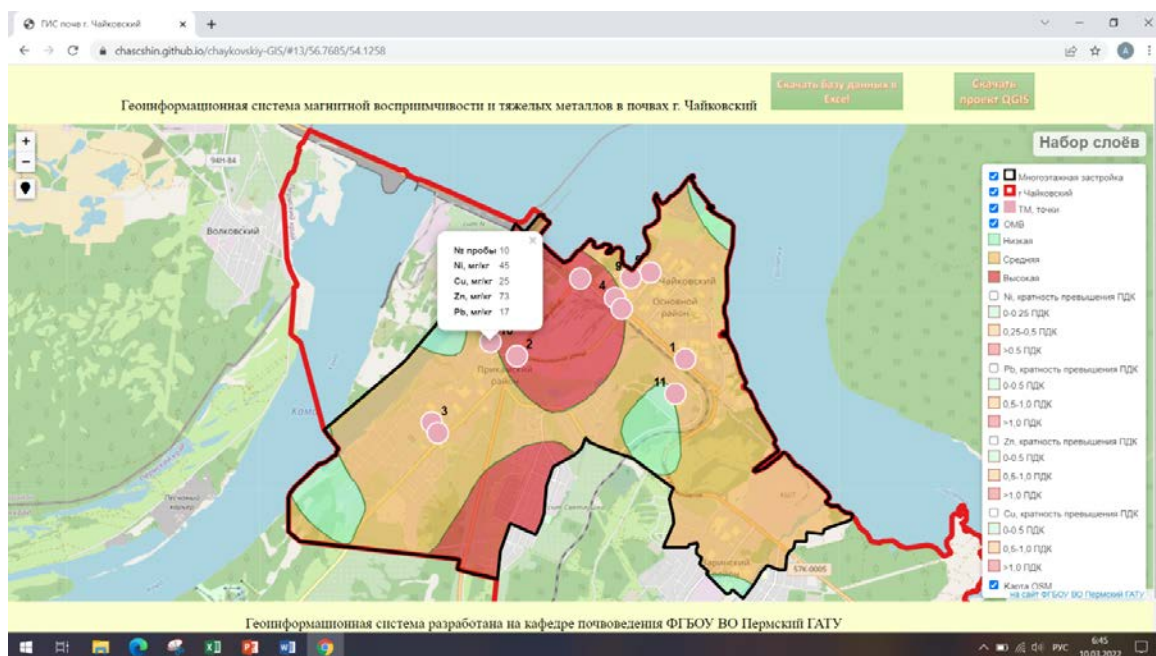


Рис. 7. Внешний вид веб-приложения после редактирования HTML-кода (размещено на GitHub)

Fig. 7. The appearance of the web application after editing the HTML code (hosted on GitHub)

Размещение веб-приложения выполнено на платформе GitHub. Функционал веб-приложения дополнен возможностью геопозиционирования, что позволяет пользователю определить свое местоположение на участках с различным эколого-магнитным состоянием почв. Доступ к данным на мобильном устройстве или компьютере возможен по адресу: <https://chascshin.github.io/chaykovskiy-GIS/#13/56.7685/54.1258>.

Веб-карта содержит не только пространственное распределение магнитной восприимчивости почв, но и дополнительные слои, характеризующие концентрации Ni, Pb, Zn, Cu (мг/кг) относительно кратности превышения ПДК. Слои были созданы методом IDW-интерполяции (обратное взвешенное расстояние).

ВЫВОДЫ

Средний уровень магнитной восприимчивости почв практически на всей территории г. Чайковский близок к фоновым значениям для дерново-подзолистых почв Среднего Предуралья. Пространственная неоднородность магнитной восприимчивости почв города наиболее точно моделируется геостатистическим методом интерполяции обычный кригинг (Ordinary kriging). Для территории г. Чайковский на основе центильного анализа данных была разработана шкала объемной магнитной восприимчивости почв с выделением градаций, которые отражают общее распределение полученных значений. Загрязненные участки в основном сформированы на территориях, прилегающих к промышленным предприятиям строительной отрасли города. Их образование связано с аэральным поступлением высокомагнитных частиц в составе пыли от стационарных источников и автотранспорта. В пределах границ участков возможного загрязнения находятся некоторые придомовые территории жилых многоквартирных домов, а также шесть детских садов и одна школа. Технологии интернет-картографирования позволяют обеспечить свободный доступ жителей, администрации и природоохранных служб г. Чайковский к результатам исследований магнитной восприимчивости и концентрации тяжелых металлов в почвах города.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абдуллин Р.К., Пономарчук А.И.* Технологии интернет-картографирования: учебное пособие. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2020. 132 с.
2. *Бабанин В.Ф., Трухин В.И., Карпачевский Л.О., Иванов А.В., Морозов В.В.* Магнетизм почв. Ярославль: Ярославский гос. тех. университет, 1995. 223 с.
3. *Васильев А.А., Лобанова Е.С.* Магнитная и геохимическая оценка почвенного покрова урбанизированных территорий Предуралья на примере города Перми. Пермь: ФГБОУ ВПО «Пермская ГСХА», 2015. 243 с.
4. *Водяницкий Ю.Н., Шоба С.А.* Магнитная восприимчивость как индикатор загрязнения тяжелыми металлами городских почв. Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2015. № 1. С. 13–20.
5. *Гладышева М.Н., Иванов А.В., Строганова М.Н.* Выявление ареалов техногенно-загрязненных почв Москвы по их магнитной восприимчивости. Почвоведение. 2007. № 2. С. 235–242.
6. *Мыслова Т.Н., Куцаева О.А., Подлесный А.А.* Сравнение эффективности методов интерполяции на основе ГИС для оценки пространственного распределения гумуса в почве. Вестник БГСХА. 2017. № 4. С. 146–152.
7. *Чащин А.Н.* Оксиды железа и тяжелые металлы в загрязненных металлургическим производством почвах г. Чусовой (Среднее Предуралье): диссертация ... кандидата биологических наук, специальность: 03.02.13. Уфа, 2010. 156 с.
8. *Da Silva Júnior J.F., Siqueira D.S., Teixeira D.B., Panosso A.R., Júnior J.M., Pereira G.T.* Multivariate split moving windows and magnetic susceptibility for locating soil boundaries of São Paulo, Brazil. Geoderma Regional. 2021. Vol. 26. P. e00418. DOI: 10.1016/j.geodrs.2021.e00418.
9. *Kirana K.H., Aprilawardani J., Ariza D., Fitriani D., Agustine E., Bijaksana S., Fajar S.J., Nugraha M.G.* Frequency Dependent Magnetic Susceptibility in Topsoil of Bandung City, Indonesia. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing. 2021. Vol. 873. No. 1. P. 012016. DOI: 10.1088/1755-1315/873/1/012016.
10. *Scholger P., Hanesch M., Scholger R.* Mapping of heavy metal loadings in soils by means of magnetic susceptibility measurements. Journal Environ. Geol. 2002. No. 42. P. 857–870. DOI: 10.1007/s12665-011-1248-9.
11. *Wang B., Zhang X., Zhao Y., Zhang M., Jia J.* Spatial and temporal distribution of pollution based on magnetic analysis of soil and atmospheric dustfall in Baiyin city, northwestern China. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2021. Vol. 18. No. 4. P. 1681. DOI: 10.3390/ijerph18041681.

REFERENCES

1. *Abdullin R.K., Ponomarchuk A.I.* Internet mapping technologies: a tutorial. Perm: Perm State National Research University, 2020. 132 p. (in Russian).
2. *Babanin V.F., Trukhin V.I., Karpachevsky L.O., Ivanov A.V., Morozov V.V.* Soil magnetism. Yaroslavl: Yaroslavl State. University, 1995. 223 p. (in Russian).
3. *Chashchin A.N.* Iron oxides and heavy metals in the soils of Chusovoy (Middle Cis-Urals) polluted by metallurgical production: dissertation... A candidate of biological sciences: 03.02.13. Ufa, 2010. 156 p. (in Russian).
4. *Da Silva Júnior J.F., Siqueira D.S., Teixeira D.B., Panosso A.R., Júnior J.M., Pereira G.T.* Multivariate split moving windows and magnetic susceptibility for locating soil boundaries of

- São Paulo, Brazil. Geoderma Regional. 2021. Vol. 26. P. e00418. DOI: 10.1016/j.geodrs.2021.e00418.
5. *Gladysheva M.N., Ivanov A.V., Stroganova M.N.* Identification of areas of technogenically polluted soils of Moscow by their magnetic susceptibility. *Soil science*. 2007. No. 2. P. 235–242 (in Russian).
 6. *Kirana K.H., Apriliawardani J., Ariza D., Fitriani D., Agustine E., Bijaksana S., Fajar S.J., Nugraha M.G.* Frequency Dependent Magnetic Susceptibility in Topsoil of Bandung City, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing. 2021. Vol. 873. No. 1. P. 012016. DOI: 10.1088/1755-1315/873/1/012016.
 7. *Myslova T.N., Kutsaeva O.A., Podlesny A.A.* Comparison of the effectiveness of GIS-based interpolation methods for estimating the spatial distribution of humus in soil. *Vestnik BSHA*. 2017. No. 4. P. 146–152 (in Russian).
 8. *Scholger P., Hanesch M., Scholger R.* Mapping of heavy metal loadings in soils by means of magnetic susceptibility measurements. *Journal Environ. Geol.* 2002. No. 42. P. 857–870. DOI: 10.1007/s12665-011-1248-9.
 9. *Vasil'ev A.A., Lobanova E.S.* Magnetic and geochemical assessment of the soil cover of the urbanized territories of the Cis-Urals on the example of the city of Perm. Perm: FGBOU VPO “Perm State Agricultural Academy”, 2015. 243 p. (in Russian).
 10. *Vodyanitsky Yu.N., Shoba S.A.* Magnetic susceptibility as an indicator of urban soil pollution by heavy metals (literature review). *Bulletin of Moscow University. Episode 17: Soil Science*. 2015. No. 1. P. 13–20 (in Russian)
 11. *Wang B., Zhang X., Zhao Y., Zhang M., Jia J.* Spatial and temporal distribution of pollution based on magnetic analysis of soil and atmospheric dustfall in Baiyin city, northwestern China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Vol. 18. No. 4. P. 1681. DOI: 10.3390/ijerph18041681.
-