

А.А. Васильев¹, А.Н. Чашин², М.В. Разинский³

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ЭКОЛОГО-МАГНИТНОГО СОСТОЯНИЯ ПОЧВ г. КРАСНОКАМСКА

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена геоинформационному картографированию эколого-магнитного состояния почв г. Краснокамска. Исследования включали точечные определения объемной магнитной восприимчивости почв и концентрации тяжелых металлов с последующим математико-картографическим моделированием полученных результатов. Картографирование магнитной восприимчивости почв позволяет сформировать ареалы эколого-магнитного состояния почв, по которым осуществляется отбор проб для определения тяжелых металлов. Таким образом, снижается объем выборки почвенных образцов для исследований тяжелых металлов без существенного уменьшения представительности итоговых результатов, что определяет актуальность выполненной работы. Цель исследований — геоинформационное картографирование эколого-магнитного состояния почв центральной части г. Краснокамска. Границы исследований с юга ограничены промышленной зоной города, которая в основном представлена предприятиями целлюлозно-бумажной промышленности. В восточной части области обследования расположена «Закамская ТЭЦ-5» и машиностроительный завод. Почвенный покров г. Краснокамска представлен урбаноземами и техногенными поверхностными образованиями. Общее число точек измерений магнитной восприимчивости составило 77, а тяжелые металлы определены в 10 образцах. При обработке пространственных данных использовались методы математико-картографического моделирования, пространственного оверлея и бинарной классификации. Интерполяция выполнена геостатистическим методом *ordinary kriging* при помощи инструмента «Spatial Analyst» программы ArcGIS 10.8. Создание Веб-ГИС «Геоинформационная система магнитной восприимчивости и тяжелых металлов в почвах г. Краснокамск» выполнено на основе открытых геотехнологий QGIS с использованием инструмента *qgis2web*, редактора кода VS Code. Хостинг Веб-ГИС осуществлен на бесплатной платформе GitHub. По результатам картографирования установлено загрязнение почв никелем и медью. Общая площадь загрязнения составила 0,55 км².

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: магнитная восприимчивость почв, геоинформационное картографирование, загрязнение почв тяжелыми металлами

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

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

³ ФГБОУ ВО «Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова», ул. Петропавловская, д. 23, Пермь, Россия, 614990,
e-mail: rmv11@mail.ru

Andrey A. Vasil'ev¹, Aleksey N. Chashchin², Mikhail V. Razinsky³

GEOINFORMATION MAPPING OF THE ECOLOGICAL AND MAGNETIC STATE OF SOILS IN KRASNOKAMSK

ABSTRACT

The article is devoted to geoinformation mapping of the ecological and magnetic state of soils in the city of Krasnokamsk. The study included point determinations of the volumetric magnetic susceptibility of soils and the concentration of heavy metals, followed by mathematical-cartographic modeling of the results obtained. Mapping the magnetic susceptibility of soils makes it possible to form areas of the ecological and magnetic state of soils, along which samples are taken for the determination of heavy metals. Thus, the sample size of soil samples for heavy metal studies is reduced without a significant decrease in the representativeness of the final results, which determines the relevance of the studies performed. The purpose of the research is geoinformation mapping of the ecological and magnetic state of soils in the central part of the city of Krasnokamsk. The boundaries of research from the south are limited by the industrial zone of the city, which is mainly represented by pulp and paper industry enterprises. In the eastern part of the survey area, Zakamskaya CHPP-5 and a machine-building plant are located. The soil cover of Krasnokamsk is represented by urbanozems and technogenic surface formations. The total number of magnetic susceptibility measurement points was 77, and heavy metals were determined in 10 samples. During processing spatial data, the methods of mathematical-cartographic modeling, spatial overlay and binary classification were used. The interpolation was performed by the geostatistical method ordinary kriging using the Spatial Analyst tool of the ArcGIS 10.8 program. The creation of the Web GIS "Geoinformation system of magnetic susceptibility and heavy metals in the soils of Krasnokamsk" was performed on the basis of QGIS open geotechnologies using the qgis2web tool, the VS Code code editor. The Web GIS is hosted on the free GitHub platform. Based on the results of mapping, soil contamination with nickel and copper was established. The total area of pollution was 0.55 km².

KEYWORDS: magnetic susceptibility of soils, geoinformation mapping, soil pollution with heavy metals

ВВЕДЕНИЕ

Город Краснокамск является частью Пермской городской агломерации и имеет в своем составе множество промышленных предприятий. В связи с этим почвенный покров территории города испытывает загрязнение. Устойчивый след техногенного загрязнения в почве оставляют тяжелые металлы [Чевычелов и др., 2021; Da Silva Júnior et al., 2021]. Проведение оценки загрязнения почв тяжелыми металлами на значительных по площади городских территориях является дорогостоящим мероприятием. В связи с этим для диагностики пространственного распределения загрязняющих веществ применяется магнитометрическая съемка, которая основана на полевом измерении объемной магнитной восприимчивости почв по регулярной сети точек, установленной в соответствии с заданным масштабом. Магнитная восприимчивость почв — это физическое свойство почвы

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

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

³ FSBEI HE "Perm State Agro-Technological University named after academician D.N. Pryanishnikov", 23, Petropavlovskaya str., Perm, 614990, Russia, e-mail: rmv11@mail.ru

намагничиваться в условиях внешнего магнитного поля [Бабанин и др., 1995]. Значения магнитной восприимчивости коррелируют с концентрацией в почве техногенных магнитных частиц, являющихся носителями тяжелых металлов [Решетников, Добролюбова, 2009]. Пространственное моделирование восприимчивости позволяет сформировать ареалы эколого-магнитного состояния почв [Scholger et al., 2002; Kirana et al., 2021; Wang et al., 2021; Marques et al., 2023; Mondal et al., 2023], а карта этого показателя представляет рабочую основу для отбора проб в которых определяется концентрация тяжелых металлов. В связи с этим почвенные образцы исследуются не по регулярной сетке с большим числом точек, а выборочно — на участках с разным уровнем магнитного состояния почв. Таким образом, снижается объем выборки почвенных образцов для лабораторного определения тяжелых металлов без существенного уменьшения представительности итоговых результатов, что определяет актуальность выполненных исследований.

Целью настоящих исследований стало геоинформационное картографирование эколого-магнитного состояния почв центральной части г. Краснокамска.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследований выбрана центральная часть г. Краснокамска (рис. 1). Границы исследований с юга граничат с промышленной зоной города, которая в основном представлена предприятиями целлюлозно-бумажной промышленности: Краснокамский целлюлозно-бумажный комбинат, Краснокамская Бумажная фабрика Гознака, а также Краснокамский завод металлических сеток. В восточной части области обследования расположена Закамская ТЭЦ-5 и машиностроительный завод. Почвенный покров г. Краснокамска представляют урбаноземы супесчаные и песчаные, урбодерново-подзолистые супесчаные и песчаные на древнеаллювиальных отложениях долины р. Камы. Площадь исследований составляет 3,7 км² или 21 % от всей площади г. Краснокамска.

Инструментальные исследования включали измерение объемной магнитной восприимчивости (ОМВ) почв и определение концентрации тяжелых металлов (ТМ). Магнитная восприимчивость определялась на местности чешским прибором «Каппаметр КТ-6» в июне 2020 г. по заранее установленным точкам основных улиц города. Навигация по точкам на местности осуществлялась при помощи приложения Next GIS Mobile. Общее число точек равно 77. Каждая из точек представляет наблюдательную площадку размером 5x5 м, на которой методом конверта ОМВ измерялась в пяти точках. Схема расположения наблюдательных площадок представлена на рис. 1.

Схема отбора почвенных образцов для определения концентрации тяжелых металлов основана на карте, построенной по результатам измерения восприимчивости почв — точки местоположения проб располагались по ареалам разных градаций ОМВ. При этом выделено 5 градаций, которые были установлены методом классификации раstra ОМВ «Естественные интервалы». Таким образом, было выбрано 10 площадок, на которых методом конверта проведен пробоотбор для определения концентрации ТМ. Образцы были взяты из слоя 0–5 см. В лаборатории определены подвижные формы элементов (Ni, Cu, Zn, Pb, извлеченные ацетатно-аммонийным буферным раствором). Интерпретация полученных результатов проведена по ГН 2.1.7.2041-06 (ПДК)¹.

При обработке пространственных данных использовались методы математико-картографического моделирования, пространственного оверлея и бинарной классификации. Пространственная интерполяция выполнена геостатистическим методом

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»

обычного кригинга (ordinary kriging) инструментом «Spatial Analyst» программы ArcGIS 10.8. Создание Веб-ГИС «Геоинформационная система магнитной восприимчивости и тяжелых металлов в почвах г. Краснокамск» выполнено на основе открытых геотехнологий QGIS с использованием инструмента qgis2web и редактора кода VS Code. Хостинг Веб-ГИС осуществлен на бесплатной платформе GitHub.

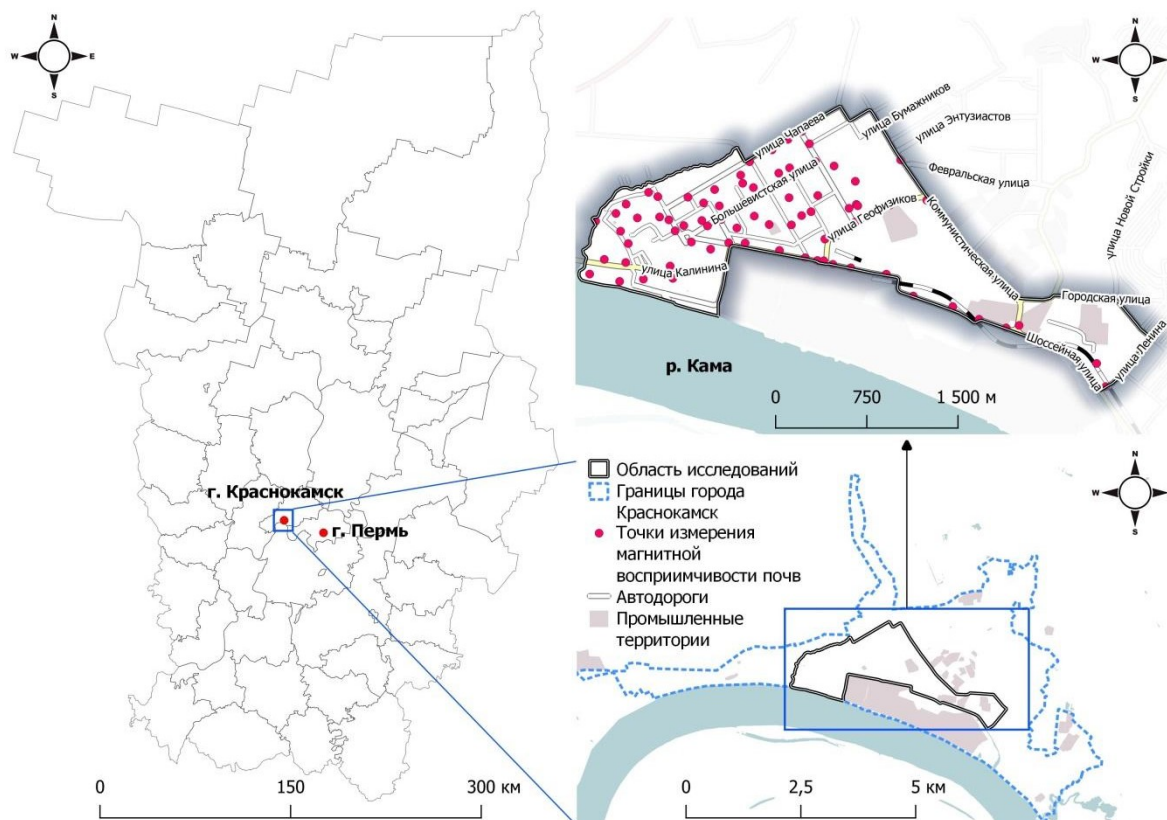


Рис. 1. Местоположение территории исследований
Fig. 1. Location of the study area

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Магнитная восприимчивость почв г. Краснокамска изменяется в интервале: от $0,3 \times 10^{-3}$ СИ (придомовая территория, ул. Комарова 9) до $13,3 \times 10^{-3}$ СИ (окрестности тепличного комбината по ул. Геофизиков, на расстоянии 370 м от ТЭЦ-5 и 580 м от завода металлических сеток) (табл. 1). Среднее равно $2,1 \times 10^{-3}$ СИ, т. е. в 3,5 р. превышает фоновые значения для зональных дерново-подзолистых почв [Васильев, Лобанова, 2015]. На площади исследования восприимчивость имеет недостаточную однородность, а среднее и медиана значительно отличаются, что не соответствует нормальному распределению. Поэтому при геостатистическом моделировании ОМВ в среде Spatial Analyst была проведена дополнительная трансформация данных по методу нормальных меток.

В результате интерполяции получен геостатистический растр, который классифицирован на 5 градаций по методу «Естественные интервалы». Способ естественных границ позволяет визуализировать результаты интерполяции так, чтобы сгруппировать близкие по значениям данные. Таким образом, сформирована шкала, которая была использована для визуализации объемной магнитной восприимчивости почв (табл. 2, рис. 2).

Табл. 1. Описательная статистика магнитной восприимчивости почв, 10^{-3} СИ ($n = 77$)
 Table 1. Descriptive statistics of soil magnetic susceptibility, 10^{-3} SI ($n = 77$)

Значения статистических показателей				Стандартное отклонение	Вариативность
мин	макс	среднее	медиана		
0,3	13,3	2,1	1,5	1,99	36

Табл. 2. Шкала объемной магнитной восприимчивости почв г. Краснокамск
 Table 2. Scale of volumetric magnetic susceptibility of soils of Krasnokamsk town

Номер группы	Цвет окраски	Градации ОМВ почв	Интервалы значений ОМВ, 10^{-3} СИ
1	Синий	Низкая	<1,72
2	Зеленый	Средняя	1,72–3,34
3	Желтый	Повышенная	3,34–5,14
4	Оранжевый	Высокая	5,14–7,76
5	Красный	Очень высокая	>7,76

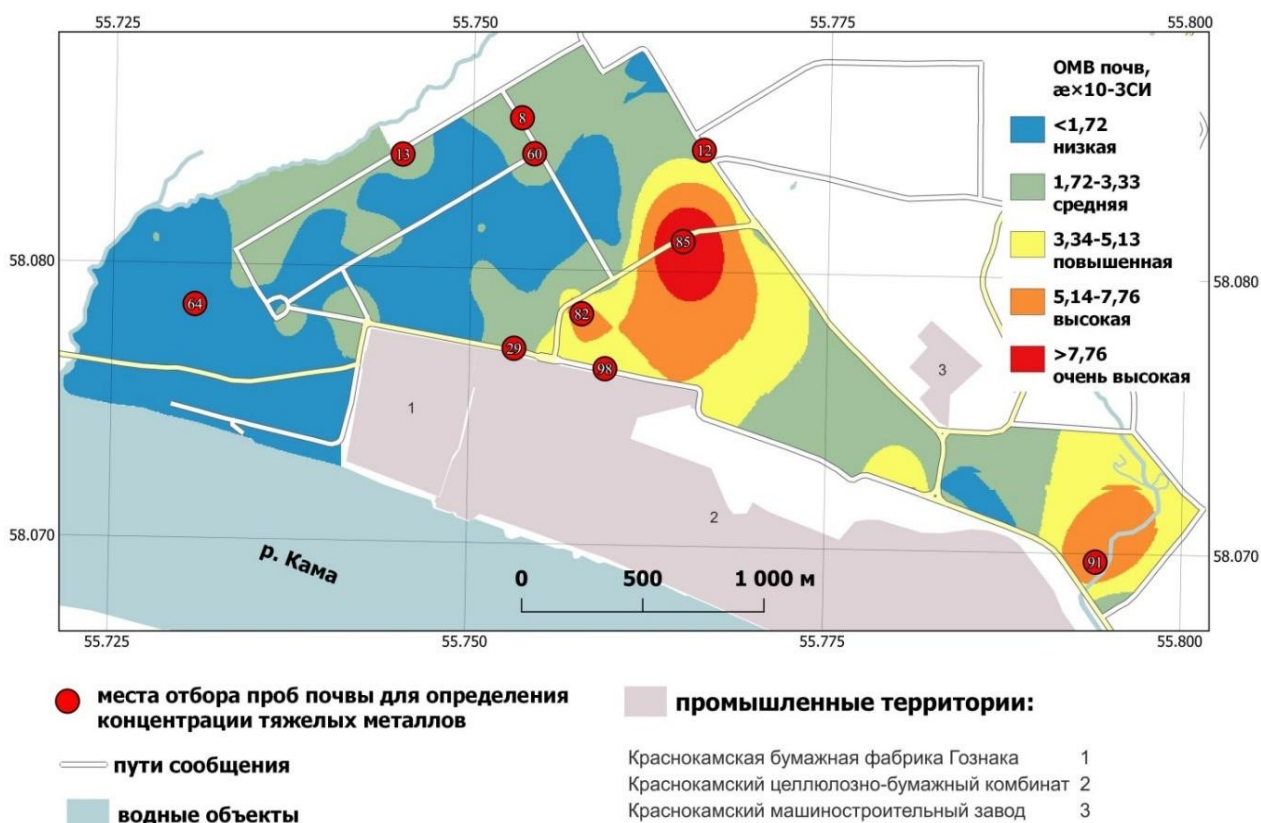


Рис. 2. Карта объемной магнитной восприимчивости почв г. Краснокамск
 Fig. 2. Magnetic susceptibility map of soils of Krasnokamsk town

Подсчет площадей показал, что на обследованной территории преобладают почвы с низкой и средней магнитной восприимчивостью (табл. 3).

Табл. 3. Площади почв с разным уровнем магнитной восприимчивости
 Table 3. Soil areas with different levels of magnetic susceptibility

Номер группы	Градации объемной магнитной восприимчивости почв	Площадь, км ²	Среднее значение в области
1	Низкая	1,4799	1,07
2	Средняя	1,2047	2,38
3	Повышенная	0,5688	4,28
4	Высокая	0,3669	6,01
5	Очень высокая	0,0872	9,37

Карта магнитной восприимчивости почв являлась основой выбора мест отбора почвенных образцов для определения в них концентрации тяжелых металлов. На карте нами выбрано 10 точек, соответствующих ареалам разной магнитной восприимчивости почвы: точки под номерами 13 и 64 на участках низкой восприимчивости; пробы 8, 29, 60 отобраны в области средней ОМВ; внутри ареалов повышенной магнитной восприимчивости взяты образцы под номерами 12 и 98; а территории высокой и очень высокой ОМВ охарактеризованы образцами 82, 91 и 85 соответственно (рис. 2). Результаты анализа элементов в образцах приведены в таблице 4.

Табл. 4. Подвижные формы тяжелых металлов (мг/кг) в слое 0–5 см почв с разной объемной магнитной восприимчивостью (ОМВ), $\times 10^{-3}$ СИ
 Table 4. Gross content of heavy metals (mg/kg) in the 0–5 cm layer of soils with different volumetric magnetic susceptibility, $\times 10^{-3}$ SI

Элемент/ОМВ	Номер образца										ПДК
	8	12	13	29	60	64	82	85	91	98	
ОМВ	2,4	2,6	3,6	3,2	3,1	3,4	7,6	13,3	7,8	3,9	–
Ni	0,4	1,0	0,5	1,3	1,4	1,6	3,7	0,6	4,5	0,5	4
Cr	–	–	–	0,1	–	0,0	0,1	–	0,2	–	6
Cu	1,0	0,5	0,8	1,2	1,3	0,3	0,0	0,6	4,9	2,0	3
Zn	0,5	0,6	1,2	1,8	2,0	0,3	0,0	0,5	0,7	–	23
Pb	1,9	1,6	2,0	1,4	1,7	1,4	1,4	0,9	2,2	0,6	20
Mn	34,1	17,0	19,8	19,9	22,5	21,7	19,7	6,8	32,8	6,1	1500

Из данных таблицы 4 видно, что на участке с высокой магнитной восприимчивостью, охарактеризованном образцом 91, почвы загрязнены никелем и медью. Концентрация тяжелых металлов в образце 85, имеющем максимальную восприимчивость, находится на уровне образцов с низкой ОМВ. На данном участке расположен тепличный комбинат, где образование магнетита, обуславливающего высокие значения ОМВ, вероятно, имеет биогенное происхождение. Результаты математико-картографического моделирования концентрации тяжелых металлов для наглядности визуализированы относительно ПДК и представлены на рисунке 3.

По результатам картографирования тяжелых металлов, в восточной части города установлен участок загрязнения почвы с превышением ПДК по никелю и меди. Общая площадь загрязнения равна 0,55 км². Карта загрязненного участка представлена на рисунке 4. В его границах расположены производственные корпуса промышленных предприятий и территория «Нефтехимпром». Наложение границ загрязненного участка на карту магнитной восприимчивости почв свидетельствует о преобладании почв с повышенной и высокой магнитной восприимчивостью. Статистические показатели магнитной восприимчивости почв участка загрязнения представлены в таблице 5.

Из приведенной таблицы видно, что область загрязнения почв в среднем имеет повышенные значения восприимчивости.

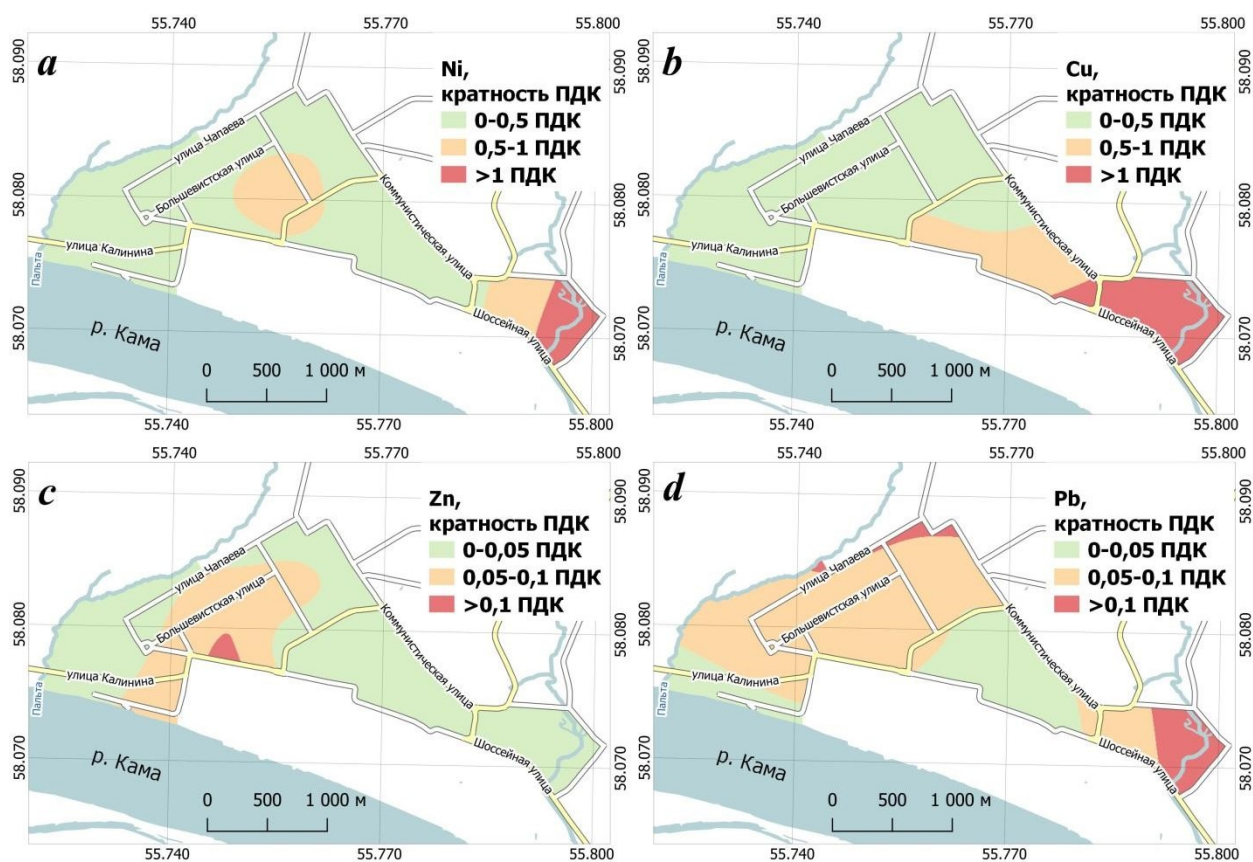


Рис. 3. Концентрация тяжелых металлов в почвах г. Краснокамск относительно ПДК:

a — Ni; b — Cu; c — Zn; d — Pb

Fig. 3. The concentration of heavy metals in the soils of Krasnokamsk:

a — Ni; b — Cu; c — Zn; d — Pb

Табл. 5. Описательная статистика магнитной восприимчивости почв загрязненного участка, 10^{-3} СИ ($n = 77$)

Table 5. Descriptive statistics of the magnetic susceptibility of soils in the contaminated area, 10^{-3} SI ($n = 77$)

Значения статистических показателей				Стандартное отклонение
мин	макс	среднее	медиана	
1,5	7,8	3,8	4,3	1,43

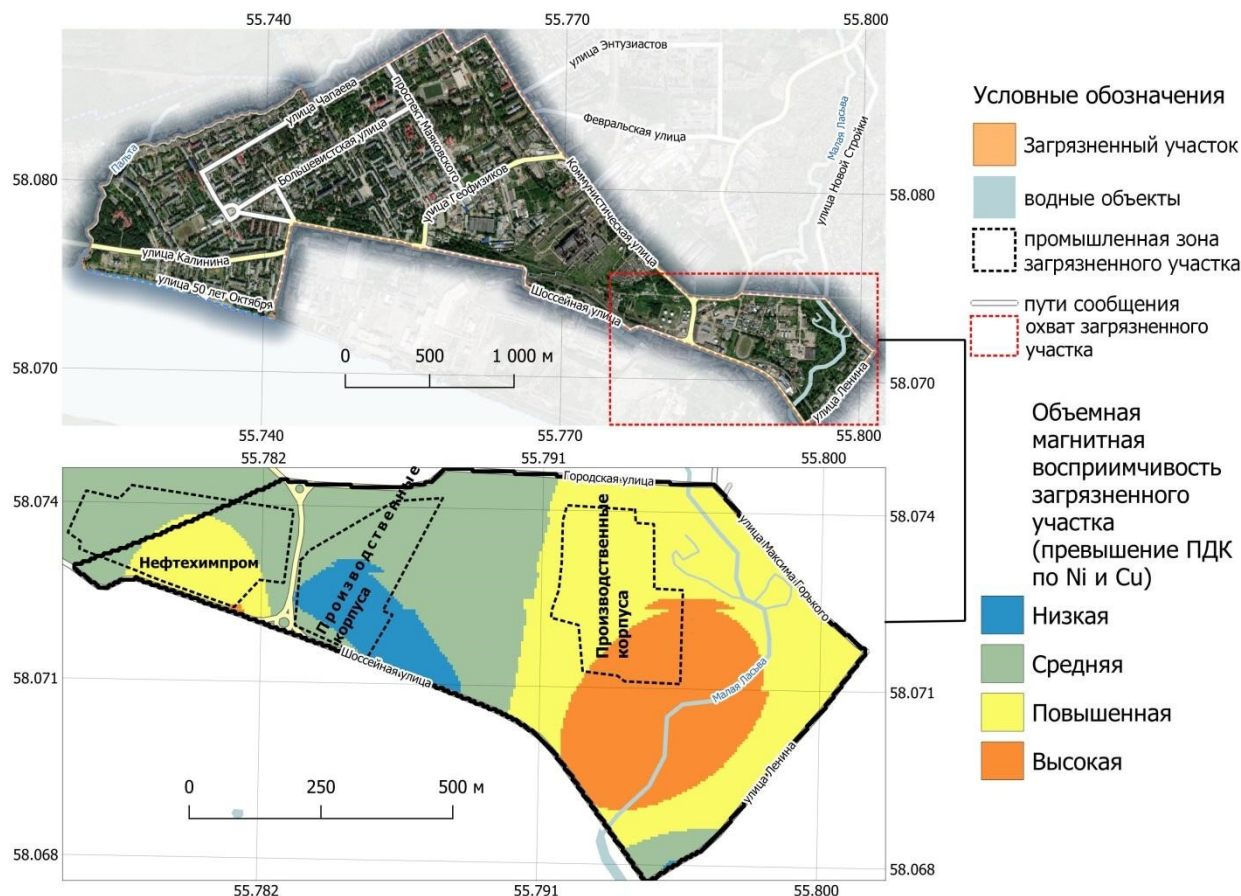


Рис. 4. Местоположение и восприимчивость участка загрязненных почв
 Fig. 4. Location and soil susceptibility of contaminated soils

Обобщение результатов исследования эколого-магнитного состояния почв отражает разработанная Веб-ГИС «Геоинформационная система магнитной восприимчивости и тяжелых металлов в почвах г. Краснокамск» с открытым доступом. Данная веб-карта является способом сочетания методов геостатистики и визуализации [Молокина, Колесников, 2021] и представляет собой набор геоэкологических карт и точечных данных в виде одного сайта. При создании интернет-карты проведена разработка клиентской части веб-приложения с использованием интерфейсов Leaflet [Абдуллин, Пономарчук, 2020]. Основным программным инструментом является плагин из официального репозитория QGIS — qgis2web. При помощи данного модуля из ГИС-проекта создан шаблон сайта. Затем он доработан при помощи HTML/CSS-редактирования: дополнен заголовком, общими улучшениями всплывающий окон атрибутивной информации и кнопками скачивания дополнительных данных (исходного ГИС-проекта в формате QGIS, таблица аналитических данных) (рис. 5). Размещена веб-ГИС на платформе GitHub, которая предоставляет бесплатное серверное пространство. Веб-карта имеет функцию геопозиционирования, что позволяет на местности осуществлять навигацию по различным участкам эколого-магнитного состояния почв. Доступ к данным организован по адресу — <https://chascshin.github.io/Krasnokamsk-GIS>.

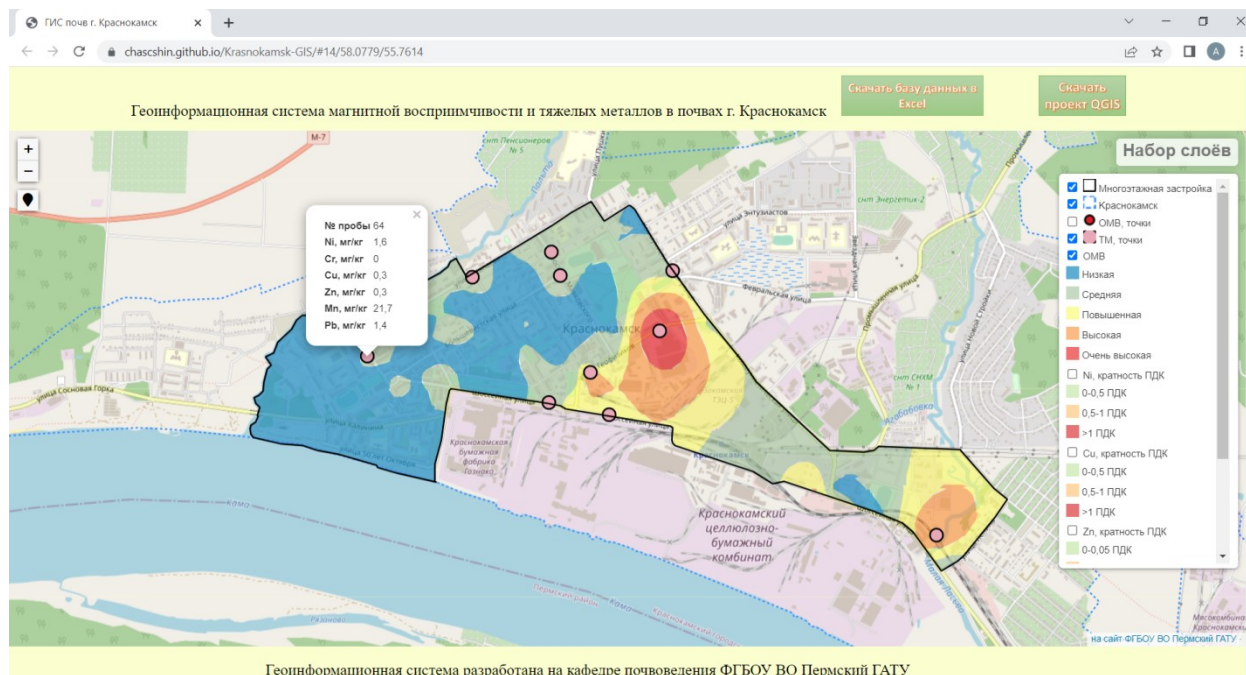


Рис. 5. Внешний вид веб-приложения после редактирования HTML-кода (размещено на GitHub)

Fig. 5. The appearance of the web application after editing the HTML code (hosted on GitHub)

ВЫВОДЫ

Среднее значение магнитной восприимчивости почв г. Краснокамска превышает фоновый уровень в 3,5 р. Пространственный анализ наложения геостатистического растра восприимчивости на топографическую основу «openstreetmap» свидетельствует о взаимосвязи участков высоких и очень высоких значений с местоположением промышленных объектов: ТЭЦ, завод металлических сеток, тепличный комбинат, «НефтеХимПром» и автодорогами регионального значения: улицы Коммунистическая и Геофизиков. Восточная часть города загрязнена никелем и медью. Площадь загрязнения составила 0,55 км². Внутри загрязненного тяжелыми металлами участка расположены промышленные объекты, а магнитная восприимчивость имеет повышенные значения.

Полученный по результатам исследований набор геоинформационных слоев был обобщен в формате Веб-ГИС. Созданный сайт открывает доступ к картам пространственного распределения магнитной восприимчивости почв и концентрации тяжелых металлов, а также содержит точки с атрибутами измерений и результатами лабораторных исследований. Таким образом, проведенное веб-картографирование, представляет собой компактную геовизуализацию многочисленного набора пространственных геоэкологических данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абдуллин Р.К., Пономарчук А.И. Технологии интернет-картографирования: учебное пособие. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2020. 132 с.

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.

Васильев А.А., Лобанова Е.С. Магнитная и геохимическая оценка почвенного покрова урбанизированных территорий Предуралья на примере города Перми. Пермь: Пермская ГСХА, 2015. 243 с.

Молокина Т.С., Колесников А.А. Анализ состояния и перспективы развития визуализации пространственных данных. Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий), 2021. Т. 26. № 4. С. 73–82.

Решетников М.В., Добролюбова Н.В. Магнитная восприимчивость и концентрация тяжелых металлов в почвах урбанизированных территорий (на примере г. Саратова). Цветные металлы, 2009. № 11. С. 15–18.

Чевычелов А.П., Алексеев А.А., Кузнецов Л.И. Использование показателя магнитной восприимчивости почв для оценки экологического состояния почвогрунтов г. Якутска. Природные ресурсы Арктики и Субарктики, 2021. Т. 26. № 1. С. 78–92.

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. V. 26. DOI: 10.1016/j.geodrs.2021.e00418.

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. V. 873. No. 1. DOI: 10.1088/1755-1315/873/1/012016.

Marques J., Ribeiro J., Mansilha C., Melo A., Fonseca R., Sant'Ovaia H., Flores D. Geochemistry of soils from the surrounding area of a coal mine waste pile affected by self-burning (Northern Portugal). Minerals, 2023. V. 13. No. 1. P. 28. DOI: 10.3390/min13010028.

Mondal S., Chatterjee S., Maity R., Gain D., Mazumdar D. Imprints of vehicular pollution in roadside dust from Kolkata, India: Insights from magnetic susceptibility, geo-statistical and SEM studies. Current Science, 2023. V. 124. No. 1. P. 56–62.

Scholger P., Hanesch M., Scholger R. Mapping of heavy metal loadings in soils by means of magnetic susceptibility measurements. Environmental Geology, 2002. No. 42. P. 857–870.

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. V. 18. No. 4. 1681 p. DOI: 10.3390/ijerph18041681.

REFERENCES

Abdullin R.K., Ponomarchuk A.I. Internet mapping technologies: Tutorial. Perm: Perm State National Research University, 2020. 132 p. (in Russian).

Babanin V.F., Trukhin V.I., Karpachevskij L.O., Ivanov A.V., Morozov V.V. Soil magnetism. Yaroslavl: Yaroslavl State University, 1995. 223 p. (in Russian).

Chevchelov A.P., Alekseev A.A., Kuznetsov L.I. Using the indicator of the magnetic susceptibility of soils to assess the environmental state of the soil of Yakutsk. Natural resources of the Arctic and Subarctic, 2021. V. 26. No. 1. P. 78–92 (in Russian).

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. V. 26. DOI: 10.1016/j.geodrs.2021.e00418.

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. V. 873. No. 1. DOI: 10.1088/1755-1315/873/1/012016.

Marques J., Ribeiro J., Mansilha C., Melo A., Fonseca R., Sant'Ovaia H., Flores D. Geochemistry of soils from the surrounding area of a coal mine waste pile affected by self-burning (Northern Portugal). *Minerals*, 2023. V. 13. No. 1. P. 28. DOI: 10.3390/min13010028.

Molokina T.S., Kolesnikov A.A. Analysis of the state and prospects for the development of visualization of spatial data. *Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT)*, 2021. V. 26. No. 4. P. 73–82 (in Russian).

Mondal S., Chatterjee S., Maity R., Gain D., Mazumdar, D. Imprints of vehicular pollution in roadside dust from Kolkata, India: insights from magnetic susceptibility, geo-statistical and SEM studies. *Current Science*, 2023. V. 124. No. 1. P. 56–62.

Reshetnikov M.V., Dobrolyubova N.V. Magnetic susceptibility and concentration of heavy metals in soils of urban areas (on the example of Saratov). *Tsvetnye Metally*, 2009. No. 11. P. 15–18 (in Russian).

Scholger P., Hanesch M., Scholger R. Mapping of heavy metal loadings in soils by means of magnetic susceptibility measurements. *Environmental Geology*, 2002. No. 42. P. 857–870.

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: Perm State Agricultural Academy, 2015. 243 p. (in Russian).

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. V. 18. No. 4. 1681 p. DOI: 10.3390/ijerph18041681.
