

УДК: 631.437

DOI: 10.35595/2414-9179-2025-2-31-399-407

А. А. Алексеев¹

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ДЛЯ СОСТАВЛЕНИЯ КАРТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ ГОРОДСКИХ ПОЧВ ЯКУТИИ

АННОТАЦИЯ

Актуальность проведенной работы заключается в необходимости постоянного мониторинга состояния природных сред ввиду увеличивающейся индустриализации в городах Республики Саха (Якутии). Особенно актуально данное исследование из-за увеличения антропогенного воздействия на достаточно небольшой территории этих городов. Тяжелые металлы в виде выбросов промышленности и автотранспорта, оседая на поверхность городских почв вместе с пылью, попадают в организм человека. Целью явилось определение степени техногенного загрязнения почвенного покрова на исследуемых территориях с помощью геоинформационных систем (ГИС-технологий). В работе была использована каппаметрия городских почв как прогнозно-поисковый способ выявления присутствия тяжелых металлов в почве. Полученные данные были статистически обработаны, определены средние величины и степени их вариабельности. При построении карт были использованы ГИС-технологии посредством программного обеспечения QGIS версии 3.20. Представлены результаты измерения объемной магнитной восприимчивости поверхности почв на территории г. Якутска (295 точек), г. Алдана (232 точек) и г. Нерюнгри (49 точек). Были определены средние, минимальные и максимальные значения магнитной восприимчивости городских почв. Территории с высокой автомобильной загруженностью, как и территории вблизи промышленных предприятий характеризуются повышенными значениями магнитной восприимчивости почв. С помощью статистических методов интерпретации данных, были выявлены коэффициенты вариации, пределы полученных данных. Построенные карты-схемы пространственного распределения максимумов магнитной восприимчивости показали, что территории, прилегающие к автострадам и улицам с интенсивным автомобильным трафиком, могут считаться наиболее загрязненными тяжелыми металлами. В данном случае ГИС-технологии наглядно отражают территории, которые нуждаются в повышенном внимании для решения проблем с тяжелыми металлами в почве.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: городские почвы, экологическая оценка, магнитная восприимчивость, картография, ГИС

¹ Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, пр-т Ленина, д. 41, Якутск, Россия, 677027,
e-mail: alex3.fromru@gmail.com

Aleksey A. Alekseev¹

USE OF MAGNETIC SUSCEPTIBILITY INDEX FOR MAPPING HEAVY METAL POLLUTION OF URBAN SOILS IN YAKUTIA

ABSTRACT

The relevance of this work lies in the need for continuous monitoring of the state of natural environments in view of increasing industrialization in the cities of the Republic of Sakha (Yakutia). This study is especially relevant due to the increase in anthropogenic impact on a fairly small territory of these cities. Heavy metals in the form of industrial and motor transport emissions fall on the surface of urban soils together with dust into the human body. The aim was to determine the degree of anthropogenic pollution of soil cover in the studied territories with the help of geographic information systems (GIS-technologies). In this work we used the urban soil kappametry as a predictive and search method for detecting the presence of heavy metals in soil. The obtained data were statistically processed, average values and degrees of their variability were determined. GIS-technologies through QGIS 3.20 software were used for map construction. The results of measuring the volumetric magnetic susceptibility of soil surface in the territory of Yakutsk (295 points), Aldan (232 points) and Neryungri (49 points) are presented. Average, minimum and maximum values of magnetic susceptibility of urban soils were determined. The territories with high automobile traffic as well as territories near industrial enterprises are characterized by increased values of soil magnetic susceptibility. With the help of statistical methods of data interpretation, coefficients of variation, limits of the obtained data were revealed. The constructed maps-charts of spatial distribution of magnetic susceptibility maxima showed that the territories adjacent to highways and streets with intensive automobile traffic can be considered as the most polluted with heavy metals. In this case, GIS-technologies clearly reflect the areas that need increased attention to address heavy metal problems in the soil.

KEYWORDS: urban soils, environmental assessment, magnetic susceptibility, cartography, GIS

ВВЕДЕНИЕ

Основным аспектом влияния урбанизации на городские почвы является изменение состава городских почв и ее структуры. Различные отходы строительства, антропогенные загрязнители в виде промышленных выбросов, автомобильный транспорт и бытовые отходы как источник загрязнения содержат тяжелые металлы, химикаты и другие загрязнители, которые могут накапливаться в городских почвах. Эти загрязнения оказывают негативное воздействие на экосистему и здоровье человека ввиду их способности к накоплению в почве. Однако при должном управлении и внедрении устойчивых практик существует возможность минимизировать негативное влияние и сохранить особую экосистему, которую предоставляют почвы. Необходим постоянный мониторинг, научные исследования и внедрение экологически ответственных решений для сохранения здоровья городских почв.

Необходимость составления карт экологического мониторинга и оценки степени антропогенного воздействия для принятия решений по охране окружающей среды является причиной широкого использования ГИС-технологий. Используя полученные карты мониторинга, специалисты могут анализировать, какие районы подвержены наибольшему риску и разрабатывать меры по смягчению последствий. Применение ГИС-технологий

¹ Institute of Biological Problems of Cryolithozone of SB of Russian Academy of Sciences, 41, Lenina str., Yakutsk, 677027, Russia, e-mail: alex3.fromru@gmail.com

делает этот процесс более точным. Важно продолжать развивать методы мониторинга и вовлекать общественность в процесс защиты окружающей среды, чтобы гарантировать сохранение природы для будущих поколений.

С целью изучения степени антропогенного влияния нами были изучены городские почвы посредством измерения их магнитной восприимчивости. Известно, что при высоких концентрациях ТМ (тяжелых металлов) в почве увеличивается показатель МВ (магнитная восприимчивость) почвы. Причина повышенной магнитной восприимчивости городских почв — обогащение их техногенным магнетитом, маггемитом, металлическим железом, магнезиоферритом [Водяницкий, Шоба, 2015]. В связи с высокой степенью корреляции МВ и содержанием в городских почвах ТМ, полученные данные по МВ почв используют для выявления источников загрязнения и составления карт распространения загрязнений. Таким способом получены карты МВ для целых стран: Польши, Англии [там же].

Целью данной работы явилось определить возможность использования полученных данные по МВ почв для составления карт антропогенного загрязнения в городах Якутск, Алдан и Нерюнгри. Каждый город характеризуется разной степенью промышленного освоения и природных условий. Якутск находится в долине р. Лены в Центральной Якутии (абс. высота 101 м), Алдан — на территории хребтов Алданского нагорья (абс. высота 650 м), Нерюнгри расположен в Южной Якутии в Чульманском низкогорье с абс. высотой 850 м.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Почвоведы измеряют магнитную восприимчивость как в поле, так и в лаборатории. В первом случае компактным измерителем определяют объемную магнитную восприимчивость (ОМВ). Во втором — величину удельной магнитной восприимчивости (УМВ) на стационарном приборе каппа-бридж [Водяницкий, Шоба, 2015]. Для определения ОМВ почв мы использовали каппаметр КМ-7 чешского производства фирмы StatisGeo. Прибор характеризуется высокой чувствительностью 10^{-6} ед. СИ. На территории городов точки измерения были выбраны по произвольной сетке, при этом особое внимание уделялось территориям вдоль улиц и дорог с высокой интенсивностью движения и промышленных предприятий. Выбирались точки определения и с невысокой интенсивностью движения внутри городских кварталов для сравнения. В точках, составляющих сеть мониторинговых наблюдений, измерения ОМВ проводились в 3-кратной повторности с площади поверхности почвогрунтов размером 1×1 м (1 м^2). Всего было получено 295 средних значений в Якутске, в Алдане — 238 точек и в Нерюнгри — всего 49 точек. Измерения были проведены в один месяц, но в разные годы в период с 2020–2024 гг. Магнитная съемка всех отобранных образцов почв на основе запатентованной методики [Лобанова, 2013] как экспресс-метод пользуется актуальностью и применяется многими учеными для характеристики трансформации почвенного покрова в процессе техногенного загрязнения не только на территории РФ¹, но и в городах других стран [Busko et al., 2010].

Несмотря на географические различия почвообразующих пород данных городов, все они подвергаются сильному техногенному воздействию. Якутск — крупный город с населением 332 тыс. чел. и с площадью 122 км^2 — является столицей Республики Саха (Якутия). Алдан и Нерюнгри являются промышленными городами Южной Якутии.

Для точек измерения ОМВ почвы мы определяли его GPS-координаты. Все величины вносились в таблицу Excel с расширением .csv, которая используется в QGIS 3.20 для построения точек на карте вместе со значениями ОМВ почвы. Далее, выбрав наиболее подходящий метод визуализации, в данном случае методом Heatmap, мы определили

¹ Патент Рос. Федерация № 2133487; Заявл. 08.01.1998; Оpubл. 20.07.1999, Бюл. № 9. 6 с.

области максимумов ОМВ почв на выбранной территории. QGIS 3.20 позволяет выбрать уровень детализации и масштаба, необходимые для различных целей.

Выбором цветовой палитры на карте достигается ясная и понятная визуализация градации величин высоких показаний ОМВ почвы на изучаемой территории.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследований были построены карты-схемы распространения и локаций высоких показаний ОМВ почвы. Высокие показания ОМВ во всех исследуемых территориях были преимущественно получены вдоль автомобильных внутригородских и пригородных дорог и трасс, а также на центральных перекрестках улиц. На дворовых территориях данных муниципальных образований, на менее загруженных улицах и в «зеленой» зоне значения ОМВ почв были значительно меньше. Распределение показаний в г. Якутске показано на рис. 1. Здесь явно выражены локации с высокими значениями ОМВ почв на интенсивно используемых перекрестках улиц. Высокие показания возле Парка культуры и отдыха обнаружены на месте вывоза снега с городской территории муниципальными службами.

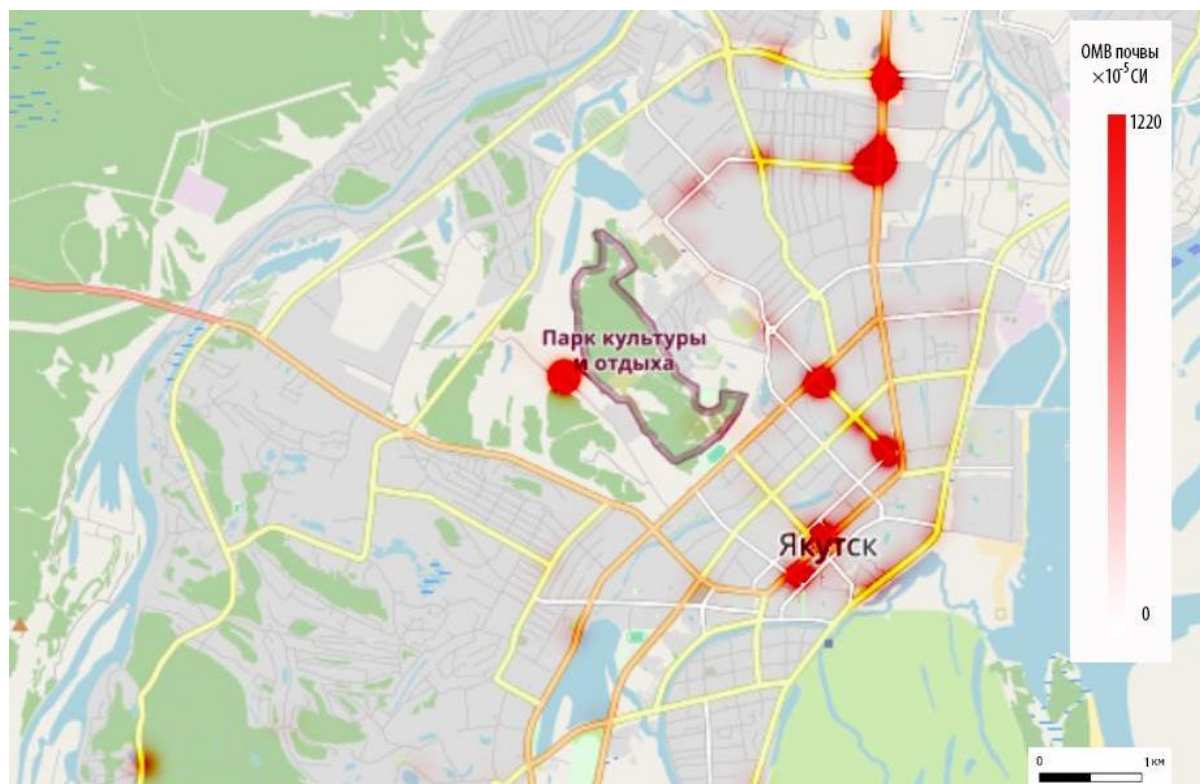


Рис. 1. Пространственное распределение высоких значений ОМВ почв в центральной части г. Якутска (июль 2020 г.)

Fig. 1. Spatial distribution of high MS of soil values in the central part of Yakutsk city (July 2020)

Величины ОМВ почвогрунтов г. Якутска изменяются с минимальных значений, равных $17,0 \times 10^{-5}$ ед. СИ до максимальных $1\,220,0 \times 10^{-5}$ ед. СИ при среднем значении 162×10^{-5} ед. СИ. Предел изменения данного показателя составляет почти три порядка величин (10^3), что указывает на высокую его вариабельность (коэффициент вариации равен 66 % ($V = 66\%$)). Самое высокое значение ОМВ почвы было отмечено нами на территории

металлобазы по ул. 50 лет Советской Армии и составляло $1\,220,0 \times 10^{-5}$ ед. СИ. Среднее значение ОМВ почвогрунтов г. Якутска сопоставимо с таковыми, определенными для отдельных промышленных районов г. Москвы ($160\text{--}180 \times 10^{-5}$ ед. СИ), г. Перми ($183,0 \times 10^{-5}$ ед. СИ), г. Медногорска ($158,0 \times 10^{-5}$ ед. СИ), и в то же время значительно выше величин, полученных для крупных промышленно развитых городов Китая, таких как Ханьчжоу и Лоян ($128,0 \times 10^{-5}$ ед. СИ [Чевычелов и др., 2021]). В частности, установлено, что основой полиэлементной аномалией городских почв Якутска является скопление таких тяжелых металлов, как Pb, Zn, Cu и Ni [Сивцева, 2012].

Район исследования в г. Алдане в геоморфологическом отношении приурочен к южной части Лено-Алданского плато, сложенного кембрийскими осадочными карбонатными породами (доломиты, известняки, мергели), а в северной части — к Алданскому нагорью, образованному кислыми кристаллическими горными породами (граниты, гранитоиды, гнейсы). Климат исследуемого района может быть охарактеризован как континентальный, холодный и супергумидный. Расположение г. Алдана — $58^{\circ}41'$ с. ш., абсолютная высота составляет 676 м, среднегодовое количество осадков — 528 мм.

Значения ОМВ почв в г. Алдане находились в пределах от 25,0 до $982,0 \times 10^{-5}$ ед. СИ при среднем значении $388,0 \times 10^{-5}$ ед. СИ. Коэффициент вариации составил 66,4 %. Высокие пики ОМВ почвы были обнаружены в центре г. Алдана на ул. Кангаласской. Эта улица прежде являлась частью междугородней автомобильной трассы А-360. Позже трассу вывели за черту города. Минимальные значения выявлены в удалении от основных улиц. ОМВ почв снижалась до $50,8 \times 10^{-5}$ ед. СИ с увеличением расстояния от магистральной трассы А-360, повышенные значения ОМВ почвы отмечены на местах автостоянок, в данной случае возле микрорайона Солнечный (рис. 2).

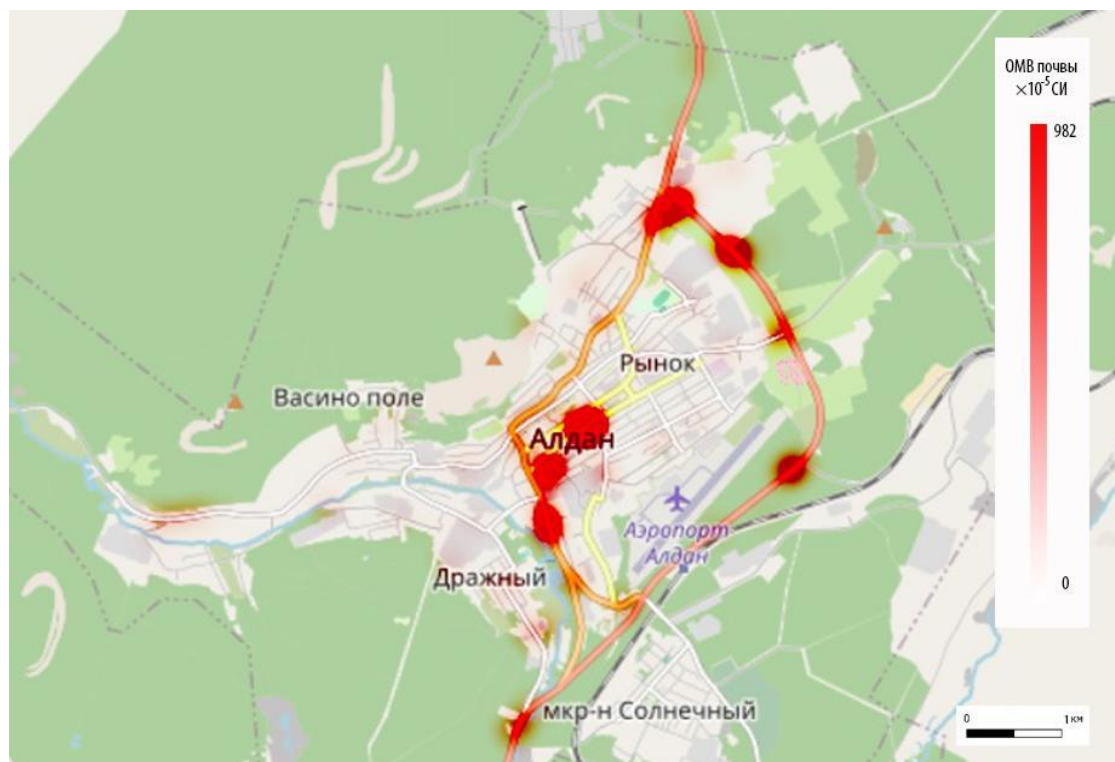


Рис. 2. Пространственное распределение высоких значений ОМВ почв в г. Алдане (июль 2022 г.)

Fig. 2. Spatial distribution of high MS of soil values in Aldan (July 2022)

В лаборатории геоэкологии Саратовского государственного университета предложили коэффициент магнитности (K_{mag}), связанный с МВ почвы. Так, при K_{mag} , равной 0–1, степень техногенной трансформации почвы является допустимой, 1–3 — умеренной, при 3–5 — опасной и при >5 — чрезвычайно опасной [Павлов и др., 2015]. В соответствии с данной шкалой мы рассмотрели весь массив данных ($n = 185$) по ОМВ почвогрунтов г. Алдана (табл. 1). При этом за фоновую величину ОМВ для г. Алдана мы приняли значение ОМВ, равное $100,0 \times 10^{-5}$ ед. СИ. Меньшая часть полученных данных по ОМВ исследуемых почвогрунтов (45 %) характеризует их степень техногенной трансформации как допустимую и умеренную, а большая часть (55 %) — как опасную и чрезвычайно опасную. Полученные данные показателя МВ почв и почвогрунтов г. Алдана показывают, что сильное загрязнение резко локализовано вдоль трассы А-360 при относительно низких значениях по всей территории города.

Величины ОМВ почвогрунтов г. Нерюнгри изменялись с минимальных значений, равных $92,0 \times 10^{-5}$ ед. СИ до максимальных — $872,0 \times 10^{-5}$ ед. СИ при среднем значении $318,5 \times 10^{-5}$ ед. СИ, коэффициент вариации — $V = 54,7$ %. Также значительно варьируются и средние величины ОМВ, полученные для почвогрунтов отдельных улиц и районов города, изменяясь в среднем от $173,0$ до $596,0 \times 10^{-5}$ ед. СИ (рис. 3).



Рис. 3. Пространственное распределение высоких значений ОМВ почв в г. Нерюнгри (июнь, 2024 г.)

Fig. 3. Spatial distribution of high MS of soil values in Neryungri (June, 2024)

Минимально загрязненными ТМ, помимо зеленых зон, оказались городские почвы ул. Ленина, пр-та Мира, ул. Карла Маркса, т. е. центральной части г. Нерюнгри. Здесь уровень техногенного загрязнения ТМ оказался ниже такового, характерного для города в

целом. И наоборот, степень техногенного загрязнения почвогрунтов ТМ оказалась выше средней по городу для таких улиц, как ул. Аммосова, Объездная автодорога, пр-т Геологов. Особенно высокие максимальные значения ОМВ ($756,1 \times 10^{-5}$ ед. СИ) были характерны для почвогрунтов ул. Аммосова и со значениями ОМВ ($872,0 \times 10^{-5}$ ед. СИ) для трассы Серебряный Бор – Нерюнгри, где отмечается интенсивное движение грузового транспорта.

Высокие показатели ОМВ фона г. Нерюнгри, по выбросам Нерюнгринской ГРЭС представлены следующими элементами: хром, никель, ванадий, кобальт, цирконий, олово, свинец, цинк и медь, являющиеся ТМ [Щелчкова, 1998]. Кроме того, в золе углей Нерюнгринского месторождения определено более 20 микроэлементов, из них относительно высокие концентрации наблюдаются у цинка, марганца, кобальта, титана и молибдена, коэффициенты концентрации которых составляют от 3,4 до 1,0 [Макаров и др., 1990].

Вариационно-статистический анализ полученных данных показал, что в пределах исследованных территорий значения ОМВ почвы изменяются в широких пределах с высокой степенью вариабельности (табл. 1).

Табл. 1. Статистические показатели ОМВ исследованных городских почв ($\times 10^{-5}$ СИ)
Table 1. Statistical parameters of MS of the studied urban soils ($\times 10^{-5}$ SI)

№ п/п	Название города	n	lim	$\bar{x} \pm Sx$	S	V
1	Якутск	295	1–1220	$162 \pm 6,21$	106	66
2	Алдан	232	175–756	$388 \pm 16,9$	257,7	66,4
3	Нерюнгри	49	92–872	$319 \pm 24,9$	174,3	54,7

Обозначения:

n — объем выборки;

lim — пределы изменения величины;

x — среднее значение;

S — стандартное отклонение;

Sx — ошибка среднего;

V — коэффициент вариации.

Результаты полученных значений ОМВ почв на картах мы сравнили с другими источниками исследований других авторов по городам Якутску и Нерюнгри [Сивцева и др., 2011], и они подтвердили локализацию распространения высоких показателей содержания ТМ. Все они четко привязаны к промышленным объектам и автомобильным дорогам с высокой интенсивностью движения, что еще раз подтверждает данные других исследований.

ВЫВОДЫ

В изученных городах показатели ОМВ фоновых почв и почв рядом с автомобильными дорогами изменяются в широких пределах, в результате чего на полученных картах участки с повышенными значениями ОМВ почв хорошо различаются. Исходя из того, что повышенные показания ОМВ почв приурочены к основным транспортно загруженным улицам, можно считать, что загрязнение почв ТМ здесь происходит в основном за счет аэротехногенного загрязнения автотранспортом.

Необходимо и дальше совершенствовать применение ГИС-технологий для учета и контроля за экологическими показателями состояния городских почв, в данном случае — чтобы отслеживать загрязнение тяжелыми металлами, для оперативной обработки результатов наблюдений. Такой подход применения капаметрии при картографировании

позволяет существенно сократить расходы на химические анализы, облегчая работу при оценке состояния почв.

ГИС предоставляет мощные инструменты для пространственного анализа данных, что позволяет выявлять закономерности, взаимосвязи и тенденции в распределении экологических показателей. В результате мы получаем наглядную картину, в нашем случае — карту территории города с областями повышенного содержания ТМ в почвах, которая легко воспринимается даже не специалистами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Водяницкий Ю. Н., Шоба С. А. Магнитная восприимчивость как индикатор загрязнения тяжелыми металлами городских почв (обзор литературы). Почвоведение, 2015. № 1. С. 13–20.

Лобанова Е. С. Магнитная восприимчивость и эколого-геохимическая оценка почвенного покрова урбанизированных территорий восточной окраины Русской равнины (на примере г. Перми). Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук. Уфа, 2013. 24 с.

Макаров В. Н., Федосеев Н. Ф., Федосеева В. И. Геохимия снежного покрова Якутии. Якутск: Институт мерзлотоведения СО АН СССР, 1990. 152 с.

Павлов П. Д., Букатин М. Д., Решетников М. В., Еремин В. Н. Состояние почвенного покрова в зоне влияния полигона твердых бытовых отходов (на примере Балаковского полигона Саратовской области). Аграрный научный журнал, 2015. № 2. С. 21–25.

Сивцева Н. Е. Экогеохимические особенности формирования урбаноземов в условиях криолитозоны (на примере г. Якутска). Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук. Якутск, 2012. 23 с.

Сивцева Н. Е., Легостаева Я. Б., Макаров В. С., Васильев Н. Ф. Экологическая оценка состояния территории г. Якутск по суммарному показателю загрязнения почвенного покрова. Вестник СВФУ, 2011. Т. 8. № 2. С. 30–35.

Чевычелов А. П., Алексеев А. А., Кузнецова 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.

Щелчкова М. В. Влияние выбросов Нерюнгринской ГРЭС на окружающую среду. Наука и образование. Якутск: Издательство ЯНЦ СО РАН, 1998. № 1. С. 120–124.

Bucko M. S., Magiera T., Pesonen L., Janus B. Magnetic, Geochemical, and Microstructural Characteristics of Road Dust on Roadsides with Different Traffic Volumes — Case Study from Finland. Water, Air and Soil Pollution, 2010. V. 209. P. 295–306.

REFERENCES

Bucko M. S., Magiera T., Pesonen L., Janus B. Magnetic, Geochemical, and Microstructural Characteristics of Road Dust on Roadsides with Different Traffic Volumes — Case Study from Finland. Water, Air and Soil Pollution, 2010. V. 209. P. 295–306.

Chevychelov A. P., Alekseev A. A., Kuznetsova L. I. Use of Magnetic Susceptibility Index of Soils to Assess the Ecological State of Soil in Yakutsk. Soil Magnetic Susceptibility Indicator for Assessing the Ecological State of Soil in Yakutsk. Arctic and Subarctic Natural Resources, 2021. V. 26. No. 1. P. 78–92 (in Russian).

Lobanova E. S. Magnetic Susceptibility and Ecological and Geochemical Assessment of the Soil Cover of the Urbanized Territories of the Eastern Edge of the Russian Plain (on the Example of

Perm). Author's abstract of the dissertation for PhD in biological sciences. Ufa, 2013. 24 p. (in Russian).

Makarov V. N., Fedoseev N. F., Fedoseyeva V. I. Geochemistry of the Snow Cover of Yakutia. Yakutsk: Institute of Permafrost Science of Siberian Branch of Academy of Sciences of USSR, 1990. 152 p. (in Russian).

Pavlov P. D., Bukatin M. D., Reshetnikov M. V., Eremin V. N. State of Soil Cover in the Zone of Influence of Solid Domestic Waste Landfill (on the Example of Balakovo Landfill Saratov Region). The Agrarian Scientific Journal, 2015. No. 2. P. 21–25 (in Russian).

Shchelchkova M. V. Impact of Neryungrinskaya HPP Emissions on the Environment. Science and Education. Yakutsk: Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1998. No. 1. P. 120–124 (in Russian).

Sivtseva N. E. Ecogeochemical Features of Urban Soils Formation in Cryolithozone Conditions (on the Example of Yakutsk). Author's abstract of the dissertation for PhD in Biological Sciences. Yakutsk, 2012. 23 p. (in Russian).

Sivtseva N. E., Legostaeva Y. B., Makarov V. S., Vasiliev N. F. Ecological Assessment of the State of the Territory of Yakutsk by the Total Indicator of Soil Cover Pollution. Vestnik of North-Eastern Federal University, 2011. V. 8. No. 2. P. 30–35 (in Russian).

Vodyanitsky Y. N., Shoba S. A. Magnetic Susceptibility as an Indicator of Heavy Metal Pollution of Urban Soils (Literature Review). Eurasian Soil Science, 2015. No. 1. P. 13–20 (in Russian).
