

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ГЕОГРАФИИ И ГЕОИНФОРМАТИКИ
Кафедра почвоведения и геоинформационных систем

МЕТЛИЦКИЙ
Илья Вячеславович

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ГИС-АНАЛИЗА НАКОПЛЕНИЯ
ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В РАСТИТЕЛЬНОСТИ ГОРОДОВ
(НА ПРИМЕРЕ Г. МОЛОДЕЧНО)**

Магистерская диссертация

Научный руководитель:

к.г.н, доцент

Карпиченко Александр Александрович

Допущен к защите

«___» _____ 2025 г.

Зав. кафедрой почвоведения и
геоинформационных систем,

к.с-х.н., доцент

Червань А.Н.

Минск, 2025

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Ключевые слова: ГИС-АНАЛИЗ, ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ, ФИТОМАССА, УРБОЛАНДШАФТЫ, ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ, МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ, ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ, ТЕХНОГЕННАЯ МИГРАЦИЯ, ЭКОЛОГИЯ ГОРОДОВ.

Цель работы – разработка ГИС-методики оценки миграции тяжелых металлов через фитомассу городских насаждений.

Объект исследования – древесная растительность г. Молодечно.

Предмет исследования – пространственные закономерности накопления тяжелых металлов (Cu, Pb, Mn, Ni, Cr, Ti, Sn) в листовой биомассе.

Методы исследования: литературный, сравнительного и системного анализа, описательный, описательной и параметрической статистики, картографический, полевой, спектрального анализа, математического моделирования, сравнительно-географический, индуктивный и дедуктивный.

Полученные итоги и их новизна. Предложен интегральный подход, объединяющий функциональное зонирование территории (как основу для анализа пространственной неоднородности распределения ТМ), методы математической статистики для выявления закономерностей в распределении ТМ, дистанционное зондирование в качестве исходных данных для определения фитомассы, модели глубокого обучения для определения высоты деревьев и сегментации крон по данным ДЗЗ. Подтверждена применимость модели HRCH при определении древесной биомассы для белорусских городов, классифицированы ложноположительные результаты сегментации и описана методика их удаления. Определена точность работы модели в различных функциональных зонах, где максимальная наблюдалась в зоне жилой многоэтажной застройки (IOU = 82.2 %, MAE высоты = 2.31 м), минимальная в усадебной зоне (IOU = 57.2 %, MAE = 4.05 м). Предложен новый показатель озелененности – отношение суммарной площади проекции крон (ППК) к площади функциональной зоны. Проведен факторный анализ, выявлены предполагаемые источники накопления Pb, Ti, Mn, Cr: для свинца таковым являются металлообрабатывающие промышленные предприятия на западе, наблюдается остаточное загрязнение вдоль основных транспортных осей; для Ti, Mn и Cr главным фактором можно считать неоднородность элементного состава подстилающих пород. Вычислен общий объем депонирования ТМ в листве и объем миграции с листовым опадом.

Рекомендации по использованию результатов работы. Результаты исследования могут быть использованы для интеграции данных ДЗЗ в системы экомониторинга, определения биомассы деревьев с целью вычисления объемов депонирования углерода в лесах. Возможно дообучение модели HRCH на данных белорусской системы ДЗЗ с целью повышения точности сегментации крон и определения высоты. Перспективным является использование моделей глубокого обучения для семантической сегментации крон отдельных деревьев и определения

их породы на основании материалов аэрофотосъемки с пространственным разрешением 0,01–0,15 м.

Связь работы с научными программами и темами. Диссертационная работа выполнялась в рамках НИР «Факторный анализ накопления тяжелых металлов в урболандшафтах (на примере городов Жабинка и Бобруйск)».

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь на 2021–2025 гг. п. 1 «Цифровые информационно-коммуникационные и междисциплинарные технологии, основанные на них производства: аэрокосмические и геоинформационные технологии».

Метлицкий, И. В. Научные основы ГИС-анализа накопления тяжелых металлов в растительности городов (на примере г. Молодечно) / И. В. Метлицкий. – Минск, 2025. – С. 58, рис. 22, табл. 11, 48 источников.

АГУЛЬНАЯ ХАРАКТАРЫСТЫКА РАБОТЫ

Ключавыя словы: ГІС-АНАЛІЗ, ЦЯЖКІЯ МЕТАЛЫ, ФІТАМАСА, УРБАЛАНДШАФТЫ, ДЫСТАНЦЫЙНАЕ ЗАНДЗІРАВАННЕ, МАШЫННАЕ НАВУЧАННЕ, ФАКТАРНЫ АНАЛІЗ, ТЭХНАГЕННАЯ МІГРАЦЫЯ.

Мэта работы – распрацоўка ГІС-методыкі ацэнкі міграцыі цяжкіх металаў праз фітамасу гарадскіх насаджэнняў.

Аб'ект даследавання – драўняная расліннасць г. Маладзечна.

Прадмет даследавання – прасторавыя заканамернасці назапашвання цяжкіх металаў (Cu, Pb, Mn, Ni, Cr, Ti, Sn) у біямасе лісця.

Метады даследавання: літаратурны, параўнальнага і сістэмнага аналізу, апісальны, апісальнай і параметрычнай статыстыкі, картаграфічны, палявы, спектральнага аналізу, матэматычнага мадэлявання, параўнальна-геаграфічны, індуктыўны і дэдуктыўны.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Прапанаваны інтэгральны падыход, які аб'ядноўвае функцыянальнае заніраванне тэрыторыі (як аснову для аналізу прасторавай неаднароднасці размеркавання ЦМ), метады матэматычнай статыстыкі для выяўлення заканамернасцяў у размеркаванні ЦМ, дыстанцыйнае зандзіраванне ў якасці зыходных даных для вызначэння фітамаасы, мадэлі глыбокага навучання для вызначэння вышыні дрэў і сегментацыі крон. Пацверджана прымяняльнасць мадэлі HRSN пры вызначэнні драўнянай біямасы для беларускіх гарадоў, класіфікаваны прытворнададатныя вынікі сегментацыі і апісана методыка іх выдалення. Вызначана дакладнасць працы мадэлі ў розных функцыянальных зонах, дзе максімальная назіралася ў зоне жылой шматпавярховай забудовы (IOU = 82.2 %, MAE вышыні = 2.31 м), мінімальная ў сядзібнай зоне (IOU = 57.2 %, MAE = 4.05 м). Прапанаваны новы паказчык азелянёнасці – адносіна сумарнай плошчы праекцыі крон (ППК) да плошчы функцыянальнай зоны. Праведзены фактарны аналіз, выяўлены меркаваныя

крыніцы назапашвання Pb, Ti, Mn, Cr: для свінцу такімі з'яўляюцца металаапрацоўчыя прамысловыя прадпрыемствы на захадзе, назіраецца рэшткавае забруджванне ўздоўж асноўных транспартных восяў; для Ti, Mn і Cr галоўным фактарам можна лічыць неаднароднасць элементнага складу падсцілаючых парод. Вылічаны агульны аб'ём дэпаніравання ЦМ у лістоце і аб'ём міграцыі з ліставым ападам.

Рэкамендацыі па выкарыстанні вынікаў работы. Вынікі даследавання могуць быць выкарыстаны для інтэграцыі даных ДЗЗ у сістэмы экаманіторынгу, вызначэння біямасы дрэў з мэтай вылічэння аб'ёмаў дэпаніравання вугляроду ў лясах. Магчыма данавучанне мадэлі HRSN на даных беларускай сістэмы ДЗЗ з мэтай павышэння дакладнасці сегментацыі крон і вызначэння вышыні. Перспектыўным з'яўляецца выкарыстанне мадэляў глыбокага навучання для семантычнай сегментацыі крон асобных дрэў і вызначэння іх пароды на падставе матэрыялаў аэрафотаздымкі з прасторавым дазволам 0,01–0,15 м.

Сувязь работы з навуковымі праграмамі і тэмамі. Дысертацийная работа была выканана ў рамках НДР "Фактарны аналіз назапашвання цяжкіх металаў ва ўрбаландшафтах (на прыкладзе гарадоў Жабінка і Бабруйск)".

Тэма дысертацыі адпавядае прыярытэтным напрамкам навуковых даследаванняў Рэспублікі Беларусь на 2021–2025 гг. п. 1 "Лічбавыя інфармацыйна-камунікацыйныя і міждысцыплінарныя тэхналогіі, заснаваныя на іх вытворчасці: аэракасмічныя і геаінфармацыйныя тэхналогіі".

Мятліцкі, І. В. Навуковыя асновы ГІС-аналізу назапашвання цяжкіх металаў у расліннасці гарадоў (на прыкладзе г. Маладзечна) / І. В. Мятліцкі. – Мінск, 2025. – С. 58, мал. 22, табл. 11, 48 крыніц.

GENERAL DESCRIPTION OF THE WORK

Keywords: GIS ANALYSIS, HEAVY METALS, PHYTOMASS, URBAN LANDSCAPES, REMOTE SENSING, MACHINE LEARNING, FACTOR ANALYSIS, TECHNOGENIC MIGRATION, URBAN ECOLOGY.

The aim of the work is to develop a GIS methodology for assessing the migration of heavy metals through the phytomass of urban plantings.

The object of the study is woody vegetation of Molodechno.

The subject of the study is spatial patterns of accumulation of heavy metals (Cu, Pb, Mn, Ni, Cr, Ti, Sn) in leaf biomass.

Research methods: literary, comparative and system analysis, descriptive, descriptive and parametric statistics, cartographic, field, spectral analysis, mathematical modeling, comparative geographical, inductive and deductive.

The obtained results and novelty. An integrated approach has been proposed, combining functional zoning of the territory (as a basis for analyzing the spatial heterogeneity of heavy metal (HM) distribution), mathematical statistics methods for identifying patterns in HM distribution, remote sensing as source data for determining

phytomass, and deep learning models for determining tree height and crown segmentation using remote sensing data. The applicability of the HRCH model for determining woody biomass in Belarusian cities was confirmed; false positive segmentation results were classified and a methodology for their removal was described. The accuracy of the model's operation in various functional zones was determined, with the maximum observed in the multi-story residential zone (IOU = 82.2 %, Height MAE = 2.31 m) and the minimum in the cottage/estate development zone (IOU = 57.2 %, MAE = 4.05 m). A new greenness indicator was proposed – the ratio of the total crown projection area (CPA) to the functional zone area. Factor analysis was conducted, identifying the presumed sources of accumulation for Pb, Ti, Mn, Cr: for lead, these are metalworking industrial enterprises in the west, with residual pollution observed along major transport axes; for Ti, Mn, and Cr, the main factor is considered to be the heterogeneity of the elemental composition of the underlying rocks. The total volume of HM deposition in foliage and the volume of migration with leaf litter were calculated.

Recommendations for using the results. The research results can be used for integrating ERS data into environmental monitoring systems and determining tree biomass for calculating carbon deposition volumes in forests. It is possible to fine-tune the HRCH model on data from the Belarusian ERS system to improve the accuracy of crown segmentation and height determination. A promising direction is the use of deep learning models for the semantic segmentation of individual tree crowns and determination of their species based on aerial photography materials with a spatial resolution of 0.01-0.15 m.

Connection of the work with scientific programs and topics. The dissertation work was carried out within the framework of the research project "Factor analysis of heavy metal accumulation in urban landscapes (case studies of the cities of Zhabinka and Babruysk)".

The dissertation topic corresponds to the priority areas of scientific research of the Republic of Belarus for 2021–2025, section 1: "Digital information and communication and interdisciplinary technologies, production based on them: aerospace and geoinformation technologies".

Metlitsky, I. V. (2025). Scientific foundations of GIS analysis of heavy metal accumulation in urban vegetation (case study of Molodechno city). / I. V. Metlitsky – Minsk. 58 pp., 22 figs., 11 tables, 48 sources.