

Крупномасштабное картографирование загрязнения почв тяжелыми металлами (Cu, Ni) на участке техногенной пустоши (г. Мончегорск) на основе полевых рXRF измерений и данных дистанционного зондирования

Дворников Ю.А.¹, Слуковская М.В.^{1,2,3}, Ярославцев А.М.^{1,4}, Мешалкина Ю.Л.^{4,5}, Саржанов Д.А.¹, Васенев В.И.⁶

¹ Российский университет дружбы народов, Москва, ydvornikow@gmail.com, sarzhanovd@bk.ru

² Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева КНЦ РАН, Апатиты, slukovskaya.mv@gmail.com

³ Лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики КНЦ РАН, Апатиты

⁴ Департамент экологии РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва, yaroslavtsevam@gmail.com

⁵ Факультет почвоведения МГУ им М.В. Ломоносова, Москва, jlmesh@list.ru

⁶ Soil Geography and Landscape Group, Wageningen University, Wageningen, slava.vasenev@wur.nl

Аннотация. Загрязнение тяжелыми металлами остается важной экологической проблемой, которая приводит к деградации экосистем в целом и почвенного покрова в частности. Для больших по площади территорий важным этапом для локализации вторичного загрязнения является крупномасштабное картографирование загрязнения почв, позволяющее выделить зоны, наиболее нуждающиеся в проведении работ по рекультивации. В работе изучено распределение никеля (Ni) и меди (Cu) с использованием портативного рентгенофлуоресцентного спектрометра в верхнем горизонте почв на участке техногенной пустоши в импактной зоне медно-никелевого комбината в окрестностях г. Мончегорск (Кольский полуостров). Валовые концентрации Cu и Ni были измерены в 84 точках на территории площадью два гектара, включавшей деградированные подзолы и торфяные почвы; растительность на участке была представлена единичными деревьями. Концентрации металлов варьировали от 0.2 до 9.0 г/кг Cu и от 0.2 до 21.0 г/кг Ni. На участке также была произведена съемка с беспилотного летательного аппарата и дифференциального GNSS приемника для получения детальной гидрологически-корректной цифровой модели рельефа с разрешением 1.5 метра для изучения влияния параметров рельефа на пространственную неоднородность концентраций загрязнителей. Данные полевых наблюдений были интерполированы на территорию всего ключевого участка с использованием регрессионного кригинга. В качестве регрессионной модели использовалась модель «расширяемые регрессионные деревья». Было выявлено, что тип почв и топографический индекс влажности являются переменными, в наибольшей степени объясняющими пространственную неоднородность распределения тяжелых металлов в верхнем горизонте почв техногенной пустоши.

Ключевые слова: техногенные почвы, тяжелые металлы, беспилотные летательные аппараты, расширяемые регрессионные деревья, техногенная пустошь, Субарктика.

High-resolution mapping of soil pollution by potentially toxic elements at a polar industrial barren (Monchegorsk) using the field proximal and remote sensing

Dvornikov Y.A.¹, Slukovskaya M.V.^{1,2,3}, Yaroslavtsev A.M.^{1,4}, Meshalkina J.L.^{4,5}, Sarzhanov D.A.¹, Vasenev V.I.⁶

¹ Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, ydvornikow@gmail.com, sarzhanovd@bk.ru

² Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity, slukovskaya.mv@gmail.com

³ Laboratory of Nature-inspired Technologies and Environmental Safety of the Arctic region, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity

⁴ Department of Ecology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, yaroslavtsevam@gmail.com

⁵ Soil Science Faculty, Lomonosov Moscow State University, Moscow, jlmesh@list.ru

⁶ Soil Geography and Landscape Group, Wageningen University, Wageningen, slava.vasenev@wur.nl

Abstract. Industrial pollution by heavy metals remains a key environmental threat, resulting in degradation of ecosystem in general and soils in particular. Large-scale mapping of polluted areas is a crucial stage in localizing the secondary contamination in vast areas. Such mapping makes it possible to indicate the zones that are in the most need in remediation. The distribution of nickel (Ni) and copper (Cu) was analyzed using field portable XRF analyzer in the topsoil within the industrial barren around the Ni and Cu smelter near the Monchegorsk town (Kola Peninsula). Bulk Cu and Ni contents were measured at 84 observation points within the area of two hectares with degraded podzols and tuff soils; vegetation in the area was represented by single trees. The heavy metal content varied from 0.2 to 9.0 g kg⁻¹ for Cu and from 0.2 to 21 g kg⁻¹ for Ni. The area was surveyed with unmanned aerial vehicle and differential global navigation satellite system to obtain a high-accuracy hydrologically correct digital terrain model with 1.5 m spatial resolution to explore environmental variables behind the spatial variability. Field observations were interpolated on the key area by regression kriging with gradient boosting machines as an input regression model. The soil type and topographic wetness index were found to be the most important variables, explaining the heavy metal content variability at the topsoil at the industrial barren.

Keywords: technogenic soils, potentially toxic metals, unmanned aerial vehicle, gradient boosting machines, industrial barren, Subarctic.

Введение

Длительное интенсивное загрязнение почв тяжелыми металлами (ТМ) в полярных регионах приводит к формированию техногенных пустошей – нарушенных ландшафтов с проективным покрытием растительного покрова менее 10 %, которые формируются вокруг источников техногенного загрязнения (Kozlov, Zvereva, 2007). Всего в мире насчитывается до сорока техногенных пустошей различного размера, большинство которых возникло в результате деятельности предприятий цветной металлургии. Одним из наиболее крупных таких ландшафтов является техногенная пустошь в районе г. Мончегорск на Кольском полуострове в зоне воздействия медно-никелевого комбината «Кольская ГМК». Комбинат был основан в 1938 г. и активен в настоящий момент: годовые эмиссии ТМ до последнего времени оценивались в 40 Гт, следы которых наблюдаются на площади до 300 км², преимущественно в северном направлении от источника выбросов (Kashulina, Saltan, 2008; Nikanov и др., 2020; Slukovskaya и др., 2020). Несмотря на снижение выбросов в 1990-е годы, уровень загрязнения почв в импактной зоне комбината остается высоким. Уровни концентраций меди (Cu) и никеля (Ni) в верхнем горизонте почв сопоставимы с перерабатываемой рудой: Ni – 0.24–4.2 %, Cu – 0.36–5.8 % (Kashulina, 2017), что на несколько порядков превышает фоновые концентрации этих металлов, а также предельно допустимые для здоровья населения концентрации (Kashulina, 2018). Ранее предпринимались попытки анализа пространственного распределения и временной динамики концентраций ТМ в почвах на участках, расположенных до 75 км от источника загрязнения (Kashulina, 2017; Kashulina, 2018; Lyanguzova et al., 2016). Было отмечено экспоненциальное снижение уровня загрязнения почв при удалении от источника выбросов (Lyanguzova et al., 2016). Несмотря на то, что общие закономерности пространственного распределения загрязнителей известны, остаются пробелы в понимании распределения на локальном уровне: влияние микро/мезорельефа и свойств почв, что является необходимым этапом для проведения рекультивации. Необходимо получить более точные количественные оценки пространственного распределения ТМ, которые лимитированы ограниченным объемом лабораторного анализа почв. В то же время, применение портативного рентгенофлуоресцентного спектрометра позволяет существенно упростить задачу измерения валовых концентраций металлов в почве. Задачами исследования являлись: 1) анализ пространственной неоднородности Cu и Ni в верхнем горизонте почв с высоким пространственным разрешением (1.5 м) на основе экспресс-методов оценки и дистанционного зондирования; 2) анализ влияния параметров рельефа (производных) на пространственную неоднородность концентраций загрязнителей.

Материалы и методы

Территория исследования (67.9N, 32.8E) площадью 2 га расположена в окрестностях г. Мончегорск в 1.5 км к северу от источника выбросов Кольской ГМК (Dvornikov et al., 2022) и представ-

ляет собой типичную техногенную пустошь с полностью деградировавшим растительным покровом. Участок характеризуется разнородным мезорельефом с вершинными поверхностями, склонами и понижениями (зоны смыва, транзита и аккумуляции). Преобладающие типы почв: деградированные подзолы иллювиально-железистые с отсутствующими горизонтами О и Е (далее – Podzol) и торфяные эутрофные почвы (далее – Histosols). Мероприятия по рекультивации, предпринятые в 2003 г., привели к формированию еще одного техногенного типа почв – торфяной релоцированной почвы по деградированным подзолам иллювиально-железистым (Koptsik et al., 2016) (далее (Histosol/Podzol). Выделенные типы почв имеют разную способность к накоплению ТМ и соотношение растворимых и нерастворимых форм металлов (Slukovskaya et al., 2020).

Точки полевых измерений (n = 84) концентраций Cu и Ni были выбраны случайным образом в пределах ключевого участка, но с дополнительной целью покрыть все возможные элементы мезорельефа. Валовые концентрации загрязнителей были измерены в полевых условиях с использованием портативного рентгенофлуоресцентного спектрометра (пРФС) Olympus®Vanta C, длительность измерения – 60 сек. Максимальная ошибка измерений не превышала 3 % в соответствии с результатами внутренней калибровки прибора.

Съемка с беспилотного летательного аппарата (БПЛА) DJI® Mavic 2 Pro была выполнена для территории ключевого участка со значительными продольным и поперечным перекрытиями (90 % и 85 % соответственно) с высоты 90 метров. Дополнительно были измерены пространственные координаты и высоты точек наземного контроля для точной привязки данных съемки с использованием дифференциальной GNSS аппаратуры STONEX® S9III differential GPS/Glonass в режиме «кинематика в реальном времени». Режим позволяет достичь точности в плане 1 см и 2 см по высоте. В результате стереофотограмметрической обработки данных съемки в среде Agisoft®Metashape построена детальная гидрологически-корректная цифровая модель рельефа (ЦМР) с пространственным разрешением 1.5 м. На основании ЦМР получены другие шесть производных поверхностей: крутизна склонов, экспозиция, топографический индекс влажности (Beven, Kirkby, 1979) кривизна поверхности, направление стока, аккумуляция стока. В дополнение, также добавлены растры высоты поверхности и типов почв. Список итоговых параметров, использованных для анализа представлен в таблице.

Таблица. Параметры рельефа и почв, использованные для прогнозирования концентраций ТМ.

Table. Parameters of relief and soils used to forecast the content of heavy metals.

Параметр, единицы измерения	Размах значений	Среднее значение
Абсолютная высота, м	159.4–177.1	164.3
Уклоны, градусы	0–26.5	6.7
Экспозиция, градусы	0–360	140.4
Кривизна поверхности	-0.1–0.7	0
Топографический индекс влажности	4.0–16.2	6.7
Направление стока	1–128	24.4
Аккумуляция стока	2.2–5528.4	63.2
Почвы	Histosol (1) – 29 %	
	Histosol/Podzol (2) – 14 %	
	Podzol (3) – 57 %	

Данные полевых измерений были разделены на две части: 1) данные для создания оптимальной регрессионной модели (80 %) и для финальной интерполяции; 2) данные для валидации итоговых карт (20 %). Для создания регрессионной модели использовался пакет «caret», доступный в среде R (R Core Team, 2021). В использованной модели gradient boosting machines (GBM, расширяемые регрессионные деревья) в качестве зависимой переменной использовались полевые данные концентраций ТМ, в качестве независимых – параметры из таблицы. Оптимальная модель была получена

в результате семиступенчатой кросс-валидации. Метриками качества модели служили коэффициент детерминации (R^2) и среднеквадратическое отклонение (RMSE). В дальнейшем остатки оптимальной модели были использованы для моделирования вариограммы и для создания итоговых результатов интерполяции концентраций Cu и Ni в виде растровых карт. На стадии валидации оценивались R^2 и RMSE результатов предсказания.

Результаты и дискуссия

Были созданы две оптимальные регрессионные модели: для Cu и для Ni. Обе являлись статистически значимыми ($p < 0.05$). Основными предикторами, объясняющими большую часть про-

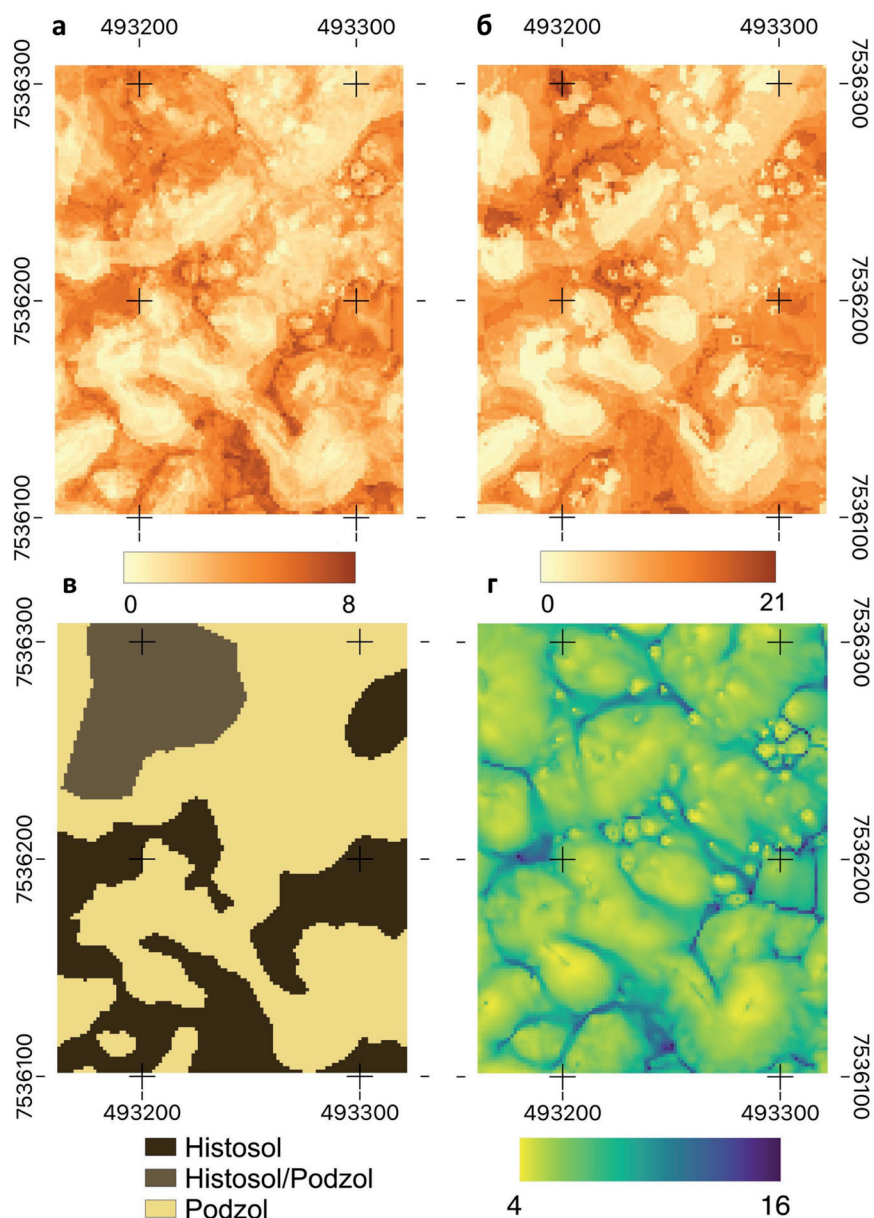


Рис. Итоговые результаты интерполяции концентраций (г/кг) меди (а) и никеля (б) с использованием оптимальных регрессионных моделей, наиболее важные предикторы концентраций: тип почв (в) и топографический индекс влажности (г).

Fig. Final interpolation rasters representing concentrations (g/kg) of Cu (a) and Ni (б) with optimal regression models applied, the most important predictors of concentrations: soil type (в) and topographic wetness index (г).

пространственной изменчивости концентраций загрязнителей являлись тип почв и топографический индекс влажности, в связи с чем построенные карты распределения загрязнителей (рис. а, б) в целом повторяют общую картину изменчивости основных предикторов (рис. в, г). Важный вклад типов почв в общую пространственную изменчивость уровней загрязнения связан с различиями в концентрации органического вещества и буферной емкостью. Связь концентраций меди и никеля в почвах техногенной пустоши с концентрацией органического вещества также описана (Paltseva et al., 2022). Наименьшие концентрации отмечены для подзолов иллювиально-железистых, наибольшие – для торфяных почв. Уровень загрязнения в техногенных почвах (Histosol/Podzol) также ниже, чем в торфяных благодаря тому, что площадка рекультивации расположена в зоне сноса материала – на возвышенности, которая была подвержена только 18-летнему загрязнению, по сравнению с другими участками. Топографический индекс влажности объяснял пространственную изменчивость концентраций загрязнителей в пределах отдельных контуров типов почв. При этом было отмечено, что этот индекс оказывает явно нелинейное влияние на зависимые переменные: его влияние отмечено только для значений в пределах от 5.5 до 7. При значениях топографического индекса влажности выше 7, его влияние не отмечалось. R^2 и RMSE модели составляли 0.76 и 0.16 для меди и 0.55 и 0.54 для Ni, соответственно. На стадии валидации метрики были существенно ниже (0.6 и 1.6 для Cu и 0.14 и 5.6 для Ni), что связано, по-видимому, с небольшой выборкой данных для валидации ($n = 16$). Полученные общие уровни концентраций меди и никеля совпадают с отмеченными ранее для этого участка для трехкилометровой буферной зоны комбината (Evdokimova et al., 2011; Kashulina, 2017). Похожие результаты были также получены для техногенной пустоши в окрестностях Садбери (Канада) (Dudka et al., 1995).

Заключение

Проведено крупномасштабное картографирование концентраций приоритетных загрязнителей (меди и никеля) в почвах на участке техногенной пустоши площадью 2 га. В качестве исходных данных для интерполяции использованы полевые данные измерений концентраций, полученные с помощью портативного рентгенофлуоресцентного спектрометра. В качестве метода интерполяции выбран метод регрессионного кригинга: была создана регрессионная модель с использованием предикторов, а затем произведен кригинг остатков модели. Созданы итоговые карты распределения Cu и Ni в поверхностном слое почвенного покрова участка пустоши. Основными предикторами, объясняющими пространственную неоднородность загрязнителей, являлись тип почв и топографический индекс влажности.

Анализ данных (Ю.А. Дворников, М.В. Слукковская, А.М. Ярославцев, Д.А. Саржанов) и подготовка статьи (Ю.А. Дворников, М.В. Слукковская) выполнены при поддержке программы академического стратегического лидерства РУДН.

Исследование выполнено в рамках проекта РНФ 19-77-300-12 и частично поддержано темой НИР №FMEZ-2022-0022.

Литература

1. Beven K.J., Kirkby M.J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology // *Hydrol. Sci. Bull.* 1979. V. 24. № 1. P. 43–69.
2. Dudka S., Ponce-Hernandez R., Hutchinson T. C. Current level of total element concentration in the surface layer of Sudbury's soils // *Sci. Total Environ.* 1995. V. 162. P. 161–171.
3. Dvornikov Y.A. et al. High resolution mapping of soil pollution by Cu and Ni at a polar industrial barren using proximal and remote sensing // *L. Degrad. Dev.* 2022. С. 1–14.
4. Evdokimova G.A., Kalabin G.V., Mozgova N.P. Contents and toxicity of heavy metals in soils of the zone affected by aerial emissions from the Severonikel Enterprise // *Eurasian Soil Sci.* 2011. V. 44. № 2. P. 237–244.
5. Kashulina G.M. Extreme pollution of soils by emissions of the copper–nickel industrial complex in the Kola Peninsula // *Eurasian Soil Sci.* 2017. V. 50. P. 837–849.
6. Kashulina G.M. Monitoring of Soil Contamination by Heavy Metals in the Impact Zone of Copper-Nickel Smelter on the Kola Peninsula // *Eurasian Soil Sci.* 2018. V. 51. P. 467–478.

7. Kashulina G.M., Saltan N.V. Plant chemistry under the extreme conditions of the «Severonickel» smelter impact (под ред. V.K. Zhirov). Apatity: Kola Science Centre. 2008. 239 с.
8. Koptsik G.N., Koptsik S.V., Smirnova I.E. Alternative technologies for remediation of technogenic barrens in the Kola Subarctic // *Eurasian Soil Sci.* 2016. V. 49. № 11. P. 1294–1309.
9. Kozlov M.V., Zvereva E.L. Industrial barrens: Extreme habitats created by non-ferrous metallurgy // *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 2007. V. 6. P. 231–259.
10. Lyanguzova I.V., Goldvirt D.K., Fadeeva I.K. Spatiotemporal dynamics of the pollution of Al–Fe-humus podzols in the impact zone of a nonferrous metallurgical plant // *Eurasian Soil Sci.* 2016. V. 49. № 10. P. 1189–1203.
11. Nikanov A.N. et al. Environmental aspects of the accumulation of mineral elements in the organism of the population living in areas of intensive industrial activities in the European part of the Arctic zone of Russia. Apatity: FRC KSC RAS. 2020. 87 с.
12. Paltseva A. et al. Proximal sensing of soil pollution by heavy metals using a portable X-ray fluorescence analyzer in Subarctic industrial barren: limitations and perspectives // *Soils in Urban Ecosystem* / Ed. A. Rakshit et al. Singapore: Springer Singapore. 2022. C. in press.
13. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing // 2021.
14. Slukovskaya M.V. et al. Organic matter accumulation by alkaline-constructed soils in heavily metal-polluted area of Subarctic zone // *J. Soils Sediments.* 2020. V. 21. P. 2071–2088.