

УДК 504.06, 631.4

DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-4-92-104



ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ И НОРМИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПОЧВ В ЗОНЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОБЪЕКТОВ ДОБЫЧИ И ПЕРЕРАБОТКИ КАМЕННОГО УГЛЯ

М. В. Евдокимова*, А. С. Горленко, Е. В. Прудникова,
М. М. Калита, А. А. Мовсисян

МГУ имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения, 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12

* E-mail: soil.resources@mail.ru

Основная цель работы состояла в проверке применимости подхода к оценке экологического состояния почв и теоретической модели биологического отклика в форме вегетационного индекса на воздействие комплекса тяжелых металлов в зоне воздействия объектов добычи и переработки каменного угля в условиях дальневосточной таежно-лесной почвенно-биоклиматической области. Исследования проведены в комплексе с геохимической оценкой природных сред, что обеспечило возможность учета размеров зон воздействия объектов добычи и переработки каменного угля на территории эксперимента по квотированию выбросов, проводимого Минприроды России.

Инвентаризация источников выбросов позволила определить ряд приоритетных объектов негативного воздействия на окружающую среду: основная промплощадка, промышленная котельная, интегрированная промплощадка, два угольных разреза и др. По результатам проведения сводных расчетов рассеивания загрязняющих веществ были выделены следующие маркерные поллютанты: углерод (сажа), пыль неорганическая и пыль каменного угля.

Установление уровней загрязнения почв и снежного покрова позволило выявить локализацию техногенных аномалий тяжелых металлов, а также определить пылевую нагрузку на исследуемую территорию. Почвенный покров характеризуется низким уровнем загрязнения по суммарному показателю загрязнения, однако накопление микроэлементов в поверхностном слое почв характерно для большинства исследованных металлов и металлоидов, о чем свидетельствуют коэффициенты концентрации >1 . Выявлены очаги загрязнения снежного покрова, приуроченные к зоне жилой застройки. Площади с очень высоким уровнем загрязнения снега расположены вблизи муниципальных котельных.

На основе теоретической модели биологического отклика в форме вегетационного индекса на воздействие комплекса тяжелых металлов определенного набора, содержащегося в почвах окрестностей предприятия по добыче и переработке каменного угля, установлены предельно допустимые уровни их содержания. Определены границы зоны воздействия основных структурных подразделений предприятия угледобычи, за чертой которых распространены территории природно-антропогенного фона. Почвы в окрестностях объектов добычи и переработки каменного угля характеризуются преимущественно фоновым (ненарушенным) состоянием либо слабодegradированы, таким образом, вред почвам на территории эксперимента не нанесен.

Ключевые слова: Sentinel-2, NDVI, аэротехногенное воздействие, экологическое нормирование, геохимия окружающей среды, квотирование выбросов, природный фон, зонирование территории.

Введение

В целях кардинального улучшения экологической обстановки в городах с высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха с 2019 г. Минприроды России проводится эксперимент по квотированию выбросов, инициированный в рамках федерального проекта «Чистый воздух» [Федеральный закон № 195, 2019; Оводков и др., 2024]. Работы по квотированию выбросов предваряют инвентаризацией источников негативного воздействия и

выполнением сводных расчетов рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. Затем определяют долевой вклад источников выбросов в общее состояние атмосферного воздуха территории проведения эксперимента в целях соблюдения гигиенических нормативов качества атмосферного воздуха. Данный расчет состоит в определении концентрации вредных веществ в двухметровом приземном слое воздуха, при этом величина максимальной разовой концентрации каждого вредного вещества в приземном слое атмосферы не должна

превышать величины его предельно допустимой концентрации (ПДК) в атмосферном воздухе. Сведения о концентрациях загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, полученные при проведении сводных расчетов, включают в себя также данные о пространственном распределении среднегодовых концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе в двухметровом слое над поверхностью земли [Приказ Минприроды России № 813, 2019].

Повышенные гигиенические требования [СанПиН 1.2.3685-21] к качеству атмосферного воздуха предъявляются к местам постоянного проживания населения за границами санитарно-защитных зон (СЗЗ). Для более уязвимых же территорий, таких как особо охраняемые территории и лесные экосистемы, целесообразна разработка экологических нормативов качества не только атмосферного воздуха [Шарыгина и др., 2019], но и всего природного комплекса земель [Экологическое нормирование..., 2013] с учетом их природных особенностей.

«Здоровье окружающей среды — это способность биосистемы в заданных пространственных границах поддерживать продуктивность растений и животных, сохранять приемлемое качество воды и воздуха, а также обеспечивать здоровье людей, животных и растений» [Кожевин, 2023]. Среди прочих компонентов окружающей среды атмосферный воздух характеризуется чрезвычайно высокой динамичностью показателей его состояния, что обуславливает определенные трудности в выявлении долевого вклада отдельных объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду (далее ОНВОС), в общее состояние природного комплекса земель, в то время как показатели состояния или здоровья почвы обладают значительно большей информативностью в связи со способностью почв удерживать загрязняющие вещества в своем профиле на длительное время. Таким образом, состояние почв отражает общее экологическое состояние природной среды [Экологическое нормирование..., 2013], но при этом подходы к оценке «здоровья» почв должны быть ориентированы прежде всего на определение системных характеристик почвенной микробиоты в сочетании с измерением химических и физических показателей состояния почв [Кожевин, 2023]. В этой связи разработаны способы предварительного отражения биологических откликов в ответ на антропогенное воздействие стрессоров на безразмерную шкалу, которая служит основой экологического нормирования [Глазунов и др., 2018], а также подходы к интерпретации экспериментальных зависимостей вида «доза-эффект» с использованием шкал желательности [Воробейчик и др., 1994].

Для оценки состояния почв в окрестностях крупных источников воздействия на окружающую среду разработаны [Геохимия окружающей среды, 1990] и постоянно совершенствуются [Максимова,

2000; Кречетов и др., 2010; Касимов и др., 2023; Битюкова и др., 2024] методики, основанные на геохимических исследованиях распространения поллютантов в окрестностях ОНВОС. Вокруг отдельных источников выбросов фиксируются аномалии их содержания в почве и снежном покрове — природных средах, способных накапливать загрязняющие вещества.

Для оценки экологического состояния почв в зоне воздействия промышленных предприятий применяют подход [Глазунов и др., 2019; Евдокимова и др., 2021, 2023], предложенный для обобщения результатов спутниковых (NDVI) и подспутниковых (содержание тяжелых металлов в почве, респирометрические показатели почвенного микробиома и др.) наблюдений и основанный на интерпретации экспериментальных зависимостей вида «доза-эффект» с использованием макрокинетической модели микробного роста на многокомпонентном субстрате [Гендугов, Глазунов, 2014]. К основным методам оценки экологического состояния почвы, находящейся под воздействием нагрузки, относятся методы определения ферментативной активности и интенсивности дыхания почвы [Бакунович и др., 2016; Манучарова и др., 2021; Никитин и др., 2022; Шарапова и др., 2022; Ananyeva et al., 2008]. Измерение почвенного дыхания при этом отличается наибольшей относительной простотой и точностью метода определения активности почвенной биоты [Ananyeva et al., 2008].

Таким образом, *цель* данной работы состояла в проверке применимости подхода к оценке экологического состояния почв [Евдокимова и др., 2019] и макрокинетической модели роста [Гендугов, Глазунов, 2014] в условиях дальневосточной таежно-лесной почвенно-биоклиматической области в комплексе с геохимическими исследованиями почв и снегового покрова для обеспечения возможности учета размеров зоны воздействия объектов добычи и переработки каменного угля на территории проведения эксперимента по квотированию выбросов. Задачи исследования: 1) проведение сводных расчетов рассеивания выбросов; 2) оценка степени загрязнения атмосферного воздуха на территории проведения эксперимента по квотированию выбросов химическими элементами пыли по их содержанию в снежном покрове и почве; 3) выявление закономерностей в пространственном распределении значений NDVI в зоне воздействия объектов добычи и переработки каменного угля; 4) выявление эмпирической зависимости концентрации тяжелых металлов в почве от расстояния до источника загрязнения и от среднегодовой доли ветров, направленных от этого источника к рассматриваемому участку; 5) обоснование ранжирования концентрации тяжелых металлов и биологических показателей состояния почв (дыхательная активность почв), отражающего степень экологиче-

ской безопасности для зоны воздействия объектов добычи и переработки каменного угля.

Антропогенное воздействие на окружающую среду на объектах добычи каменного угля связано с изъятием вещества (угля и горных пород) и его привносом в природные среды (выбросы, сбросы, отвалы, складирование готовой продукции) [Семикобыла, Добровольский, 2011; Семенков и др., 2023]. Угольная пыль является источником поступления в окружающую среду As, Cd, Cr, Cu, As, Ni и Pb [Семикобыла, Добровольский, 2011; Семенков и др., 2023]. Формирование геохимического загрязнения почв в окрестностях объектов угледобычи происходит прежде всего за счет поступления угольной и породной пыли в атмосферный воздух [Семикобыла, Добровольский, 2011]. Перенос угольной пыли осуществляется по воздуху непосредственно с мест складирования угля и при осуществлении взрывных работ на разрезах и в шахтах. Для почв, находящихся вблизи отвалов угольных шахт, характерно повышенное содержание соединений тяжелых металлов и металлоидов (Co, Cu, Cr, Cd, Ni, Pb, Zn, Fe, Mn) [Семенков и др., 2023; Minkina et al., 2023], а также S [Семенков и др., 2023].

Материалы и методы

Объектом настоящего исследования была территория эксперимента по квотированию выбросов, проводимого Минприроды России, расположенная в западной части Хабаровского края (рис. 1). Климат

характеризуется высокой континентальностью с бесснежной морозной зимой и теплым влажным летом [Осипов, 2015; Природные условия..., 2019]. Средняя температура января -30°C , июля 16°C [Осипов, 2015].

Для ландшафтов Буреинского нагорья характерно проявление зональности (поясности) растительного покрова. Главными лесообразующими породами при этом являются ель аянская (*Picea ajanensis* Fisch. ex Carrière) и лиственница Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr) [Осипов, 2015]. В нижней части бореально-лесного пояса спутником ели аянской становится пихта белокорая (*Abies nephrolepis* (Trautv.) Maxim.), а на надпойменных террасах встречается ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.) [Осипов, 2015]. Растительный покров исследуемой территории представлен лиственничниками (бруснично-рододендроновыми и багульниково-брусничными), еловыми лесами с примесями березы, а также сообществами, характерными для переувлажненных территорий в местах залегания вечной мерзлоты — мохово-болотными лиственничными редколесьями, осоково-багульниковыми кочками, поросшими кустарниковой березой.

Территория исследования относится к дальневосточной таежно-лесной почвенно-биоклиматической области, подзоне буроземов грубогумусовых и подзолов, частично к буреинской горной провинции [Единый государственный реестр почвенных ресурсов России, 2014]. В границах исследуемого

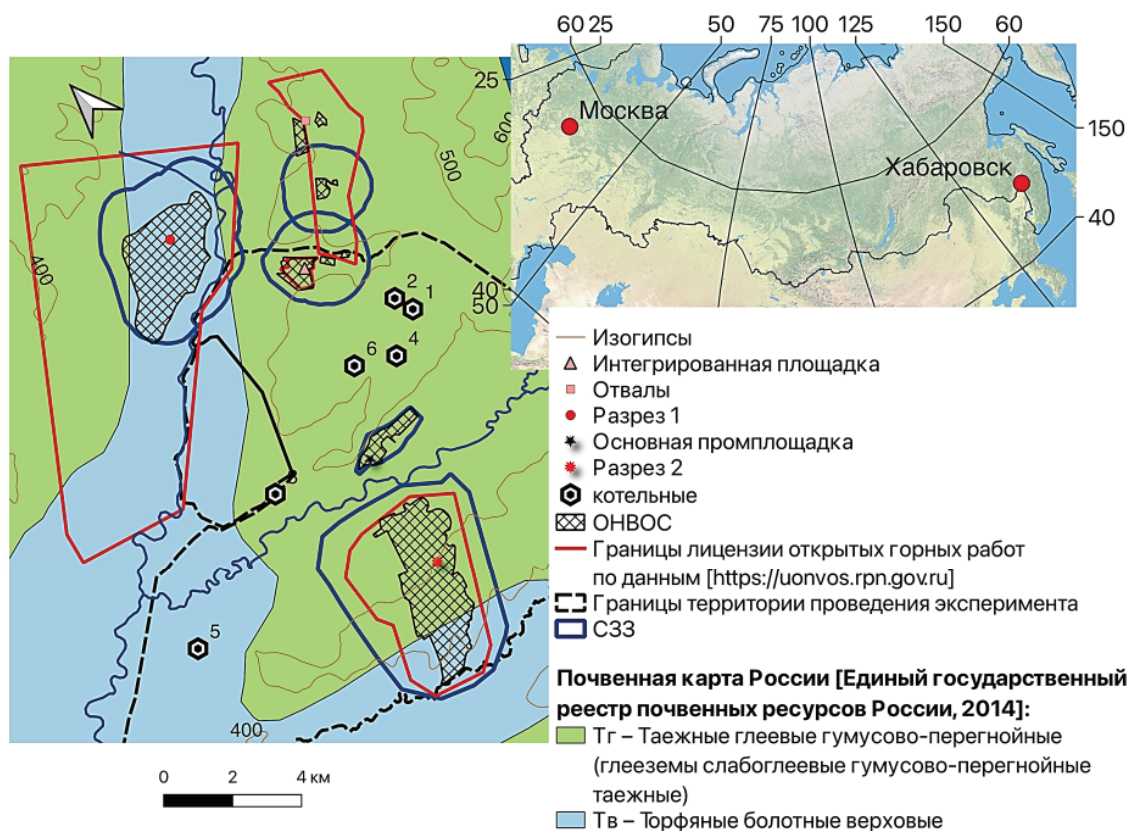


Рис. 1. Почвенная карта исследуемой территории

участка распространены торфяно-болотные верховые и таежные глеевые гумусово-перегнойные почвы (рис. 1). Снизу профиль почвы замыкается горизонтом льдистой мерзлоты.

Инвентаризация источников выбросов, находящихся в ведении предприятия по добыче и переработке каменного угля и расположенных на территории проведения эксперимента по квотированию выбросов, позволила выделить ряд приоритетных ОНВОС: основная промплощадка, промышленная котельная (№ 6 на рис. 1), обогатительная фабрика, интегрированная промплощадка, два угольных разреза, складская зона и склад взрывчатых материалов. Впоследствии часть из них была объединена в комплексы ввиду близости их расположения. ОНВОС, для которых устанавливали долевой вклад и выявляли зоны воздействия на почвенный и растительный покров, приведены на рис. 1. Оценки выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от ОНВОС выполнены по методикам, включенным Минприроды России в перечень методик расчета выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух от стационарных источников [Приказ Минприроды России № 341, 2018]. Расчет рассеивания выбросов проведен методами, утвержденными приказом Минприроды России № 273 [2017]. В составе выбросов предприятия присутствуют 48 загрязняющих веществ. По результатам проведения сводных расчетов рассеивания загрязняющих веществ были выделены следующие приоритетные поллютанты: углерод (сажа), пыль неорганическая и пыль каменного угля.

Предполагали, что стрессоры попадают в почву в составе пыли, переносимой по воздуху от ОНВОС, автономных источников теплоснабжения (АИТ) и муниципальных котельных, расположенных в черте жилой застройки. Г.П. Глазуновым и др. [2019] ранее был предложен и апробирован подход к экологической оценке состояния земель, испытывающих воздействие промышленных объектов, на основе нелинейной модели с использованием величины NDVI (Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс [Tucker, 1979]) в качестве количественного показателя отклика экосистемы на воздействие стрессоров и концентрации тяжелых металлов в почве в качестве показателя интенсивности их воздействия.

Использование макрокинетической модели биологического роста на многокомпонентном субстрате [Гендугтов, Глазунов, 2014] обеспечило основу для количественного исследования полной кривой биологического отклика на воздействие загрязняющих веществ в почве (при фиксированном времени наблюдения за ростом):

$$q = \Lambda e^{-K/z} z^{-B}. \quad (1)$$

В этом уравнении Λ — коэффициент, масштабирующий биотический показатель q , K — коэффициент «скорости» увеличения биотического показателя q в результате увеличения результирующей концентрации z тяжелых металлов и металлоидов в почве, B — коэффициент «скорости» убывания биотического показателя q в ответ на увеличение результирующей концентрации компонентов субстрата z .

Результирующая концентрация тяжелых металлов и металлоидов ($\text{мг} \cdot \text{кг}^{-1}$) (табл. 1) рассчитана в форме геометрического среднего:

$$z = \sqrt[n]{\prod c_i},$$

где n — число учтенных компонентов и c_i — концентрация i -го вещества в почве, $\text{мг} \cdot \text{кг}^{-1}$.

Коэффициенты модели (1) получены приближением этих уравнений к экспериментальным данным способом наименьших квадратов с использованием алгоритма, созданного на языке Python 3. Исследование кривой отклика методами математического анализа с использованием производных первого, второго и третьего порядков позволило установить и содержательно интерпретировать особые точки кривой биологического отклика на воздействие. Особые точки модели (1) рассчитаны с использованием пакета программ компьютерной алгебры Maxima. Точности модели (1) оценивали по параметру корня средней квадратичной ошибки (RMSE), который является показателем эффективности для модели и измеряет среднюю разницу между значениями, спрогнозированными моделью, и фактическими значениями.

Выявление эмпирической связи между степенью загрязнения почвы и удаленностью от источника загрязнения в опорном направлении осуществлялось по экспериментальным данным в форме степенной функции. Пересчет границ воздействия основных структурных подразделений предприятия в других

Таблица 1

Содержание кислоторастворимых соединений тяжелых металлов и металлоидов в фоновой почве и пыли каменного угля ($\text{мг} \cdot \text{кг}^{-1}$)

Образец	Pb	Hg	Zn	Cr	Cu	V	Ni	Cd	Co	Fe	Mn	As	Sr	z	pH
Почва	29,5	0,04	68,5	3,6	13,0	18,2	4,0	<1	3,4	11287	374,5	1,8	7,6	14,0	6,2
Пыль	15	0,02	20,0	3,1	8,4	18,8	2,0	<1	3,3	8062	126,8	1,5	24,2	9,7	9,0

направлениях от завода по опорному азимуту проводился по формуле [Евдокимова и др., 2021]:

$$l = m(a/b)^{1/4}, \quad (2)$$

где l — протяженность зоны воздействия в направлении данного румба; m — коэффициент пересчета, равный протяженности зоны воздействия по опорному румбу; a — доля ветра, создавшего границу воздействия по данному румбу; b — доля ветра опорного направления. Экстраполяция местоположения пункта с концентрацией, соответствующей особой точке z_4 , с опорного румба на остальные семь румбов позволила оконтурить расчетный ареал зоны воздействия для таких ОНВОС, как угольный разрез № 1 (УР № 1), угольный разрез № 2 (УР № 2), интегрированная площадка (ИП), основная промплощадка (ОП), отвалы (рис. 1), путем соединения прямыми линиями местоположений соответствующих особых точек z_4 , взятых на восьми румбах. В точке z_4 происходит смена стимулирующего действия (эффект гормезиса) на угнетающее действие металлов (проявление токсического эффекта) [Андреева, Кожевин, 2014].

Для анализа закономерностей биологического отклика почвенного микробиома на содержание комплекса тяжелых металлов определенного набора (табл. 1) были также исследованы закономерности изменения интенсивности эмиссии углекислого газа из почвы [Ananyeva et al., 2008].

Обобщение откликов почвенного микробного сообщества на загрязнение провели путем норми-

рования показателей их значениями в точке максимума функции (1): $x = z/z_4$ и $y = q/q_4$ соответственно.

Ранжирование качества почв по закономерностям обобщенного отклика почвенного микробного сообщества $y = q/q_4$ на загрязнение почв $x = z/z_4$ провели на основе показателя состояния p [Глазунов и др., 2018]:

$$p = ye^{-\alpha/y}, \quad (3)$$

где y — показатель отклика на нагрузку; α и γ — коэффициенты, определяемые решением системы из двух уравнений (3) для пары значений отклика y обобщенной функции «доза-эффект», одно из которых получено для максимальной нагрузки x_0 , не выводящей почву из состояния нормы, а второе — для минимальной нагрузки x_* , гарантированно выводящей ее за пределы возможности самовосстановления. Коэффициенты уравнения (3) получены с использованием пакета программ компьютерной алгебры Maxima.

Значения NDVI для целей настоящего исследования находили по космическим снимкам высокого разрешения Sentinel-2 (10 м) с сервера Vega-Science [Лупян и др., 2019] (рис. 2). Обработку данных дистанционного зондирования и подготовку картографического материала проводили с использованием свободно распространяемой ГИС QGIS [https://www.qgis.org].

В рамках полевых исследований 2023 г. на разном удалении от объектов добычи и переработки каменного угля была заложена 51 пробная

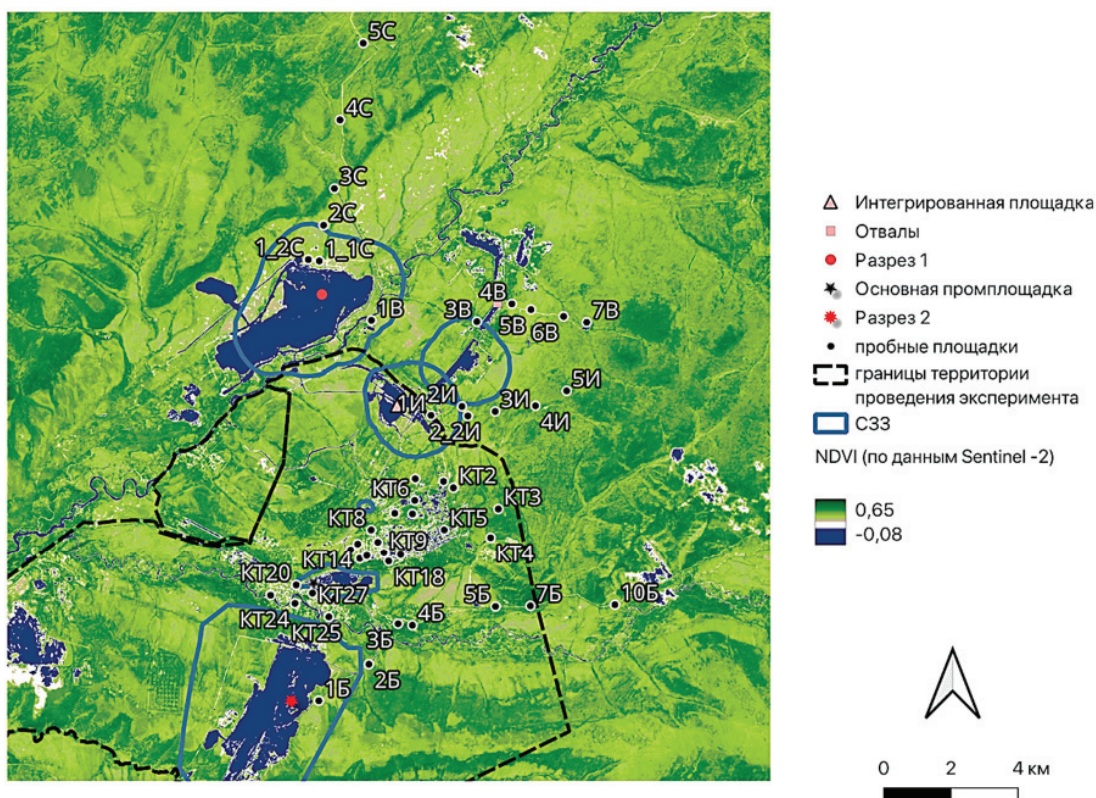


Рис. 2. Карта вегетационного индекса, рассчитанного по материалам Sentinel-2

площадка, на каждой из которых из гумусово-перегнойного горизонта почв с глубины 0–5 см было отобрано по одной смешанной пробе. Степень загрязнения почв тяжелыми металлами оценивали по содержанию кислоторастворимых соединений тяжелых металлов. Измерения проводили в 1 н. HNO_3 вытяжке (табл. 1) методом ИСП-ОЭС [ММБИ-80-2008] на оптико-эмиссионном спектрометре. В условиях техногенного загрязнения азотная кислота растворяет оксиды и сульфиды металлов, являющиеся основными компонентами промышленных выбросов, при этом по мере удаления от ОНВОС содержание кислоторастворимых форм тяжелых металлов в почве снижается [Ладонин, 2016]. По валовому содержанию тяжелых металлов

в почве не всегда можно судить об экологической ситуации и влиянии загрязняющих веществ на растения [Плеханова, Золотарева, 2020].

Пробы снега были отобраны 28 февраля 2024 г. Период снеговосхода составил 119 дней, что позволило определить время, за которое атмосферные выпадения накопились в снегу. Оно рассчитывалось от даты установления устойчивого снежного покрова (по данным Гидрометеослужбы) — 01 ноября 2023 г. Валовое содержание металлов в твердом осадке снега определяли после их разложения царской водкой ($\text{HCl} + \text{HNO}_3$ в соотношении 3:1). Растворимую часть снега фильтровали и концентрировали упариванием в 50 раз.

Характеристика почв и снежного покрова дана на основе геохимических показателей [«Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха ...», 1990]. Они учитывают распределение как отдельных металлов, так и их ассоциаций, обусловленных полиэлементностью химического состава техногенных потоков, формирующих загрязнение. К таким показателям относятся коэффициент концентрации химических элементов и суммарный показатель загрязнения. Коэффициент концентрации — показатель кратности превышения содержания химического элемента в точке опробования (c_p , $\text{мг} \cdot \text{кг}^{-1}$) над его содержанием в аналогичной природной среде на фоновом участке. Фоновая площадка была заложена на территории, не подвергающейся загрязнению и удаленной на 8 км от ОНВОС. Содержание тяжелых металлов в фоновой почве приведено в табл. 1. Суммарный показатель загрязнения почв (Z_c^{II}) представляет собой сумму превышений коэффициентов концентрации химических элементов ($K_{c_i}^{\text{II}}$), накапливающихся в аномалиях:

$$Z_c^{\text{II}} = \sum_i^n K_{c_i}^{\text{II}} - (n-1),$$

где n — количество аномальных элементов.

Для тех же пунктов пробоотбора и для аналогичного набора тяжелых металлов был рассчитан суммарный показатель загрязнения снежного покрова (Z_c^{C}):

$$Z_c^{\text{C}} = \sum_i^k K_{c_i}^{\text{C}} - (k-1),$$

где $K_{c_i}^{\text{C}}$ — коэффициент концентрации химических элементов в снежном покрове; k — количество аномальных элементов.

Общее количество пыли ($\text{кг} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$), выпадающей на единицу площади в единицу времени [Методические рекомендации..., 1990], рассчитывали по формуле:

$$P = P_a / (S \times T),$$

где P_a — вес пыли (кг), осаждаемой снегом, S — проективная площадь сведения (км^2), T — временной интервал (сут) между моментом опробования и датой установления устойчивого снежного покрова. В нашем случае $S = 7,85 \text{Е}-09 \text{ км}^2$, а $T = 119$ сут.

Таблица 2

Общее количество пыли, выпадающей из атмосферного воздуха на единицу площади в сутки

П/п	P_a , кг	P , $\text{кг} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$	Уровень загрязнения
1_2С	0,000068	73	низкий
2С	0,000019	20	низкий
3С	0,000039	42	низкий
4С	0,000003	3	низкий
5С	0,000005	5	фоновая
1И	0,000187	200	низкий
2_2И	0,000050	54	низкий
3И	0,000037	39	низкий
4И	0,000013	13	низкий
1Б	0,000452	483	высокий
2Б	0,000119	127	низкий
3Б	0,000024	26	низкий
4Б	0,000116	125	низкий
5Б	0,000241	258	средний
КТ1	0,000195	209	низкий
КТ4	0,000104	111	низкий
КТ5	0,000067	72	низкий
КТ8	0,000268	287	средний
КТ12	0,000145	155	низкий
КТ16	0,000189	202	низкий
КТ18	0,000464	496	высокий
КТ19	0,000185	198	низкий
КТ20	0,000322	345	средний
КТ22	0,000186	199	низкий
КТ25	0,000062	66	низкий
КТ26	0,000157	168	низкий
КТ2	0,000085	91	низкий

Результаты

Сводные расчеты рассеивания выбросов. Для выявления перечня загрязняющих веществ, концентрации которых превышают гигиенические нормативы качества атмосферного воздуха [СанПиН 1.2.3685-21], проведены сводные расчеты загрязнения атмосферного воздуха. Данные расчеты лежат в основе нормирования выбросов при реализации процедуры квотирования выбросов [Оводков и др., 2024]. Так, по результатам сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха основными ОНВОС, оказывающими воздействие на приземный слой атмосферного воздуха на территории проведения эксперимента по квотированию выбросов, стали: основная промплощадка № 1; складская зона и угольный разрез № 2. При этом приоритетными компонентами выбросов являются: углерод (сажа), пыль неорганическая и пыль каменного угля.

Оценка степени загрязнения атмосферного воздуха химическими элементами пыли. Исследование уровней загрязнения почв и снежного покрова в окрестностях объектов добычи и переработки каменного угля, а также в жилой зоне позволило выявить основные ареалы загрязнения почв и снегового покрова. Несмотря на достаточно интенсивное поступление пыли с атмосферными осадками (табл. 2) на территорию жилой зоны, почвенный покров исследуемой территории характеризуется исключительно низким уровнем загрязнения по показателю $Z_c^П$ (табл. 3).

Однако для большинства металлов характерно накопление в поверхностном слое почв, о чем свидетельствуют коэффициенты концентрации элементов >1 (табл. 3).

На территории проведения эксперимента выявлены очаги загрязнения снежного покрова, которые

Таблица 3

Суммарный показатель загрязнения почвы

П/п	$K_i^П$							$Z_c^П$	Уровень загрязнения
	<i>Cd</i>	<i>Cu</i>	<i>As</i>	<i>Ni</i>	<i>Pb</i>	<i>Zn</i>	<i>Hg</i>		
1_2С	–	1,1	1,4	4,1	0,4	2,8	3,0	8	низкий
2С	–	0,4		0,7	0,6	1,3	1,7	2	низкий
3С	–	0,7	3,3	1,0	1,1	1,2	4,2	7	низкий
4С	–	0,9	2,5	1,2	1,2	1,3	2,4	5	низкий
1И	–	1,0	1,1	2,1	2,1	2,2	2,9	6	низкий
2_2И	–	0,7		1,7	0,8	2,4	1,7	4	низкий
3И	–	0,9	1,5	1,5	1,3	1,3	3,2	5	низкий
4И	–	1,2	1,6	3,7	1,4	1,8	1,8	6	низкий
1Б	–	1,0	1,6	2,3	1,1	1,2	0,7	3	низкий
2Б	–	1,5	0,9	1,7	1,1	2,6	0,7	4	низкий
3Б	–	3,4	1,4	3,1	3,8	5,7	0,7	13	низкий
4Б	–	1,8	2,2	2,7	1,7	4,5	0,7	9	низкий
5Б	–	1,7	1,0	2,2	1,4	2,8	1,1	5	низкий
КТ1	–	1,6	1,2	1,7	1,6	2,6	0,6	5	низкий
КТ4	–	1,0	1,0	1,6	1,3	2,8	2,8	5	низкий
КТ5	–	0,6	6,1	2,4	0,7	1,8	2,0	9	низкий
КТ8	–	2,2	-	1,6	2,4	4,6	1,1	8	низкий
КТ12	–	1,0	1,3	2,2	1,5	2,0	0,6	4	низкий
КТ16	–	3,4	1,0	2,7	2,5	5,0	2,3	12	низкий
КТ18	–	1,7	1,6	2,7	1,4	3,8	0,6	7	низкий
КТ19	–	1,2	0,7	1,3	1,1	2,0	0,3	3	низкий
КТ20	–	4,6	0,8	2,4	3,0	4,1	0,6	11	низкий
КТ22	–	4,6	0,8	2,4	3,0	4,1	0,6	11	низкий
КТ25	–	4,6	1,5	2,2	2,2	4,0	0,5	9	низкий
КТ26	–	2,2	1,3	2,0	1,8	3,5	6,6	12	низкий
КТ2	–	1,1	0,7	1,0	1,3	2,1	1,2	3	низкий

Таблица 4

Параметры и особые точки уравнения модели (1) зависимости NDVI от результирующей концентрации тяжелых металлов в почве

Зона	Λ	B	K	RMSE	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	z_6	q_{14}
УР № 1	5,27E+23	16,0	187,0	0,01	7,3	8,9	10,8	11,7	14,5	17,0	0,46
ОП	7,34E+10	6,5	123,8	0,02	8,9	12,1	15,8	19,0	26,0	32,4	0,52
ИП	2,58E+06	4,4	56,9	0,01	5,1	7,4	10,0	12,9	18,5	23,7	0,41
УР № 2	7,34E+10	6,5	123,8	0,02	8,9	12,1	15,8	19,0	26,0	32,4	0,52
Отвалы	4,52	0,62	10,4	0,01	1,8	3,6	5,5	16,8	30,0	43,1	0,42

приурочены к зоне жилой застройки. Площади с очень высоким уровнем загрязнения расположены вблизи муниципальных котельных № 1 и № 2 (рис. 3), что свидетельствует о том, что данные ОНВОС вносят существенный вклад в загрязнение атмосферного воздуха. Далее зоны загрязнения снежного покрова концентрическими областями расходятся от эпицентра загрязнения и оконтуривают площади с высоким уровнем загрязнения территории. В окрестностях угольных разрезов и других структурных подразделений предприятия ареалов с высоким уровнем загрязнения по показателю Z_c^c не выявлено. Пробные площадки в данном случае характеризуются низким и средним уровнем загрязнения (рис. 3). Очаги повышенной пылевой нагрузки находятся в границах СЗЗ разреза № 2, а также в местах сосредоточения АИТ и в непосредственной близости к автодорогам (табл. 2).

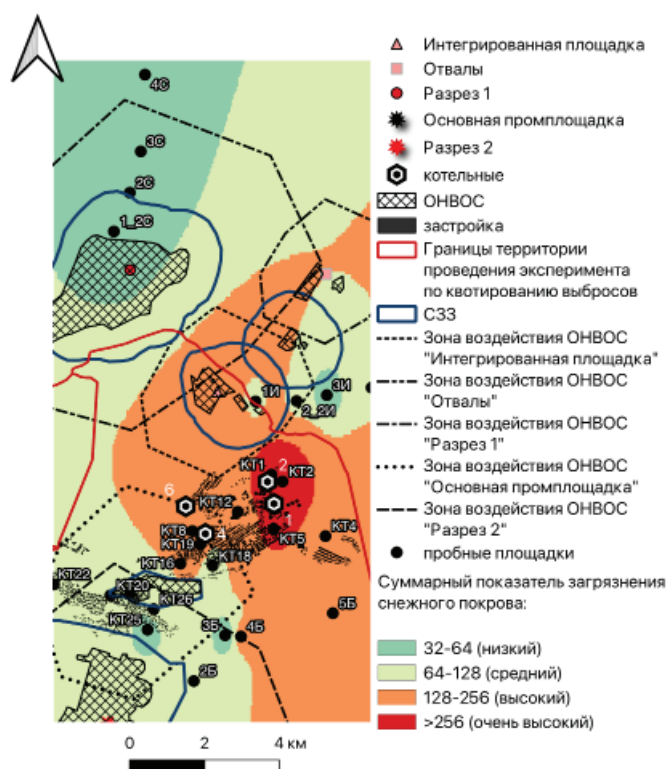


Рис. 3. Карта суммарного загрязнения (Z_c^c) территории химическими элементами пыли, осаждаемой снегом

Выявление закономерностей в пространственном распределении значений NDVI в зоне воздействия ОНВОС. Загрязняющие вещества, поступающие в почву и накапливающиеся в ее профиле, оказывают совокупное воздействие на реципиентов этого загрязнения, степень которого зависит от класса опасности веществ и величин их концентрации в почве. С использованием нелинейной модели (1) удалось оценить воздействие химических соединений в виде результирующей концентрации Z тяжелых металлов в почве на состояние растительности, а также установить пороговые концентрации химических соединений в почве в зоне воздействия структурных подразделений предприятия по добыче и переработке каменного угля. Степень совпадения результатов расчета по модели (1) с экспериментальными данными по зависимости вегетационного индекса от результирующей концентрации Z тяжелых металлов в почвах пробных площадок на 28-й неделе 2023 г. весьма высока (табл. 4), о чем свидетельствуют низкие значения RMSE.

Выявление эмпирической зависимости концентрации тяжелых металлов в почве от расстояния до источника загрязнения. Для обеспечения возможности экстраполяции пороговых значений в точке z_4 (табл. 4) на оси, направленные вдоль основных румбов от источника загрязнения (см. рис. 1), сначала по данным химического анализа почв исследовали эмпирическую связь между концентрацией загрязняющих веществ Z в почве и удаленностью от источника загрязнения. Удаленность точек с известной концентрацией в почве загрязняющих веществ вдоль опорного румба от каждого структурного подразделения предприятия связана с концентрацией в почве загрязняющих веществ степенной эмпирической зависимостью с высокой степенью тесноты связи коэффициентов корреляции по шкале Чеддока, что позволило вычислить по формуле (2) удаленность на местности значений NDVI для особых точек z_4 в опорном направлении и экстраполировать их на остальные румбы, полагая, что коэффициент пересчета равен корню четвертой степени из отношения доли ветров нужного румба к доле ветров опорного румба (табл. 5).

Таблица 5

Экстраполированные на направления вдоль основных румбов местоположения на местности (км) точек с концентрациями тяжелых металлов, соответствующих особой точке модели Z_4

Направление ветра	Доли ветров	УР № 1	УР № 2	ОП	ИП	Отвалы
С	0,11	4,3	4,0	2,8	2,2	1,8
С-В	0,13	4,5	4,1	2,9	2,3	1,9
В	0,09	4,1	3,8	2,7	2,0	1,7
Ю-В	0,05	3,6	3,3	2,4	1,8	1,5
Ю	0,14	4,6	4,3	3,0	2,3	1,9
Ю-З	0,19	4,9	4,6	3,2	2,5	2,0
З	0,22	5,1	4,8	3,4	2,6	2,1
С-З	0,07	3,8	3,5	2,5	1,9	1,6

Границы зоны воздействия для ОНВОС нанесены на топооснову путем соединения местоположений, соответствующих особой точке Z_4 на макрокинетической кривой (1), прямыми линиями (см. рис. 3). Использование подхода по выявлению границ природно-антропогенного фона [Яковлев, Евдокимова, 2022] позволяет оценить долевым вклад конкретного объекта негативного воздействия на окружающую среду в совокупное загрязнение атмосферного воздуха территории жилой застройки по состоянию почв и впоследствии оценить целесо-

образность принятия решения о квотировании выбросов данного источника загрязнения. Выявление нескольких приоритетных ОНВОС предполагает проведение ранжирования источников по их вкладу в совокупное загрязнение атмосферного воздуха и степени социальной значимости учреждений [Федеральный закон № 195-ФЗ, 2019].

Обоснование ранжирования концентрации тяжелых металлов и биологических показателей состояния почв. Теоретическая модель (1) удовлетворительно описывает опытные данные по микробиологической активности почв пробных площадок (табл. 6). Аппроксимация экспериментальных данных теоретической функцией (1) позволила оценить воздействие тяжелых металлов в виде их результирующей концентрации Z в почве на микробиологическую активность почв в окрестностях некоторых ОНВОС, а также определить пороговую концентрацию Z_4 химических соединений в почве (табл. 6).

График биологического отклика на результирующую концентрацию тяжелых металлов в почвах в обобщенном для всех откликов виде (рис. 4) представляет собой экстремальную кривую в виде деформированного колокола. Он обладает тем же набором особых точек, приведенным в таблицах индивидуальных биологических откликов. Более того, в тех случаях, когда индивидуальные графики при переходе к переопределенной системе координат совпадают, они имеют одинаковые особые точки.

Таблица 6

Параметры и особые точки уравнения модели (1) зависимости микробиологических показателей от результирующей концентрации тяжелых металлов ($\text{мг}\cdot\text{кг}^{-1}$) в почве пробных площадок

Зона	Λ	B	K	RMSE	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	z_6	q_{14}
Базальное дыхание, $\text{мкг}\cdot\text{C}\cdot(\text{г}\cdot\text{ч})^{-1}$											
УР № 1	5,5E+18	13,0	127,9	0,09	5,8	7,2	8,9	9,8	12,5	14,8	1,5
ИП	1,01E+65	40,9	563,4	1,17	10,3	11,7	13,3	13,8	15,9	17,7	4,0
УР № 2	4,84E+23	14,2	233,3	0,10	9,9	12,2	15,0	16,4	20,6	24,3	1,8
Субстрат-индуцированное дыхание, $\text{мкг}\cdot\text{C}\cdot(\text{г}\cdot\text{ч})^{-1}$											
УР № 1	7,85E+30	17,7	309,2	2,40	1,3	2,7	4,0	17,5	22,7	32,6	17,2
ИП	3,61E+116	72,7	1028,8	4,21	11,4	12,5	13,9	14,2	15,8	17,1	19,1
УР № 2	1,65E+26	15,2	263,8	0,95	10,6	13,0	15,9	17,3	21,6	25,4	6,8
Углерод микробной биомассы почв, $\text{мкг}\cdot\text{C}\cdot\text{г}^{-1}$ почвы											
УР № 1	2,13E+37	20,5	364,14	45,64	11,8	14,0	16,8	17,8	21,7	25,0	745
ИП	1,49E+118	72,7	1028,8	170,01	11,4	12,5	13,9	14,1	15,8	17,1	773
УР № 2	5,23E+28	15,6	273	29,34	10,8	13,2	16,1	17,5	21,8	25,5	334
Обобщение биологических откликов, б/р											
Все ОНВОС	2,09E+07	17,1	16,9	0,22	0,63	0,76	0,92	0,99	1,23	1,43	0,63

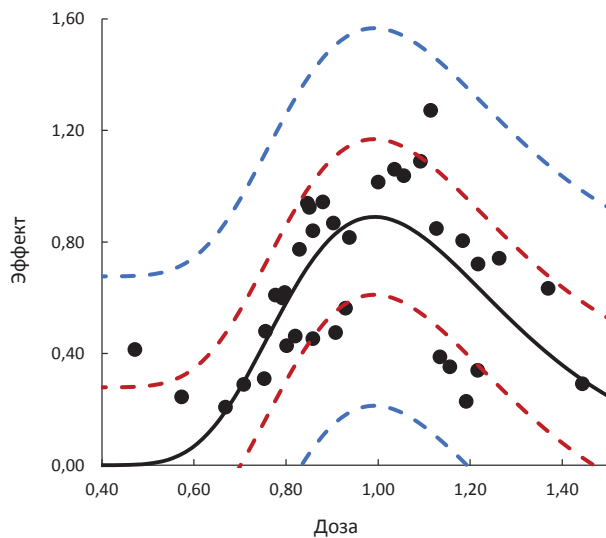


Рис. 4. Биологический отклик на результирующую концентрацию тяжелых металлов в почвах окрестностей объектов добычи и переработки каменного угля в обобщенном для микробиологических показателей виде; точки — эксперимент, сплошная линия — по уравнению (1), пунктир — доверительные пояса модели

На основе пятиуровневой шкалы качества почвы и показателя ее состояния p провели ранжирование качества почв в окрестностях объектов добычи каменного угля (табл. 7) [Глазунов и др., 2018]. На равномерной шкале показателя состояния p (2) с использованием коэффициентов $\alpha = -0,7$ и $\gamma = 0,114$ рассчитали недостающие значения отклика y для p , равного 0,5 и 0,75. Имея в виду, что угнетающее действие тяжелых металлов проявилось при концентрации x_4 , приняли эту величину за x_0 . Крайне неблагоприятное состояние биологической системы x_* соответствует особой точке x_6 , p в данном случае равно 1.

Таблица 7

Ранжирование качества почв по показателю состояния p , рассчитанного на основе обобщенного биологического отклика

Категория	Состояние	Концентрация	Описание
1	$0 \leq p < 0,25$	$0 < x \leq 0,99$	Недеградированные (ненарушенные)
2	$0,25 \leq p < 0,5$	$0,99 < x \leq 1,31$	Слабодеградированные
3	$0,5 \leq p < 0,75$	$1,31 < x \leq 1,39$	Среднедеградированные
4	$0,75 \leq p < 1$	$1,39 < x \leq 1,43$	Сильнодеградированные
5	$p = 1$	$x > 1,43$	Очень сильнодеградированные (разрушенные)

Отнесение нормированных концентраций z/z_4 к категориям качества на равномерной шкале показателя состояния p (2) позволило сделать вывод о том, что почвы прилегающих к основным структурным подразделениям предприятия по добыче каменного угля территорий характеризуются преимущественно фоновым (ненарушенным) состоянием или слабодеградированы, таким образом, вред почвам как компоненту окружающей среды не нанесен.

Обсуждение

Загрязнение атмосферного воздуха исследуемой территории связано с работой ОНВОС, находящихся в ведении предприятия по добыче и переработке каменного угля, а также с пылегазовыми выбросами передвижных источников воздействия, муниципальных котельных и АИТ, расположенных в жилой зоне. Расчетными методами были определены приоритетные компоненты выбросов предприятия, которыми стали: углерод (сажа), пыль неорганическая и пыль каменного угля, а также обоснован перечень ОНВОС, осуществляющих основной вклад в совокупное состояние атмосферного воздуха территории: основная промплощадка № 1; складская зона и угольный разрез № 2.

На основе теоретической модели [Гендуглов, Глазунов, 2014; Глазунов и др., 2019] биологического отклика в форме NDVI на воздействие комплекса тяжелых металлов определенного набора, содержащегося в почвах окрестностей ОНВОС, связанных с угледобычей, установлены предельно допустимые уровни их содержания, не вызывающие снижения значений вегетационного индекса, рассчитанного по материалам спутников Sentinel-2. Границы зоны воздействия ОНВОС установлены путем соединения местоположений, соответствующих особой точке z_4 на макрокинетической кривой [Гендуглов, Глазунов, 2014], прямыми линиями. Визуальные признаки деградации почв внутри границ данной зоны выявлены не были. За пределами границ воздействия распространены территории природно-антропогенного фона [Яковлев, Евдокимова, 2022].

Загрязняющие вещества, переносимые по воздуху в составе пыли с объектов добычи и переработки каменного угля и осаждающиеся вместе с атмосферными осадками на поверхность почвы, не создают геохимические аномалии (ореолы загрязнения) в почвах и снежном покрове.

Обобщение на одной кривой биологических откликов в форме базального, субстрат-индуцированного дыхания и углерода микробной биомассы на полиэлементное загрязнение почв позволило получить полную кривую «доза-эффект» для более чувствительных биологических показателей. Тем самым была обоснована правомерность выбора ведущих компонентов субстрата (загрязняющих веществ почв). Полезным результатом обобщен-

ной модели явилась обратимость переходов от перепределенной системы координат к исходным показателям и от особых точек обобщенной модели к индивидуальным особым точкам.

Почвы прилегающих к основным структурным подразделениям предприятия территорий характеризуются преимущественно фоновым (ненарушенным) состоянием. На части пробных площадок были выявлены слабодegradированные почвы, в связи с чем можно констатировать, что с точки зрения воздействия на почвенный покров принятие решения о снижении (квотировании) выбросов данных ОНВОС не приведет к улучшению состояния почв.

Заключение

Результаты исследования показали, что использованный в работе подход к экологической оценке состояния земель, испытывающих воздействие ОНВОС, применим в условиях дальневосточной таежно-лесной почвенно-биоклиматической области. На основе теоретической модели биологического отклика в форме NDVI на воздействие комплекса тяжелых металлов получены пороговые результирующие концентрации тяжелых металлов в почвах, что, в свою очередь, открыло возможность выявления зон воздействия для конкретных источников выброса в атмосферу.

Важным дополнением подхода стали подспутниковые измерения микробиологической активности почв, а также геохимические исследования территории в зоне воздействия основных ОНВОС. Оценка экологического состояния почв и снегового покрова позволила выявить ореолы их фактического загрязнения.

Таким образом, с учетом полевой верификации подход к выявлению зон воздействия промышленных предприятий может быть рекомендован к использованию в целях установления индивидуального вклада ОНВОС в формирование совокупного состояния атмосферного воздуха по экологическому состоянию почв. Ограничениями применимости модели служат условия, сформулированные при ее выводе, среди которых важнейшими являются предположения об однотипности почвенно-гидрологических и геоморфологических условий на пробных площадках, а также сходстве химизма загрязнения окружающей среды.

Благодарность

Авторы выражают глубокую благодарность безвременно ушедшим д. б. н., профессору Г.П. Глазунову и канд. ф.-м. наук, вед. науч. сотр. В.М. Гендугову за создание теоретической модели, ставшей основой для оценки и нормирования состояния почв и растительного покрова в зоне воздействия промышленного предприятия.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреева О.А., Кожевникова П.А. Оптимизация естественного сообщества микроорганизмов почвы как способ создания микробных удобрений // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2014. № 4.
2. Бакунович Н.О., Хохлова О.С., Мякина Т.Н. и др. Загрязнение тяжелыми металлами и дыхательная активность микроорганизмов в нативных почвах и искусственных субстратах (на примере заповедного участка «Ямская степь») // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2016. № 85.
3. Битюкова В.Р., Дехнич В.С., Кравчик А.И. и др. Оценка влияния автономных систем отопления жилых строений на загрязнение воздуха в муниципальных образованиях (на примере Байкальского региона) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2024. № 1.
4. Воробейчик Е.Л., Садыков О.Ф., Фарафонов М.Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений. Екатеринбург, 1994.
5. Гендугов В.М., Глазунов Г.П. Макрокинетическая модель микробного роста на многокомпонентном субстрате // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2014. № 3.
6. Геохимия окружающей среды / Ю.Е. Саэт, Б.А. Ревич, Е.П. Янин и др. М., 1990.
7. Глазунов Г.П., Гендугов В.М., Евдокимова М.В. и др. Макроскопическая кинетика временной и пространственной изменчивости вегетационного индекса NDVI на территории заповедника «Ямская степь» в условиях загрязнения почвы тяжелыми металлами // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 2.
8. Глазунов Г.П., Гендугов В.М., Яковлев А.С. и др. Научные основы экологической оценки состояния компонентов окружающей среды и нормирования их качества. М., 2018.
9. Евдокимова М.В., Глазунов Г.П., Яковлев А.С. и др. Оценка экологического состояния земель, загрязненных комплексом тяжелых металлов, в окрестностях города Норильска за период с 2004 по 2019 г. по материалам NDVI MODIS с сервера Vega-Science // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 4.
10. Евдокимова М.В., Яковлев А.С. Экологическая оценка состояния почв и растительного покрова в окрестностях горно-обогатительного комбината по данным дистанционного зондирования Земли // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2023. № 1.
11. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России [Электронный ресурс]. 2014. URL: <http://egrpr.soil.msu.ru/download.php#soilmap> (дата обращения: 13.12.2023).

12. Касимов Н.С., Кошелева Н.Е., Поповичева О.Б. и др. Загрязнение Московского мегаполиса: мониторинг химического состава микрочастиц в системе «атмосфера–снег–дорожная пыль–почвы–поверхностные воды» // Метеорология и гидрология. 2023. № 5.
13. Кожевин П.А. Показатели почвенного «здоровья» в оценке почв (обзор) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2023. № 2.
14. Кречетов П.П., Королева Т.В., Черницова О.В. и др. Экологическое нормирование в районах падения отделяющихся частей ракет-носителей // МНКО. 2010. № 5.
15. Ладонин Д.В. Формы соединений тяжелых металлов в техногенно-загрязненных почвах: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 2016.
16. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А. и др. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 3. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170>
17. М-МВИ-80-2008 Методика выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложениях методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии.
18. Максимова Н.В. Уточненная оценка загрязнения воздушного бассейна промышленно развитого региона с учетом снежного мониторинга: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Тула, 2000.
19. Манучарова Н.А., Ксенофонтова Н.А., Белов А.А. и др. Прокариотный компонент нефтезагрязненной торфяной олиготрофной почвы при разном уровне минерального питания // Почвоведение. 2021. № 1.
20. Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве. М., 1990.
21. Никитин Д.А., Семенов М.В., Чернов Т.И. и др. Микробиологические индикаторы экологических функций почв (обзор) // Почвоведение. 2022. № 2.
22. Оводков М.В., Миронова А.Д., Никитин М.В., Ткачев М.А. О подготовке сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха в рамках федерального проекта «Чистый воздух» и эксперимента по квотированию выбросов // Охрана атмосферного воздуха. Новые подходы и пути решения: сборник трудов к XXV Экологическому конгрессу «Атмосфера-2024». СПб., 2024.
23. Осипов С.В. Леса и редколесья гольцово-таежных ландшафтов Буреинского нагорья (разнообразие, структура, динамика) // Сибирский лесной журнал. 2015. № 1.
24. Плеханова И.О., Золотарева О.А. Экологическое нормирование состояния почв, загрязненных тяжелыми металлами // Агрохимия. 2020. № 10.
25. Поляк Ю.М., Сухаревич В.И. Почвенные ферменты и загрязнение почв: биодegradация, биоремедиация, биоиндикация // Агрохимия. 2020. № 3.
26. Приказ Минприроды России от 06.06.2017 № 273 «Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе».
27. Приказ Минприроды России от 29.11.2019 г. № 813 «Об утверждении правил проведения сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха, включая их актуализацию».
28. Приказ Минприроды России от 31.07.2018 г. № 341 «Об утверждении Порядка формирования и ведения перечня методик расчета выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух стационарными источниками».
29. Природные условия государственного природного заповедника «Буреинский» [Электронный ресурс]. 2019. URL: <https://zapbureya.ru/o-nas/prirodnye-usloviya/> (дата обращения: 03.05.2024).
30. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».
31. Семенов И.Н., Шаропова А.В., Леднев С.А. и др. Фракционный состав соединений металлов и серы в верхнем слое почв зон воздействия террикона угольной шахты (среднерусская лесостепь) // Аридные экосистемы. 2023. Т. 29, № 2(95).
32. Семикобыла Я.Г., Добровольский А.И. Прогноз экологической ситуации в горнопромышленном районе шахты Северная ОАО «Ургалуголь» с увеличением ее мощности // Уголь. 2011. № 2(1018).
33. Федеральный закон № 195-ФЗ от 26.07.2019 г. «О проведении эксперимента по квотированию выбросов загрязняющих веществ и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части снижения загрязнения атмосферного воздуха».
34. Шаропова А.В., Семенов И.Н., Кречетов П.П. и др. Влияние керосина на целлюлозолитическую активность дерново-подзолистой и песчаной пустынной почвы (лабораторный эксперимент) // Почвоведение. 2022. № 2.
35. Шарыгина И.О., Игнатьева Ю.С., Вельбовец Ю.И., Столярова С.А. Перспективы развития экологического нормирования качества атмосферного воздуха в рамках реализации положений Федерального закона от 21.07.2014 № 219-ФЗ // Управление качеством. 2019. № 12.
36. Экологическое нормирование и управление качеством почв и земель / Под общ. ред. С.А. Шобы, А.С. Яковлева, Н.Г. Рыбальского. М., 2013.
37. Яковлев А.С., Евдокимова М.В. Подход к установлению зон экологической ответственности предприятий и уровней природно-антропогенного фона почв // Почвоведение. 2022. № 9.
38. Ananyeva N.D., Susyan E.A., Chernova O.V. et al. Microbial respiration activities of soils from different climatic regions of European Russia // European Journal of Soil Biology. 2008. № 44 (2).
39. Minkina T., Fedorenko G., Nevidomskaya D. et al. Biogeochemical and microscopic studies of soil and *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. plants affected by coal mine dumps // Environmental Science and Pollution Research. 2023. Vol. 31.
40. Tucker C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // Remote Sens Environ. 1979. Vol. 8, Iss. 2.

Поступила в редакцию 21.06.2024

После доработки 23.07.2024

Принята к публикации 30.07.2024

ENVIRONMENTAL ASSESSMENT AND SOIL QUALITY REGULATION IN THE IMPACT ZONE OF COAL MINING AND PROCESSING FACILITIES

M. V. Evdokimova, A. S. Gorlenko, E. V. Prudnikova, M. M. Kalita, A. A. Movsisyan

The main purpose of the work was to verify the applicability of the approach to assessing the ecological state of soils and the theoretical model of the response of a living being in the form of a vegetation index to the impact of a complex of heavy metals in the zone of impact of coal mining and processing facilities in the conditions of the Far Eastern taiga-forest soil-bioclimatic region. The research was carried out in conjunction with a geochemical assessment of natural environments, which made it possible to consider the size of the impact zones of coal mining and processing facilities on the territory of the emission quota experiment conducted by the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation.

The inventory of emission sources allowed us to identify several priority areas: the main industrial site, an industrial boiler house, an integrated industrial site, two coal mines, etc. According to the results of the summary calculations of the dispersion of pollutants, the following priority pollutants were identified: carbon (soot), inorganic and coal dust.

The determination of soil and snow pollution levels made it possible to identify the localization of technogenic anomalies of heavy metals, as well as to determine the dust load on the studied area. The soil cover is characterized by a low level of pollution in terms of the total pollution index, however, the accumulation of trace elements in the surface layer of soils is typical for most of the studied metals and metalloids, as evidenced by concentration coefficients > 1 . Centers of snow cover pollution have been identified, confined to the residential area. Areas with very high levels of snow pollution are located near municipal boiler houses.

Based on a theoretical model of the response of a living in the form of a vegetation index to the effect of a complex of heavy metals of a certain set contained in the soils of the vicinity of a coal mining and processing enterprise, maximum permissible levels of their content have been established. The boundaries of the zone of influence of the main structural divisions of the coal mining enterprise, beyond which the territories of the natural and anthropogenic background are distributed, are determined. The soils in the vicinity of coal mining and processing facilities are characterized mainly by a background (undisturbed) condition or are poorly degraded, thus no harm has been done to the soils.

Keywords: Sentinel-2, NDVI, aerotechnogenic impact, environmental regulation, environmental geochemistry, emission quotas, background values, ecological zones.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Евдокимова Мария Витальевна, канд. биол. наук, доцент кафедры земельных ресурсов и оценки почв факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,
e-mail: soil.resources@mail.ru

Горленко Анастасия Сергеевна, канд. биол. наук, ст. науч. сотр. кафедры земельных ресурсов и оценки почв факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,
e-mail: anastasrcru@gmail.com

Прудникова Ева Владимировна, аспирантка кафедры земельных ресурсов и оценки почв факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова, мл. науч. сотр. лаборатории экотоксикологического анализа почв (ЛЭТАП),
e-mail: eva.pr@mail.ru

Калита Мария Михайловна, аспирантка кафедры земельных ресурсов и оценки почв факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова, инж.-лаб. 1 кат. ЛЭТАП,
e-mail: mari-kalita@mail.ru

Мовсисян Артем Арменович, магистрант кафедры земельных ресурсов и оценки почв факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,
e-mail: kanjjji@mail.ru