



Научная статья

УДК 631.41:504.05

EDN: MMDCUU

DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-3-365-381

## Оценка эколого-функциональных свойств почвенного покрова городских лесов Иркутской области

О.В. Шергина<sup>a✉</sup>

<sup>a</sup>Сибирский институт физиологии и биохимии растений Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

**Резюме.** Проблема антропогенного изменения биогеоценологических функций почвенного покрова городских лесов Иркутской области требует познания механизмов функционирования этих территорий и своевременной оценки экологических последствий. Цель исследований заключалась в подборе перечня необходимых показателей-индикаторов, описывающих эколого-функциональные свойства почв, которые позволяют с высокой степенью информативности оценить изменение экологического состояния почвенного покрова в условиях урбанизированной среды. Из всего многообразия эколого-функциональных свойств почв оценивались те, которые напрямую связаны с оздоровлением окружающей среды городов: детоксицирующая способность, питательный режим и буферность почвы. Показано, что наиболее информативными являются параметры лесной подстилки и верхних гумусовых горизонтов почв. Установлено, что все выбранные показатели-индикаторы почв отличаются высоким уровнем взаимных корреляций, что отражает их высокую функциональность в условиях негативного антропогенного воздействия (техногенное загрязнение и рекреационная нагрузка) городской среды. Результаты исследований расширили представление об экологических механизмах адаптации почв к антропогенным нагрузкам и роль этих компонентов в поддержании экологического равновесия на урбанизированной территории. Представленный подход на основе выбранных информативных параметров лесных почв урбанизированных территорий позволил не только судить об экологическом потенциале почв, о возможности очищения и восстановления городской среды в сложившихся условиях азротехногенного загрязнения и рекреационной нагрузки, но и разрабатывать рекомендации по оптимизации состояния окружающей среды в городах.

**Ключевые слова:** функционирование естественных лесных почв, техногенное загрязнение, рекреационная нагрузка, устойчивость почв

**Благодарности:** Работа была выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (рег. № НИОКТР – 125021702332-4).

**Для цитирования:** Шергина О.В. Оценка эколого-функциональных свойств почвенного покрова городских лесов Иркутской области // Науки о земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 3. С. 365–381. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-3-365-381>. EDN: MMDCUU.

Original article

## Assessment of environmental and functional properties of Irkutsk region urban forest soil cover

Olga V. Shergina<sup>a✉</sup>

<sup>a</sup>Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

**Abstract.** The problem of anthropogenic changes in the biogeocenotic functions of the soil cover of urban forests in the Irkutsk region requires knowledge of the territory functioning mechanism and timely assessment of environmental consequences. The purpose of the research lies in the selection of a list of necessary indicators that describe the environmental and functional properties of soils, which allow a highly informative assessment of changes in the environmental state of the soil cover in an urbanized environment. The research assesses those environmental and functional properties of soils which are directly related to the improvement of the urban environment including detoxifying ability, nutritional regime and soil buffering capacity. Forest litter and upper humus horizon parameters are shown to be the most informative. All selected soil indicator parameters are found to have high levels of mutual correlation, reflecting their high functionality under the negative anthropogenic impacts (technogenic pollution and recreational load) of the urban environment. The research results expanded our understanding of the environmental mechanisms of soil adaptation to anthropogenic loads and the



role of these components in maintaining ecological balance in urban areas. The presented approach based on selected informative parameters of forest soils in urban areas enabled to assess the environmental potential of soils as well as the feasibility of cleaning and restoring the urban environment under the current conditions of airborne anthropogenic pollution and recreational loads. It also allowed to develop recommendations for optimizing urban environmental conditions.

**Keywords:** functioning of natural forest soils, technogenic pollution, recreational load, soil stability

**Acknowledgements:** The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (reg. No. NIOKTR – 125021702332-4).

**For citation:** Shergina O.V. Assessment of environmental and functional properties of Irkutsk region urban forest soil cover. *Earth sciences and subsoil use*. 2025;48(3):365-381. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-3-365-381>. EDN: MMDCUU.

## Введение

Многие урбанизированные территории Иркутской области характеризуются такой уникальной особенностью, как сохранение естественных лесных массивов внутри городского каркаса. В городских лесах региона произрастают различные древесные породы естественного происхождения на природно сформированных почвах [1]. В настоящее время изучение городских лесов является одним из важнейших направлений в экологии урбанизированных территорий [2–4]. Естественные леса не только являются более устойчивыми объектами в сравнении с искусственно созданными парками и скверами, но и выполняют значимые средорегулирующие функции для сохранения оптимального состояния окружающей среды [5]. Сейчас все большее число городских лесов получает статус особо охраняемых территорий, что свидетельствует о признании важности этих природных компонентов для урбанизированных территорий [6, 7].

Понимание ценности городских лесов, их функционального назначения может способствовать принятию природоохранных решений в целях улучшения качества окружающей среды [8]. На урбанизированных территориях Иркутской области ранее не проводились исследования уникальных естественно сохранившихся лесных территорий. Основными факторами, оказывающими негативное воздействие на городские леса в регионе, служат высокая рекреационная нагрузка и техногенное загрязнение [9]. Необходимо отметить, что уровень промышленного загрязнения воздушного бассейна в регионе довольно высок вследствие сосредоточения крупных центров теплоэнергетики, цветной металлургии,

топливной, химической и нефтехимической промышленности<sup>1</sup>. Более того, в будущем высока вероятность усиления антропогенного воздействия, поскольку Иркутская область перспективна для дальнейшего хозяйственного освоения<sup>2</sup>. В этом плане для улучшения экологической ситуации (помимо сокращения объемов техногенных выбросов и снижения уровня рекреационной нагрузки) важным является разрабатывание научно обоснованных подходов улучшения состояния естественных лесов, которые выполняют важнейшую роль в оздоровлении окружающей среды [10].

Почвы занимают важнейшее место в структурно-функциональной организации лесных биогеоценозов. Уникальным экологическим звеном в городских лесах являются естественные почвы, которые выполняют важнейшую роль в биогеохимических циклах и поддержании биоразнообразия городской среды в целом [11, 12]. Важную роль в сохранении экологического равновесия в биогеоценозе играют такие педохимические процессы, как аккумуляция элементов-биогенов в органической подстилке и гумусовом веществе, детоксикация элементов-загрязнителей и миграция подвижных форм элементов в почвенном профиле [13, 14].

Данные по изучению почв городских лесов позволяют информативно оценивать уровень антропогенной нагрузки на экосистему и определять необходимость применения экологических методов по оптимизации окружающей среды [15–17]. Поэтому важным этапом при оценке экологической обстановки на урбанизированных территориях должно являться получение информативных данных об оценке эколого-функциональных свойств

<sup>1</sup> Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2022 году». Иркутск: Изд-во ООО «Максима», 2023. 285 с.

<sup>2</sup> Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году». М.: Изд-во Минприроды России; МГУ им. М.В. Ломоносова, 2023. 686 с.



городских почв [18]. В то же время концепция сохранения природных почв как уникальных компонентов экосистем урбанизированных территорий является основой устойчивого природопользования [19]. Это позволило определить цель исследования – оценить эколого-функциональные свойства естественных городских почв по комплексу информативных индикаторов (детоксицирующая способность, минеральный режим, буферные свойства) и выявить функциональные особенности трансформации природной среды в условиях промышленного загрязнения и рекреационной нагрузки в урбоэкосистемах Иркутской области (города Усолье-Сибирское и Ангарск).

### Материалы и методы исследования

Исследования выполнялись в 2021–2023 гг. на территориях городов Усолья-Сибирского и Ангарска Иркутской области, в городских лесах естественного происхождения, локально сохранившихся в разных районах урбанизированных территорий. Из многих негативных факторов, влияющих на городские лесные биогеоценозы, нами рассматривалось воздействие на почвенный покров рекреационной нагрузки и загрязнение окружающей среды. По данным Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, уровень загрязнения воздуха в городах оценивается как высокий<sup>2</sup>. Кроме того, природные особенности (холмистый рельеф, длительные периоды слабых ветров, температурные инверсии воздуха, пониженное среднегодовое количество осадков) не способствуют активному самоочищению приземного слоя воздуха [20]. Помимо загрязнения городские лесные почвы испытывают существенное негативное воздействие рекреационного лесопользования: вытаптывание живого напочвенного покрова, захламливание поверхности [21]. Исследования почв осуществлялись в выбранных городских лесных массивах размерами от 10 до 15 га, в каждом из них закладывали пробную площадь (ПП). Фоновая ПП располагалась на удалении более 150 км от городов

(рис. 1). Закладка ПП проводилась в соответствии с международной методикой ICP Forest [22] и общепринятыми методами полевого мониторинга лесных почв<sup>3,4</sup>. Всего было создано 13 ПП (табл. 1). Размер каждой ПП составлял 0,1 га (1000 м<sup>2</sup>). Следует отметить, что в городских лесах, которые располагались на удалении 2–5 км от промышленного источника загрязнения, доминирующим антропогенным воздействием являлось техногенное загрязнение, на территориях внутри жилых застроек обнаруживался высокий уровень рекреационной нагрузки.

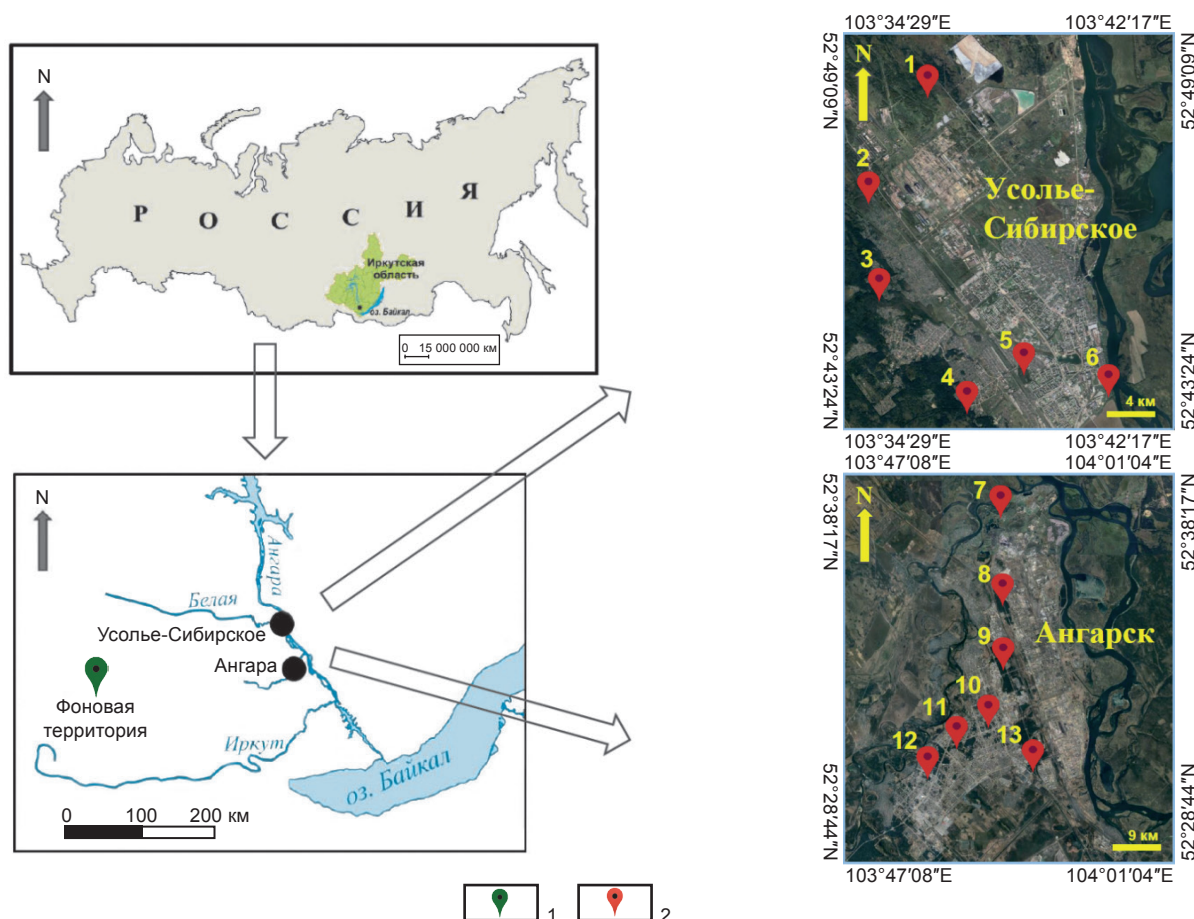
В городских сосново-березовых лесах были заложены почвенные разрезы глубиной до 1,5 м и проводилось описание почвенного профиля (рис. 2). Название типа почв и индексов горизонтов устанавливалось в соответствии с общепринятой классификацией и единым государственным реестром почвенных ресурсов России [23]. На каждой ПП в полевых условиях проводился отбор почвенных проб и изучались морфологические и физико-химические свойства (плотность сложения, влажность, пористость, аэрация) лесной подстилки, верхних гумусовых горизонтов и всех горизонтов почвенного профиля.

Эколого-функциональные свойства почв изучались по комплексу кислотно-основных, катионообменных, гумификационных показателей почв, миграции элементов-биогеоценов и элементов-поллютантов в горизонтах почвенного профиля<sup>5</sup> [24, 25]. Элементный химический состав почв определялся методами атомно-абсорбционной спектrophотометрии, фотоколориметрирования с использованием сертифицированных методов и приборного парка Сибирского института физиологии и биохимии растений Сибирского отделения Российской академии наук, центра коллективного пользования «Биоаналитика» и Республиканского аналитического центра (г. Улан-Удэ). Использовалось следующее высокотехнологичное оборудование: атомно-абсорбционный спектрофотометр AAnalyst 600 (PerkinElmer Life and Analytical Sciences, США), спектрофотометр UNICO 2100 (United

<sup>3</sup> Мотузова Г.В., Безуглова О.С. Экологический мониторинг почв: учеб. пособие. СПб.: Изд-во «Академический проект», 2007. 240 с. EDN: VRSIIR.

<sup>4</sup> Васильченко А.В. Почвенно-экологический мониторинг: учеб. пособие. Оренбург: Изд-во ОГУ, 2017. 281 с.

<sup>5</sup> Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами / под ред. Н.Г. Зырина, С.Г. Малахова. М.: Гидрометеиздат, 1981. 109 с.



**Рис. 1. Карта-схема расположения пробных площадей на территориях городов Усолье-Сибирского и Ангарска:**

1 – пробная площадь на городской территории; 2 – фоновая пробная площадь

**Fig. 1. Map-diagram of sample plot location in the cities of Usolye-Sibirskoye and Angarsk:**

1 – urban sample plot; 2 – background sample plot

**Таблица 1. Характеристика пробных площадей городских лесов**

**Table 1. Characteristics of urban forest sample plots**

Номер ПП	Географические координаты	Доминирующее антропогенное воздействие	Тип/подтип почвы	Состав древостоя*
Усолье-Сибирское				
1	52°48'43"N; 103°34'27"E	Техногенное загрязнение	Серая лесная среднемощная	6С4Б
2	52°47'09"N; 103°35'02"E	Техногенное загрязнение	Серая лесная среднемощная	7Б3С
3	52°47'25"N; 103°38'33"E	Рекреационная нагрузка	Светло-серая лесная маломощная	9С1Б
4	52°43'57"N; 103°36'59"E	Рекреационная нагрузка	Серая лесная среднемощная	8С2Б
5	52°44'10"N; 103°38'45"E	Рекреационная нагрузка	Серая лесная мощная	7С3Б
6	52°43'19"N; 103°41'09"E	Рекреационная нагрузка	Светло-серая лесная среднемощная	7Б3С
Ангарск				
7	52°37'27"N; 103°53'54"E	Рекреационная нагрузка	Серая лесная среднемощная	7С3Б
8	52°34'47"N; 103°54'03"E	Техногенное загрязнение	Светло-серая лесная среднемощная	6С4Б
9	52°33'01"N; 103°54'08"E	Техногенное загрязнение	Серая лесная маломощная	7С3Б
10	52°31'34"N; 103°52'13"E	Рекреационная нагрузка	Серая лесная среднемощная	6С4Б
11	52°31'09"N; 103°51'06"E	Рекреационная нагрузка	Светло-серая лесная среднемощная	7С3Б
12	52°29'10"N; 103°48'02"E	Рекреационная нагрузка	Серая лесная среднемощная	8С2Б
13	52°28'53"N; 103°57'14"E	Техногенное загрязнение	Серая лесная среднемощная	7С3Б
Фоновая территория				
–	52°10'29"N; 103°15'01"E	Отсутствует	Серая лесная мощная	7С3Б

*Примечание.* ПП – пробная площадь; \* – формулы древостоя представляют собой условные обозначения состава древесных пород в лесу; сумма долей деревьев равна 10 единицам (нормативному значению); С – сосна, Б – береза.





**Рис. 2. Городские сосново-березовые леса на серых лесных почвах (г. Ангарск)**  
**Fig. 2. Urban pine-birch forests located on grey forest soils (Angarsk city)**

Products & Instruments, Inc., США), анализатор вольтамперометрический TA-Lab («ТомьАналит», Россия).

Для статистической обработки всех полученных данных применяли программу «Среда статистических вычислений R» и ее использование в Data Mining<sup>6</sup>. Вычислялись средние величины каждого параметра и их стандарт-

ные отклонения. Для установления корреляций между показателями использовали непараметрический коэффициент Спирмена. Проверку равенства средних значений в парных выборках проводили с помощью *t*-критерия. Достоверность различий оценивали с помощью критерия Манна – Уитни (при  $P \leq 0,05$ ). Все приведенные в данной работе значения

<sup>6</sup> Шипунов А.Б., Балдин Е.М., Волкова П.А., Коробейников А.И., Назарова С.А., Петров С.В. [и др.]. Наглядная статистика. Используем R!: учеб. пособие. М.: Изд-во ООО «ДМК Пресс. Электронные книги», 2012. 298 с. EDN: QOOUQJ.





показателей имеют статистически достоверные различия. Для дифференциации полученных данных применялся кластерный анализ, выполненный в программе StatSoft STATISTICA 10.0.1011. Для построения карт-схем применяли картографические программы: Surfer 23.1.162, CorelDRAW Graphics Suite X8 Portable, а также использовались электронные карты Google Earth (<https://www.google.ru/intl/ru/earth/>) и Google Maps (<https://www.google.ru/maps/>).

### Результаты исследования и их обсуждение

При натурном обследовании установлено, что в городских сосново-березовых лесах Усо-лья-Сибирского и Ангарска распространены два основных подтипа серых лесных почв – собственно серые лесные и светло-серые лесные почвы [23]. По международной классификации почв (WRB, от англ.: World reference base of soil resources) описанные подтипы относятся к Greyic Phaeozems Albic<sup>7</sup>. Почвенный профиль представлен совокупностью следующих горизонтов: A0 – A1 – A2 – A2B – B1 – B2 – BC – C, при этом зоны органической, гумусовой, элювиальной и иллювиальной аккумуляции веществ четко дифференцированы по глубине и не отличаются от расположения в почвенном профиле на фоновой территории. Вместе с тем выявлен ряд отличий городских почвенных профилей от фоновых по морфологическим признакам. В верхних слоях городских почв зафиксированы интенсивные потоки гумуса, которые распространены хаотично в виде фронтальных языков; минеральные горизонты имеют в основном плитчато-комковатую и комковатую структуру; в горизонтах присутствует белесая присыпка, часто наблюдается неоднородное окрашивание, присутствие сизых и серовато-бурых пятен и линз; текстурные минеральные горизонты имеют более светлые оттенки, по структуре они плитчатого строения и характеризуются повышенной водоудерживающей способностью. В ряде случаев наличие очень плотных текстурных горизонтов в городских серых лесных почвах приводит к развитию процесса антропогенного оглеения, что, как известно, значительно снижает плодородие почвы [26]. В целом морфологические признаки указывают на наличие

ряда неблагоприятных процессов в городских почвах, включающих разрушение строения почвенных агрегатов, развитие оглеения и солонцевания почв, нарушение деградации органического вещества, изменение миграции гумусовых веществ, увеличение содержания антропогенных включений в горизонтах. Значительные отличия городских почв от фоновой почвы вызваны воздействием высокого или среднего уровня рекреационной нагрузки, поэтому негативные изменения наблюдаются прежде всего в лесной подстилке и верхних гумусово-аккумулятивных горизонтах.

Изменение эдафических условий служит определяющим фактором особенности произрастания деревьев и травянистых растений на городских территориях [21]. Как правило, древостои сосны и березы, произрастающие на городских почвах – это одноярусные, средневозрастные (50–70 лет), средние по высоте (16–25 м), негустые (полнота 0,3–0,4 ед.), часто встречаются ослабленные деревья со всевозможными механическими повреждениями. Травостой, как правило, средний по высоте, негустой, неоднородный, проективное покрытие составляет 60–70 %, общая численность видов колеблется от 15 до 26, при этом доля лесных видов составляет 65 %, доля сорных видов может достигать 20–40 %. Видами-доминантами травянистых являются: *Carex*, *Poa pratensis*, *Trifolium pretense*, *Ranunculus sceleratus*, *Polygonum aviculare*, *Achillea millefolium*, *Plantago depressa*, *Carum carvi*, *Phleum pratense*.

*Изучение детоксицирующей способности лесных почв.* Способность почвы выполнять детоксикацию в первую очередь связана с процессами аккумуляции и миграции биогеохимических потоков элементов и их соединений по почвенному профилю [27, 28]. Для оценки детоксицирующей способности лесных почв проводилось изучение таких показателей, как кислотность почвенной среды, содержание органических веществ (гумуса) и накопление элементов-загрязнителей, в особенности тяжелых металлов (ТМ), подвижных форм серы и хлора, по глубине почвенного профиля. При изучении актуальной кислотности почв установлено, что в лесных почвах городских территорий обнаруживается сдвиг реакции среды почвенных растворов в сторону щелоч-

<sup>7</sup> World reference base for soil resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Rome: FAO, 2014. 191 p.

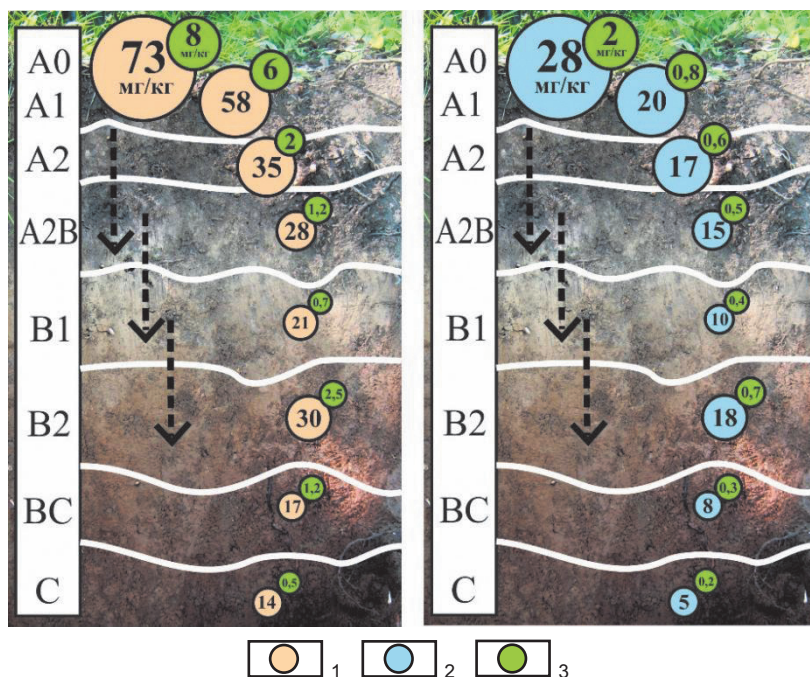


ных значений. Так, в органической подстилке наблюдается увеличение актуальной кислотности до значений рН (водн.) 7,8 при фоновом уровне 5,7, а в гумусовых горизонтах – до 8,1 при значении фона рН (водн.) 5,2. При этом подщелачивание почв вызывает четкое снижение уровня гидролитической кислотности – величины, которая свидетельствует об общем содержании всех кислотных компонентов (ионы железа, алюминия и др.) в почвенном растворе. Исследования показали, что даже при невысоком подщелачивании почв наблюдается выраженная тенденция снижения гидролитической кислотности. Между актуальной кислотностью почвенного раствора всех генетических горизонтов серых лесных почв и гидролитической кислотностью выявлена корреляционная зависимость ( $r = 0,83$ ,  $n = 118$ ). Значения гидролитической кислотности более стабильны, что позволяет наиболее точно определить уровень подщелачивания почв и оценить их потенциальную устойчивость к антропогенной нагрузке. Проведение лизиметрических исследований показало, что уровень загрязнения лесных почв ТМ, серой, хлором обусловлен двумя ключевыми педохимическими процессами – вертикальной миграцией элементов по почвенному профилю и аккумуляцией в органическом веществе. Миграция в значительной степени обусловлена изменением реакции почвенного раствора, а именно подщелачиванием верхних горизонтов почв и снижением щелочности с глубиной. Увеличение щелочности затрудняет подвижность ТМ и снижает их миграционную активность, вместе с тем увеличивается растворимость сульфат- и хлорид-ионов, повышая вероятность их переноса в нижние горизонты почвы. При биохимической аккумуляции элементы-загрязнители взаимодействуют с органическим веществом, образуя устойчивые соединения гумуса с металлами, что препятствует дальнейшему перемещению токсикантов в глубину почвы. Благодаря этому значительная доля загрязняющих веществ остается закрепленной в верхней части почвенного профиля, сохраняя относительно низкий уровень проникновения в нижние горизонты. При этом наблюдаемые процессы находятся в непрерывной геохимической взаимосвязи, которая определяет направленность детоксицирующей способности и сохранение оптимальных эколого-функциональных свойств почв.

На примере исследования физико-химической миграции сульфатов и хлоридов в почвенной толще лесных почв на территории г. Усолья-Сибирского показано высокое накопление токсикантов в гумусово-аккумулятивных горизонтах (A1, A2) и интенсивное иллювиальное перераспределение с глубиной вплоть до почвообразующих горизонтов (BC, C), располагающихся на глубине более 1,5 м (рис. 3).

Детальное изучение процессов миграции серы, поступающей в виде аэротехногенных выбросов диоксида серы на поверхность почвы, также выявило значительное перераспределение геохимического потока этого поллютанта в почвенном профиле. Показано, что в разных горизонтах почвенного профиля за счет их разных физико-химических свойств наблюдаются выраженные изменения в накоплении этого поллютанта. В горизонтах A0, A1, A2 осажденная и накопленная сера в виде сульфат-иона постепенно вымывается из органического вещества и поступает в минеральную фракцию горизонтов A2B, B1, откуда уже в составе легкорастворимых солей мигрирует до горизонта B2. Иллювиальные коллоиды минеральной фракции этого горизонта фиксируют большую часть сульфатов в виде гипса  $\text{CaSO}_4$  (накопление подтверждается результатами аналитического определения при его растворении раствором соляной кислоты), а другая их часть в процессе транзитного вымывания поступает в почвообразующие горизонты BC и C, где наблюдается дальнейшая их фиксация. Таким образом, техногенная сера активно вовлекается в миграционный поток в системе почвенных горизонтов, что обуславливает, с одной стороны, возможность ее миграции на разную глубину почв, а с другой – способствует ее фиксации в виде нерастворимых солей.

Изучение перераспределения биогеохимических потоков ТМ показало, что наибольшей хемосорбцией и детоксицирующей способностью по отношению к ТМ обладают лесная подстилка (A0) и верхние гумусовые горизонты (A1, A2, A2B), а также иллювиальные горизонты (B2), в которых фиксация ТМ происходит за счет минеральных коллоидов (табл. 2). Обнаружено, что в органическом веществе почв содержание подвижных форм ТМ может максимально превышать фоновые значения по свинцу до 30 раз, меди – до 16, кобальту и молибдену – до 10 раз, цинку –



**Рис. 3. Миграция подвижных (водорастворимых) форм серы и хлора по почвенному профилю серых лесных почв г. Усолья-Сибирского и фоновой территории:**  
1 – концентрация сульфат-иона в городских почвах; 2 – концентрация хлорид-иона в городских почвах;  
3 – концентрация сульфат- и хлорид-ионов в фоновых почвах

**Fig. 3. Migration of mobile (water-soluble) forms of sulfur and chlorine along the soil profile of grey forest soils of Usolye-Sibirskoye and the background area:**  
1 – sulfate ion concentration in urban soils; 2 – chloride ion concentration in urban soils;  
3 – sulfate and chloride ion concentration in the background soils

до 8, кадмию и никелю – до 7 раз, хрому, стронцию и титану – до 5 раз. Высокие концентрации ТМ обусловлены аккумуляцией в гумусовом веществе верхних горизонтов, это подтверждается выявленной линейной зависимостью ( $R^2 = 0,78$ ) между суммой приоритетных ТМ ( $\Sigma$ свинец, кадмий, цинк, медь, мг/кг) и накоплением органического углерода в городских серых лесных почвах. Кроме того, возрастает сорбционная активность подвижных ионов (катионов) кальция, магния, калия, натрия почвенного поглощающего комплекса (ППК) иллювиальных горизонтов В2 по отношению к ионам элементов-поллютантов, что приводит к иммобилизации последних на геохимическом барьере вследствие образования соединений с низкой скоростью миграции, таких как гидроксокомплексы цинка(II) калия, свинца(II) натрия, кадмия(II) натрия. В целом детоксицирующая способность городских лесных почв направлена на связывание и преобразование элементов-токсикантов в системе почвенного профиля, являясь важным механизмом ее устойчивости к антропогенным факторам окружающей среды. Необходимо учитывать, что при высоком уровне

загрязнения, превышающем емкость почвы к связыванию и преобразованию токсикантов, может произойти накопление загрязняющих веществ в почвенном профиле, что негативно скажется на состоянии окружающей среды. Поэтому мониторинг городских лесных почв, оценка их детоксицирующей способности и разработка мер по снижению антропогенной нагрузки являются важнейшими задачами для сохранения экологического равновесия в урбозкосистеме.

*Изучение питательного режима лесных почв.* Исследование лесных почв на урбанизированных территориях Иркутской области показало, что их функционирование в условиях антропогенной нагрузки направлено не только на оптимальное накопление органического вещества, а также на поддержание пула питательных элементов и формирование сбалансированного газового состава при минерализации органического вещества. Отличительной особенностью городских серых лесных почв является сохранение хорошо структурированного гумусово-аккумулятивного слоя (до 15 см), что свидетельствует об активных процессах биогенной трансформации





Таблица 2. Среднее\* содержание подвижных (кислоторастворимых, 1 М HCl) форм металлов, мг/кг, в лесной подстилке и горизонтах почвенного профиля в городских лесах Иркутской области и на фоновой территории  
Table 2. Average content of mobile (acid-soluble, 1 M HCl) forms of metals (mg/kg) in forest litter and soil profile horizons in urban forests of the Irkutsk region and in the background area

Индекс горизонта почв	Pb	Cd	Zn	Cu	Fe	Mn	Al	Cr	Ni	Co	Mo	Sr	Ti
Усолье-Сибирское													
A0	49,54	0,47	167,74	32,85	8063,82	624,35	6866,95	83,71	27,54	8,44	1,06	182,54	210,85
A1	32,51	0,18	49,15	9,39	4584,73	575,02	4015,40	9,24	11,15	7,45	0,22	40,10	70,56
A2	26,15	0,13	30,25	8,85	3984,10	536,67	3953,44	8,13	10,81	6,20	0,17	27,87	52,35
A2B	18,75	0,11	21,20	6,82	3372,87	375,67	2767,40	6,83	7,57	5,31	0,13	19,51	49,39
B1	14,97	0,07	16,85	4,86	2698,30	302,54	2213,92	5,46	6,05	4,25	0,11	15,61	38,51
B2	21,75	0,12	24,59	6,45	3722,80	435,78	3110,19	8,29	8,88	6,16	0,14	22,63	56,28
BC	13,17	0,06	14,85	3,95	2374,50	264,47	1848,25	4,11	5,33	3,48	0,10	13,74	34,77
C	11,45	0,05	12,98	3,24	2065,82	230,09	1494,98	3,58	3,82	2,54	0,07	11,75	29,25
Ангарск													
A0	30,05	0,44	160,65	37,50	8753,98	523,68	7485,85	91,14	39,35	9,10	1,45	142,51	154,02
A1	24,15	0,16	43,45	13,55	5340,13	506,95	4270,20	11,98	19,16	8,44	0,28	30,49	57,65
A2	18,25	0,12	27,20	10,48	5037,46	451,42	4386,95	10,49	13,86	7,53	0,21	21,97	39,58
A2B	11,98	0,08	18,31	7,34	3738,09	315,95	3070,84	7,45	9,70	6,37	0,17	15,38	33,85
B1	8,98	0,07	14,65	5,87	2990,47	252,79	2456,68	5,87	7,75	5,10	0,14	14,04	27,05
B2	12,57	0,10	17,45	8,51	4336,18	366,58	3562,18	8,74	11,25	7,39	0,19	19,39	40,26
BC	9,02	0,05	12,37	5,16	2631,61	224,46	2161,88	5,24	6,83	4,69	0,13	12,35	24,43
C	7,11	0,04	10,95	4,48	2289,50	193,54	1880,84	4,50	5,91	3,80	0,09	9,35	17,15
Фоновая территория													
A0	4,61	0,07	28,92	6,55	2236,75	202,04	1769,68	17,63	5,56	1,57	0,16	42,79	45,88
A1	1,91	0,04	7,78	2,04	2017,76	152,15	1645,24	2,66	2,71	1,05	0,04	8,31	16,70
A2	0,89	0,03	3,60	0,62	2586,09	106,31	1301,36	1,90	1,88	0,71	0,03	5,74	12,95
A2B	0,62	0,02	2,52	0,42	1810,26	74,42	910,95	1,33	1,31	0,49	0,02	4,02	9,09
B1	0,50	0,01	2,01	0,35	1448,21	59,53	728,73	1,07	1,05	0,40	0,01	3,21	7,27
B2	0,72	0,02	2,92	0,50	2098,35	86,32	1056,71	1,55	1,53	0,57	0,02	4,66	10,24
BC	0,44	0,01	1,77	0,31	1274,43	52,39	641,31	0,94	0,93	0,35	0,01	2,83	6,40
C	0,38	0,01	1,54	0,27	1108,75	45,58	557,94	0,76	0,81	0,29	0,01	2,41	5,52

Примечание. \*Ошибка средней величины составляет от 5 до 10 %.



растительных остатков, их минерализации и гумификации. На всех городских территориях содержание гумуса в верхних горизонтах A1, A2 лесных почв изменяется от 3,5 до 6,5 %, что меньше фоновых значений на 15–25 %. При этом городские лесные почвы характеризуются достаточным содержанием общего азота (до 0,51 %), подвижного фосфора (до 190 мг/кг) и калия (до 130 мг/кг).

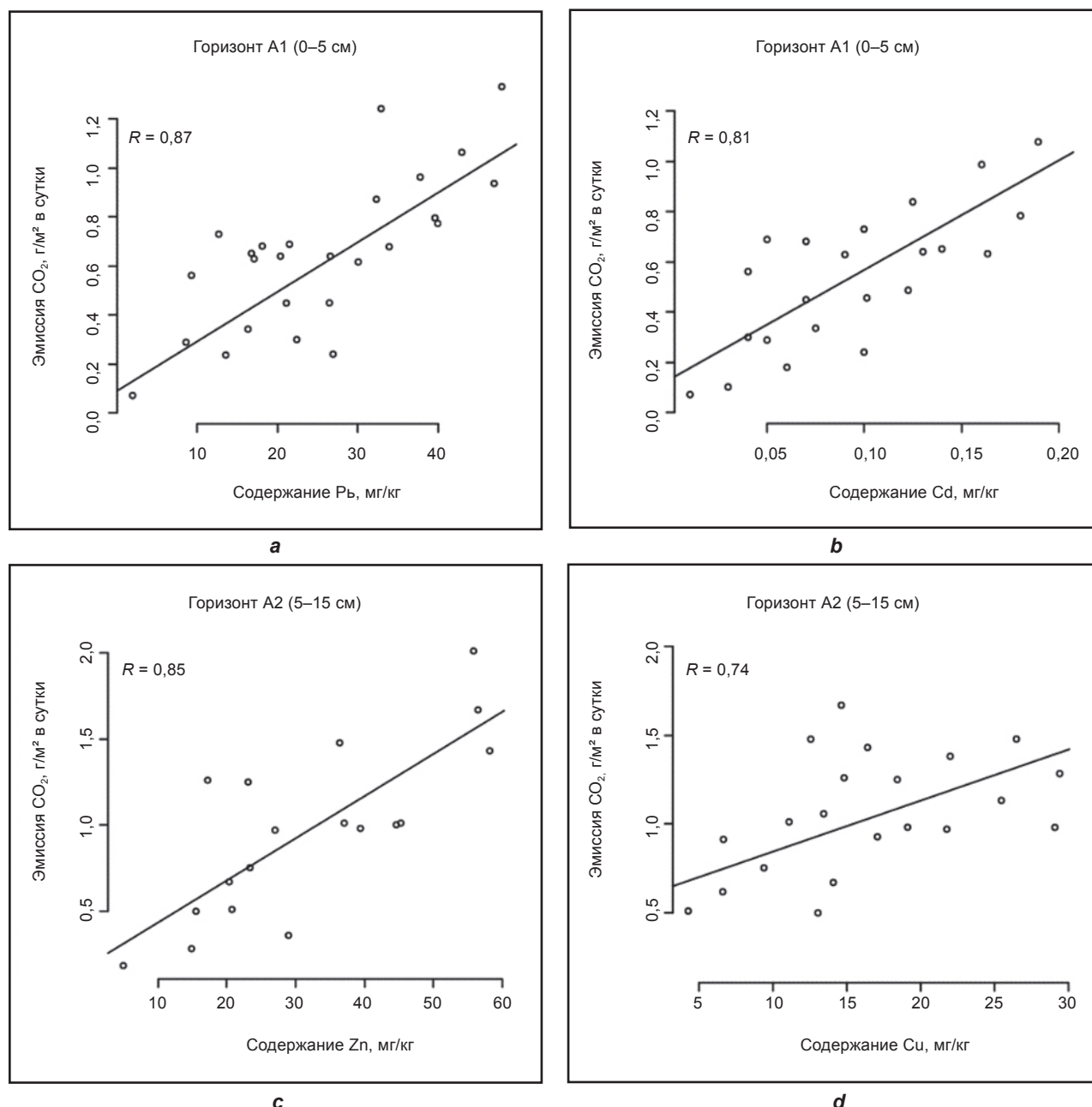
Показано, что большую роль в оптимизации состояния питательного режима почв играет эмиссионный поток «углекислый газ / кислород», связанный с минерализацией лесной подстилки и органического вещества. Данные свидетельствуют, что в целом углекислый газ из лесных почв городских территорий в 1,5–2,5 раза превышает фоновые значения, тогда как интенсивность эмиссии кислорода – в 1,5 раза ниже фона. Исследования показали, что при увеличении эмиссии углекислого газа, а значит, при усилении интенсивности разложения лабильных органических компонентов почвы наблюдается снижение содержания кислорода в припочвенном воздухе в сравнении с фоновым уровнем, особенно если верхние горизонты были нарушены и их водно-физические свойства изменены. Судя по результатам изучения соотношения потоков газов «углекислый газ/кислород», имеют место явные нарушения в газообмене почвы городских лесов. Обнаружено, что среди всех изученных почв светло-серые лесные почвы (подтип почв с наименьшим содержанием гумуса), которые формировались в условиях высокой рекреационной нагрузки, выделялись наиболее пониженным содержанием кислорода в почвенном воздухе, что, судя по всему, связано со снижением пористости почв и воздухопроницаемости при уплотнении, когда наблюдается развитие анаэробных условий. В таких условиях высокой рекреационной нагрузки обнаруживается увеличение эмиссии углекислого газа в атмосферный воздух на 15–25 %. Это связано со значительным уменьшением лесной подстилки в результате рекреационного вытаптывания и увеличением количества незакрепленных гумусовыми кислотами бикарбонатов, которые при химическом разложении создают увеличение эмиссионного потока углекислого газа в атмосферный воздух.

Установлено, что в условиях усиления эмиссионного потока углекислого газа из верхних горизонтов почв наблюдается снижение

общего азота на 25–40 %. Поэтому в соответствии с показателем соотношения C/N, большинство почв характеризуется низким обогащением гумуса азотом, значения C/N для них составляли 9,5–15,2, тогда как для фоновых – 5,6–8,5. Показатель C/N является одним из важнейших для оценки не только дегумификации, но и интенсивности минерализации почв. Чем меньше отношение углерода к азоту, тем лучше обеспеченность почв азотом и активнее процессы минерализации органического вещества. Исследования показали, что минерализация органического вещества городских почв значительно обусловлена влиянием загрязняющих веществ (рис. 4).

При исследовании выявлено, что повышенная интенсивность эмиссии углекислого газа показывает высокую корреляционную связь ( $R \geq 74$ ) с содержанием ТМ в гумусовых горизонтах. Это объясняется тем, что загрязняющие вещества вызывают подщелачивание органического вещества, а значит приводят к образованию большей доли легкогидролизуемых лабильных компонентов гумуса, при минерализации которого микроорганизмами наблюдается усиление эмиссии углекислого газа. Также установлено наличие прямых корреляционных связей между высоким соотношением C/N (когда в составе гумуса мало азота) и уровнем накопления ТМ. Это указывает на то, что в городских почвах высокие концентрации ТМ замедляют процессы разложения органического вещества до образования доступного азота, необходимого для активного функционирования микробных сообществ. Следствием этого становится нарушение естественного процесса минерализации органического вещества до стабильных, стойких к окислению, гумусовых соединений. В целом же полученные результаты позволяют заключить, что как рекреационная нагрузка, так и техногенное загрязнение оказывают значительное, сопоставимое между собой, негативное влияние на нарушение газообмена «углекислый газ / кислород», гумификацию органического вещества и нарушение элементного состава минерального режима лесных почв, что в конечном итоге приводит к ослаблению их эколого-функциональных свойств в условиях городской среды.

*Изучение буферных свойств лесных почв.* Изучение буферной способности почв проводилось для лесной подстилки (A0) и верхних гумусовых горизонтов (A1, A2), которые



**Рис. 4. Зависимость между эмиссией углекислого газа с поверхности гумусовых горизонтов почв (A1, A2) и накоплением подвижных (кислоторастворимых, 1 М HCl) форм тяжелых металлов в их составе:**

*a – свинца; b – кадмия; c – цинка; d – меди*

**Fig. 4. Relationship between carbon dioxide emission from the surface of humus horizons of soils (A1, A2) and accumulation of mobile (acid-soluble, 1 M HCl) forms of heavy metals in their composition:**  
*a – lead; b – cadmium; c – zinc; d – copper*

содержат основные запасы буферных компонентов почв и обладают максимальной аккумулятивной способностью по отношению к элементам-загрязнителям. Кроме этого, верхние горизонты служат удобными объектами для систематического мониторингового изучения буферной способности почв, что позволяет глубже понять биогеохимические механизмы этого эколого-функционального свойства

почв<sup>3</sup>. Буферная способность городских лесных почв определялась по комплексу параметров, в наибольшей степени отражающих способность почвы поддерживать оптимальное состояние в условиях антропогенного воздействия: актуальная кислотность, нарушение органического вещества (содержание гумуса, скорость эмиссии углекислого газа с поверхности почвы), содержание обменных





катионов в ППК и физические характеристики почв (плотность сложения, аэрация). С целью унификации различающихся по цифровым значениям выбранных параметров проводилось нормирование относительно минимальных фоновых значений (минимальное значение для каждого показателя принималось за 10 баллов, максимальное – 100 баллов). В основу расчетов были положены формулы балльных оценок для показателей-стимуляторов и показателей-дестимуляторов<sup>6</sup>. Выбор двух разных формул связан с тем, что фоновые показатели могут принимать как максимальные, так и минимальные значения. Например, для расчета оценки содержания гумуса в почвах использовалась формула показателя-стимулятора, когда фоновому значению присваивалась оценка 100 баллов:  $B = 100 \times (X_{i_n} - X_{i_{min}}) / (X_{i_{max}} - X_{i_{min}})$ . Для расчета баллов накопления ТМ использовалась формула показателя-дестимулятора, когда фоновому значению присваивалось наименьшее значение баллов:  $B = 100 - 100 \times (X_{i_n} - X_{i_{min}}) / (X_{i_{max}} - X_{i_{min}})$ . После расчета индивидуальных баллов выполнялось их суммирование для каждой ПП городской территории и вычислялся общий оценочный балл:  $B_{total} = B_a + B_b + B_c + \dots B_n / N$ . Далее для дифференциации почв на пробных площадях по буферной способности рассчитанные баллы подвергались кластерному анализу. Данные были представлены в виде графического изображения – кластера, отображающего уровни сходства анализируемых почв на всех пробных площадях по буферной способности. Полученные результаты по-

зволили определить три градации буферной способности почв: высокая (100–80 баллов), средняя (79–50 баллов), низкая (49–30 баллов). Применение геоинформационной системы картографирования позволило построить в программе Surfer 23.1.162 карты-схемы, отражающие изменение буферной способности почв на территориях городов Ангарска и Усолья-Сибирского (рис. 5).

Исследования показали, что низкая буферная способность почв обнаружена в городских лесах, расположенных в глубине жилых застроек (чаще всего это территории на небольшом расстоянии от центра города и вблизи промышленных территорий). В почвах этих лесов наблюдается высокая плотность сложения и низкая аэрация верхних горизонтов, а также выраженная деструкция гумусового вещества, что приводит к значительному падению содержания органических кислот (в большей степени гуминовых форм) в гумусе и повышению щелочности почв до pH (водн.) 8,2. Кроме этого, в почвах наблюдаются неблагоприятные процессы, выражающиеся в нарушении формирования структурированности и минерализации гумусового слоя за счет увеличения с поверхности почв эмиссии углекислого газа до 2,5 раза и снижения эмиссии кислорода до 1,5 раза. Аккумулирующая способность этих почв к загрязняющим элементам главным образом определяется не хемосорбцией гумусовыми горизонтами (A1, A2, A2B), которые из-за своей небольшой мощности (10–15 см) не могут обладать высокой аккумулирующей способностью. Поэтому

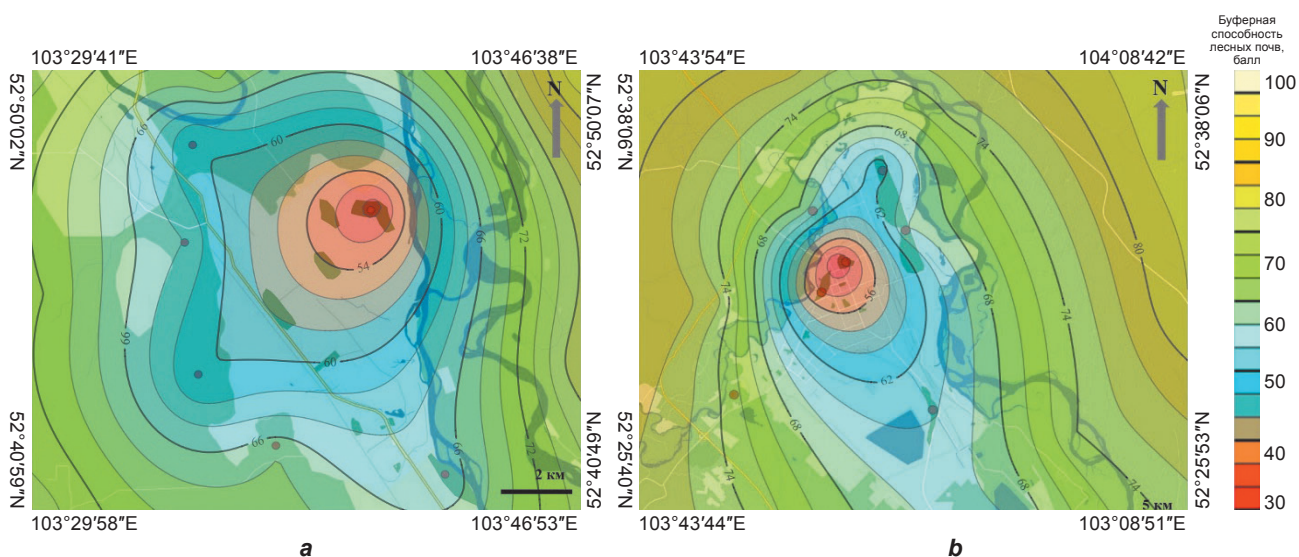


Рис. 5. Карты-схемы буферной способности почв городских лесов Усолья-Сибирского (а) и Ангарска (б)  
Fig. 5. Maps-diagrams of soil buffering capacity in urban forests of Ussolye-Sibirskoye (a) and Angarsk (b)



на территориях с низкой буферной способностью почв наблюдается небольшая доля закрепленных загрязняющих элементов в составе комплексных органических соединений гумусового вещества. В нарушенных почвах глинистые минералы, которыми они обогащены, выступают адсорбентами по отношению к элементам-загрязнителям, но эти связи менее прочные, чем связи с гумусом. В результате элементы высвобождаются в почвенный раствор, становясь более подвижными и доступными для растений.

Средняя буферная способность почв выявлена для большинства городских лесов Усолья-Сибирского и Ангарска, расположенных в основном в небольших жилых кварталах. На этих территориях воздействие негативных факторов (атмосферного загрязнения и рекреационной нагрузки) также оказывает выраженное влияние на формирование физико-химических свойств и изменение морфоструктурных параметров почв. В почвах обнаруживается сохранение тенденции к замедлению процесса минерализации органического вещества, что обусловлено снижением общего содержания гуминовых кислот и увеличением фульвокислот в составе гумуса. Направленность биогеохимических взаимодействий в почвах свидетельствует о наблюдающейся трансформации в соотношениях между обменными катионами калия, натрия, кальция и магния в ППК и увеличении их общей суммы. Исследования показали, что дисбаланс в составе ППК определяется в основном за счет увеличения обменного кальция и натрия – более чем в 10 раз, при этом в составе обменных катионов наблюдается химическое замещение кальция на натрий в обменно-поглощенном состоянии. Увеличение натрия в почвенном растворе приводит к выраженным морфологическим изменениям – под лесной подстилкой наблюдается образование солевых прослоек и линз антропогенного происхождения. Одним из основополагающих факторов снижения буферной способности почв по-прежнему остается увеличение доли щелочных компонентов в почвенном растворе и как итог – сохранение щелочности почв (рН (водн.) до 7,6).

Высокая буферная способность характерна для почв городских лесов, расположенных на окраинах городов, значительно удаленных от крупных автомагистралей и не попадающих под перенос промышленных эмиссий.

Для лесных почв этих территорий зарегистрированы высокие значения доли устойчивых гуминовых кислот, способных удерживать элементы в почвенном растворе и осуществлять аккумуляцию (детоксикацию) по отношению к ТМ. Почвы характеризуются достаточным содержанием органического вещества, мощной лесной подстилкой, благоприятными кислотнo-щелочными условиями и оптимальным составом ППК почвенного раствора. Таким образом, изучение буферной способности почв позволило описать эколого-функциональные особенности почв городских лесов и сделать заключение о природном потенциале их устойчивости в условиях промышленного загрязнения и рекреационной нагрузки. Полученные результаты могут служить основой для дальнейших исследований, направленных на углубленное понимание механизмов функционирования почв в условиях антропогенной нагрузки. Это может включать изучение влияния конкретных видов негативного воздействия, анализ динамики восстановления почв и разработку методов улучшения их функциональных свойств.

### Заключение

Впервые выполнена комплексная оценка эколого-функциональных свойств почв городских лесов Усолья-Сибирского и Ангарска Иркутской области с учетом трех экологических показателей: детоксицирующая способность, питательный режим и буферная способность. Установлена высокая связь между выбранными показателями, что отражает их функциональность в условиях антропогенного воздействия. Взаимосвязь между показателями подтверждает взаимообусловленность биогеохимических процессов в почвенной системе и важность учета всех эколого-функциональных свойств при оценке ее состояния. Результаты показали значительные различия в состоянии почв обследованных городских лесных массивов. Высокие значения детоксицирующей способности указывают на способность почв нейтрализовать токсические вещества, что особенно важно в условиях промышленного загрязнения. Отмечены территории с низким питательным режимом почв, что требует внимания к вопросам сохранения их плодородия. Оценка буферной способности позволила определить участки с различной степенью устойчивости к изменению внешних условий, что имеет решающее значение для прогнозирования и предотвращения



ния деградации лесных почв в городах. В дальнейшем необходимо уделить особое внимание зонам с низкими показателями экологических функций почв, поскольку они требуют первоочередных действий по стабилизации и улучшению их состояния. Полученные результаты служат основой для разработки и реализации мероприятий по охране и восстановлению почв городских лесов с учетом особенностей каждой территории. Результаты исследования

углубляют понимание механизмов адаптации лесных почв к городским нагрузкам и их значимости для поддержания экологического баланса. Предлагаемый подход позволяет не только оценить текущее состояние почв городских лесов Иркутской области, но и спрогнозировать потенциальные изменения под воздействием антропогенных факторов, что важно для формирования эффективных мер охраны окружающей среды в урбозкосистемах.

#### Список источников

1. Мартынова Н.А., Пушкарева В.С. Экологическая устойчивость почв лесных ландшафтов г. Иркутска и его окрестностей // Почвы и окружающая среда. 2019. Т. 2. № 1. С. 1–14. <https://doi.org/10.31251/pos.v2i1.48>. EDN: SWIVXG.
2. Таран И.В., Спиридонов В.Н., Беликова Н.Д. Преобразование пригородных лесов. Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения Российской академии наук, 2006. 145 с. EDN: QKXZCN.
3. Бурова Н.В., Феклисов П.А. Антропогенная трансформация пригородных лесов. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2007. 263 с. EDN: QKQMAF.
4. Скрипальщикова Л.Н., Татаринцев В.И., Зубарева О.Н., Перевозникова В.Д., Стасова В.В., Грешилова Н.В. [и др.]. Экологическое состояние пригородных лесов Красноярск. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2009. 179 с. EDN: OUBBIT.
5. Овеснов С.А., Ефимик Е.Г., Молганова Н.А. Антропогенная трансформация экосистем городских лесов г. Перми // Антропогенная трансформация природной среды. 2017. № 3. С. 157–159. EDN: ZUJVLX.
6. Данченко М.А. Эколого-экономическое обоснование лесохозяйственных мероприятий в городских лесах (на примере г. Томска). Томск: Изд-во ТГУ, 2011. 200 с. EDN: SYWRSZ.
7. Беднова О.В. Технология нормирования и индикации состояния лесных экосистем в условиях городских особо охраняемых территорий // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2014. Т. 18. № 6. С. 36–51. EDN: TBQEXV.
8. Кичигин Н.В. Городские леса: режим охраны и использования // Журнал российского права. 2011. № 6. С. 28–34. EDN: OGYUBJ.
9. Потапова Е.В. Городские леса и парки г. Иркутска: привлекательность и состояние // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2014. Т. 8. № 2. С. 80–90. EDN: SIZUWL.
10. Пузаченко Ю.Г. Общие основания концепции устойчивого развития и экосистемных услуг // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2012. № 3. С. 22–39. EDN: PAGJLX.
11. Bhaduri D., Sihi D., Bhowmik A., Verma B.C., Munda S., Dari B. A review on effective soil health bio-indicators for ecosystem restoration and sustainability // Frontiers in Microbiology. 2022. Vol. 13. P. 938481. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.938481>. EDN: YNIOCT.
12. Кожевин П.А. Показатели почвенного «здоровья» в оценке почв (обзор) // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2023. № 2. С. 16–25. <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-2-16-25>. EDN: FQQDNU.
13. Шергина О.В., Миронова А.С., Тупицына Ю.С. Оценка экосистемных функций городских лесов по показателям почв и древесных растений // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2022. Т. 30. № 4. С. 447–458. <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2022-30-4-447-458>. EDN: CPGZGO.
14. Копчик С.В., Копчик Г.Н. Оценка современных рисков избыточного накопления тяжелых металлов в почвах на основе концепции критических нагрузок (обзор) // Почвоведение. 2022. № 5. С. 615–630. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22050033>. EDN: SNJYDE.
15. Pouyat R.V., Yesilonis I.A., Szlavecz K., Csuzdi C., Hornung E., Korsós Z., et al. Response of forest soil properties to urbanization gradients in three metropolitan areas // Landscape Ecology. 2008. Vol. 23. Iss. 10. P. 1187–1203. <https://doi.org/10.1007/s10980-008-9288-6>. EDN: IOOZBK.
16. Терехова В.А., Кулачкова С.А., Морачевская Е.В., Кирюшина А.П. Методология биодиагностики почв и особенности некоторых методов биоиндикации и биотестирования (обзор) // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2023. № 2. С. 35–45. <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-2-35-45>. EDN: KOJVCN.
17. Sirkovich E.C., Walser S.L., Perdrial N., Richardson J.B. Evaluating trace elements in urban forest soils across three contrasting New England USA towns and cities by pXRF and mass spectrometry // Environmental Pollution. 2023. Vol. 336. P. 122441. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122441>. EDN: DMXQXJ.
18. Scharenbroch B.C., Trammell T.L., Paltseva A., Livesley S.J., Edmondson J. Urban soil formation, properties, classification, management, and function // Frontiers in Ecology and Evolution. 2022. Vol. 10. P. 987903. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.987903>.





19. Васенев В.И., Ауденхофен А.П.В., Ромзайкина О.Н., Гаджиягаева Р.А. Экологические функции и экосистемные сервисы городских и техногенных почв: от теории к практическому применению (обзор) // Почвоведение. 2018. № 10. С. 1177–1191. <https://doi.org/10.1134/S0032180X18100131>. EDN: XWNQRV.
20. Максютова Е.В., Башалханова Л.Б., Корытный Л.М., Сороковой А.А. Природно-климатические факторы в экологическом зонировании г. Иркутска // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 2. С. 55–59. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-2-055-059>. EDN: FYRGWW.
21. Михайлова Т.А., Шергина О.В. Питательный статус древесных растений как интегральный показатель состояния урбоэкосистемы // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Биология. Экология. 2011. Т. 4. № 2. С. 66–73. EDN: NXQRXR.
22. Cools N., De Vos B. Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Hamburg: ICP Forests Programme Coordinating Centre, 2010. 477 p.
23. Алябина И.О., Андроханов В.А., Вершинин В.В., Волков С.Н., Ганжара Н.Ф., Добровольский Г.В. [и др.]. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. М.: Гриф и К, 2014. 768 с. EDN: TNAMEB.
24. Воробьева Л.А. Химический анализ почв: монография. М.: Изд-во МГУ, 2012. 186 с. EDN: QLCNED.
25. Carter M.R., Gregorich E.G. Soil sampling and methods of analysis. Florida: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007. 1264 p.
26. Кузнецов В.А., Стома Г.В. Влияние рекреации на лесные городские ландшафты (на примере национального парка «Лосиный остров» г. Москвы) // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2013. № 3. С. 27–33. EDN: RGQSWP.
27. Molchanov V. Biogeochemical accumulation of trace elements in soils and plants of the Russian Far East // Development and Modern Problems of Aquaculture: International scientific and practical conference. BIO Web of conferences (Divnomorskoe, 27 September – 4 October 2023). Divnomorskoe: EDP Sciences, 2024. Vol. 84. P. 01002. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20248401002>. EDN: XIKTUZ.
28. Yakovets L. Migration of heavy metals in the soil profile // Norwegian Journal of Development of the International Science. 2021. Vol. 54. Iss. 1. P. 8–12. <https://doi.org/10.24412/3453-9875-2021-54-1-8-12>. EDN: SMJVYI.

### References

1. Martynova N.A., Pushkareva V.S. Environmental sustainability of soils in forest landscapes of Irkutsk and its environs. *The Journal of Soils and Environment*. 2019;2(1):1-14. (In Russ.). <https://doi.org/10.31251/pos.v2i1.48>. EDN: SWIVXG.
2. Taran I.V., Spiridonov V.N., Belikova N.D. *Transformation of suburban forests*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2006, 145 p. (In Russ.). EDN: QKXZCN.
3. Burova N.V., Feklistov P.A. *Anthropogenic transformation of suburban forests*. Arkhangelsk: Arkhangelsk State Technical University; 2007, 263 p. (In Russ.). EDN: QKQMAF.
4. Skripalshchikova L.N., Tatartsev V.I., Zubareva O.N., Perevoznikova V.D., Stasova V.V., Greshilova N.V., et al. *Ecological state of suburban forests of Krasnoyarsk*. Novosibirsk: Geo; 2009, 179 p. (In Russ.). EDN: OUBBIT.
5. Ovesnov S.A., Efimik E.G., Molganova N.A. Anthropogenic transformation of urban forest ecosystems in Perm. *Anthropogenic transformation of natural environment. Antropogennaya transformatsiya prirodnoy sredy*. 2017;3:157-159. (In Russ.). EDN: ZUJVLX.
6. Danchenko M.A. *Ecological and economic justification of forest management activities in urban forests (case study of Tomsk city)*. Tomsk: Tomsk State University; 2011, 200 p. (In Russ.). EDN: SYWRSZ.
7. Bednova O.V. Ecological standardization and indication technology of the forest ecosystems state in urban specially protected natural areas. *Forestry Bulletin*. 2014;18(6):36-52. (In Russ.). EDN: TBQEXV.
8. Kichigin N.V. Urban forests: protection and use regime. *Journal of Russian Law*. 2011;6:28-34. (In Russ.). EDN: OGYUBJ.
9. Potapova E.V. City woods and parks of Irkutsk: attractiveness and condition. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series: Earth Sciences*. 2014;8(2):80-90. (In Russ.). EDN: SIZUWL.
10. Puzachenko Yu.G. General basis of conception of sustainable development and ecosystem surveys. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2012;3:22-39. (In Russ.). EDN: PAGJLX.
11. Bhaduri D., Sihi D., Bhowmik A., Verma B.C., Munda S., Dari B. A review on effective soil health bio-indicators for ecosystem restoration and sustainability. *Frontiers in Microbiology*. 2022;13:938481. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.938481>. EDN: YNIOCT.
12. Kozhevnikov P.A. Soil "health" indicators in soil assessment (review). *Moscow University Bulletin. Series 17. Soil Science*. 2023;78:84-92. (In Russ.). <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-2-16-25>. EDN: FQQDNU.
13. Shergina O.V., Mironova A.S., Tupitsyna Y.S. Assessment of ecosystem functions of urban forests in terms of soil and trees. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2022;30(4):447-458. (In Russ.). <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2022-30-4-447-458>. EDN: CPGZGO.
14. Koptsik S.V., Koptsik G.N. Assessment of current risks of excess heavy metals accumulation in soils based on the critical loads concept (Review). *Eurasian Soil Science*. 2022;5:615-630. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0032180X22050033>. EDN: SNJYDE.
15. Pouyat R.V., Yesilonis I.D., Szlavecz K., Csuzdi C., Hornung E., Korsós Z., et al. Response of forest soil properties to urbanization gradients in three metropolitan areas. *Landscape Ecology*. 2008;23(10):1187-1203. <https://doi.org/10.1007/s10980-008-9288-6>. EDN: IOOZBK.



16. Terekhova V.A., Kulachkova S.A., Morachevskaya E.V., Kiryushina A.P. A soil biodiagnostics methodology and features of some bioindication and biotesting methods (review). *Moscow University Bulletin. Series 17. Soil Science*. 2023;2:35-45. (In Russ.). <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-2-35-45>. EDN: KOJVCN.
17. Sirkovich E.C., Walser S.L., Perdrial N., Richardson J.B. Evaluating trace elements in urban forest soils across three contrasting New England USA towns and cities by pXRF and mass spectrometry. *Environmental Pollution*. 2023;336:122441. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122441>. EDN: DMXQXJ.
18. Scharenbroch B.C., Trammell T.L., Paltseva A., Livesley S.J., Edmondson J. Urban soil formation, properties, classification, management, and function. *Frontiers in Ecology and Evolution*. 2022;10:987903. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.987903>.
19. Vasenev V.I., Oudenhoven A.P.E., Romzaykina O.N., Hajiaghaeva R.A. The ecological functions and ecosystem services of urban and technogenic soils: from theory to practice (a review). *Eurasian Soil Science*. 2018;10:1177-1191. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0032180X18100131>. EDN: XWNQVR.
20. Maksyutova E.V., Bashalkhanova L.B., Korytny L.M., Sorokovoi A.A. Natural-climatic factors in ecological zoning of the city of Irkutsk. *Theoretical and Applied Ecology*. 2021;2:55-59. (In Russ.). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-2-055-059>. EDN: FYRGWW.
21. Mikhailova T.A., Shergina O.V. Nutritional status of arboreal plants as an integrated indicator reflecting urban ecosystem conditions. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series: Biology. Ecology*. 2011;4:66-73. (In Russ.). EDN: NXQXR.
22. Cools N., De Vos B. *Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests*. Hamburg: ICP Forests Programme Coordinating Centre; 2010, 477 p.
23. Alyabina I.O., Androkhanov V.A., Vershinin V.V., Volkov S.N., Ganzhara N.F., Dobrovolsky G.V., et al. *Unified State Register of soil resources of Russia. Version 1.0*. Moscow: Grif i K; 2014, 768 p. (In Russ.). EDN: TNAMEB.
24. Vorobyova L.A. *Chemical analysis of soils*. Moscow: Moscow University; 2012, 186 p. (In Russ.). EDN: QLCNED.
25. Carter M.R., Gregorich E.G. *Soil sampling and methods of analysis*. Florida: CRC Press, Taylor & Francis Group; 2007, 1264 p.
26. Kuznetsov V.A., Stoma G.V. The influence of recreation on the city forest landscape (based on the example of national park "Losinuy ostrov"). *Moscow University Bulletin. Series 17. Soil Science*. 2013;3:27-33. (In Russ.). EDN: RGQSWP.
27. Molchanov V. Biogeochemical accumulation of trace elements in soils and plants of the Russian Far East. In: *Development and Modern Problems of Aquaculture: International scientific and practical conference. BIO Web of conferences*. 27 September – 4 October 2023, Divnomorskoe. Divnomorskoe: EDP Sciences; 2024, vol. 84, p. 01002. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20248401002>. EDN: XIKTUZ.
28. Yakovets L. Migration of heavy metals in the soil profile. *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2021;54(1):8-12. <https://doi.org/10.24412/3453-9875-2021-54-1-8-12>. EDN: SMJVYI.

#### Информация об авторе / Information about the author



##### Шергина Ольга Владимировна,

кандидат биологических наук,  
ведущий научный сотрудник отдела устойчивости наземных экосистем,  
Сибирский институт физиологии и биохимии растений  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
г. Иркутск, Россия,

✉ sherolga80@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6333-8821>

##### Olga V. Shergina,

Cand. Sci. (Bio.),  
Leading Researcher of the Department of Terrestrial Ecosystem Stability,  
Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry  
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russia,

✉ sherolga80@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6333-8821>

#### Вклад автора / Contribution of the author

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.



#### Конфликт интересов / Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.  
The author declares no conflicts of interests.

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*  
*The final manuscript has been read and approved by the author.*

#### Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 02.09.2025 одобрена после рецензирования 16.09.2025; принята к публикации 25.09.2025.

The article was submitted 02.09.2025; approved after reviewing 16.09.2025; accepted for publication 25.09.2025.