

УДК 631.45:631.416.2

ВЛИЯНИЕ АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА СОДЕРЖАНИЕ ФОСФОРА В ПОЧВАХ ГОРОДОВ МИРА[§]

© 2025 г. А. Э. Роберт^{1,*}, Г. Р. Балашов², Н.В. Верховцева³, В. И. Васнев¹

¹Российский университет дружбы народов, департамент ландшафтного дизайна и проектирования устойчивых экосистем аграрно-технологического института

117198 Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, Россия

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

123242 Москва, Б. Грузинская ул., 10, стр. 1, Россия

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, факультет почвоведения

119991 Москва, Ленинские горы, 1, стр. 12, Россия

*E-mail: anton.robert@yandex.ru

Рассмотрены антропогенные факторы, влияющие на содержание фосфора в городских почвах. В проанализированных исследованиях отмечено влияние численности, плотности населения и исторического развития городов на фосфорное загрязнение почв, определены особенности распределения фосфора по зонам городских почв. Большинство исследований посвящены превышению содержания фосфора на сельскохозяйственных угодьях, в то время как «зафосфачиванию» городских почв уделяется гораздо меньше внимания, что определяет актуальность проведенного обзора научных публикаций.

Ключевые слова: общий фосфор, подвижные формы фосфора, урбаноземы, промышленные, селитебные и рекреационные зоны, плотность населения, антропогенное влияние, городская экосистема.

DOI: 10.31857/S0002188125030111, **EDN:** UQCGOX

ВВЕДЕНИЕ

Изменение состава почвы как одного из базовых элементов экосистемы города оказывает влияние на состояние экологической ситуации и комфортность жизни населения. Фосфор (P), являясь одним из 3 основных элементов питания растений (вместе с азотом и калием), необходим для их развития. Однако слишком высокий уровень содержания фосфора в почве может иметь негативные последствия для растений, городских водных объектов и экосистемы города в целом.

Термин «зафосфачивание почв» рассматривается современными исследователями в отрицательном аспекте – как процесс, приводящий к избыточному содержанию фосфора в почвах [1–4], хотя первоначально был предложен А.В. Соколовым [5] и в своей формулировке не имел негативного оттенка, означая процесс обогащения почв подвижными фосфатами в результате длительного внесения фосфорных

удобрений [1]. В исследованиях Титовой В.И. с соавторами для оценки высокого содержания фосфора в почвах под воздействием антропогенных факторов используются термины «техногенная трансформация» или «техногенная фосфотизация» почв [3]. Имеет смысл ввести термин «антропогенная фосфотизация», который в рамках данной статьи будет использоваться наряду с формулировками «повышенное и избыточное содержания почвенного фосфора» или «фосфорное загрязнение».

В настоящем обзоре были проанализированы результаты научных исследований почв городов с разной историей, плотностью и численностью населения, расположенных на крупных и средних реках, которые являются основными источниками водоснабжения этих агломераций. Попадая в водоемы при эрозии почв и с водным стоком, фосфор с использованием современных методов очистки удаляется из воды на 70–90% [6]. Кроме того, повышенное содержание фосфора приводит к эвтрофикации водных объектов [7]. Для анализа также были использованы исследования, посвященные вопросу озеленения городских ландшафтов как регулятора фосфорного загрязнения почв.

[§] Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-77-300-12).

Для изучения почв города и пригородных территорий выделяют поверхностно-антропогенно-преобразованные и глубоко антропогенно-преобразованные почвы. К первой группе относят почвы с мощностью преобразованной толщи до 50 см: агроземы (почвы городских огородов), литоземы (мощность до 30 см), урбостратифицированные почвы, сохраняющие ненарушенную серединную и нижнюю часть профиля. Вторая группа включает селитебные почвы (в основном предназначенные для жилых, общественных и промышленных объектов), культуроземы (заброшенные огороды и сады), рекреаземы (скверы с клумбами и газонами, где использован органиано-минеральный субстрат), реплантоземы (почвы после рекультивации с подсыпкой органического горизонта). В эту же группу относят почвоподобные субстраты – техноурбаноземы, экраноземы (под асфальтом и бетонными покрытиями) [8]. Отдельно рассматриваются природно-антропогенные зоны – городские луга и леса, расположенные на естественных почвах, но частично преобразованные. Существуют научные работы, посвященные систематике почв и почвообразующих пород города [9]. В данном обзоре для анализа и сравнения результатов исследований использовали деление почв по зонам города на промышленную, транспортную, селитебную и рекреационную [10], что позволило выделить городские участки, наиболее загрязненные фосфором, а также выявить определяющие факторы антропогенной фосфотизации.

В изученных статьях для определения содержания фосфора в почве использованы методы, основанные на обработке образцов растворителями и анализе вытяжек, среди которых методы Кирсанова, Чирикова, Мачигина, Францесона, Эгнера–Рима, Брея–Куртца, метод определения степени подвижности форм по Карпинскому–Замятиной и по методу Скофилда [11–18]. Реже в научных исследованиях встречается метод биотестирования с использованием лабораторных фитотестов, вегетационных и полевых опытов [19]. Для определения природы фосфора гумусовых соединений известен метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР) [20, 21]. Также стали применять термодинамические методы [22].

В мировой практике получил распространение метод на основе раствора гидрокарбоната натрия, или метод Олсена (определение Olsen-P). Данный метод является хорошим для показателей оценки биодоступности P, но имеет существенный недостаток – значительное занижение данных для почв, имеющих щелочную реакцию [23].

Также в зарубежной литературе для определения различных фракций фосфора используют модифицированную технологию фракционирования Хедли с дальнейшим спектрофотометрическим

определением их концентраций [24]. Среди этих фракций можно выделить: $\text{NaHCO}_3\text{-P}_t$ – часть доступного P, неорганического ($\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$) и органического P ($\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$), NaOH-P_t – неорганический (NaOH-P_i) и органический P (NaOH-P_o) плотно адсорбированный и/или закрепленный на соединениях Al и Fe, P в гуминовых и фульвокислотах, Dil.HCl-P_i (Ca-P_i) – преимущественно неорганический P, связанный с Ca (апатит, различные кальциевые фосфаты и P, адсорбированные на CaCO_3), Conc.HCl-P_t – неорганический P (Conc.HCl-P_i), окклюдируемый в слабые силикатные минералы, и органический P (Conc.HCl-P_o), остаточный-P (Res-P) – неорганический и органический P в тугоплавких минералах и органическом веществе.

В данном обзоре анализировали исследования, посвященные антропогенному влиянию. Однако природные факторы могут играть важную роль, усиливая или ослабляя влияние “антропогенной фосфотизации” почв, хотя некоторые исследователи называют природные факторы косвенными по отношению к антропогенным [24]. В научных работах выделяется ряд природных факторов, влияющих на содержание фосфора в городских почвах: рельеф и зависимость от высоты точки над уровнем моря [24, 25], принадлежность образцов почв к разным экосистемам [8], типы почв [26], природно-климатические особенности [26], кислотность и гигроскопичность почв [27], наличие почвенного гумуса [27], гранулометрический состав [26], сезонная зависимость [27].

Учитывая, что приведенные выше факторы влияют на содержание фосфора в почвах города, следует однако отметить, что наиболее значимым остается антропогенный фактор. Значительная часть исследований посвящена промышленному загрязнению городских почв. В данном обзоре, проанализировав исследования о фосфорном загрязнении почв по отдельным городским зонам, остановимся на особенностях непромышленной антропогенной фосфотизации почв городов мира.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ФОСФОРА В РАЗЛИЧНЫХ ГОРОДСКИХ ЗОНАХ

Содержание и распределение фосфора в различных городских зонах имеет определенные закономерности, что нашло отражение в научных статьях, посвященных исследованиям почвенных образцов городов Архангельска, Благовещенска, Уссурийска, Нижнего Новгорода и Курска [4, 10, 28, 29, 30].

Для оценки степени фосфорного загрязнения почв по городским зонам целесообразно сравнивать содержание фосфора по отношению к фоновым показателям (табл. 1).

Фоновыми, или естественными, территориями можно считать территории, не испытывающие

Таблица 1. Обобщенные данные содержания фосфора в почвах городов России, мг/кг

Зона	Содержание фосфора, мг/кг	Превышение по отношению к фону, в раз	Источник
Город, река	г. Архангельск, р. Северная Двина		[10]
Промышленная	181	0.8	
Селитебная	717	3.2	
Рекреационная	279	1.2	
Фон	225		
Город, река	г. Благовещенск, р. Амур, р. Зея		[28]
Промышленная	493	7.4	
Селитебная	394	5.9	
Рекреационная	254	3.8	
Транспортная	345	5.1	
Фон	67		
Город, река	г. Уссурийск, р. Раздольная, р. Комаровка, р. Раковка		[29]
Промышленная	73	1.9	
Селитебная	242	6.2	
Транспортно-селитебная	155	4.0	
Рекреационная	105	2.7	
Фон	39		
Город, река	г. Нижний Новгород, р. Волга, р. Ока		[4]
Агротехногенная	479	6.1	
Селитебная	236	3.0	
Рекреационная	103	1.3	
Селитебно-транспортная	278	3.5	
Фон	78		

антропогенного влияния, но близкие по своим природным показателям к исследованным образцам почв. В качестве рекреационной зоны были выбраны парки, лесопарки и скверы городов. Селитебные зоны представлены придомовыми территориями многоэтажной и малоэтажной застройки, транспортная зона – газонами вдоль проезжей части улиц, промышленные – при заводских территориями и свалками промышленных бытовых отходов, агротехногенные – садовыми товариществами и лесопитомниками.

По результатам проведенных исследований авторы отмечали, что промышленная зона имела наибольшее превышение содержания фосфора по отношению к фоновому в г. Благовещенске. Однако чаще всего фосфорное загрязнение городских почв фиксировали на селитебных, транспортных и транспортно-селитебных территориях.

В зонах малоэтажной застройки наличие избыточного фосфора может быть связано со сбросом хозяйственных вод на почву в отсутствие канализации, применением удобрений на огородных участках, а также повышенным содержанием гумуса.

Фосфотизация зон многоэтажной застройки связана с бытовыми отходами и со строительным мусором.

Исследования образцов почв различных районов г. Курска также выявили фосфорное загрязнение. Авторами отмечено, что повышенное содержание фосфора обнаружено в следующих зонах: селитебной (жилые кварталы многоэтажной и малоэтажной застройки), рекреационная (лесопарковая зона), промышленная зона (территория ликвидированного завода тракторных запчастей) [30].

В г. Нижнем Новгороде наиболее загрязненные фосфором были образцы отдельно выделенной автотранспортной зоной исследования агротехногенной зоны (лесопитомник, садовые товарищества, хозяйства на окраине города) за счет внесения удобрений и техногенной пыли. В селитебной и селитебно-транспортной зоне, несмотря на средние показатели содержания подвижного фосфора, имелись участки превышения фоновых показателей в 20 и более раз. Также наблюдали увеличение содержания фосфора вниз по профилю почв, что было связано с их песчаным и супесчаным гранулометрическим составом. В мало нарушенных

почвах в рекреационной и агротехногенной зонах наблюдали уменьшение содержания фосфора вниз по профилю, что объяснялось зависимостью распределения подвижных форм фосфора от степени нарушенности почвенного покрова и от количества его поступления в почву [4].

Зарубежные исследования фосфорного загрязнения городских почв также отмечают различные результаты в отдельных зонах. Высокий уровень содержания фосфора (0.2–0.7%) подтверждал его высокое антропогенное поступление в городские и пригородные почвы Марракеша (центральная часть Марокко). Этот показатель больше по сравнению с фоновыми (0.2–0.3%). Мусорные свалки и промышленные почвы отличались самым высоким содержанием P (0.3–1.7%), так же как и пригородное сельское хозяйство и рыночное садоводство, орошаемое городскими и промышленными сточными водами (0.6–0.7%) [31].

Типы городского землепользования в Марракеше, вызывающие значительное увеличение содержания фосфора, в порядке убывания распределялись следующим образом: пригородное сельское хозяйство → промышленность → свалки городских и промышленных отходов → строительство.

ЧИСЛЕННОСТЬ И ПЛОТНОСТЬ НАСЕЛЕНИЯ КАК ФАКТОР ФОСФОРНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГОРОДСКИХ ПОЧВ

Вопросы, связанные с влиянием численности и плотности населения на содержание фосфора в городских почвах, можно разделить на следующие группы: зависимость фосфорного загрязнения относительно удаленности от центральной части города, снижение концентрации фосфора в пригородах по отношению к крупному городу, особенности концентрации фосфора и его соединений в зависимости

от вида деятельности населения на той или иной территории города.

Результаты исследований содержания фосфора в почвах крупного г. Чэнду (юго-западный Китай) и менее подверженных антропогенному воздействию пригородах этого мегаполиса показали, что концентрации общего фосфора и его основных фракций в центральном районе были значительно больше, чем в пригородных районах [32]. Кроме того, содержание фосфора значительно снижалось с увеличением расстояния от городского центра. Эти концентрации значительно положительно коррелировали с плотностью застроенных территорий и дорог.

Чэнду – быстро развивающийся город, который производит 3000–3500 т бытовых отходов в день. Будучи центрами потребления продуктов питания и производства отходов, города транспортируют и хранят большое количество фосфора, что увеличивает его концентрацию в городских почвах [32]. Такие материалы городской застройки, как асфальт, цемент и дерево, также способствуют повышению концентрации фосфора [33]. Плотность дорог – еще один важный фактор, влияющий на содержание почвенного фосфора, что можно объяснить накоплением твердых частиц рядом с дорогой [33–37]. Почвенный фосфор прикрепляется к этим частицам, тем самым увеличивая его концентрацию на таких участках [38, 39].

Распределение концентрации фосфора в городских, пригородных и сельских почвах Наньчана (восток Китая) и Ханьчжоу (юго-восток Китая) подтверждают его высокое содержание в городских почвах по сравнению с пригородными (Ханьчжоу: город – 3345, пригород – 100 мг/кг, Наньчан: город, 670, пригород – 250 мг/кг) [40, 41] при численности населения в Ханьчжоу 11.9 млн человек, в Наньчане – 6.3 млн человек (табл. 2).

Таблица 2. Обобщенные данные содержания фосфора в почвах городов Китая, мг/кг

Зона	Содержание фосфора, мг/кг	Численность населения, млн человек	Источник
Город, река	г. Ханьчжоу, р. Фучуньцзян, дельта р. Янцзы		[41]
Городские почвы	3345	11.9	
Пригородные почвы	3100		
Сельские почвы	510		
Город, река	г. Наньчан, р. Ганьцзян, в окрестности о. Поянху		[40]
Городские почвы	670	6.3	
Пригородные почвы	250		
Сельские почвы	290		

Авторами исследований почв Ханьчжоу отмечены различия в содержании основных фракций фосфора. Например, среди 5 фракций P в почве относительное содержание HCl-P, поступающего из материалов с большим количеством Са-фосфатов, было значительно больше в городских почвах (36%), чем в пригородных (8%) и сельских (6%) [40].

В городских и пригородных районах Ханьчжоу содержание фосфора в почве было значительно больше, чем в сельской местности (город – 3345, сельские территории – 510 мг/кг). Городские и пригородные почвы были обогащены фосфором в диапазоне от 1.1 до 12.0 раз для общего фосфора (TP) и 1.6–32.9 раза для Olsen-P по сравнению с сельскими почвами. Относительное содержание различных фракций фосфора в городских и пригородных почвах уменьшалось в порядке HCl-P > органический P > остаточный P > NaOH-IP > NaHCO₃-IP > H₂O-P. Фракция HCl-P была доминирующей и составляла 42.3–81.0% TP [41].

Старые городские почвы имели наибольшее общее содержание фосфора, за ними следовали старые пригородные растительные почвы, новые пригородные растительные почвы и новые городские почвы. Значительные различия в содержании Olsen-P также наблюдали между категориями почв. Содержание Olsen-P также увеличивалось по мере урбанизации: в городских и пригородных почвах в 1.6–32.9 раза превышало среднее содержание фракции Olsen-P в сельских почвах. Это отражает влияние городского землепользования как основного фактора, влияющего на изменчивость содержания доступного фосфора.

Исследования содержания фосфора в почвах столицы Китая Пекина были проведены на 6 типах участков в зависимости от вида деятельности населения, включая жилой район (RA), деловой район (BA), классический сад (CG), культурно-образовательный район (CEA), общественное зеленое пространство (PGS) и придорожную зону (RSA) [42]. Кроме того что концентрация фосфора имела тенденцию к снижению от центра города к его окраинам, также она различалась по типу использования и распределилась в следующей последовательности CG > BA > RSA > RA > CEA > PGS.

Уровни содержания TP в городских почвах Пекина варьировались от 452 до 2260 мг/кг, при среднем 857 мг/кг. По сравнению с другими городами Китая, средний уровень TP в данном исследовании был больше, чем в Гонконге (средний = 6.00 мг/кг), но меньше, чем в Урумчи (от 769 до 1960 мг/кг, при среднем 1240 мг/кг) [42]. Основными факторами различия в содержании фосфора стали деятельность и плотность населения. Например, в городских районах широко используют фосфорсодержащие материалы: Са(Н₂Р₀)₂ × Н₂О – основной компонент пищевых разрыхлителей, СаНР₀₄ × 2Н₂О – основная добавка в корм для домашних животных и зубную

пасту, РСl₃ используют для производства пластмасс, Р₄С₁₀ и РСl₃ – сырье для пестицидов, Na₅Р₃О₁₀ – основной компонент моющих средств, а Н₃Р₀₄ используют для производства фосфорных удобрений. Все вышеперечисленные элементы необходимы для современной жизни и/или санитарной защиты городов. В сельской местности плотность населения ниже, и использование некоторых фосфорсодержащих материалов (например, пищевых разрыхлителей, моющих средств, кормов для домашних животных и зубной пасты) также меньше, чем в городах.

Зависимость от численности населения подтверждают медианные величины содержания фосфора в городской почве Лондона (Великобритания) – 1530 мг/кг при показателях в неурбанизированной зоне – 1220 мг/кг [43]. Структура распределения соответствовала плотности населения Лондона, которая была получена по данным переписи населения Лондона 2011 г. [44]. Более того, медианная концентрация P в городской зоне Лондона была значительно больше, чем в европейских сельскохозяйственных, пастбищных землях [45] и сельских районах Англии и Уэльса [46].

Исследования городских почв Лондона подтверждает результаты предыдущих работ и позволяют утверждать, что плотность и деятельность населения формируют структуру и величину концентрации почвенного фосфора в агломерациях [47, 48]. Кроме того, материалы городской среды, такие как асфальт, цемент и древесина, вносят свой вклад в повышенное содержание P. Исследователи подчеркивали, что накопление P связано с уровнем населения и урбанизации города, а особую опасность представляет то, что накопленный P может быть мобилизован в ручьи городскими ливневыми водами [49], вызывая эвтрофикацию водных экосистем [50].

ВЛИЯНИЕ ИСТОРИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ГОРОДА НА СОДЕРЖАНИЕ ПОЧВЕННОГО ФОСФОРА

Особенности градостроительства и его история оказывают значительное влияние на состав городских почв. Сравнения результатов и проведенный дисперсионный анализ данных образцов почв китайского мегаполиса Нанкин показали значительные различия между городским югом и городским севером [51]. Процесс городского развития, включая численность населения и уровень городской инфраструктуры, повлиял на накопление и распределение почвенного фосфора. Анализ содержания фосфора определил следующую цепочку показателей от высоких к более низким: городской юг → городской север → пригород. Это совпало с процессом расширения города Нанкин с юга на север и с последующим присоединением территории пригорода [52, 53]. Более

длительная история урбанизации стала причиной накопления фосфора в почве.

Высокое содержание ТР также наблюдали в более глубоких горизонтах в зоне древнего поселения на юге города, что может быть результатом исторического поступления фосфора из антропогенных материалов [51].

Таким образом, на содержание почвенного фосфора может влиять процесс развития городов, включающий расширение территории и улучшение инфраструктуры.

В этой связи интересны исследования культурных слоев древних городов юга России: Танаиса, расположенного на высокой цокольной террасе Дона (первая четверть III в. до н.э. — середина V в. н.э.) в 36 км от Ростова-на-Дону (Ростовская обл.), и Фанагории, находящейся на Таманском полуострове (основана в 543 г. до н.э.) к западу от поселка Сенная Краснодарского края. На этих исторических территориях зафиксировано экстремальное содержание фосфора, которое сохранилось даже в верхних горизонтах давно заброшенных городов, что связано с обогащением слоев остатками костей животных и устойчивостью фосфатов кальция [53].

ВЗАИМОВЛИЯНИЕ ЗЕЛЕННЫХ НАСАЖДЕНИЙ И СОДЕРЖАНИЯ ФОСФОРА В ГОРОДСКИХ ПОЧВАХ

В исследовании почв г. Чэнду было отмечено как один из определяющих факторов антропогенного влияния наличие и тип зеленых насаждений [32]. Озеленение играет важнейшую роль в экологической картине города, является обязательным элементом городского ландшафта и частью плана городского строительства. Поскольку в настоящей статье идет речь о городских и пригородных почвах, необходимо отметить плотную взаимосвязь таких компонентов, как почва—растительность—комфортность жизнедеятельности в городе. Растительность (древесно-кустарниковая и напочвенный растительный покров) в данном случае играет и эстетическую, и улучшающую микроклимат, и оздоровительную, и средообразующую роль.

В настоящее время активно изучают вопрос о способности высоких концентраций подвижного фосфора вызывать нарушения в растениях. Избыточное содержание фосфора может угнетать развитие растений различными путями: снижая доступность микроэлементов для растений [1], повышая доступность тяжелых металлов, например мышьяка [54], усиливая восприимчивость растений к болезням [19, 55], уменьшая количество поглощаемой воды корнями растений [56] и усиливая действие солевого стресса [57].

Чрезмерное содержание фосфора способствует возникновению дисбаланса между производством активных форм кислорода и способностью растения к их детоксикации [58]. Исследования показали, что фосфорный стресс может привести к увеличению производства кислорода, что приводит к окислительному стрессу растений [59, 60].

Влияние избыточного фосфора на рост и развитие растений может варьироваться в зависимости от их вида [61]. Кроме того, фаза развития растения также может влиять на его восприимчивость к фосфорному стрессу. Например, молодые саженцы более восприимчивы к такому поражению, чем зрелые растения [62].

Помимо вида растений и фазы развития, на реакцию растений в условиях избытка фосфора могут влиять и другие факторы: рН почвы, температура и уровень влажности [63]. Например, высокий уровень рН почвы может привести к нерастворимости фосфора, что делает его недоступным для растений, в то время как низкий уровень рН почвы может увеличить доступность фосфора, что приводит к потенциальной токсичности.

Приведенные факторы негативного влияния избыточных количеств фосфора на растения подтверждают необходимость исследования содержания этого элемента в почвах селитебных и рекреационных зон города.

Говоря о важности озеленения для улучшения экологической ситуации в городе, а также о необходимости рекультивации нарушенных земель, необходимо учитывать, что для этих целей используют грунт самого разного происхождения, в том числе с территорий сельскохозяйственных и животноводческих комплексов, в почвах которых уже имеется повышенное содержание фосфора. Этим объясняются приведенные примеры фосфорного загрязнения образцов почв, взятых в парках и скверах городов (Благовещенск, Курск, Пекин, Лондон) [28, 30, 42, 43].

Повышенное содержание фосфора в почве характерно и для образцов почв территорий городских зоопарков [64]. Скудность животных и ограниченная территория вольеров приводят к поступлению значительного количества подвижного фосфора в почву с продуктами жизнедеятельности обитателей зоопарка.

Анализируя влияние концентрации фосфора в почве на развитие растений, необходимо отметить и обратный эффект — воздействие зеленых насаждений на фосфорное загрязнение почв. Способность растений к фиторемедиации и защите от запыленности почвы можно использовать для регулирования количества почвенного фосфора.

Средообразующие и регулирующие свойства городского озеленения зависят от ряда факторов, в том

числе видового состава растений и морфологических особенностей их строения, плотности насаждений, а также различной потребности растений в органических и неорганических соединениях [65]. Таким образом, планирование местонахождения и типа зеленых насаждений является еще одним антропогенным фактором регулирования содержания фосфора в городских почвах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ научных работ показал необходимость исследования состава почв в различных зонах и районах городов, в том числе на наличие в них фосфора, что оказывает влияние не только на создание привлекательного городского ландшафта, но и на городскую экосистему в целом. Антропогенные факторы играют определяющее значение в процессе фосфотизации почв города. Спектр этих факторов не ограничивается промышленным и транспортным загрязнением почв фосфором и включает такие аспекты, как численность и плотность населения, история развития города, наличие зеленых насаждений.

Дальнейших исследований требует не только анализ городских почв и факторов фосфорного загрязнения, но и возможные мероприятия по стабилизации уровня содержания в них фосфора, поскольку актуальной остается взаимосвязь: городские почвы—городские водоемы—водоснабжение города—комфортность и безопасность жизнедеятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кирил Ю.Н., Боровик Р.А., Рудая О.А., Чесноков Н.Н., Бобровици Л.В.* Экологический мониторинг коллекции сирени ботанического сада МГУ. Влияние избыточного внесения фосфатов на почву и растения сирени обыкновенной (*Syringa vulgaris* L.) // Вестн. МичуринскГАУ. 2021. № 1. С. 64.
2. *Шумилова Л.П.* Оценка техногенного загрязнения почв Благовещенска // Географ. и природн. ресурсы. 2016. № 2. С. 36–45.
3. *Титова В.И., Варламова Л.Д., Дабахова Е.В., Бахарев А.В.* Изучение фосфорных удобрений и фосфатного состояния почв // Агрехим. вестн. 2011. № 2. С. 3–6.
4. *Дабахов М.В., Титова В.И.* Аккумуляция биогенных элементов в почвах урбанизированных ландшафтов // Агрехимия. 2004. № 2. С. 74–79.
5. *Соколов А.В.* Агрехимия фосфора. М., Л.: Изд-во АН СССР, 1950. 152 с.
6. *Ясинский Н.С., Даценко Ю.С.* Закономерности формирования речного стока фосфора для целей гидрологического моделирования // Природообустройство. 2018. № 1. С. 25–33.
7. *Евсеев А.В., Христофорова Н.К.* Фосфор как индикатор качества вод рек южного Приморья // Исследовано в России. 2004. Т. 7. С. 1740–1747.
8. *Жарикова Е.А.* Почвы Владивостока: основные характеристики и свойства // Вестн. ДВО РАН. 2012. № 3. С. 67–73.
9. *Прокофьева Т.В., Мартыненко И.А., Иванников Ф.А.* Систематика почв и почвообразующих пород Москвы и возможность их включения в общую классификацию // Почвоведение. 2011. № 5. С. 611–623.
10. *Попова Л.Ф., Никитина М.В.* Кумуляция, миграция и трансформация фосфора в почвах города Архангельска // Фундамент. исслед-я. 2014. № 9–1. С. 70–74.
11. ГОСТ 26207-91 Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО. Введен в действие 01.07.1993. М.: Изд-во стандартов, 1992. 7 с.
12. ГОСТ 26204-91 Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Чирикова в модификации ЦИНАО. Введен в действие 01.07.1993. М.: Изд-во стандартов, 1992. 6 с.
13. ГОСТ 26205-91 Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Мачигина в модификации ЦИНАО. Введен в действие 01.07.1993. М.: Изд-во стандартов, 1992. 8 с.
14. *Адрианов С.Н.* Оценка методов определения подвижных фосфатов в почве // Плодородие. 2008. № 2. С. 14–17.
15. *Аверкина С.С.* Региональные особенности и оценка методов определения подвижных фосфатов в почвах Новосибирской области // Вестн. НовосибирскГАУ. 2019. № 3. С. 7–16.
16. *Скляр С.И., Ильин А.В., Валин Д.Н., Липицкая Н.Н.* Содержание подвижного фосфора в почвах административных районов Республики Крым // Изв. сел.-хоз. науки Тавриды. 2022. № 32(195). С. 30–43.
17. *Гинзбург К.Е.* Методы определения фосфора в почве // Агрехимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. С. 106–187.
18. *Пуховский А.В.* Экспрессный метод определения подвижности почвенных фосфатов // Агрехим. вестн. 2000. № 6. С. 32–34.
19. *Терехова В.А., Домашнев Д.Б., Каниский М.А., Степачев А.В.* Экотоксикологическая оценка повышенного содержания фосфора в почвогрунте по тест-реакциям растений на разных стадиях развития // Пробл. агрехим. и экол. 2009. № 3. С. 21–26.
20. *Макаров М.И.* Влияние промышленного загрязнения на содержание фосфора в гуминовых кислотах дерново-подзолистых почв // Вестн. МГУ. Сер. 17. Почвоведение. 1987. № 2. С. 31–35.

21. Макаров М.И. Соединения фосфора в гумусовых кислотах почвы // Почвоведение. 1997. № 4. С. 458–466.
22. Чумаченко И.Н., Сушеница Б.А., Алиев Ш.А. Агрохимия фосфора и нетрадиционного минерального сырья. М., 2001. 290 с.
23. Христенко А.А., Нешта А.П. Проблемы совершенствования диагностики фосфатного состояния почв // Почвовед. и агрохим. 2014. № 2. С. 103–111.
24. Zhou J., Wu Y., Bing H., Yang Z., Wang J., Sun H., Sun S., Luo J. Variations in soil phosphorus biogeochemistry across six vegetation types along an altitudinal gradient in SW China // Catena. 2016. V. 142. P. 102–111.
25. Reimann C., Filzmoser P., Fabian K., Hron K., Birke M., Demetriades A., Dinelli E., Ladenberger A. The concept of compositional data analysis in practice—total major element concentrations in agricultural and grazing land soils of Europe // Sci. Total Environ. 2012. V. 26. P. 196–210.
26. Полищук Н.П., Савельев В.Г. Динамика фосфора в почвах городской среды и факторы ее определяющие // Формирование гражданской идентичности как фактор закрепления молодых кадров в регионе. Сб. мат-лов Международ. научн.-практ. конф. Курган, 2021. С. 286–290.
27. Власов И.И., Надежкина Е.В., Тушавина О.В. Содержание подвижных форм элементов минерального питания в почвах парка “Покровское-Стрешнево” // Агрохим. вестн. 2015. № 4. С. 37–39.
28. Радомская В.И., Бородина Н.А. Оценка антропогенного загрязнения почвы урбанизированной территории на примере города Благовещенска // Геоэкол. Инж геолог., гидрогеолог., геокриолог. 2019. № 6. С. 79–93.
29. Жарикова Е.А. Особенности агрохимических свойств и элементного состава почв урбанизированных ландшафтов (на примере г. Усурийска) // Вестн. АлтайГАУ. 2019. №. 3(173). С. 71–78.
30. Неведров Н.П. Классификация почвенных повреждений городских экосистем Курска // Астрахан. Вестн. экол. образ-я. 2018. № 2(44). С. 111–118.
31. El Khalil H., Schwartz C., El Hamiani O., Kubiniok J., Morel J.L., Boularbah A. Distribution of major elements and trace metals as indicators of technosolisation of urban and suburban soils // J. Soil Sediment. 2013. V. 13. P. 519–530.
32. Li T., Zheng W., Zhang S., Jia Y., Lia Y., Xu X. Spatial variations in soil phosphorus along a gradient of central city—suburb—exurban satellite // Catena. 2018. V. 170. P. 150–158.
33. Metson G.S., David M., Iwaniec D.M., Baker L.A., Bennett E.M., Childers D.L., Cordell D., Grimm N.B., Grove J.M., Nidzgorski D.A., White S. Urban phosphorus sustainability: Systemically incorporating social, ecological, and technological factors into phosphorus flow analysis // Environ. Sci. Policy. 2015. V. 47. P. 1–11.
34. Meng J., Tao M., Wang L., Liu X., Xu J. Changes in heavy metal bioavailability and speciation from a Pb—Zn mining soil amended with biochars from co-pyrolysis of rice straw and swine manure // Sci. Total Environ. 2018. V. 633. P. 300–307.
35. Berndtsson C.J. Storm water quality of first flush urban runoff in relation to different traffic characteristics // Urban Water J. 2014. V. 11. № 4. P. 284–296.
36. Kuoppamäki K., Setälä H., Rantalainen A-L., Kotze D.J. Urban snow indicates pollution originating from road traffic // Environ. Pollut. 2014. V. 195. P. 56–63.
37. Roy J.W., Bickerton G. Elevated dissolved phosphorus in riparian groundwater along gaining urban streams // Environ. Sci. Technol. 2014. V. 48. № 3. P. 1492–1498.
38. Berretta C., Sansalone J. Speciation and transport of phosphorus in source area rainfall—runoff // Water Air Soil Pollut. 2011. V. 222. P. 351–365.
39. Viklander M. Substances in urban snow. A comparison of the contamination of snow in different parts of the city of Luleå, Sweden // Water Air Soil Pollut. 1999. V. 14. P. 377–394.
40. Chen F.S., Yavitt J., Hu X.F. Phosphorus enrichment helps increase soil carbon mineralization in vegetation along an urban-to-rural gradient, Nanchang, China // Applied soil ecology. 2014. № 75. P. 181–188.
41. Zhang M.K. Phosphorus accumulation in soils along an urban—rural land use gradient in Hangzhou, southeast China // Commun. Soil Sci. Plant Anal. 2004. № 35(5–6). P. 819–833.
42. Zhao X., Xia X. Total nitrogen and total phosphorous in urban soils used for different purposes in Beijing, China // Proced. Environ. Sci. 2012. V. 13. P. 95–104.
43. Meng Y., Cav M., Zhan C. Spatial distribution patterns of phosphorus in top-soils of Greater London Authority area and their natural and anthropogenic factors // Appl. Geochem. 2018. № 88. P. 213–220.
44. London datastore. 2011. <https://data.london.gov.uk/dataset/2011-census-demography>
45. Riemann C., Filzmoser P., Fabian K., Hron K., Birke M., Demetriades A., Dinelli E., Ladenberger A. The concept of compositional data analysis in practice—total major element concentrations in agricultural and grazing land soils of Europe // Sci. Total Environ. 2012. V. 426. P. 196–210.
46. Rawlins B.G., McGrat S.P., Schei A.J., Breward N., Cave M., Liste T.R., Ingha M., Gowin C., Carter S. The advanced soil geochemical atlas of England and Wales.

- 2012 // British Geological Survey, Keyworth, Nottingham. 2012. P. 134–135.
47. Brett M.T., Arhonditsis G.B., Mueller S.E. Non-point-source impacts on stream nutrient concentrations along a forest to urban gradient // *Environ. Manag.* 2005. № 35. P. 330–342.
 48. Steinke K., Kussow W.R., Stier J.C. Potential contributions of mature prairie and turfgass to phosphorus in urban runoff. // *J. Environ. Qual.* 2013. № 42. P. 1176–1184
 49. Brezonik P., Stadelmann T.H. Analysis and predictive models of stormwater runoff volumes, loads, and pollutant concentrations from watersheds in the Twin Cities metropolitan area, Minnesota, USA // *Water Res.* 2002. № 36. P. 1743–1757.
 50. Yuan D.G., Zhang G.L., Gong Z.T., Burghardt W. Variations of soil phosphorus accumulation in Nanjing, China as affected by urban development // *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2007. № 170(2). P. 244–249.
 51. Halvorson J.J., Schmidt M.A., Hagerman A.E., Gonzalez J.M., Liebig M.A. Reduction of soluble nitrogen and mobilization of plant nutrients in soils from US northern Great Plains agroecosystems by phenolic compounds // *Soil Biol. Biochem.* 2016. № 94. P. 211–221.
 52. Xie X., Xiang Q., Wu T., Zhu M., Xu F., Xu Y., Pu L. Impacts of agricultural land reclamation on soil nutrient contents, pools, stoichiometry, and their relationship to oat growth on the east China coast // *Land.* 2021. V. 10. № 4. P. 355.
 53. Александровский А.Л., Александровская Е.И., Долгих А.В., Замотаев И.В., Курбатова А.Н. Почвы и культурные слои древних городов юга Европейской России // *Почвоведение.* 2015. № 11. С. 1291.
 54. Загорюлько А.В., Гайдукова Н.Г., Шабанова И.В., Скоробогатова А.С. Эколого-агрономическая оценка действия химических средств земледелия на урожай и качество зерна озимой пшеницы // *Научн. журн. КубГАУ.* 2017. № 131(07). С. 1–20.
 55. Lambers H., Finnegan P.M., Laliberte E., Pearse S.J., Ryan M.H., Shane M.W., Veneklaas E.J. Phosphorus nutrition of plants in a changing world // *Nature Plants.* 2017. V. 3. № 3. P. 17006.
 56. Wu J., Liang J., Björn L., Li J., Shu W., Wang Y. Phosphorus-arsenic interaction in the 'soil–plant–microbe' system and its influence on arsenic pollution // *S. Total Environ.* 2022. V. 802. P. 149–796.
 57. Coccozza C., Brilli F., Pignattelli S., Pollastri S., Brunetti C., Gonnelli C., Tognetti R., Centritto M., Loreto F. The excess of phosphorus in soil reduces physiological performances over time but enhances prompt recovery of salt-stressed *Arundo donax* plants // *Plant Physiol. Biochem.* 2020. V. 151. P. 556–565.
 58. Wang Y., Selinski J., Mao C., Zhu Y., Berkowitz O., Whelan J. Excess phosphate modulates retrograde signaling pathway controlling nuclear gene expression in *Arabidopsis* // *Proceed. Nat. Acad. Sci. USA.* 2014. V. 111. № 43. P. E4399–E4408.
 59. Hasanuzzaman M., Bhuyan M.H.M.B., Anee T.I., Parvin K., Nahar K., Mahmud J.A., Fujitaet M. Regulation of ascorbate-glutathione pathway in mitigating oxidative damage in plants under phosphorus toxicity: An Overview // *Antioxidants.* 2020. V. 9. № 1. P. 17.
 60. He Y., Liao H., Yan X. Localized supply of phosphorus induces root morphological and architectural changes of rice in split and stratified soil cultures // *Plant and Soil.* 2003. V. 248. P. 247–256.
 61. Lynch J.P. Root architecture and plant productivity // *Plant Physiol.* 1995. V. 109. № 1. P. 7–13.
 62. George T.S., Gregory P.J., Wood M., Read D., Buresh R.J. Phosphatase activity and organic acids in the rhizosphere of potential agroforestry species and maize // *Soil Biol. Biochem.* 2002. V. 34. № 10. P. 1487–1494.
 63. Richardson A.E., Lynch J.P., Ryan P.R., Delhaize E., Smith F.A., Smith S.E., Harvey P.R., Ryan M.H., Veneklaas E.J., Lambers H., Oberson A., Culvenor R.A., Simpson R.J. Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture // *Plant and Soil.* 2005. V. 269. № 1. P. 191–201.
 64. Федоренко А.Н., Жадобин А.В., Казеев К.Ш., Гобарова А.А., Колесников С.И. Оценка содержания биогенных элементов в почвах зоопарка (Ростов-на-Дону) // *Агрехим.вестн.* 2020. № 5. С. 80–84.
 65. Бухарина И.Л., Поварнищина Т.М., Ведерников К.Е. Эколого-биологические особенности древесных растений в урбанизированной среде. Ижевск: Ижевская ГСХА, 2007. 216 с.

Influence of Anthropogenic Factors on the Phosphorus Content in the Soils of the Cities of the World

A. E. Robert^{a,#}, G. R. Balashov^b, N. V. Verkhovtseva^c, V. I. Vasenev^a

^a*Peoples' Friendship University of Russia, Department of Landscape Design and Design of Sustainable Ecosystems of the Agrarian and Technological Institute,
ul. Miklukho-Maklaya 6, Moscow 117198, Russia*

^b*The O.Y. Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS,
B. Gruzinskaya ul. 10, bld. 1, Moscow 123242, Russia*

^c*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science,
Leninskie Gory 1, bld. 12, Moscow 119991, Russia*

[#]*E-mail: anton.robert@yandex.ru*

Anthropogenic factors affecting the phosphorus content in urban soils are considered. In the analyzed studies, the influence of population size, density and historical development of cities on phosphorus pollution of soils was noted, and the features of phosphorus distribution in urban soil zones were determined. Most studies are devoted to the excess of phosphorus content on agricultural land, while much less attention is paid to the “phosphating” of urban soils, which determines the relevance of the review of scientific publications.

Keywords: total phosphorus, mobile forms of phosphorus, urbanozems, industrial, residential and recreational zones, population density, anthropogenic influence, urban ecosystem.