

Е. С. Шавалда<sup>1</sup>, А. В. Судник<sup>1</sup>, Н. С. Юшин<sup>2</sup>, И. И. Зиньковская<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича  
Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь,  
e-mail: e.shavalda@gmail.com, asudnik@tut.by<sup>2</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Российская Федерация,  
e-mail: ynik\_62@mail.ru, inga@jinr.ru**СТРУКТУРА ПРИДОРОЖНЫХ ТРАВЯНИСТЫХ СООБЩЕСТВ  
В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ПОЧВ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ**

**Аннотация.** Отмечены растительные сообщества, встречающиеся вдоль полосы отвода автодорог Минска и Минской обл., и условия их произрастания с учетом химического загрязнения почвенного покрова тяжелыми металлами (Cd, Co, Cu, Ni, Pb и Zn). Придорожные фитоценозы преимущественно относятся к классам *Polygono-Poetea annuae*, *Artemisietea vulgaris* и *Molinio-Arrhenatheretea*. Распределение сообществ в полосе отвода экспозиций «выемка», «насыпь» и «нулевое положение» имело мозаичный характер вследствие различной сохранности почвенного покрова, степени его эрозии и загрязненности, общего антропогенного воздействия. Антропогенный характер загрязнения полосы отвода (автотранспорт, дорожное покрытие) подтверждается преимущественным накоплением тяжелых металлов в верхнем горизонте (0–10 см) в отличие от нижнего (10–20 см) и снижением концентрации элементов по мере удаления от дорожного полотна. На основе отмеченных фитоценозов предложен список растений для использования в придорожных травосмесях, обладающих устойчивостью к комплексу антропогенных факторов (эрозия, кошение, загрязнение тяжелыми металлами и др.).

**Ключевые слова:** придорожная растительность, полоса отвода, тяжелые металлы, загрязнение почвы, придорожный газон

Ya. S. Shavalda<sup>1</sup>, A. V. Sudnik<sup>1</sup>, N. S. Yushin<sup>2</sup>, I. I. Ziniovskaia<sup>2</sup><sup>1</sup>V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,  
e-mail: e.shavalda@gmail.com, asudnik@tut.by<sup>2</sup>Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russian Federation, e-mail: ynik\_62@mail.ru, inga@jinr.ru**STRUCTURE OF ROADSIDE GRASS COMMUNITIES UNDER CONDITIONS  
OF SOIL CONTAMINATION WITH HEAVY METALS**

**Abstract.** This study examines the plant communities found along the road right of way in Minsk and the Minsk region, as well as the conditions for their growth. In particular, it takes into account the chemical contamination of the soil with heavy metals (Cd, Co, Cu, Ni, Pb and Zn). The roadside phytocenoses are mainly classified as belonging to the classes *Polygono-Poetea annuae*, *Artemisietea vulgaris* and *Molinio-Arrhenatheretea*. The distribution of communities in the right-of-way of the “Notch,” “Embankment,” and “Zero position” exposure exhibited a mosaic character due to the varying preservation of the soil cover, the degree of its erosion and pollution, and the general anthropogenic impact. The anthropogenic nature of right-of-way pollution (motor transport, road surface) is corroborated by the predominant accumulation of heavy metals in the upper horizon (0–10 cm) in contrast to the lower horizon (10–20 cm) and a decrease in concentration with distance from the road surface. Based on the noted phytocenoses, a list of suitable plants for use in roadside grass mixtures that are resistant to a complex of anthropogenic factors is proposed (erosion, mowing, pollution with heavy metals, etc.).

**Keywords:** roadside vegetation, right-of-way, heavy metals, soil pollution

Я. С. Шавалда<sup>1</sup>, А. У. Суднік<sup>1</sup>, Н. С. Юшын<sup>2</sup>, І. І. Зінькоўская<sup>2</sup><sup>1</sup>Інстытут эксперыментальнай батанікі імя В. Ф. Купрэвіча Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, Мінск, Беларусь,  
e-mail: e.shavalda@gmail.com, asudnik@tut.by<sup>2</sup>Аб'яднаны інстытут ядзерных даследаванняў, Дубна, Расійская Федэрацыя, e-mail: ynik\_62@mail.ru, inga@jinr.ru**СТРУКТУРА ПРЫДАРОЖНЫХ ТРАВЯНИСТЫХ ЗГУРТАВАННЯЎ  
ВА ЎМОВАХ ЗАБРУДЖАНАСЦІ ГЛЕБ ЦЯЖКІМІ МЕТАЛАМІ**

**Анотацыя.** Адзначаны раслінныя згуртаванні, якія сустракаюцца ўздоўж паласы адводу аўтадарог Мінска і Мінскай воб., і ўмовы іх росту з улікам хімічнага забруджвання глебавага покрыва цяжкімі металамі (Cd, Co, Cu, Ni, Pb і Zn). Прыдарожныя фітацэнозы пераважна адносяцца да класаў *Polygono-Poetea annuae*, *Artemisietea vulgaris* і *Molinio-Arrhenatheretea*. Размеркаванне згуртаванняў у паласе адводу экспазіцый «выемка», «насып» і «нулявое становішча» мела мазаічны характар па прычыне рознай захаванасці глебавага покрыва, ступені яго эрозіі і забруджванасці, агульнага антрапагеннага ўздзеяння. Антрапагенны характар забруджвання паласы адводу (аўтатранспарт, дарожнае пакрыццё) пацвярджаецца пераважным назапашваннем цяжкіх металаў у верхнім гарызонце (0–10 см) у адрозненне ад ніжняга (10–20 см) і зніжэннем канцэнтрацыі элементаў па меры аддалення ад дарожнага палатна. На аснове адзначаных фітацэнозаў прапанаваны спіс раслін для выкарыстання ў прыдарожных травасумесях, якія валодаюць устойлівасцю да комплексу антрапагенных фактараў (эрозія, кашэнне, забруджванне цяжкімі металамі і інш.).

**Ключавыя словы:** прыдарожная расліннасць, паласа адводу, цяжкія металы, забруджванне глебы

**Введение.** Структура придорожных фитоценозов определяется множеством факторов: конструкцией полосы отвода, интенсивностью движения автотранспорта, периодичностью и качеством проводимых мероприятий по уходу, степенью эрозии и загрязненности почв, типом примыкающих экосистем и др. Данные сообщества характеризуются нестабильностью флористического состава, проявляющейся в специфических диагностических процессах (сукцессионные изменения) в ответ на внутри- и межсезонные изменения условий в полосе отвода, например, из-за изменения ежегодного регламента мероприятий (кошение, засевание семян и подсыпание почвогрунта) [1]. Сложная конструкция полосы отвода с наличием откосов и кюветов приводит к развитию растительности с широкой экологической валентностью и антропоотолерантностью [2]. Особое влияние на создание придорожного газона оказывают использование травосмесей из многолетних злаков и обилие синантропных видов, в том числе адвентивных (инвазивных).

Важным фактором произрастания придорожных фитоценозов является химическое загрязнение тяжелыми металлами (ТМ), среди которых наблюдается превышение базовых величин Cd, Co, Cu, Ni, Pb и Zn. Фитотоксичность комплекса данных элементов слабо изучена, а их совместное действие способно проявляться в виде синергизма. Распространение ТМ происходит преимущественно воздушным путем с последующим накоплением в почве и миграцией между почвенными горизонтами. Типичными признаками поражения растений высокими концентрациями ТМ являются: снижение активности ферментов дыхания и фотосинтеза, поступления ряда веществ в клетки и ткани растений, задержка роста и повреждение корневой системы и хлороз (Cd (1–13 мг/кг)); снижение фотосинтеза и транспирации, хлороз, желтая пятнистость с последующим некрозом, «уродливые» формы, задержка роста корней и молодых побегов (Ni (30–100 мг/кг)); снижение дыхания и фотосинтеза, увеличение поступления Cd и снижение Zn в тканях растений, увядание, темно-зеленая окраска листьев (Pb (100–500 мг/кг)); хлороз молодых листьев и побегов (Zn (140–250 мг/кг)) [3, 4].

В структуре фитоценозов в условиях постоянного химического загрязнения наблюдается угнетение аборигенной растительности с формированием специфических сообществ нарушенных территорий с доминированием рудеральных (сорные, адвентивные) видов [5]. Изменение концентрации ТМ в почве приводит к дифференциации некоторых аборигенных видов [6]. Для двулетних и многолетних трав высокая загрязненность почв приводит к уменьшению биометрических параметров растения [7].

Необходимо отметить, что минимальное повышение концентрации в почве комплекса ТМ может не приводить к отрицательному воздействию на структуру растительности. Негативное действие этих элементов начинается только при возрастании их концентрации выше порога токсичности [8]. В придорожных биогеоценозах определить влияние ТМ на состав и структуру растительных сообществ затруднительно из-за комплексного действия элементов и невозможности учета всех природных и антропогенных факторов, поэтому на придорожных территориях следует учитывать вероятностную устойчивость фитоценозов к способности произрастать на почвах с определенным уровнем химического загрязнения.

**Материалы и методы исследований.** Предметом исследования является оценка уровня загрязненности ТМ (Cd, Co, Cu, Ni, Pb и Zn) почвогрунтов для придорожных фитоценозов с указанием их синтаксонов и условий произрастания [9]. В качестве репрезентативных было выбрано девять участков вдоль полосы отвода с различной интенсивностью дорожного движения (рис. 1). Учитывая преобладание западных и юго-западных направлений воздушных масс, отбор почвы проводился в пределах полосы отвода только с подветренной относительно автодороги стороны, испытывающей преимущественное загрязнение от автодороги. С учетом конструкции полосы отвода участки исследования были разделены на следующие экспозиции: в «выемке» отбор проводился с четырех секторов: 1 – прилегающая к дороге полоса 0,5–1,5 м; 2 – кювет; 3 – склон; 4 – внешняя бровка выемки (2–4 м); в «насыпи» и «нулевом положении» выделены три сектора: 1 – прилегающая к дороге полоса 0,5–1,5 м; 2 – склон и кювет; 3 – подошва насыпи или кювета (2–10 м) [10, 11]. В каждом секторе выполнялся отбор образцов почвы на глубине 0–10 см и 10–20 см. Всего отобрано 60 образцов.

Дальнейшая подготовка, химический и спектральный анализы образцов проводились на спектрометре PlasmaQuant 9000 Elite в секторе нейтронного активационного анализа и прикладных исследований отделения ядерной физики Лаборатории нейтронной физики имени И. М. Франка Объединенного института ядерных исследований (Дубна, Российская Федерация). Для сравнения данных загрязненности почвы ТМ использовались санитарно-гигиенические (ПДК, ОДК) нормативы и средние (кларк) значения ТМ (табл. 1) [12–16]. Определение зависимости накопления ТМ в почве между секторами осуществлялось с помощью коэффициента корреляции ( $r$ ). Анализ данных выполнен с помощью программы Microsoft Excel, данные представляли в форме среднего арифметического значения и его стандартной ошибки ( $M \pm m$ ).

Экологически опасный уровень концентрации ТМ в почвогрунте был рассчитан с помощью коэффициента опасности ( $K_o$ ) [17, 18]:

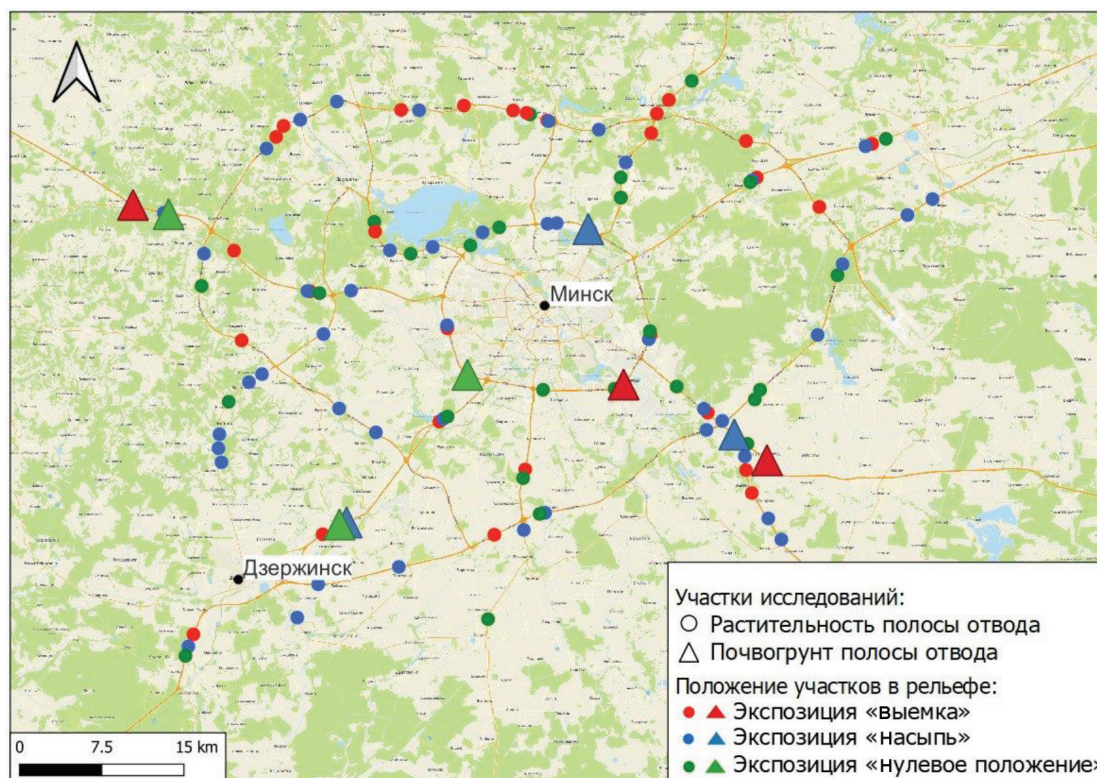


Рис. 1. Местоположение участков исследования придорожной травянистой растительности с учетом отбора почвенных образцов

Таблица 1. Показатели концентрации тяжелых металлов в почве (валовое содержание)

Норматив содержания химического элемента в почве	Cd (мг/кг)	Co (мг/кг)	Cu (мг/кг)	Ni (мг/кг)	Pb (мг/кг)	Zn (мг/кг)
ПДК [12, 13, 15]	0,5	12	33	85	32	100
ОДК (ПДК) [13,16]	0,5	5	33	20	30	55
Кларк [14]	0,1	6	13	20	12	35

$$K_o = \frac{C_{\text{образец}}}{C_{\text{фон}}}$$

где  $C_{\text{образец}}$  – концентрация ТМ в отобранном образце почвы, мг/кг;  $C_{\text{фон}}$  – фоновое содержание ТМ (кларк) (табл. 1), мг/кг.

Оценка степени загрязнения почвогрунтов комплексом ТМ проводилась с помощью суммарного показателя (уровня) загрязненности ( $Z_c$ ) [17, 18]:

$$Z_c = \sum K_o - (n - 1),$$

где  $K_o$  – коэффициент опасности ТМ;  $n$  – количество исследуемых ТМ.

Анализ  $Z_c$  проводился по следующим категориям: допустимый –  $K_o < 8$ ; низкий –  $K_o = 8-16$ ; средний –  $K_o = 16-32$ ; высокий –  $K_o = 32-128$ ; очень высокий –  $K_o > 128$ .

С целью установления вероятностных адаптационных возможностей фитоценозов произрастать на территориях с определенным уровнем химического загрязнения дополнительно закладывались 112 эколого-фитоценологических профилей в полосе отвода с разделением по соответствующим экспозициям и секторам. Определялся видовой состав [19] и принадлежность сообществ к синтаксонам с помощью методологии Й. Браун–Бланке (см. рис. 1) [20]. Таким образом, оценивался уровень загрязненности почв и встречающиеся синтаксоны для каждого сектора экспозиций с учетом конструкции полосы отвода и по мере удаления от дорожного полотна.

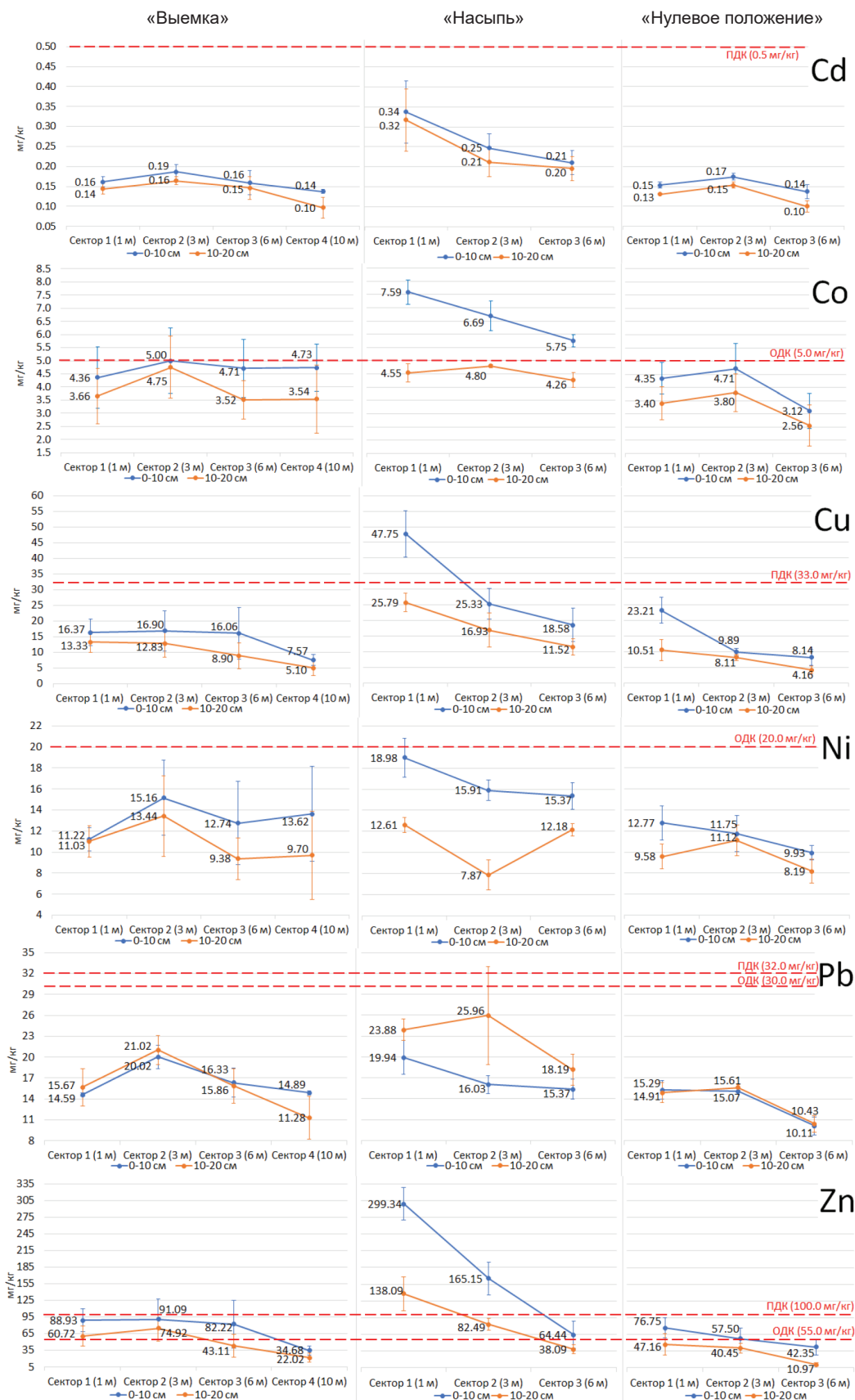


Рис. 2. Распределение ТМ в почвогрунтах полосы отвода автодорог с учетом положения участков исследования в рельефе и относительно дорожного полотна



**Результаты и их обсуждение. Кадмий (Cd).** Средние концентрации элемента в почвах находятся в пределах 0,1–0,34 мг/кг (рис. 2, табл. 2), при этом содержание Cd во всех экспозициях не превышает ПДК и ОДК (0,5 мг/кг). В экспозиции «насыпь» отмечено снижение концентрации элемента по мере удаления от дорожного полотна ( $r = 0,9$  при  $p < 0,05$ ), а в «выемке» – увеличение концентрации элемента на откосах (сектор 3) с накоплением в кюветах (сектор 2) ( $r = 0,9$  при  $p < 0,05$ ). Наибольшая средняя загрязненность характерна для «насыпи» – в 1,7 раза выше остальных экспозиций. Средняя концентрация в секторах и на глубине отбора во всех экспозициях превышала кларковые значения (0,1 мг/кг), кроме результатов нижележащих горизонтов наиболее отдаленных секторов «выемки» и «нулевого положения» –  $0,1 \pm 0,03$  мг/кг.

**Кобальт (Co).** Диапазон средних концентраций Co составил 2,56–7,59 мг/кг. Для «насыпи» отмечена наибольшая загрязненность – концентрация в верхнем горизонте (0–10 см) превышала ОДК (5 мг/кг) в 1,2–1,5 раза со снижением по мере удаления от дорожного полотна (см. рис. 2, табл. 2). Средняя загрязненность верхнего горизонта (0–10 см) во всех экспозициях была выше в 1,3 раза – на 1,22 мг/кг нижнего горизонта (0–10 см). Положительная корреляция ( $r = 0,9$  при  $p < 0,05$ ) показывает равномерную подвижность элемента в секторах 1 и 2 для «насыпи» и «нулевого положения». Превышение кларка (6 мг/кг) отмечалось только в верхних горизонтах (0–10 см) «насыпи» секторов 1 и 2 в 1,3–1,5 раза. Результаты показывают слабый эффект накопления и средний захват кобальта компонентами почв.

**Медь (Cu).** Средние концентрации элемента колеблются в широких пределах – от 4,16 до 47,75 мг/кг. Превышение ПДК и ОДК (33 мг/кг) отмечалось в верхнем горизонте (0–10 см) сектора 1 «насыпи» в 1,4 раза (47,75 мг/кг) (см. рис. 2, табл. 2). Среднее содержание Cu в верхнем горизонте (0–10 см) было выше нижнего (10–20 см) в 1,6 раза – на 7,26 мг/кг. Для всех экспозиций отмечается снижение средней концентрации по мере удаления от дорожного полотна. Равномерное изменение концентрации Cu отмечается в положительной корреляции ( $r = 0,9$  при  $p < 0,05$ ) между секторами 1 и 2 «нулевого положения» и всей полосы отвода «выемки». «Насыпь» соответствует общему положению наибольшей загрязненности ТМ – средняя концентрация выше «нулевого положения» и «выемки» в 2,3 и 2 раза соответственно. Превышение кларкового значения (13 мг/кг) преимущественно отмечается в верхних горизонтах (0–10 см). Концентрация Cu показывает постоянное снижение в зависимости от удаления от дорожного полотна без характерной аккумуляции в кюветах.

**Никель (Ni).** Средние показатели содержания Ni находятся в пределах 7,87–18,98 мг/кг, превышений ПДК (85 мг/кг) и ОДК (20 мг/кг) не обнаружено (см. рис. 2, табл. 2). Средняя концентрация в верхнем горизонте (0–10 см) выше нижнего (10–20 см) в 1,3 раза – на 3,24 мг/кг. Положительная корреляция для секторов 1 и 2 «насыпи» ( $r = 0,8$  при  $p < 0,05$ ), всей полосы отвода «нулевого положения» и «выемки» ( $r = 0,9$  при  $p < 0,05$ ) характеризует равномерное распределение элемента вдоль всей полосы отвода с накоплением в кюветах и смывом с откосов. Значения концентрации Ni ниже кларка (20 мг/кг) показывают наименьшую загрязненность почвы по сравнению с другими ТМ.

**Свинец (Pb).** Диапазон средних значений Pb находится в пределах 10,11–25,96 мг/кг, превышений ПДК (32 мг/кг) и ОДК (30 мг/кг) не обнаружено (см. рис. 2, табл. 2). В отличие от других элементов концентрация свинца выше в нижнем горизонте (10–20 см) на 1,52 мг/кг, что, вероятно, вызвано ранее используемым этилированным бензином, остаточные продукты которого мигрировали в нижние горизонты. Исключением являются сектор 3 «нулевого положения» и сектор 4 «выемки» по причине высокой сельскохозяйственной освоенности региона, возможного использования фосфатных удобрений, содержащих Pb, на примыкающих к автодороге территориях. В «выемке» между секторами 2 и 3 отмечалась положительная корреляция ( $r = 0,9$  при  $p < 0,05$ ) по накоплению свинца. Наибольшая средняя загрязненность характерна для «насыпи» – в 1,2 раза выше «выемки» и в 1,5 раза выше «нулевого положения». Средняя концентрация Pb была выше кларковых значений (12 мг/кг) во всех экспозициях, кроме сектора 3 «нулевого положения» и нижнего горизонта (10–20 см) сектора 4 «выемки». Отмечается накопление в кювете «выемки» по сравнению с примыкающими секторами в 1,3–1,4 раза – на 4,49–5,39 мг/кг.

**Цинк (Zn).** Средние концентрации цинка колеблются в широких значениях – 10,97–299,34 мг/кг. Отмечено превышение допустимых концентраций: для «выемки» отмечалось превышение ОДК (55 мг/кг) в секторах 1 и 2, а также в верхнем горизонте (0–10 см) сектора 3 в среднем в 1,4 раза; в «нулевом положении» превышение ОДК было в верхнем горизонте (0–10 см) секторов 1 и 2 в 1,2 раза (см. рис. 2, табл. 2). В «насыпи» отмечены самые высокие показатели превышения ПДК (100,0 мг/кг) в секторе 1 (верхний горизонт (0–10 см) в 3 раза, нижний горизонт (10–20 см) в 1,4 раза) и секторе 2 (верхний горизонт (0–10 см) в 1,7 раза). Превышение ОДК также наблюдалось в секторе 3 в нижнем горизонте (10–20 см) в 1,5 раза и в верхнем горизонте (0–10 см) в 1,2 раза. В «нулевом положении» характерно накопление Zn в нижнем горизонте (10–20 см) кювета ( $r = 0,9$  при  $p < 0,05$ ) при росте концентрации в примыкающих секторах 1 и 3. В «выемке» положительная корреляция ( $r = 0,9$  при  $p < 0,05$ ) равномерного распределения Zn отмечается в секторах 2–4. Наибольшее содержание элемента в «насыпи»: выше

Таблица 2. Концентрация тяжелых металлов в почве придорожных территорий, мг/кг

Элемент / показатель (глубина, см)	Экспозиция «выемка», мг/кг						Экспозиция «насыпь», мг/кг						Экспозиция «нулевое положение», мг/кг		
	Сектор						Сектор						Сектор		
	1 (1 м)	2 (3 м)	3 (6 м)	4 (10 м)	1 (1 м)	2 (3 м)	3 (6 м)	1 (1 м)	2 (3 м)	3 (6 м)	1 (1 м)	2 (3 м)	3 (6 м)		
Cd (0–10)	0,16 ± 0,012	0,19 ± 0,019	0,16 ± 0,030	0,14 ± 0,005	0,34 ± 0,078	0,25 ± 0,036	0,21 ± 0,031	0,15 ± 0,007	0,17 ± 0,009	0,14 ± 0,017	0,13 ± 0,001	0,15 ± 0,007	0,10 ± 0,014		
Cd (10–20)	0,14 ± 0,014	0,16 ± 0,011	0,15 ± 0,029	0,10 ± 0,026	0,32 ± 0,078	0,21 ± 0,037	0,20 ± 0,030	4,36 ± 0,595	4,71 ± 0,961	2,24 ± 0,024	3,40 ± 0,622	3,80 ± 0,715	3,12 ± 0,672		
Co (0–10)	2,84 ± 0,027	3,38 ± 0,031	3,27 ± 0,047	3,58 ± 0,033	7,59 ± 0,466	6,69 ± 0,562	5,75 ± 0,225	23,21 ± 4,143	9,89 ± 1,147	8,14 ± 2,533	10,51 ± 3,454	8,11 ± 0,983	4,16 ± 1,101		
Co (10–20)	4,36 ± 1,171	5,00 ± 1,241	4,71 ± 1,107	4,73 ± 0,889	4,55 ± 0,344	4,80 ± 0,065	4,26 ± 0,281	12,77 ± 1,645	11,75 ± 1,739	9,93 ± 0,673	15,37 ± 1,269	11,12 ± 1,442	8,19 ± 1,143		
Cu (0–10)	16,37 ± 4,221	16,90 ± 6,436	16,06 ± 8,351	7,57 ± 1,738	47,75 ± 7,404	25,33 ± 4,958	18,58 ± 5,336	15,29 ± 1,321	15,07 ± 0,139	10,11 ± 1,276	15,37 ± 1,446	15,61 ± 0,439	10,43 ± 1,201		
Cu (10–20)	13,33 ± 3,358	12,83 ± 4,471	8,90 ± 4,034	5,10 ± 2,565	25,79 ± 3,010	16,93 ± 5,493	11,52 ± 2,629	76,75 ± 17,657	57,50 ± 18,560	42,35 ± 14,250	12,18 ± 0,582	14,91 ± 1,478	40,45 ± 8,845		
Ni (0–10)	11,22 ± 1,117	15,16 ± 3,557	12,74 ± 3,952	13,62 ± 4,506	18,98 ± 1,854	15,91 ± 0,976	15,37 ± 1,269	47,16 ± 18,669	40,45 ± 8,845	10,97 ± 2,933	7,87 ± 1,422	9,58 ± 1,187	7,3		
Ni (10–20)	11,03 ± 1,483	13,44 ± 3,820	9,38 ± 1,974	9,70 ± 4,199	12,61 ± 0,689	7,87 ± 1,422	12,18 ± 0,582	16,03 ± 1,275	16,03 ± 1,275	2,4	15,29 ± 1,321	15,07 ± 0,139	2,4		
Pb (0–10)	14,59 ± 0,229	20,02 ± 1,650	16,33 ± 2,086	14,89 ± 0,312	19,94 ± 2,417	16,03 ± 1,275	15,37 ± 1,446	3,3	3,3	–1,1	15,37 ± 1,446	15,61 ± 0,439	–1,1		
Pb (10–20)	15,67 ± 2,681	21,02 ± 2,076	15,86 ± 2,483	11,28 ± 3,083	23,88 ± 1,531	25,96 ± 7,063	18,19 ± 2,235	6,9	6,9	–1,1	14,91 ± 1,478	15,61 ± 0,439	–1,1		
Zn (0–10)	88,93 ± 20,588	91,09 ± 36,420	82,22 ± 43,067	34,68 ± 8,103	299,34 ± 29,066	165,15 ± 29,160	64,44 ± 23,864	7,3	7,3	–1,1	76,75 ± 17,657	57,50 ± 18,560	–1,1		
Zn (10–20)	60,72 ± 18,633	74,92 ± 24,135	43,11 ± 20,696	22,02 ± 8,148	138,09 ± 30,539	82,49 ± 10,500	38,09 ± 7,814	16,4	16,4	–1,1	47,16 ± 18,669	40,45 ± 8,845	–1,1		
Z <sub>c</sub> (0–10)	7,8	9	7,5	2,6	30,9	16,4	6,9	7,3	4,9	2,4	7,3	4,9	2,4		
Z <sub>c</sub> (10–20)	5	7,1	3,1	0,2	15	8,7	3,9	3,3	3	–1,1	3,3	3	–1,1		

«нулевого положения» в 2,9 раза и «выемки» в 1,8 раза. Среднее содержание цинка в секторах экспозиций превышало кларки (35 мг/кг), кроме нижнего горизонта (10–20 см) наиболее отдаленных секторов «выемки» и «нулевого положения». Наиболее высокие концентрации Zn в отличие от других элементов, вероятно, вызваны внесением минеральных удобрений (сульфат аммония с высоким содержанием цинка) на примыкающих территориях и сходны с антропогенным воздействием Pb.

Для каждого сектора экспозиций (с учетом отбора почвы на глубине 0–10 и 10–20 см) был рассчитан суммарный показатель загрязнения ( $Z_c$ ) (см. табл. 2). Определение среднего значения для всех показателей  $Z_c$  в пределах экспозиции показало следующие различия по уровню загрязненности ТМ: «насыпь» (13,6 – низкий) > «выемка» (5,3 – допустимый) > «нулевое положение» (3,3 – допустимый). Общий уровень загрязненности «насыпи» был выше «выемки» в 2,6 раза и выше «нулевого положения» в 4,1 раза.

Наибольший суммарный показатель загрязнения ( $Z_c$ ) отмечен в секторе 1 «насыпи»: верхний горизонт (0–10 см) – 30,9 (средний уровень загрязнения), нижний горизонт (10–20 см) – 15,0 (низкий уровень загрязнения) и секторе 2 (верхний горизонт (0–10 см) – 16,4 (средний уровень загрязнения), нижний горизонт (10–20 см) – 8,7 (низкий уровень загрязнения) (см. табл. 2). В верхнем горизонте (0–10 см) сектора 2 «выемки»  $Z_c = 9,0$  (низкий уровень загрязнения). В остальных секторах экспозиций  $Z_c = -1,1-7,8$  (допустимое загрязнение) со снижением по мере удаления от дорожного полотна и глубины анализа почв. Наибольшее значение  $Z_c$  среди всех изученных ТМ имеет Zn: наблюдается его антропогенный рост вследствие увеличения автотранспортного потока и широкого использования минеральных удобрений в сельском хозяйстве на примыкающих к автодороге территориях.

*Структура придорожных фитоценозов.* По синтаксономической структуре придорожная растительность представлена 3 классами, 4 порядками, 6 союзами, 11 ассоциациями и 2 сообществами.

#### ПРОДРОМУС ПРИДОРОЖНОЙ ТРАВЯНИСТОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Класс *Polygono-Poetea annuae* Rivas-Martínez 1975

Порядок *Polygono arenastr-Poëtalía annuae* R. Tx. in Géhu et al. 1972 corr. Rivas-Martínez et al. 1991

Союз *Polygono-Coronopodion* Sissingh 1969

Акк. *Polygonetum arenastr* Gams 1927 corr. Lanikova in Chytry 2009

Класс *Artemisietea vulgaris* Lohmeyer et al. in Tx. ex von Rochow 1951

Порядок *Agropyretalia intermedio-repentis* T. Müller et Görs 1969

Союз *Convolvulo arvensis-Agropyrion repentis* Görs 1967

Акк. *Arrhenathero elatioris-Dactylidetum glomeratae* Arepieva 2015

Акк. *Convolvulo arvensis-Elytrigietum repentis* Felföldy 1943

Акк. *Convolvulo arvensis-Brometum inermis* Felföldy 1943

Акк. *Calamagrostidetum epigeios* Kostiljov in V. Solomakha et al. 1992

Сообщество *Calamagrostis epigeios* [*Agropyretalia intermedio-repentis* / *Koelerio-Corynephoretea canescentis*]

Сообщество *Pilosella officinarum-Bromopsis inermis* [*Agropyretalia intermedio-repentis* / *Koelerio-Corynephoretea canescentis*]

Класс *Molinio-Arrhenatheretea* Tx. 1937

Порядок *Potentillo-Polygonetalia avicularis* Tx. 1947

Союз *Potentillion anserinae* Tx. 1947

Акк. *Lolio-Potentilletum anserinae* (Knapp 1946) Tx. 1947

Порядок *Arrhenatheretalia* R. Tx. 1931

Союз *Arrhenatherion elatioris* (Br.-Bl. 1925) Koch 1926

Акк. *Festucetum rubrae* (Domin 1923) Válek 1956 em. Pukau et al. 1956

Союз *Festucion pratensis* Sipajlova et al. 1985

Акк. *Dactylido glomeratae-Bromopsietum inermis* Sapegin et Dajneko 2008

Акк. *Festucetum pratensis-Dactylidetum glomeratae* Dymina 1989

Союз *Cynosurion cristati* Tx. 1947

Акк. *Leontodonto-Poetum pratensis* Anishchenko et Ishbirdina in Ishbirdina et al. 1989 ex Anishchenko et al. 2019

Акк. *Lolietum perennis* Gams 1927

Классы *Polygono-Poetea annuae* и *Artemisietea vulgaris* представлены в основном растительностью нарушенных территорий (рудерально-сегетальные виды) и соответствуют наиболее загрязненным секторам полосы отвода, что также связано с высоким уровнем общего антропогенного воздействия, сопровождающегося деградацией почвенного покрова [21, 22].

Асс. *Polygonetum arenastri* Gams характерна для сектора 1 всех экспозиций и встречается в условиях  $Z_c = 3,3-30,9$  (допустимый средний уровень загрязнения) (см. табл. 2). Сообщество характерно для участков полосы отвода с сильным уплотнением и перегревом почв, высокой степенью эрозии [22]. Основу сообщества формируют такие виды, как *Poa annua*, *Polygonum arenastrum*, *Potentilla anserina*, *Plantago major*, *Poa compressa* и др.

Асс. *Arrhenathero elatioris-Dactylidetum glomeratae* встречается исключительно в секторах 2 и 3 «насыпи» и соответствует участкам со слабым антропогенным воздействием без признаков вытаптывания и уплотнения почв, отсутствием механического повреждения почвенного покрова в результате кошения [23]. Уровень  $Z_c = 3,9-16,4$  (допустимый средний уровень загрязнения ТМ) (см. табл. 2). Доминируют следующие виды: *Arrhenatherum elatius*, *Dactylis glomerata*, *Trifolium pratense*, *Festuca pratensis*, *Lolium perenne* и др.

Асс. *Convolvulo arvensis-Elytrigietum repentis* и асс. *Convolvulo arvensis-Brometum inermis* отмечены в секторах 1 и 2 участков, фитоценозы достаточно сформированы, антропогенная нагрузка умеренная с признаками эрозии почв [24].  $Z_c = 3-30,9$  (допустимый средний уровень загрязнения ТМ) (см. табл. 2). Преобладают такие виды, как *Bromopsis inermis*, *Convolvulus arvensis*, *Dactylis glomerata*, *Elytrigia repens*, *Lolium perenne* и др.

Асс. *Calamagrostidetum epigeios* отличается широкой экологической валентностью условий произрастания, вдоль автодорог занимает территории, которые ранее испытали сильное антропогенное воздействие (реконструкция автодороги, регулярная периодичность сезонного кошения и высокая степень эрозии почв) или интенсивность данного воздействия на протяжении нескольких сезонов возросла [25]. Встречается во всех секторах экспозиций. Условия  $Z_c = 0,2-30,9$  (допустимый средний уровень загрязнения ТМ) (см. табл. 2). Характерные виды: *Calamagrostis epigeios*, *Dactylis glomerata*, *Lolium perenne*, *Solidago Canadensis* и др.

Безранговые сообщества *Calamagrostis epigeios* [*Agropyretalia intermedio-repentis* / *Koelerio-Corynephoretea canescentis*] и *Pilosella officinarum-Bromopsis inermis* [*Agropyretalia intermedio-repentis* / *Koelerio-Corynephoretea canescentis*] отмечаются на откосах (сектор 3) «выемок» на участках с наибольшей эрозией почв и деградацией придорожного газона вследствие интенсивного кошения.  $Z_c = 3,1-7,5$  (допустимый уровень загрязнения ТМ) – отсутствие сформированного газона (фитоценоз с замкнутой ценофлорой) в первую очередь определяется методами ухода, а не уровнем загрязненности почв ТМ (см. табл. 2). Доминируют виды *Bromopsis inermis*, *Calamagrostis epigeios*, *Coryza canadensis*, *Lolium perenne*, *Pilosella officinarum* и др.

Сообщества класса *Molinio-Arrhenatheretea* отражают наиболее благоприятные условия развития придорожных фитоценозов, приближенных к параметрам регламентируемого придорожного газона. Почвенный покров подвержен меньшей интенсивности общего антропогенного воздействия в отличие от классов *Polygono-Poetea annuae* и *Artemisietea vulgaris* [26].

Асс. *Lolio-Potentilletum anserinae* и асс. *Lolietum perennis* встречаются на участках с наибольшей загрязненностью почв ТМ, для которых характерны сильное антропогенное воздействие, эрозия, уплотнение и механическое повреждение почв и растительности в результате частого кошения (сектор 1 всех экспозиций) [27, 28]. Условия  $Z_c = 3,3-30,9$  (допустимый средний уровень загрязнения ТМ) (см. табл. 2). В основе фитоценоза виды *Dactylis glomerata*, *Festuca rubra*, *Leontodon autumnalis*, *Lolium perenne*, *Potentilla anserina* и др.

Асс. *Festucetum rubrae* встречается вдоль всей полосы отвода экспозиций на участках с плотной, достаточно сформированной дерниной, соответствует параметрам придорожного газона [29].  $Z_c = 0,2-30,9$  (допустимый средний уровень загрязнения ТМ) (см. табл. 2). В сообществах преобладают виды *Bromopsis inermis*, *Dactylis glomerata*, *Festuca pratensis*, *Festuca rubra*, *Lolium perenne* и др.

Асс. *Dactylido glomeratae-Bromopsietum inermis* является наиболее распространенной вдоль автодорог Минска и Минской обл. и динамичной, но в отличие от сообществ сеяных пойменных лугов богата синантропными видами [30]. Занимает все секторы экспозиций полосы отвода, кроме сектора 1. Условия  $Z_c = 0,2-16,4$  (допустимый средний уровень загрязнения ТМ) (см. табл. 2). Доминируют виды *Bromopsis inermis*, *Calamagrostis epigeios*, *Dactylis glomerata*, *Lolium perenne*, *Solidago canadensis* и др.

Асс. *Festucetum pratensis-Dactylidetum glomeratae* встречается преимущественно в секторе 3 «насыпи» и «нулевого положения», секторе 4 «выемки». В сообществе отмечается обилие луговых и синантропных видов. Интенсивность эрозии почв одна из самых низких.  $Z_c = 0,2-6,9$  (допустимый уровень загрязнения ТМ) (см. табл. 2). Преобладают виды *Calamagrostis epigeios*, *Dactylis glomerata*, *Festuca pratensis* и др.

Асс. *Leontodonto-Poetum pratensis* также характерна для наиболее отдаленных от дорожного полотна секторов, но испытывающих сильное антропогенное воздействие (вытаптывание) из-за частого призывания к пешеходным дорожкам и другой придорожной инфраструктуре [28]. Условия  $Z_c = 0,2-16,4$



(допустимый средний уровень загрязнения ТМ) (см. табл. 2). Доминируют виды: *Dactylis glomerata*, *Leontodon autumnalis*, *Poa pratensis* и др.

**Рекомендации по подбору видов, используемых для формирования придорожного газона в условиях антропогенных факторов вдоль автодорог.** Учитывая доминирование видов в отмеченных сообществах, специфику антропогенного воздействия и уровень загрязненности почв ТМ, следует предложить следующие виды злаков для озеленения придорожных территорий: длиннокорневищные (*Bromopsis inermis*, *Elytrigia repens*) и рыхлодерновинные (*Dactylis glomerata*, *Festuca pratensis*, *Festuca rubra*, *Lolium perenne*, *Poa pratensis*). На участках с наиболее выраженными эрозионными процессами предлагается дополнительно использовать *Calamagrostis epigeios*. Из существующих придорожных травосмесей следует исключить *Phleum pratense* и *Agrostis tenuis* из-за их низкой встречаемости в условиях антропогенного воздействия, в том числе вероятностного токсического эффекта от загрязнения ТМ.

**Закключение.** Условия антропогенного воздействия вдоль автодорог обусловили преимущественное загрязнение ТМ верхнего горизонта (0–10 см) с накоплением ряда элементов (Cd, Co, Ni, Pb) в кюветах. Pb показал более высокие концентрации в нижнем горизонте (10–20 см) – последствия использования этилированного бензина в конце XX в. По результатам сравнения с санитарно-гигиеническими нормативами (ПДК и ОДК) отмечается наибольшая загрязненность полосы отвода Co, Cu, Zn; Cd, Ni, Pb, не превышавшими допустимые концентрации. Концентрация Ni не превышала кларковых значений, что характеризует его наименьшее содержание по сравнению с другими элементами. Аномальное содержание Zn определяется ростом автотранспорта и используемых минеральных удобрений на примыкающих к автодороге участках. Суммарный показатель загрязнения определил наибольшее накопление элементов в «насыпи» и наименьшее загрязнение почв в «нулевом положении». Наибольшее значение в  $Z_c$  имеет Zn. Полученные данные загрязненности полосы отвода ТМ и определение структуры придорожных сообществ с оценкой вклада основных доминирующих видов позволили предложить список растений для озеленения, обладающих устойчивостью к комплексу негативных факторов (эрозия, кошение, загрязнение ТМ и др.).

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (грант НАУКА М № Б23М-001 от 2 мая 2023 г.).

#### Список использованных источников

1. Сумина, О. И. Формирование растительности на техногенных местообитаниях Крайнего Севера России / О. И. Сумина. – СПб.: Информ–Навигатор, 2013. – 340 с.
2. Харитонцев, Б. С. Особенности видового состава растительности придорожных фитоценозов / Б. С. Харитонцев, Е. И. Попова // Современ. проблемы науки и образования. – 2017. – № 5. – С. 1–8.
3. Узаков, З. З. Тяжелые металлы и их влияние на растения / З. З. Узаков // Символ науки. – 2018. – № 1–2. – С. 52–53.
4. Давыдова, С. Л. Тяжелые металлы как супертоксиканты XXI века: учеб. пособие / С. Л. Давыдова, В. И. Тагасов. – М.: Изд-во РУДН, 2002. – 140 с.
5. Сообщества растений трансформеров: ассоциация *Urtico dioicae-Heracleetum sosnowskyi* / Н. Н. Панасенко [и др.] // Бюл. Брянск. отд-ния Рус. ботан. о-ва. – 2014. – Т. 2, № 5. – С. 48–53.
6. Косицин, А. В. Внутривидовая изменчивость металлоустойчивости в некоторых южноуральских популяциях *Aster alpinus* (Asteraceae) / А. В. Косицин, Н. В. Алексеева-Попова, Т. И. Игошина // Ботан. журн. – 1985. – Т. 70, № 8. – С. 1084–1091.
7. Демич, Ю. А. Содержание тяжелых металлов в объектах окружающей среды и состояние растительных популяций / Ю. А. Демич // Вестн. СГУ. – 2006. – № 7 (47). – С. 45–53.
8. Содержание токсических веществ в листьях деревьев – экологическая характеристика урбосистемы / А. П. Парахонский [и др.] // Междунар. журн. эксперим. образования. – 2011. – № 3. – С. 110–111.
9. Об автомобильных дорогах и дорожной деятельности: Закон Респ. Беларусь, 2 дек. 1994 г., № 3434-XII // Ведомасцi Нац. сходу Рэсп. Беларусь. – 1995. – № 5. – 31 с.
10. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа: ГОСТ 17.4.4.022017. – М.: Стандартинформ, 2018. – 12 с.
11. Загрязнение почвогрунта полосы отвода автомобильных дорог Минской области тяжелыми металлами / Е. С. Шавалда [и др.] // Ботаника (исследования). – 2023. – Вып. 52. – С. 155–166.
12. Головатый, С. Е. Тяжелые металлы в агроэкосистемах / С. Е. Головатый. – Минск: РУП «Ин-т почвоведения и агрохимии», 2002. – 239 с.
13. Об утверждении гигиенических нормативов [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 25 янв. 2021 г., № 37 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://rpsch.by/Docs/post-37-2021.pdf>. – Дата доступа: 15.03.2024.
14. Петухова, Н. Н. Кларкам микроэлементов в почвенном покрове Беларуси / Н. Н. Петухова, В. А. Кузнецов // Докл. Акад. наук Беларуси. – 1992. – Т. 26, № 5. – С. 461–465.
15. Охрана окружающей среды и природопользование Земли. Порядок выполнения работ по дифференцированному нормированию содержания химических веществ в землях (включая почвы) = Ахова навакольнага асяроддзя і прыродакарыстанне Землі. Парадак выканання работ па дыферэнцыяванаму нармаванню ўтрымання хімічных рэчываў у землях (уключаючы глебы): ТКП 17.03-06-2019 (33140). – Введ. 01.05.19. – Минск: М-во природ. ресурсов и охраны окружающей среды. – 2019. – 17 с.

16. Состояние природной среды Беларуси: экол. бюл. 2014 г. / НАН Беларуси, М-во природ. ресурсов и охраны окружающей среды; под общ. ред. В. Ф. Логинова. – Минск: [б. и.], 2015. – 347 с.
17. Павлов, П. Д. Состояние почвенного покрова в зоне влияния полигона твердых бытовых отходов (на примере Александровского полигона г. Саратова) / П. Д. Павлов, М. В. Решетников, В. Н. Еремин // Аграр. науч. журн. – 2014. – № 11. – С. 34–38.
18. Баканина, Ф. М. Техногенные изменения почвенного покрова городских территорий (на примере г. Горького) / Ф. М. Баканина // Антропогенные изменения и охрана природной среды: межвуз. сб. науч. тр. / М-во образования РСФСР, Нижегород. гос. пед. ин-т; редкол.: Э. Г. Коломыц [и др.]. – Н. Новгород, 1990. – С. 61–66.
19. Определитель высших растений Беларуси / под ред. В. И. Парфенова. – Минск: Дизайн ПРО, 1999. – 472 с.
20. Миркин, Б. М. История и концептуальные установки классификации растительных сообществ с использованием подхода Браун–Бланке / Б. М. Миркин, Л. Г. Наумова // *Lethaea rossica*. – 2014. – Т. 9. – С. 21–34.
21. Vegetation of the Czech Republic 2. Ruderal, weed, rock and scree vegetation Academia / М. Chytrý [et al.]. – Praha, 2009. – 520 p.
22. Обзор растительных сообществ класса *Polygono arenastri–Poëtea annuae* в Российской Федерации / Я. М. Голованов [и др.] // *Turczaninowia*. – 2023. – Т. 26, № 2. – С. 147–169.
23. Арепьева, Л. А. Синантропные сообщества с *Dactylis glomerata* L. в Курской области / Л. А. Арепьева // Растительность России. – 2018. – № 33. – С. 3–18.
24. Арепьева, Л. А. О новых синтаксонах синантропной растительности города Брянска / Л. А. Арепьева // Разнообразие растительного мира. – 2019. – № 2 (2). – С. 18–37.
25. Бородулина, В. П. Наземнейниковые луга в охранной зоне Полистовского заповедника (Псковская область) / В. П. Бородулина, А. Ф. Комарова, О. В. Чередниченко // Разнообразие растительного мира. – 2019. – № 1 (1). – С. 44–61.
26. Vegetation of the Czech Republic 1. Grassland and Heathland Vegetation / М. Chytrý [et al.]. – Praha, 2007. – 528 p.
27. *Bodrogköz*, Gy. Hydroecology of the plant communities at the middle Tisza-valley i. *Agropyro-Rumicion* / Gy. Bodrogköz // *Tiscia (Szeged)*. – 1985. – Vol. 20. – P. 55–97.
28. Растительность газонов города Уфы (Республика Башкортостан) / И. Е. Анищенко [и др.] // Растительность России. – 2019. – № 36. – С. 25–40.
29. Автомобильные дороги. Правила содержания: ТКП 366-2021 (33200). – Минск: М-во транспорта и коммуникаций Респ. Беларусь, 2022. – 41 с.
30. Сапегин, Л. М. Синтаксономия и геоботаническая характеристика луговых экосистем поймы р. Сож пригорода г. Гомеля / Л. М. Сапегин, Н. М. Дайнеко // Изв. Гомел. гос. ун-та имени Ф. Скорины. – 2010. – № 3 (60). – С. 29–39.

Поступила 02.05.2024