Трансформация экосистем
Ecosystem Transformation

ISSN 2619-0931 Online
www.ecosysttrans.com

DOI: https://doi.org/10.23859/estr-240411
EDN: https://elibrary.ru/sujzgzm
УДК 631.95

Научная статья

Влияние выбросов автотранспорта на снежный покров агроландшафтов в условиях Карелии

Е.В. Дубина-Чехович*, О.Н. Бахмет

Карельский Научный Центр РАН, 185035, Россия, Республика Карелия, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, д. 11

**d-chehovich@yandex.ru*

Аннотация. В работе представлены результаты оценки влияния выбросов автотранспорта на снежный покров агроландшафтов Карелии. Исследование проведено в наиболее благоприятной для сельскохозяйственного производства южной агроклиматической зоне региона в период с 2018 по 2019 гг. Атмосферные осадки в виде снега, формирующиеся в условиях влияния автотранспорта, характеризовались средним и низким уровнем пылевого загрязнения. Выпадения пыли на территорию мелиорированного агроландшафта до 50 м от автотрассы составили 129.8–385.9 кг/(км²×сут), что превышало фоновые значения в 8.3–25.0 раза. Коэффициенты суммарного загрязнения снежного покрова (по твердому остатку) на агроландшафтах демонстрировали средний и высокий уровни. В составе нерастворимого остатка снега в высоких концентрациях преобладали Mo, W, Ti, Al, K, Cu, Na, Mn, Ca, Mg, Fe, Ni, Cr, Cd; коэффициенты концентрации этих элементов относительно фона составляли от 1.5 до 74. Обнаружено превышение ПДК для Cd (до 10 раз), Zn (9.4), Co (9.0), Mo (7.9), Cu (3.2), Ni (2.4), Sb (3.3), Fe (2.1). Значения показателя суммарного загрязнения жидкой фазы снега в целом не достигали пороговых значений, при этом наиболее подверженной воздействию оказалась территория в 100 и 150 м от дороги. Общая техногенная нагрузка на агроландшафт с удалением от дороги снижалась и до 15 м от трассы определена как средняя.

Ключевые слова: снег, сельскохозяйственные угодья, загрязнение, макро- и микроэлементы, автодорожный комплекс, пылевая нагрузка, подзона средней тайги

Финансирование. Исследования выполнены в рамках государственного задания FMEN-2022-0013, регистрационный номер НИОКТР 122031000202-1.

ORCID:
Е.В. Дубина-Чехович, https://orcid.org/0000-0001-8232-0232
О.Н. Бахмет, https://orcid.org/0000-0002-5093-3285

Для цитирования: Дубина-Чехович, Е.В., Бахмет, О.Н., 2025. Влияние выбросов автотранспорта на снежный покров агроланшафтов в условиях Карелии. *Трансформация экосистем* **8** (4), 43–64. https://doi.org/10.23859/estr-240411

Поступила в редакцию: 11.04.2024
Принята к печати: 10.11.2024
Опубликована онлайн: 21.11.2025

DOI: https://doi.org/10.23859/estr-240411
EDN: https://elibrary.ru/sujzgzm
UDC 631.95

Article

Impact of traffic-generated emissions on the snow cover of agricultural landscapes in Karelia

E.V. Dubina-Chekhovich*, O.N. Bakhmet

Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, Pushkinskaya St. 11, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185035 Russia

**d-chehovich@yandex.ru*

Abstract. The article reports the results of an assessment of the impact of traffic-generated emissions on the snow cover of agricultural landscapes in Karelia. The study was carried out in 2018 and 2019 in the region's most agriculturally favorable southern agroclimatic zone. The snowfall formed under road traffic impact exhibited medium or low dust pollution levels. The dust pollution load onto a drained agricultural landscape within 50 m off the road was 129.8–385.9 kg/(km^2×day), exceeding the background 8.3–25.0-fold. The integrated pollution index values for the snow cover (solid residue) of the agricultural landscapes were at medium and high levels. The insoluble residue of snow predominantly contained high concentrations of Mo, W, Ti, Al, K, Cu, Na, Mn, Ca, Mg, Fe, Ni, Cr, Cd, with concentration coefficients 1.5–74 times that of the background. Maximum permissible concentrations (MPC) were exceeded for Cd (up to 10-fold), Zn (9.4), Co (9.0), Mo (7.9), Cu (3.2), Ni (2.4), Sb (3.3), Fe (2.1). The integrated pollution index for snow in the liquid phase was generally below the threshold values, with the greatest impact found between 100 and 150 m off the road. The total man-made pollution load on the agricultural landscape declined with distance from the road and was classified as medium-level within 15 m off the road.

Keywords: snow, farmlands, pollution, macro- and micronutrients, road and vehicle complex, dust pollution load, middle taiga subzone

Funding. The studies were carried out under state assignment FMEN-2022-0013, Ref. no 122031000202-1.

ORCID:
E.V. Dubina-Chekhovich, https://orcid.org/0000-0001-8232-0232
O.N. Bakhmet, https://orcid.org/0000-0002-5093-3285

To cite this article: Dubina-Chekhovich, E.V., Bakhmet, O.N., 2025. Impact of traffic-generated emissions on the snow cover of agricultural landscapes in Karelia. *Ecosystem Transformation* **8** (4), 43–64. https://doi.org/10.23859/estr-240411

Received: 11.04.2024
Accepted: 10.11.2024
Published online: 21.11.2025

Введение

Передвижные источники загрязнения, в том числе автомобильный транспорт, являются одним из главных факторов ухудшения окружающей среды. Особенностями автотранспортных потоков как источника поступления пылевых выбросов, в отличие от локализованных в пространстве (промышленных предприятий, строительных объектов и др.), являются неорганизованность, повсеместность, выброс вредных веществ на уровне дыхания человека (Невмержицкий, 2017). Автомобильно-дорожный комплекс, с одной стороны, главенствует в обеспечении экономического роста и социального развития страны (Абсолямова, 2021), с другой – служит одним из крупнейших загрязнителей атмосферного воздуха, почвы, природных вод, растений и т.д. (Baensch-Baltruschat et al., 2020). Эмиссия загрязняющих веществ, поступающих от автомобильно-дорожной инфраструктуры и комплекса в целом, в Российской Федерации составляет от 50 до 80% (Егорова и др., 2014), а по некоторым данным валовая доля автомобильного транспорта в суммарных выбросах достигает 70–90% (Невмержицкий, 2017).

Основными загрязнителями при эксплуатации автотранспорта являются выхлопные газы, испаряющиеся нефтепродукты, пыль, продукты истирания шин, тормозных колодок и дисков сцепления, асфальтовых и бетонных покрытий и т.д. (Егорова и др., 2014). Количество и состав отработавших газов также определяются конструктивными особенностями и техническим состоянием автомашин, режимом работы двигателей, качеством и видом топлива, состоянием ходовой части транспорта, качеством дорожных покрытий и метеоусловиями. Известно, что в результате эмиссии при движении автотранспортных средств в окружающую среду поступают до 300 различных соединений, в том числе и таких металлов, как As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn, Sb, Co, Mn, V, Ba, Se (Тунакова и др., 2016). Разнообразие химического состава аэрозольно-пылевых выбросов, размеры мелкодисперсных частиц, их высокая удельная поверхность и токсичность, а также отсутствие единой системы учета выбросов дорожного транспорта затрудняют оценку и идентификацию химического состава загрязнения окружающей среды.

В последние годы с развитием дорожной автомобильной сети и ростом транспортного трафика увеличивается поступление техногенных выбросов от автодорожного комплекса. Автомобильные магистрали нередко проходят и через земли, используемые в сельхозпроизводстве, вследствие чего прилегающие к дорогам участки агроэкосистем попадают под негативное воздействие техногенной аэрозольно-пылевой эмиссии. Наиболее подвержены влиянию выбросов территории в пределах расстояния 100 м от проезжей части (Аброськин, 2017). По некоторым данным (Аброськин, 2017; Лёвкин и Лазеба, 2014), поступление загрязняющих веществ от дорожных объектов в зависимости от ряда условий (типа рельефа, растительности, транспортных средств, метеоусловий и т.д.) может распространяться до 200 м и более.

Одним из существенных факторов в распространении выбросов на агроландшафтах является наличие организованного стока природных вод с площадей водосбора. По мнению Л.В. Кирейчевой и Е.А. Лентяевой (2020), мелиорированные сельскохозяйственные угодья – это широкомасштабный, плохо контролируемый источник загрязнения водных экосистем пестицидами, минеральными удобрениями, биогенными элементами, тяжелыми металлами. Помимо веществ, попадающих в водотоки в процессе сельскохозяйственной деятельности, значительная их часть поступает с поверхностным стоком с водосборных площадей территорий населенных пунктов, автомобильных дорог и т.д. Количество выпадающих осадков влияет на дебит дренажных вод в осушительных системах, составляя 20–40% от общего объема последних. Пик дренажного стока приходится в период снеготаяния и сильных дождей. При сбросе загрязненных стоков в водную среду значительная их часть сорбируется в донных отложениях и взвесях, создавая внутренний вторичный источник техногенного загрязнения и опасность как для почвенных, так и для водных экосистем. Отметим при этом, что в Карелии, где наблюдается избыточное увлажнение, для обеспечения оптимального водно-воздушного режима почв осушено 43% сельхозугодий

(62.8 тыс. га). В условиях быстро изменяющихся параметров техногенного воздействия, а также общей стратегии вовлечения залежных земель в сельскохозяйственный оборот, повышения плодородия почв, увеличения урожайности сельхозугодий оценка состояния агроладшафтов продолжает оставаться актуальной задачей.

Исследование химического состава снежного покрова является одним из эффективных и экономичных способов сбора данных о поступлении загрязняющих веществ из атмосферы в почву и природные воды (Богатырев и др., 2018). В климатических условиях Северо-Западного региона, где снежный покров сохраняется в течение продолжительного времени (около 5 месяцев), он становится корректным индикатором аэротехногенных выпадений в зимний период. Снег обладает высокой сорбционной способностью, вследствие чего аккумулирует и сохраняет в себе все загрязняющие атмосферу компоненты. Химический состав талого снега формируется в результате поступления с осадками различных минеральных элементов, поглощения газов, водорастворимых аэрозолей и твердых пылевых частиц, оседающих из атмосферы (Богатырев и др., 2018; Василенко и др., 1985).

Цель исследований – оценка уровня загрязнения мелиорированного агроландшафта в зоне воздействия автомобильного транспорта путем определения пылевой нагрузки и изучения химического состава снежного покрова.

Материалы и методы

Исследования проведены на территории Республики Карелия в 2018–2019 гг. на осушенных открытой сетью каналов сельскохозяйственных угодьях, примыкающих к участкам федеральной автомобильной трассы Р-21. Изучено три однотипных мелиоративных объекта в Прионежском (объекты № 1 и 3) и Кондопожском (объект № 2) районах республики, расположенные в подзоне средней тайги (Рис. 1, Табл. 1). В сельскохозяйственном производстве эти осушенные территории используются под сенокосы с момента ввода в эксплуатацию мелиоративных объектов. Регулирующая открытая сеть по причине отсутствия эксплуатационных мелиоративных работ заросла древесно-кустарниковой растительностью (береза, ива, сосна, ель). На смежных с сельхозугодьями участках автотрассы отсутствуют газопылезащитные и пылеуловительные устройства. Протяженность общей границы сопряженных территорий составляет от 416 до 2200 м, интенсивность трафика автотранспорта на прилегающих трассах достигает 2105 ± 44 авт./ч.

Многие исследователи (Аброськин, 2017; Лёвкин и Лазеба, 2014) указывают на снижение аэрозольно-пылевой нагрузки с удалением от автодорожного полотна. Максимальные ее значения наблюдаются на расстоянии до 5 м от дороги. Однако газопылевые выбросы в зависимости от интенсивности автотрафика, состава транспортных средств, особенностей ландшафта, метеоусловий и других факторов могут распространяться и на более значительные расстояния (Лёвкин и Лазеба, 2014). В Карелии воздействие выбросов автотранспорта на снежный покров агроландшафтов ранее не изучалось. Размещение пробных площадей обусловлено расположением сельскохозяйственных угодий относительно дорожного полотна (как правило, их смежная граница проходит на расстоянии не менее 10–15 м от трассы), мелкоконтурностью ландшафтов, а также наличием регулирующей открытой мелиоративной сети с частотой устройства каналов 30–40 м. Несмотря на равнинный рельеф, лимитирующим фактором в поступлении газопылевых выбросов на сельхозугодья являлась древесно-кустарниковая растительность в осушителях (возраст древостоя – более 15–20 лет). Поэтому образцы снежного покрова отобраны по градиенту удаления 15, 50, 100 и 150 м от автомобильной дороги. Каждая пробная площадь имела форму прямоугольника со сторонами 50×15 м (S = 750 м^2) и расположена параллельно автотрассе. Пробоотбор снежной массы проведен в трехкратной повторности в соответствии с РД 52.04.186–89[1].

Фоновая пробная площадь такого же размера заложена в этой же природно-климатической зоне на мелиорированном агроландшафте на расстоянии более 30 км от источников техногенного воздействия.

Во всех образцах твердый осадок снежного покрова состоял из природных частиц (фрагментов органов кормовых трав, листьев березы, а также хвои и коры деревьев), удаленных во время пробоподготовки образцов. Образцы снега на загрязненных участках также содержали мелкодисперсную темно-серую пыль. В твердом остатке снега рентгенофлуоресцентным методом на приборе ARL ADVANT'X (Thermo Scientific, Швейцария) и методами МС-ИСП с использованием масс-спектрометра Series 2 (Thermo Fisher, США) определяли содержание макроэлементов (Na,

[1] РД 52.04.186-89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы.

Рис. 1. Картосхемы осушенных агроландшафтов и федеральных автомобильных трасс: **A** –объект № 1, **B** – объект № 2, **C** – объект № 3. Точками указаны места отбора проб (на 15.03.2022).

Табл. 1. Характеристика объектов исследования в зоне воздействия автомобильного транспорта в Карелии.

Показатель	Объект		
	№ 1	№ 2	№ 3
Район расположения	Прионежский	Кондопожский	Прионежский
Координаты	N 61°87'68" E 34°23'98"	N 62°08'78" E 34°26'37"	N 61°83'24" E 34°20'59"
Участок мелиорации	«Колино-Долгий бор»	«Суна»	«Томицы»
Год ввода объекта мелиорации в эксплуатацию	1980	1981	1986
Площадь осушенных сельскохозяйственных угодий, га	253	125	209
Протяженность открытой осушительной сети, км	94	69	86
Протяженность смежной границы автотрассы и с/х угодий, м	2200	416	1240
Фитоценоз	злаково-разнотравный		

Mg, Si, P, K, Ca, Cl, S, Al, Ti) и микроэлементов (W, Mo, Fe, Sn, Sb, Cr, Ni, Zn, Cd, Cu, V, Co, Mn) соответственно. Полученные результаты представлены в Табл. 2. После таяния снега в отфильтрованной талой воде определяли реакцию среды и содержание макро и микроэлементов с помощью атомно-абсорбционного спектрофотометра АА-6800 и АА-7000 (Shimadzu, Япония).

Изучение снежного покрова проведено в соответствии с методическими рекомендациями (Методические рекомендации по геохимической..., 1982). Определяли среднесуточную пылевую нагрузку на сельскохозяйственные угодья, рассчитанную по формуле

$$P_n = P_o / (S \times t),$$

где P_n – величина пылевой нагрузки, кг/(км^2×сут); P_o – вес твердого снегового осадка, мг(кг); S – площадь снегового шурфа, км^2; t – количество суток от начала снегостава до дня отбора проб.

К моменту отбора проб срок снегостава составлял 148 дней; таким образом, взятые нами пробы снежного покрова отражали поступление поллютантов приблизительно за 5 месяцев. С учетом колебаний поступления и аэрального переноса поллютантов полученные результаты можно экстраполировать на весь год.

В соответствии с методическими рекомендациями (Методические..., 1982; Сает и др., 1990) рассчитывались коэффициенты концентрации химических веществ в снежном покрове относительно фона (K_{Ci}) и ПДК ($K_{ПДК}$) по следующим формулам:

$$K_{Ci} = C_i / C_{фi},$$
$$K_{ПДК} = C_i / C_{ПДК},$$

где C_i – фактическое содержание i-го химического элемента в атмосферных осадках, мг/кг; $C_{фi}$ – фоновое содержание i-го химического элемента в атмосферных осадках, мг/кг; $C_{ПДК}$ – предельно допустимая концентрация i-го химического элемента в атмосферных осадках, мг/кг[2].

[2] Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 13 декабря 2016 г. N 552 "Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения" (с изменениями и дополнениями).

Табл. 2. Содержание химических элементов в почвах и снежной талой массе агроландшафтов южной Карелии в фоновых условиях. Прочерк – элемент не обнаружен.

Элемент	Al	Ti	Fe	V	Cr	Mn	Cd	Zn	Mo	Co	Ni	Pb	Cu	Ba	W	Cd	Sn	Sb
Почва (старопахотный горизонт), мг/кг	19669.0	752.0	33280.0	70.0	24.0	675.0	0.2	83.0	0.5	11.0	28.0	13.0	26.0	618.0	0.4	0.2	1.7	4.3
Снеготалая масса, мкг/л	4.1	–	26	–	0.2	5.0	0.08	24	–	0.5	0.8	0.5	0.7	–	–	–	–	–

Суммарный показатель загрязнения (Zc), характеризующий эффект воздействия группы элементов, рассчитывали по следующей формуле:

$$Zc = Kci + \ldots + Kcn–(n–1),$$

где n – количество учитываемых химических элементов; Kci – коэффициент концентрации i-го компонента загрязнения, превышающий единицу.

Общая нагрузка ($P_{общ}$), создаваемая поступлением химического элемента в окружающую среду, рассчитана по формуле

$$P_{общ} = C \times P_n,$$

где C – содержание химического элемента, P_n – величина пылевой нагрузки, кг/(км^2×сут).

Кроме того, рассчитывались коэффициенты относительного увеличения общей нагрузки элемента (K_p):

$$K_p = P_{общ}/P_ф$$
$$\text{при } P_ф = C_ф \times P_{пф},$$

где $C_ф$ – фоновое содержание исследуемого элемента; $P_{пф}$ – фоновая пылевая нагрузка; $P_ф$ – фоновая нагрузка исследуемого элемента.

Суммарный показатель нагрузки рассчитан по формуле

$$Z_p = \sum K_p – (n–1),$$

где n – число учитываемых аномальных элементов с K_{Ci} и K_p больше 1.

Оценка уровней загрязнения снежного покрова по суммарному показателю загрязнения, пылевой нагрузке и суммарной нагрузке проведена по критериям в соответствии с «Методическими рекомендациями...» (1982) и представлена в Табл. 3.

Результаты и обсуждение

В ходе исследования установлено, что значения среднесуточной пылевой нагрузки колебались от 6.5 ± 1.7 до 385.9 ± 37.5 кг/(км²×сут) (Табл. 4). Такой широкий размах обусловлен градиентом удаления от автодорожного полотна: на ближних к дороге участкам в среднем нагрузка составила 253.7 кг/(км²×сут), а на дальних – 24.5 кг/(км²×сут). Это согласуется с рядом исследований; так, в работе E Adamiec et al. (2016) аэрозольно-пылевая нагрузка на разном расстоянии до 2 м от трассы составляла 1800 кг/(км²×сут), а на расстоянии 5 м – 500 кг/(км²×сут). Необходимо отметить, что пылевая нагрузка в урбанистических условиях с интенсивным автотрафиком гораздо выше, чем вблизи автомобильных магистралей. Для сравнения, на территории города до 5 м от дороги с насыщенным движением автотранспорта она составила 8800 кг/(км²×сут) (Прокофьева и др., 2015). Тем не менее, запыленность вблизи магистралей остается достаточно высокой. Ветра умеренной силы (> 10 м/с) способны переносить по воздуху в процессе сальтации частицы размером 1 мм и более (Прокофьева и др., 2015). При этом частицы диаметром от 1 до 10 мкм могут витать в воздухе несколько суток, менее 1 мкм – до 10–20 дней, а взвешенные частицы диаметром менее 0.1 мкм не осаждаются (Невмержицкий, 2016).

В нашем исследовании на фоновой территории пылевая нагрузка составила в среднем 15 кг/(км²×сут), что в целом согласуется с литературными данными по Нечерноземью России 10–20 кг/(км²×сут) (Сает и др., 1990). Большая часть значений уровня пылевой нагрузки на сельхозугодья, находящиеся под влиянием выбросов, не достигала низкого уровня загрязнения, особенно на расстоянии от автотрассы 100 м и более; однако даже на этих участках масса пыли в 1.5–5.0 раз выше фонового показателя. На близко расположенных к дороге пробных площадях объектов № 1 и 2 загрязнение классифицировалось как среднее и низкое (аэральные выпадения превышали фон в 1.4–25.0 раз) соответственно, в отличие от объекта № 3, где выпадения пыли незначительны (Табл. 4).

Табл. 3. Уровень загрязнения снежного покрова (Сает и др., 1990).

Уровень загрязнения	Суммарный показатель загрязнения, Zc	Пылевая нагрузка P_n, кг/(км^2 × сут)	Суммарный показатель нагрузки, Z_p
Низкий	32–64	100–250	< 1000
Средний	64–128	250–450	1000–5000
Высокий	128–256	450-850	5000–10000
Очень высокий	> 256	> 850	> 10000

Химический состав снежного покрова осушенных агроландшафтов под воздействием автомобильного транспорта

Кислотность талой снежной массы придорожных полос агроландшафтов варьировала в диапазоне 5.3–6.4 и была близка к среднему значению для атмосферных осадков в Северо-Западном Федеральном Округе (pH = 5.9). На пробных площадях по мере удаления от дороги значения pH постепенно сдвигались в сторону слабокислой реакции, что может свидетельствовать о снижении антропогенной нагрузки. Достоверные различия относительно фона отмечены только на объекте № 1 (Табл. 4): с удалением от дорожного полотна значения pH снежного покрова от близких к нейтральным равномерно уменьшались до слабокислых.

Фоновые пробы снежного покрова характеризовались природными значениями содержания изученных элементов, не превышающими региональных показателей. Наивысшие коэффициенты концентрации поллютантов в твердом остатке снега относительно фона выявлены как для макро- (Mg, K, Al, Na, Ti) – до 3 раз, так и микроэлементов W, Mo, Fe, Sn, Sb, Cr, Ni, Zn, Cd, Cu, V, Co, Mn (Табл. 4, Рис. 2) – до 74 раз. Превышение ПДК обнаружено для Cd – до 10 раз, Zn – 9.4, Co – 9.0, Mo – 7.9, Cu – 3.2, Ni – 2.4, Fe – 2.1.

Полученные нами данные по химическому составу техногенной пыли находят связь с составами выбросов в результате истирания покрышек и тормозных колодок, компонентами выхлопных газов, различных бензиновых и дизельных присадок, добавок к моторным, трансмиссионным и гидравлическим маслам, используемых для улучшения эксплуатационных свойств автомобильного транспорта (Дамдинов и Митыпов, 2021), а также с износом компонентов автодорожного комплекса.

Известно, что при истирании тормозных колодок в воздух попадают Cu, V, Mo, Ni, Cr, а при износе покрышек – Al, Cd, Pb, Fe, Zn, Co, Cu (Голубев, 2007); при эрозии катализатора выделяются Pt, Pd, Rh, а при износе накладок – Pb, Cu, Sb (Егорова и др., 2014). Однако в отношении ключевых индикаторов износа автодорожных элементов нет единого мнения. По данным Th. Grigoratos и G. Martini (2014), а также D. Guo с соавторами (2021), в результате эксплуатации тормозов выделяется медь и сурьма; А.В. Голубев (2007) выявил присутствие меди, ванадия, молибдена, никеля и хрома, а E. Adamiec и др. (2016) в качестве приоритетных веществ наряду с медью и хромом выделяет титан, поскольку титанаты щелочных металлов используются в качестве неорганических наполнителей с целью стабилизации коэффициента трения.

Значительное превышение Cd и Zn в дорожной пыли связано с истиранием асфальтобетонного покрытия и автомобильных покрышек (Adamiec et al.,, 2016). В регионах, где продолжительный период времени в течение года используются шипованные шины, вклад износа покрышек и дорожного покрытия в выбросы намного выше. Так, например, показано, что изнашивание дорожного покрытия в скандинавских странах зимой возрастает до 6 раз (Усенко и Гриневич, 2023). Климатические и метеорологические особенности регионов (низкие или слишком высокие температуры, избыточное количество атмосферных осадков, ветер, солнечная радиация) оказывают существенное влияние на прочностные характеристики дорожного покрытия (Алексеев и др., 2022). Наиболее опасным с точки зрения износа асфальтобетонных покрытий являются небольшие значения положительных температур (до +10 °C) в сочетании с избыточным водонасыщением (Леднев, 2018).

Детальные исследования химического состава пылевой фракции показали, что ее компоненты могут быть различны, однако во всех типах выбросов автотранспорта (выхлопные газы, истирание покрышек, тормозных колодок и т.д.) в достаточно больших количествах присутствуют V, Sb, Fe, Cu, Pb, Zn, Cd, Mn, Mo (Егорова и др., 2014).

Табл. 4. Показатели загрязнения снежного покрова мелиорированных агроландшафтов под воздействием автомобильного транспорта. Уровни загрязнения приведены по: Сает и др., 1990. Над чертой указаны значения для талой снежной массы, под чертой – для твердого остатка снега. Жирным шрифтом выделены достоверные отличия от фоновых значений ($p \leq 0.05$); «–» – значения не достигают пороговых показателей; «*» – указаны загрязнители, коэффициент концентрации которых превышает 1.5.

Объект	Расстояние от источника загрязнения, м	pH	Величина пылевой нагрузки P_n	Уровень пылевого загрязнения	Суммарный показатель загрязнения Zc	Уровень загрязнения	Показатель общей нагрузки Z_p	Уровень общей нагрузки
№ 1	15	6.2 ± 0.2*	385.9 ± 37.5	средний	15.4 / 95.4	средний	2643.0	средний
	50	6.0 ± 0.1*	**129.8 ± 40.4**	низкий	15.5 / –		242.4	
	100	6.0 ± 0.1*	63.2 ± 2.9	–	34.1 / –	низкий	190.8	–
	150	5.8 ± 0.04	51.4 ± 2.2		28.9 / –		126.3	
№ 2	15	6.2 ± 0.03	**316.1 ± 60.7**	средний	20.1 / 170.1	высокий	2723.3	средний
	50	6.0 ± 0.1	76.6 ± 21.9		7.2 / –		92.2	
	100	5.9 ± 0.1	57.1 ± 14.4	–	22.4 / –	–	113.1	
	150	5.8 ± 0.2	15.7 ± 5.5		28.1 / –		30.9	
№ 3	15	6.2 ± 0.1	**59.2 ± 11.0**		17.7 / 132.7	высокий	1715.6	средний
	50	5.9 ± 0.1	21.1 ± 9.5	–	15.0 / –		25.8	
	100	5.6 ± 0.3	7.3 ± 4.2		8.7 / –	–	5.4	–
	150	5.8 ± 0.1	6.5 ± 1.7		11.7 / –		5.4	
Фон		5.9	15.4 ± 7.1	–	–	–	–	–

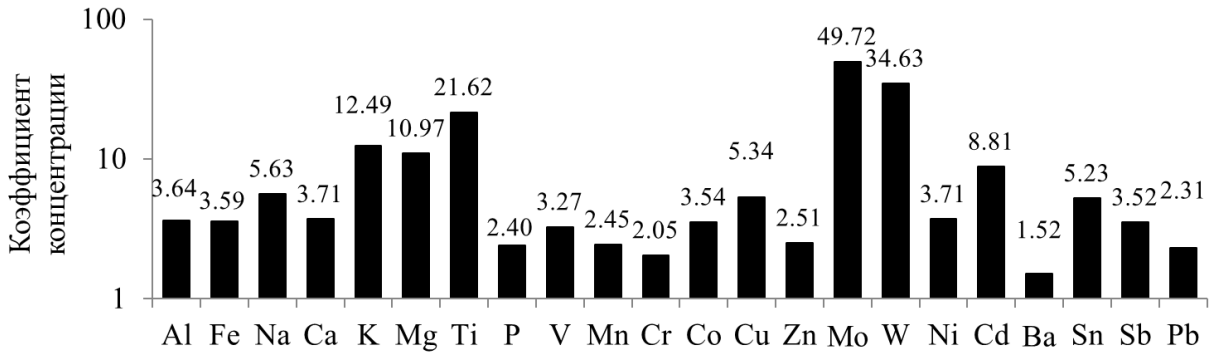

Рис. 2. Коэффициенты концентрации химических элементов, входящих в состав техногенной пыли придорожных почв агроландшафтов (n = 15) в среднем по всем объектам (использован логарифмический масштаб вертикальной оси).

В нашем исследовании нерастворимый остаток снежного покрова агроландшафтов на каждом объекте характеризовался своим специфическим рядом преимущественного накопления элементов, однако во всех случаях максимальными концентрациями обладали молибден, ванадий и титан (Табл. 5).

Ниже детально рассматриваются особенности накопления химических элементов, концентрации которых как минимум в 10 раз превышают ПДК и условные фоновые значения.

Поступление Mo в поверхностный слой агроландшафтов с нерастворимым осадком снега составило 17.3–39.7 мг/кг, что в 34.6–79.4 раза выше фонового значения. Необходимо отметить, что значительная часть почв Северо-Западного региона имеет невысокое его накопление. Наиболее бедны доступными формами молибдена кислые почвы. Наименьшая их аккумуляция отмечена в дерново-подзолистых песчаных почвах (0.05 мг/кг) (Касимов и Власов, 2015; Почвы Карелии, 1981). Валовое содержание молибдена в почвах региона колеблется от 0.6 до 3.4 мг/кг (Рыбаков, 2017). Такие значительные вариации связаны с локальными условиями: техногенным воздействием, геохимическими аномалиями и т.д.

Биологическая значимость молибдена достаточно велика: он входит в состав ферментов, участвующих в фиксации молекулярного азота клубеньковыми бактериями, в восстановлении нитратов до аммиака и характеризуется относительно высокими коэффициентами биологического поглощения. Молибден повышает в зеленой массе растений количество аскорбиновой кислоты, каротина, оказывает положительное действие на белковость и другие качественные показатели зернобобовых культур, повышает урожайность бобового компонента в смеси и в конечном счете приводит к увеличению сбора протеина с единицы площади. В случае молибденовой недостаточности растения испытывают угнетение в росте, развитии и снижают продуктивность; накапливается большое количество нитратов, нарушается нормальный азотный обмен (Rana et al., 2020). Обогащение почвы сельскохозяйственных угодий региона данным микроэлементом может и благоприятно воздействовать на формирование фитоценоза.

Согласно данным исследователей (Афиногенов, 2008; Кабата-Пендиас и Пендиас, 1989), вольфрам и ванадий по своему биологическому воздействию могут частично заменить молибден. Поступление данных микроэлементов в верхний горизонт почвы с осадками по результатам нашего анализа достаточно интенсивное – 10.7–246.9 мг/кг.

Вольфрам токсичен для растений при значительном превышении фонового значения. По данным Д.С. Рыбакова и Н.В. Крутских (2021), среднее (фоновое) содержание W в минеральных горизонтах почв Заонежского полуострова в Карелии (север Онежского озера) составило 0.2 мг/кг, максимальное – 0.6 мг/кг при среднем содержании в земной коре 1.3. В нашем исследовании в верхнем горизонте старопахотных почв концентрация W достигала в среднем 0.4 мг/кг; в техногенной пыли его среднее накопление было интенсивным (11.8 мг/кг) и превышало фон в 29.6 раза.

Ванадий является широко распространенным элементом (Борисенко, 1973). Кларк данного микроэлемента в почвах составляет 90 мг/кг (Кабата-Пендиас и Пендиас, 1989). Наряду с ртутью, мышьяком и кадмием он характеризуется высокой токсичностью. В то же время микроэлемент участвует в синтезе ряда биологически активных веществ, в процессах обмена, фотосинтеза, фиксации азота и т.д. Токсичность ванадия для растений проявляется при его концентрации в почве от 140 мг/кг (Кабата-Пендиас и Пендиас, 1989). В нашем исследовании на условно чистой

Табл. 5. Ряды преимущественного накопления элементов в твердом остатке снежного покрова агроландшафтов.

Объект № 1	Mo > W > Ti > K > Mg > Na > Cu > V > Sb > Co > Cd > Al > Ca > Fe > Zn > Cr > Sn > P > Pb > Ba > Ni > Mn
Объект № 2	Mo > W > Ti > Cd > K > Sn > Mg > Cu > Na > Al > Co > Sb > Ni > V > Zn > Ca > Fe > P > Cr > Pb > Mn > Ba
Объект № 3	Mo > W > Ti > K > Cd > Mg > Na > Cu > Sb > V > Al > Co > Zn > Sn > Ba > Fe > Ca > Ni > Mn > P > Pb > Cr

фоновой территории сельхозугодий его содержание в почве в два раза меньше его токсичной концентрации – 70.1 мг/кг, тогда как в нерастворимом остатке снега в среднем аккумулировано 229.4 мг/кг, что в 3.3 раза выше фона.

Титан – достаточно распространенный элемент в земной коре, при этом он малоподвижен в процессах выветривания и почвообразования. Содержание его в подзолистых почвах составляет 3800 мг/кг, торфяных болотных – 5200 мг/кг (Виноградов, 1957). В нашем опыте накопление титана в старопахотном горизонте текстурно-дифференцированных среднесуглинистых почв на условно фоновой территории в 3.0 раза ниже – 1250.4 мг/кг. Аккумуляция элемента твердым остатком снега на агроландшафтах вблизи дорог в 21.3 раза превышает фоновое значение (26625.8 мг/кг). Использование титана при выращивании сельскохозяйственных культур встречается редко (Hussain et al., 2021). Несмотря на это, некоторые исследования подтверждают его положительное воздействие на рост и развитие растений: усиливает фотосинтез в условиях абиотического стресса (Tumburu et al., 2015, Шеуджен и др., 2015), улучшает устойчивость к засухе, солевому стрессу и стрессу низкой освещенности (Gohari et al., 2020). Тем не менее, высокие концентрации вызывают снижение эффективности фотосинтеза, усиливают окислительный процесс (Cigler et al., 2010).

Кадмий в нашем исследовании накапливался достаточно интенсивно, особенно на объекте № 1 (3.3 мг/кг). Содержание его в пробах снега на всех объектах исследования колебалось (коэффициент вариации составил 30%), наименьшая аккумуляция наблюдалась на объекте № 3 (0.6 мг/кг). В целом накопление Cd превышало фон в 2.8–13.6 раза. Высокие дозы элемента токсичны для растений, уменьшают содержание фосфора, кальция, магния, железа, цинка (Ильин и Сысо, 2001), что приводит к торможению роста и развития и в результате к значительному снижению продуктивности, а в отдельных случаях даже к гибели растений. Микроэлемент является одним из немногих тяжелых металлов, способных к перемещению в генеративные органы злаков, что увеличивает его опасность для человека и животных. При избыточном содержании кадмия в почвах нарушается фиксация атмосферного азота, уменьшается интенсивность процессов аммонификации, нитрификации и денитрификации (Реуце и Кырстя, 1986). В промышленном производстве он ранее широко применялся при изготовлении автомобильных аккумуляторов, шин, покрышек, тормозных колодок, а также в качестве антикоррозийного покрытия крепежных деталей транспортных средств. В настоящее время из-за высокой токсичности элемента его использование сокращается.

Поступление калия в придорожные почвы агроландшафта составило в среднем 1335.0 мг/кг, оно превосходило фоновые значения почти в 12 раз. Соединения калия широко применяются в автотранспортной промышленности при производстве топливных элементов, автомобильных шин из синтетического каучука, антифрикционных добавок и смазочных композиций для использования в узлах трения качения и скольжения (Лаврентьева и Батищева, 2010).

Магний за счет его низкой плотности используется при изготовлении различных автомобильных компонентов (топливных баков, рам сидений, легкосплавных дисков и т.д.). В техногенной пыли его накопление составило 18189.5 мг/кг (примерно в 10 раз выше фона). Несмотря на то, что магний принято относить к вторичным по значимости элементам питания сельскохозяйственных культур, он необходим для их полноценного роста и развития (участвует в фотосинтезе, транспорте фосфора, синтезе сахаров, перераспределении крахмала, фиксации азота в клубеньках бобовых и т.д.) (Аканова и др., 2021). Кроме того, существуют упоминания об ухудшении физических свойств почв под влиянием высокого содержания магния (Аканова и др., 2021).

Остальные элементы в составе твердого остатка снега имели коэффициенты концентрации меньше 10 (Рис. 2); особенности их накопления планируется рассмотреть в рамках другой статьи.

Анализ значений коэффициентов суммарного загрязнения снежного покрова (по нерастворимой его части) агроландшафтов под воздействием автомобильного транспорта выявил средний уровень загрязнения на пробных площадях объекта № 1 и высокий – на объектах №№2 и 3 (Табл. 4). При этом основная масса загрязнителей оседает непосредственно в почвах придорожной территории до 15 м от автотрассы. На пробных площадях, удаленных от дороги более чем на 50 м, остаток отсутствует или его количество слишком мало, чтобы определить химический состав.

Часть химических элементов также была определена нами в талой массе снега. В Табл. 6 представлены только те из них, которые имеют коэффициент концентрации больше 1. В целом на всех пробных площадях фоновые показатели превышены до 34 раз (Al, Mg, Ca, Fe, Cu, Mn, Ni, Zn, Cr). Распределение элементов по исследованной территории происходило неодинаково в зависимости от градиента удаленности. Особенно высокое их накопление в снежном покрове может отражать специфику массопереноса вещества. Интенсивная аккумуляция непосредственно у автотрассы выявлена для Ca, Mg, Fe, Al, Cu, Cr, Cd; с удалением от дороги значения коэффициентов концентрации этих элементов снижаются, в отличие от Ni, Mn, Zn, Pb, Co. Достоверное отклонение от условного фона выявлено для Ca, Mg на всех пробных площадях объектов № 1 (на расстоянии до 100 м) и № 2 (150 м).

Обращают на себя внимание высокие концентрации алюминия в снеготалой массе – от 1.3 до 135.3 мкг/л при фоновом значении 4.1 мг/л. Алюминиевые сплавы применяются в автомобильной промышленности в производстве двигателей, деталей кузова (капотов, дверей, рам), колесных дисков и других автокомпонентов. С каждым годом использование алюминия в этой отрасли увеличивается из-за возможности создания легких, прочных и устойчивых к коррозии конструкций.

Поступление в почвы сельскохозяйственных угодий снеговой воды, обогащенной соединениями алюминия, может отрицательно воздействовать на почвенное плодородие (Bojórquez-Quintal et al., 2017). В почвах дерново-подзолистого типа подвижный алюминий аккумулируется на уровне порядка 30 мг на 100 г почвы (Алексеев, 1987; Тянтова и др., 2005). Высокие его концентрации негативно воздействуют на культивируемые растения (Амосова и др., 2007). Однако в литературе встречаются данные и о благоприятном влиянии ионов алюминия в малых дозах на рост растений отдельных видов (Климашевский, 1991, Bojórquez-Quintal. et al., 2017).

Марганец в жидкой фазе снега характеризовался также высокими коэффициентами концентрации относительно фоновых условий ($К_с$ до 28.7). При этом его распределение в снежном покрове исследуемой территории было неравномерным и наряду с кобальтом, цинком, магнием, кальцием и свинцом не поддавалось тенденции уменьшения содержания с увеличением расстояния от источника загрязнения (Табл. 6). Такая значительная пространственная вариабельность макро- и микроэлементов, возможно, связана с распространением загрязнения в виде аэрозолей. Полученные нами результаты исследования снежного покрова вблизи автодорог согласуются с литературными данными по изучению аккумуляции загрязнителей и в снеге, и в почвах сельскохозяйственных угодий (Ашиккалиев и др., 2017; Wang et al., 2022).

Аккумуляция марганца в отфильтрованной талой воде на всех объектах колебалась в широких пределах – от 1.1 до 48.4 мкг/л и по мере удаления на 15, 50 и 100 м от дорожного полотна его накопление в растворимой форме в среднем составило 13.7, 9.6 и 20.9 мкг/л соответственно. Обычно марганец аккумулируется в верхнем почвенном слое вследствие его фиксации органическим веществом. В почвах, имеющих кислую реакцию среды (pH ниже 5.5), содержание водорастворимых соединений этого элемента, как правило, возрастает (Кабата-Пендиас и Пендиас, 1989). Марганец является важным компонентом роста и развития сельскохозяйственных культур, участвующим в окислительно-восстановительных процессах, входит в состав ферментов, способствует образованию сахаров, белков, синтезу нуклеиновых кислот, повышает устойчивость растений к неблагоприятным факторам внешней среды и т.д. (Школьник, 1974). Однако высокие концентрации элемента в растениях негативно воздействуют на обмен веществ (углеводный, белковый, фосфатный), а также нарушают процессы закладки генеративных органов (Pobilat and Voloshin, 2018).

Содержание хрома, кобальта, никеля, меди и свинца в жидкой фазе снега превосходило фон менее чем в 10 раз. Максимальный коэффициент концентрации (5.3) выявлен для Ni. При этом Cr и Ni относительно других элементов имели устойчивое превышение фоновых значений на всех объектах. Кобальт преимущественно накапливался на объектах №№ 2 и 3, свинец и медь – на объекте № 3.

В целом значения показателя суммарного загрязнения жидкой фазы снежного покрова на агроландшафтах вблизи автодорог не достигали критических значений, и атмосферные осадки

Табл. 6. Коэффициенты концентрации макро- и микроэлементов в снеготалой массе на агроландшафтах под воздействием автотранспорта. Прочерк – элемент не обнаружен.

Расстояние от источника загрязнения, м	Элемент												Уровень суммарного загрязнения (Zc)
	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Al	Cu	Ni	Co	Cr	Pb	Cd	
Объект № 1													
15	2.9	5.1	5.0	10.0	0.3	33.0	1.5	2.9	0.9	2.3	0.1	0.4	15.4
50	2.5	3.9	1.3	11.7	0.1	2.4	0.9	3.7	0.6	1.8	–	0.2	15.5
100	2.5	4.7	0.8	28.7	0.4	1.2	0.8	5.3	0.8	2.1	–	0.2	34.1
150	1.8	2.8	1.2	27.0	0.3	1.1	0.6	2.3	0.9	1.4	0.1	0.2	28.9
Объект № 2													
15	3.1	3.6	0.9	16.3	0.4	3.4	0.5	4.6	0.7	1.2	0.1	–	20.1
50	2.6	3.4	1.6	3.7	0.4	1.7	0.5	3.1	1.2	1.6	0.1	–	7.2
100	1.8	2.4	1.7	18.7	0.3	0.3	0.6	3.3	0.8	2.1	–	–	22.4
150	1.3	2.0	0.6	23.7	0.2	0.8	0.3	3.5	1.1	2.8	0.2	–	28.1
Объект № 3													
15	1.7	2.3	0.9	10.9	0.3	4.5	0.3	3.1	1.8	4.8	1.1	–	17.7
50	1.4	1.6	1.5	10.7	0.2	1.4	0.1	0.7	2.0	3.8	0.9	–	15.0
100	1.2	1.4	0.6	1.0	1.5	3.3	4.0	4.6	0.9	1.3	1.3	–	8.7
150	3.3	3.7	0.6	9.5	0.2	1.6	0.1	0.3	0.7	2.7	1.5	–	11.7

характеризовались как незагрязненные, кроме участка в 100 м от автотрассы объекта № 1: здесь выявлен Zc = 34.1, что соответствует низкому уровню (Табл. 6).

Средние значения показателя суммарного загрязнения снеготалой массы сельскохозяйственных угодий отражают распределение ореолов загрязнения на исследуемой территории. Так, наиболее подверженными воздействию оказались участки в 100 и 150 м от дороги (Рис. 3), в отличие от значений, полученных в результате расчета Zc по твердому остатку снега. Достоверные различия по загрязнению снеготалой массы между участками исследования на разном расстоянии от автотрассы не обнаружены.

Общая техногенная нагрузка на агроландшафты под воздействием автомобильного транспорта

На фоне относительно невысоких значений пылевого загрязнения уровень суммарного загрязнения варьировал от низкого до высокого. Общая техногенная нагрузка (Z_p) на агроландшафт на близких к дороге участках всех объектов определена как средняя (Табл. 4).

Ряды преимущественного накопления элементов в снежном покрове вблизи автотрасс имеют схожие черты (Табл. 5), и состав компонентов, превышающих фоновые показатели, практически идентичен. Значительное превышение Cd и Zn, вероятно, в первую очередь связано с выбросами автодорожного комплекса в результате истирания покрышек, а выбросы Mo, Cu и Ni – с износом тормозных колодок.

Заключение

Установлено, что автомобильный транспорт в Карелии является значимым источником поступления антропогенных выбросов, содержащих широкий спектр химических элементов. Атмосферные осадки в виде снега, формирующиеся в условиях влияния автотранспорта, характеризовались средним и низким уровнем пылевого загрязнения, при этом воздействие уменьшалось по мере удаления от трассы. Суммарный показатель загрязнения демонстрировал средний и высокий уровень. Поступление в высоких концентрациях Mo, W, Ti, Al, K, Cu, Na, Mn, Ca, Mg, Fe, Ni, Cr, Cd (Кс от 1.5 до 74.0 относительно фоновых условий) характерно для всех исследованных агроландшафтов вблизи федеральных автодорог. Превышение ПДК обнаружено для кадмия (до 10 раз), цинка (9.4), кобальта (9.0), молибдена (7.9), меди (3.2), никеля (2.4), сурьмы (3.3) и железа (2.1). Общая техногенная нагрузка (Z_p) на агроландшафт на близких к дороге участках всех объектов определена как средняя (1715.6–2723.2), а на дальних не достигала минимальных пороговых значений (5.4–242.4). С целью формирования экологически устойчивых и высокопродуктивных агроландшафтов необходимо проводить мероприятия по устройству газопылезащитных ограждений, пылеуловительных древесно-кустарниковых полос вдоль автомобильных дорог (Дубина-Чехович, 2023).

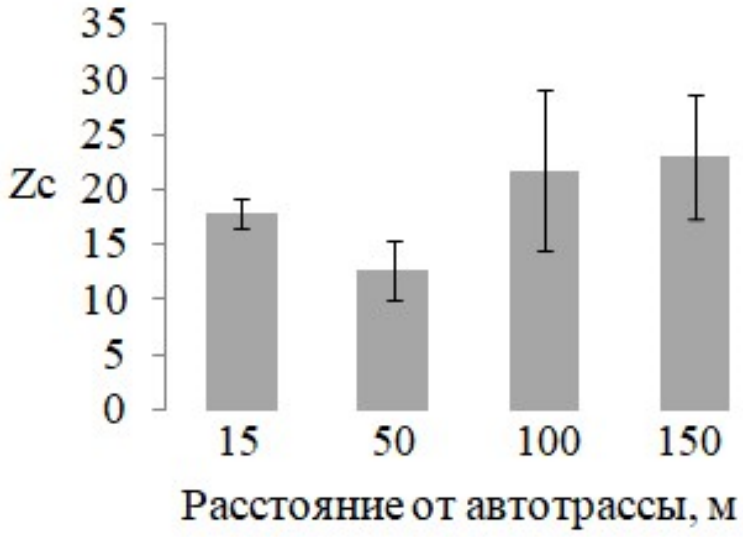

Рис. 3. Уровень суммарного загрязнения (Zc) снеготалой массы агроландшафтов под воздействием автотранспорта.

Список литературы

Аброськин, А.А., 2017. Динамическая система экологического мониторинга атмосферного воздуха для обеспечения экологической безопасности строительных объектов. *Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук*. Волгоград, Россия, 142 с.

Абсолямова, А., 2021. Влияние автотранспорта на состояние окружающей среды города Уфа. *Материалы XI Международной научно-практической конференции «Экология и природопользование: прикладные аспекты»*. Уфа, Россия, 7–10.

Аканова, Н.И., Козлова, А.В., Мухина, М.Т., 2021. Роль магния в системе питания растений. *Агрохимический вестник* **6**, 66–72. https://doi.org/10.24412/1029-2551-2021-6-014

Алексеев, С.В., Симонов, Д.Л., Катикова, А.С., 2022. Воздействие природных факторов на состояние дорог в различных регионах России. *Инновационные транспортные системы и технологии* **8** (4), 14–30. https://doi.org/10.17816/transsyst20228414-30

Алексеев, Ю.В., 1987. Тяжелые металлы в почвах и растениях. Агропромиздат, Ленинград, СССР, 140 с.

Амосова, Н.В., Николаева, О.Н., Сынзыныс, Б.И., 2007. Механизмы алюмотолерантности у культурных растений (обзор). *Сельскохозяйственная биология* **1**, 36– 42.

Афиногенов, Ю.П., 2008. Биогенные элементы и их физиологическая роль. Учебное пособие. ВГУ, Воронеж, Россия, 143 с.

Ашиккалиев, А.Х., Вильданова, Л.Р., Ашиккалиева, М.А., 2017. Почвенно-экологическая оценка земель сельскохозяйственного назначения степной зоны. *Естественные и технические науки* **12**, 271–274.

Богатырев, Л.Г, Жилин, Н.И., Самсонова, В.П., Якушев, Н.Л., Кириллова, Н.П. и др., 2018. Многолетний мониторинг снежного покрова в условиях природных и урбанизированных ландшафтов Москвы и Московской области. *Вестник московского университета* **5** (2), 85–96.

Борисенко, Л.Ф., 1973. Ванадий. Минералогия, геохимия и типы эндогенных месторождений. Недра, Москва, СССР, 192 с.

Василенко, В.Н., Назаров, И.М., Фридман, М.Д., 1985. Мониторинг загрязнения снежного покрова. Гидрометеоиздат, Ленинград, СССР,181 с.

Виноградов, А.П., 1957. Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах. Академия наук СССР, Москва, СССР, 237 с.

Голубев, А.В., 2007. Сельскохозяйственная экология. Саратовская государственная сельскохозяйственная академия, Саратов, Россия, 418 с.

Дамдинов, Б.Б., Митыпов, Ч.М., 2021. Влияние добавок мелкодисперсных частиц металлов на характеристики смазочных материалов. *Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика* **1**, 28–42.

Дубина-Чехович, Е.В., 2023. Трансформация почв мелиорированных агроландшафтов Северо-Запада России в результате аэротехногенного загрязнения. *Диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук*. Уфа, Россия, 234 с.

Егорова, О.С., Буркеева, Д.Р., Гоголь, Э.В., Тунакова, Ю.А., 2014. Оценка вклада автотранспортных потоков в загрязнение атмосферного воздуха г. Казани. *Вестник Казанского технологического университета* **17** (16), 141–142.

Ильин, В.Б., Сысо, А.И., 2001. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Сибирское отделение РАН, Новосибирск, Россия, 145 с.

Кабата-Пендиас, А., Пендиас, Х., 1989. Микроэлементы в почвах и растениях. Мир, Москва, СССР, 439 с.

Касимов, Н.С., Власов, Д.В., 2015. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии. *Вестник московского университета* **5** (2), 7–17.

Кирейчева, Л.В., Лентяева, Е.А. 2020. Влияние сельскохозяйственного производства на загрязнение водных объектов. *Природообустройство* **18**, 18–26.

Климашевский, Э.Л., 1991. Генетический аспект минерального питания растений. Агропромиздат, Москва, СССР, 414 с.

Лаврентьева, О.В., Батищева, О.М., 2010. Теоретические основы применения химических реактивов на автомобильном транспорте: учебное пособие. Самарский государственный технический университет, Самара, Россия, 146 с.

Лёвкин, Н.Д., Лазеба, А.В., 2014. Распространение тяжелых металлов в зоне движения автотранспорта. *Известия ТулГУ. Науки о Земле* **3**, 9–16.

Леднев, А.В., 2018. Анализ факторов, влияющих на износостойкость асфальтобетона. *Инженерный вестник Дона* **1**.

Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения городов химическими элементами, 1982. Григорян, С.В. (ред.). IMGRE, Москва, СССР, 111 с.

Невмержицкий, Н.В., Ложкина, О.В., Ложкин, В.Н., 2016. Расчетная методика и компьютерная программа для оценки и прогнозирования загрязнения воздуха на автомагистралях мелкодисперсными взвешенными частицами PM_{10} и $PM_{2,5}$. *Вестник гражданских инженеров* **2** (55), 206–209.

Невмержицкий, Н.В., 2017. Методика оценки и прогнозирования экстремального загрязнения воздуха на автомагистралях мелкодисперсными взвешенными частицами PM_{10} и $PM_{2.5.}$ *Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт Петербург, Россия, 23 с.*

Почвы Карелии: учебное пособие, 1981. Морозова, Р.М. и др. (ред.). Издательство АН СССР, Петрозаводск, СССР, 192 с.

Прокофьева, Т.В., Шишков, В.А., Кирюшин, А.В., Калушин, И.Ю., 2015. Свойства твердых (пылеаэрозольных) атмосферных выпадений придорожных территорий г. Москвы. *Известия РАН. Серия географическая* **3**, 107–120.

Реуце, К., Кырстя, С., 1986. Борьба с загрязнением почв. Агропромиздат, Москва, СССР, 221 с.

Рыбаков, Д.С., 2017. Геоэкология Карелии: геохимический подход к проблемам оценки риска. КарНЦ РАН, Петрозаводск, Россия, 311 с.

Рыбаков, Д.С., Крутских, Н.В., 2021. Геоэкологические закономерности распределения молибдена и вольфрама при антропогенной трансформации геосистем Прионежья. *Географический вестник* **1** (56), 81–95. https://doi.org/10.17072/2079-7877-2021-1-81-95

Сает, Ю.Е., Ревич, Б.А., Янин, Е.П., Смирнова, Р.С., Башаркевич, И.Л. и др., 1990. Геохимия окружающей среды. Недра, Москва, СССР, 335 с.

Тунакова, Ю.А., Новикова, С.В., Шагидуллин, А.Р., 2016. Способы оценки поступления металлов с выбросами автотранспорта с помощью нейросетевых технологий. *Известия Самарского научного центра РАН* **18** (5(3)), 505–508.

Тянтова, Е.Н., Сынзыныс, Б.И., Бурухин, С.Б., Козьмин, Г.В., 2005. Химия алюминия в окружающей среде. *Агрохимия* **2**, 87–93.

Усенко, А.В., Гриневич, Н.А., 2023. Влияние шипованных шин на дорожное покрытие. *Электронный архив УГЛТУ*, 697–701.

Шеуджен, А.Х., Корсунова, М.И., Бондарева, Т.Н., Осипов, М.А., Есипенко, С.В., 2015. Титан в черноземе выщелоченном западного Предкавказья. *Научный журнал КубГАУ* **112** (08).

Школьник, М.Я., 1974. Микроэлементы в жизни растений. Наука, Ленинградское отделение, Ленинград, СССР, 324 с.

Adamiec, E., Jarosz-Krzemińska, E., Wieszała, R., 2016. Heavy metals from non-exhaust vehicle emissions in urban and motorway road dusts. *Environmental Monitoring and Assessment* **188** (369). https://doi.org/10.1007/s10661-016-5377-1

Baensch-Baltruschat, B., Kocher, B., Stock, F., Reifferscheid, G., 2020. Tyre and road wear particles (TRWP) – A review of generation, properties, emissions, human health risk, ecotoxicity, and fate in the environment. *Science of The Total Environment* **733** (137823). https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137823

Bojórquez-Quintal, E., Escalante-Magaña, C., Echevarría-Machado, I. and Martínez-Estévez, M., 2017. Aluminum, a friend or foe of higher plants in acid soils. *Frontiers in Plant Science* **8**, 1767. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01767

Cigler, P., Olejnickova, J., Hruby, M., Cséfalvay, L., Peterka, J., Kuzel, S., 2010. Interactions between iron and titanium metabolism in spinach: A chlorophyll fluorescence study in hydropony. *Journal of plant physiology* **167**, 1592–7. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2010.06.021

Gohari, G., Mohammadi, A., Akbari, A., Panahirad, S., Dadpour, M.R., Fotopoulos, V., Kimura, S., 2020. Titanium dioxide nanoparticles (TiO2 NPs) promote growth and ameliorate salinity stress effects on essential oil profile and biochemical attributes of Dracocephalum moldavica. *Scientific Reports* **10**, 1–14.

Grigoratos, T., Martini, G., 2014. Non-exhaust traffic related emissions – Brake and tyre wear PM. EUR 26648. Publications Office of the European Union, Luxembourg, JRC89231. https://doi.org/10.2790/21481

Guo, D., Wei, H., Guo, Y., Wang, Ch., Yin, Z., 2021. Non-exhaust particulate matter emission from vehicles: A review. *E3S Web of Conferences, VESEP2020* **268** (01015), 1–17. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126801015

Hussain, S., Shafiq, I., Skalicky, M., Brestic, M., Rastogi, A., Mumtaz, M., Hussain, M., et al., 2021. Titanium application increases phosphorus uptake through changes in auxin content and root architecture in soybean (*Glycine Max* L.). *Plant Science* **12**, 743618. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.743618

Pobilat, A.E., Voloshin, E.I., 2018. Manganese in soils and plants of the southern part of central Siberia. *Trace Elements in Medicine (Moscow)* **18** (2), 43-47.

Rana, M.S., Bhantana, P., Imran, M., Saleem, M.H., Chengxiao, Hu. et al., 2020. Molybdenum potential vital role in plants metabolism for optimizing the growth and development. *Annals of Environmental Science and Toxicology* **4** (1), 032–044. https://doi.org/10.17352/aest.000024

Tumburu, L., Andersen, C.P., Rygiewicz, P.T., Reichman, J.R., 2017. Molecular and physiological responses to titanium dioxide and cerium oxide nanoparticles in *Arabidopsis*. *Environmental Toxicology and Chemistry* **36** (1), 71–82. https://doi.org/10.1002/etc.3500

Wang, Zh., Zhou, W., Jiskani, I.M., Luo, H., Ao, Zh., Mvula, E.M., 2022. Annual dust pollution characteristics and its prevention and control for environmental protection in surface mines. *Science of The Total Environment* **825** (15), 153949. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153949

References

Abros'kin, A.A., 2017. Dinamicheskaya sistema ekologicheskogo monitoringa atmosfernogo vozdukha dlya obespecheniya ekologicheskoy bezopasnosti stroitel'nykh ob'ektov [Dynamic system of environmental air monitoring for ensuring ecological safety of construction objects]. *PhD in Technical Sciences thesis*. Volgograd, Russia, 142 p. (In Russian).

Absolyamova, A., 2021. Vliyanie avtotransporta na sostoyanie okruzhayushchey sredy goroda Ufa [Impact of motor transport on the environment of Ufa city]. *Materialy XI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Ekologiya i prirodopol'zovanie: prikladnye aspekty» [Proceedings of the XI International Scientific-Practical Conference "Ecology and Environmental Management: Applied Aspects"].* Ufa, Russia, 7–10. (In Russian).

Adamiec, E., Jarosz-Krzemińska, E., Wieszała, R., 2016. Heavy metals from non-exhaust vehicle emissions in urban and motorway road dusts. *Environmental Monitoring and Assessment* **188** (369). https://doi.org/10.1007/s10661-016-5377-1

Akanova, N.I., Kozlova, A.V., Mukhina, M.T., 2021. Rol' magniya v sisteme pitaniya rasteniy [The role of magnesium in plant nutrition systems]. *Agrokhimicheskiy vestnik [Agrochemical Bulletin]* **6**, 66–72. (In Russian). https://doi.org/10.24412/1029-2551-2021-6-014

Alekseev, S.V., Simonov, D.L., Katikova, A.S., 2022. Vozdeystvie prirodnykh faktorov na sostoyanie dorog v razlichnykh regionakh Rossii [Impact of natural factors on road conditions in Russian regions]. *Innovatsionnye transportnye sistemy i tekhnologii [Innovative Transport Systems and Technologies]* **8** (4), 14–30. (In Russian). https://doi.org/10.17816/transsyst20228414-30

Alekseev, Yu.V., 1987. Tyazhelye metally v pochvakh i rasteniyakh [Heavy metals in soils and plants]. Agropromizdat, Leningrad, USSR, 140 p. (In Russian).

Amosova, N.V., Nikolaeva, O.N., Synzynys, B.I., 2007. Mekhanizmy alyumotolerantnosti u kul'turnykh rasteniy (obzor) [Mechanisms of aluminum tolerance in cultivated plants (review)]. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya [Agricultural Biology]* **1**, 36–42. (In Russian).

Afinogenov, Yu.P., 2008. Biogennye elementy i ikh fiziologicheskaya rol'. Uchebnoe posobie [Biogenic elements and their physiological role. Textbook]. Voronezh State University, Voronezh, Russia, 143 p. (In Russian).

Ashikkaliev, A.Kh., Vil'danova, L.R., Ashikkalieva, M.A., 2017. Pochvenno-ekologicheskaya otsenka zemel' sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya stepnoy zony [Soil-ecological assessment of agricultural lands in the steppe zone]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki [Natural and Technical Sciences]* **12**, 271–274. (In Russian).\

Baensch-Baltruschat, B., Kocher, B., Stock, F., Reifferscheid, G., 2020. Tyre and road wear particles (TRWP) – A review of generation, properties, emissions, human health risk, ecotoxicity, and fate in the environment. *Science of The Total Environment* **733** (137823). https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137823

Bogatyrev, L.G., Zhilin, N.I., Samsonova, V.P., Yakushev, N.L., Kirillova, N.P. et al., 2018. Mnogoletniy monitoring snezhnogo pokrova v usloviyakh prirodnykh i urbanizirovannykh landshaftov Moskvy i Moskovskoy oblasti [Long-term monitoring of snow cover in natural and urbanized landscapes of Moscow and the Moscow region]. *Vestnik moskovskogo universiteta [Bulletin of Moscow University]* **5** (2), 85–96. (In Russian).

Bojórquez-Quintal, E., Escalante-Magaña, C., Echevarría-Machado, I. and Martínez-Estévez, M., 2017. Aluminum, a friend or foe of higher plants in acid soils. *Frontiers in Plant Science* **8**, 1767. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01767

Borisenko, L.F., 1973. Vanadiy. Mineralogiya, geokhimiya i tipy endogennykh mestorozhdeniy [Vanadium. Mineralogy, geochemistry and types of endogenous deposits]. Nedra, Moscow, USSR, 192 p. (In Russian).

Cigler, P., Olejnickova, J., Hruby, M., Cséfalvay, L., Peterka, J., Kuzel, S., 2010. Interactions between iron and titanium metabolism in spinach: A chlorophyll fluorescence study in hydropony. *Journal of plant physiology* **167**, 1592–7. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2010.06.021

Golubev, A.V., 2007**.** Sel'skokhozíaìstvennaíaˆèkologiíaˆ[Agricultural ecology]. Saratov State Agricultural Academym Saratov, Russia, 418 p. (In Russian).

Damdinov, B.B., Mitypov, Ch.M., 2021. Vliyanie dobavok melkodispersnykh chastits metallov na kharakteristiki smazochnykh materialov [Effect of fine metal particle additives on lubricant properties]. *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Khimiya. Fizika [Bulletin of Buryat State University. Chemistry. Physics]* **1**, 28–42. (In Russian).

Dubina-Chekhovich, E.V., 2023. Transformatsiya pochv meliorirovannykh agrolandshaftov Severo-Zapada Rossii v rezul'tate aerotekhnogennogo zagryazneniya [Transformation of soils in reclaimed agrolandscapes of NW Russia due to aerotechnogenic pollution]. *PhD in Biological Sciences thesis*. Ufa, Russia, 234 p. (In Russian).

Egorova, O.S., Burkeeva, D.R., Gogol', E.V., Tunakova, Yu.A., 2014. Otsenka vklada avtotransportnykh potokov v zagryaznenie atmosfernogo vozdukha g. Kazani [Assessment of motor transport contribution to air pollution in Kazan]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of Kazan Technological University]* **17** (16), 141–142. (In Russian).

Gohari, G., Mohammadi, A., Akbari, A., Panahirad, S., Dadpour, M.R., Fotopoulos, V., Kimura, S., 2020. Titanium dioxide nanoparticles (TiO2 NPs) promote growth and ameliorate salinity stress effects on essential oil profile and biochemical attributes of Dracocephalum moldavica. *Scientific Reports* **10**, 1–14.

Grigoratos, T., Martini, G., 2014. Non-exhaust traffic related emissions – Brake and tyre wear PM. EUR 26648. Publications Office of the European Union, Luxembourg, JRC89231. https://doi.org/10.2790/21481

Guo, D., Wei, H., Guo, Y., Wang, Ch., Yin, Z., 2021. Non-exhaust particulate matter emission from vehicles: A review. *E3S Web of Conferences, VESEP2020* **268** (01015), 1–17. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126801015

Hussain, S., Shafiq, I., Skalicky, M., Brestic, M., Rastogi, A., Mumtaz, M., Hussain, M., et al., 2021. Titanium application increases phosphorus uptake through changes in auxin content and root architecture in soybean (*Glycine Max* L.). *Plant Science* **12**, 743618. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.743618

Il'in, V.B., Syso, A.I., 2001. Mikroelementy i tyazhelye metally v pochvakh i rasteniyakh Novosibirskoy oblasti [Trace elements and heavy metals in soils and plants of Novosibirsk region]. Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, Russia, 145 p. (In Russian).

Kabata-Pendias, A., Pendias, Kh., 1989. Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh [Trace elements in soils and plants]. Mir, Moscow, USSR, 439 p. (In Russian).

Kasimov, N.S., Vlasov, D.V., 2015. Klarki khimicheskikh elementov kak etalony sravneniya v ekogeokhimii [Clarke values of chemical elements as reference standards in ecogeochemistry]. *Vestnik moskovskogo universiteta [Moscow University Bulletin]* **5** (2), 7–17. (In Russian).

Kireycheva, L.V., Lentyaeva, E.A., 2020. Vliyanie sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva na zagryaznenie vodnykh ob'ektov [Impact of agricultural production on water pollution]. *Prirodoustroystvo [Environmental Engineering]* **18**, 18–26. (In Russian).

Klimashevskiy, E.L., 1991. Geneticheskiy aspekt mineral'nogo pitaniya rasteniy [Genetic aspect of plant mineral nutrition]. Agropromizdat, Moscow, USSR, 414 p. (In Russian).

Lavrentieva, O.V., Batishcheva, O.M., 2010. Teoreticheskie osnovy primeneniya khimicheskikh reagentov na avtomobil'nom transporte: uchebnoe posobie [Theoretical foundations of chemical reagents application in motor transport: textbook]. Samara State Technical University, Samara, Russia, 146 p. (In Russian).

Lyovkin, N.D., Lazeba, A.V., 2014. Rasprostranenie tyazhelykh metallov v zone dvizheniya avtotransporta [Distribution of heavy metals in motor transport zones]. *Izvestiya Tul'GU. Nauki o Zemle [News of Tula State University. Earth Sciences]* **3**, 9–16. (In Russian).

Lednev, A.V., 2018. Analiz faktorov, vliyayushchikh na iznosostoykost' asfal'tobetona [Analysis of factors affecting wear resistance of asphalt concrete]. *Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering Bulletin of Don]* **1**. (In Russian).

Metodicheskie rekomendatsii po geokhimicheskoy otsenke zagryazneniya gorodov khimicheskimi elementami [Guidelines for geochemical assessment of urban pollution by chemical elements], 1982. Grigoryan, S.V. (ed.). IMGRE, Moscow, USSR, 111 p. (In Russian).

Nevmerzhitskiy, N.V., Lozhkina, O.V., Lozhkin, V.N., 2016. Raschetnaya metodika i komp'yuternaya programma dlya otsenki i prognozirovaniya zagryazneniya vozdukha na avtomagistralyakh melkodispersnymi vzveshennymi chastitsami PM_{10} i $PM_{2.5}$ [Calculation methods and software for assessing and predicting PM_{10} and $PM_{2.5}$ air pollution on highways*]. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]* **2** (55), 206–209. (In Russian).

Nevmerzhitskiy, N.V., 2017. Metodika otsenki i prognozirovaniya ekstremal'nogo zagryazneniya vozdukha na avtomagistralyakh melkodispersnymi vzveshennymi chastitsami PM_{10} i $PM_{2.5}$ [Methods for assessment and prediction of extreme air pollution by PM_{10} and $PM_{2.5}$ particles on highways]. *PhD in Technical Sciences thesis*. Saint Petersburg, Russia, 23 p. (In Russian).

Pobilat, A.E., Voloshin, E.I., 2018. Manganese in soils and plants of the southern part of central Siberia. *Trace Elements in Medicine (Moscow)* **18** (2), 43-47.

Pochvy Karelii: uchebnoe posobie [Soils of Karelia: textbook], 1981. Morozova, R.M. et al. (eds.). Publishing House of the USSR Academy of Sciences, Petrozavodsk, USSR, 192 p. (In Russian).

Prokofieva, T.V., Shishkov, V.A., Kiryushin, A.V., Kalushin, I.Yu., 2015. Svoystva tverdykh (pyleaerozol'nykh) atmosfernykh vypadeniy pridorozhnykh territoriy g. Moskvy [Properties of solid (dust-aerosol) atmospheric deposits in Moscow roadside areas]. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya [Proceedings of RAS. Geographical Series]* **3**, 107–120. (In Russian).

Rana, M.S., Bhantana, P., Imran, M., Saleem, M.H., Chengxiao, Hu. et al., 2020. Molybdenum potential vital role in plants metabolism for optimizing the growth and development. *Annals of Environmental Science and Toxicology* **4** (1), 032–044. https://doi.org/10.17352/aest.000024

Reutse, K., Kyrstya, S., 1986. Bor'ba s zagryazneniem pochv [Combating soil pollution]. Agropromizdat, Moscow, USSR, 221 p. (In Russian).

Rybakov, D.S., 2017. Geoekologiya Karelii: geokhimicheskiy podkhod k problemam otsenki riska [Geoecology of Karelia: geochemical approach to risk assessment]. Karelian Research Centre RAS, Petrozavodsk, Russia, 311 p. (In Russian).

Rybakov, D.S., Krutskikh, N.V., 2021. Geoekologicheskie zakonomernosti raspredeleniya molibdena i vol'frama pri antropogennoy transformatsii geosistem Prionezh'ya [Geoecological patterns of molybdenum and tungsten distribution during anthropogenic transformation of Onega region geosystems]. *Geograficheskiy vestnik [Geographical Bulletin]* **1** (56), 81–95. (In Russian). https://doi.org/10.17072/2079-7877-2021-1-81-95

Saet, Yu.E., Revich, B.A., Yanin, E.P., Smirnova, R.S., Basharkevich, I.L. et al., 1990. Geokhimiya okruzhayushchey sredy [Environmental geochemistry]. Nedra, Moscow, USSR, 335 p. (In Russian).

Sheudzhen, A.Kh., Korsunova, M.I., Bondareva, T.N., Osipov, M.A., Esipenko, S.V., 2015. Titan v chernozeme vyshchelochemnom zapadnogo Predkavkaz'ya [Titanium in leached chernozem of Western Ciscaucasia]. *Nauchnyy zhurnal KubGAU [Scientific Journal of Kuban State Agrarian University]* **112**(08). (In Russian).

Shkol'nik, M.Ya., 1974. Mikroelementy v zhizni rasteniy [Trace elements in plant life]. Nauka, Leningrad, USSR, 324 p. (In Russian).

Tumburu, L., Andersen, C.P., Rygiewicz, P.T., Reichman, J.R., 2017. Molecular and physiological responses to titanium dioxide and cerium oxide nanoparticles in *Arabidopsis*. *Environmental Toxicology and Chemistry* **36** (1), 71–82. https://doi.org/10.1002/etc.3500

unakova, Yu.A., Novikova, S.V., Shagidullin, A.R., 2016. Sposoby otsenki postupleniya metallov s vybrosami avtotransporta s pomoshch'yu neyrosetevykh tekhnologiy [Methods for assessing metal emissions from motor transport using neural network technologies]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN [Proceedings of Samara Scientific Center RAS]* **18** (5(3)), 505–508. (In Russian).

Tyantova, E.N., Synzynys, B.I., Burukhin, S.B., Koz'min, G.V., 2005. Khimiya alyuminiya v okruzhayushchey srede [Aluminum chemistry in the environment]. *Agrokhimiya [Agrochemistry]* **2**, 87–93. (In Russian).

Usenko, A.V., Grinevich, N.A., 2023. Vliyanie shipovannykh shin na dorozhnoe pokrytie [Impact of studded tires on road surfaces]. *Elektronnyy arkhiv UGLTU [Ural State Forest Engineering University Electronic Archive]*, 697–701. (In Russian).

Vasilenko, V.N., Nazarov, I.M., Fridman, M.D., 1985. Monitoring zagryazneniya snezhnogo pokrova [Monitoring of snow cover pollution]. Gidrometeoizdat, Leningrad, USSR, 181 p. (In Russian).

Vinogradov, A.P., 1957. Geokhimiya redkikh i rasseyannykh elementov v pochvakh [Geochemistry of rare and trace elements in soils]. USSR Academy of Sciences, Moscow, USSR, 237 p. (In Russian).

Wang, Zh., Zhou, W., Jiskani, I.M., Luo, H., Ao, Zh., Mvula, E.M., 2022. Annual dust pollution characteristics and its prevention and control for environmental protection in surface mines. *Science of The Total Environment* **825** (15), 153949. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153949