

ГЕОГРАФИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК: 504.054;504.064.2.001.18

ГЕОХИМИЯ СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА ТЕРРИТОРИИ МГУ
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВАН.Е. Кошелева¹, Д.Г. Сычева², Н.С. Касимов³^{1–3} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,
кафедра геохимии ландшафтов и географии почв*¹ *Профессор, д-р геогр. наук; e-mail: natalak@mail.ru*² *Аспирант; e-mail: l.msu@yandex.ru*³ *Академик, д-р геогр. наук; e-mail: nskasimov@geogr.msu.ru*

Определены концентрации взвешенных форм металлов и металлоидов в снежном покрове и скорости их осаждения на территории МГУ за зимний период 2021/22 г. Проанализировано содержание Zn, As, Cd, Pb, Cr, Ni, Cu, Sb, V, Mn, Bi, Mo, Co, W, Sr, Be, Ti, Ag, Sn и Fe. Антропогенное воздействие в Москве обусловило увеличение твердых выпадений из атмосферы в среднем до 27 кг/км² в сутки, что в 5,4 раза больше, чем на фоновой территории. В твердой фазе снежного покрова наиболее интенсивно аккумулируются W, Sb, Sn, Sr, Cd, Bi с превышением их концентраций над фоном в среднем в 5,2–9,7 раза. Наиболее сильно по сравнению с фоном загрязнен снежный покров селитебной зоны, где аккумулируются Sb, W, Cd, Bi, Sn и Sr, их содержание превышает фон в 4,1–12 раз. На 45% изученной территории выявлен средний уровень суммарного загрязнения твердой фазы снега с $Z_c = 32–64$. Максимальная интенсивность выпадения поллютантов зафиксирована в рекреационной зоне ($Z_d = 413$). Наибольшие уровни пылевой нагрузки (141 кг/км² в сутки) и суммарного показателя имиссии ($Z_d = 1764$) установлены на территории стадиона МГУ. С помощью метода APCA-MLR идентифицированы три основных источника поллютантов: выбросы автомобильного транспорта влияют на поступление Fe, Cr, V, Ni, Pb, Co, Mo, W, Sn, Zn, природно-техногенные источники определяют накопление Be, Ti, Bi, Mn, Sb, Mo, As, Sr, выбросы промышленных предприятий – Cu, Pb, Cr.

Ключевые слова: металлы, металлоиды, Москва, атмосферные выпадения

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.5.1

ВВЕДЕНИЕ

Высокие темпы урбанизации в последние десятилетия оказывают значительное влияние на качество городской среды во многих странах мира. Сильное антропогенное воздействие испытывают все компоненты урбандолафтов, включая водные объекты, атмосферный воздух и почвенный покров [Sicard et al., 2023]. В городах с продолжительным зимним периодом, во время которого формируется устойчивый снежный покров, снег активно используется в качестве индикатора загрязнения окружающей среды. Это обусловлено его высокой сорбционной способностью, связанной с меньшей скоростью выпадения и большей площадью поверхности снежинок по сравнению с дождевыми каплями [Vasić et al., 2012]. Исследование химического состава пылевой составляющей снега позволяет определить количество загрязняющих веществ, выпада-

ющих на снежный покров за зимний период, когда концентрации поллютантов в атмосфере выше, а низкая температура препятствует растворению и трансформации веществ. По степени загрязнения снега можно количественно оценить пылевую и геохимическую нагрузку на городские ландшафты и массу поллютантов, поступающих в почву и поверхностные воды во время снеготаяния [Геохимия ландшафтов..., 2016]. При изучении геохимии снежного покрова в городах особое внимание уделяется накоплению в нем высокотоксичных и канцерогенных загрязнителей, включая металлы и металлоиды (ММ) [Vlasov et al., 2020].

В крупных мегаполисах важную роль в загрязнении городской среды играют выбросы автомобильного транспорта. Снежный покров вдоль обочин дорог активно накапливает поллютанты, поступающие с выбросами автотранспорта. Во время весен-

него таяния снега загрязненные стоки попадают в поверхностные и подземные воды и затем включаются в региональные миграционные потоки, вызывая повышение содержания элементов в сопредельных природных средах [Геохимия ландшафтов..., 2016].

Кампус МГУ на Воробьевых горах занимает площадь около 167 га, на его территории расположены учебные корпуса факультетов, Фундаментальная библиотека, Медицинский научно-образовательный центр, Ботанический сад, спортивные и другие вспомогательные и служебные объекты. Со всех сторон кампус ограничен крупными автомобильными дорогами с интенсивным транспортным движением, практически у каждого корпуса на территории МГУ расположены автомобильные парковки. Ежедневно университет посещают десятки тысяч человек, которые пользуются личным и общественным автотранспортом.

Цель работы – оценить уровень загрязнения территории МГУ имени М.В. Ломоносова в северо-восточной части района Раменки г. Москвы по микроэлементному составу твердой фазы в снежном покрове. Для этого решались следующие задачи: 1) установить интенсивность пылевых выпадений на фоновой и городской территориях; 2) определить уровни концентраций и выпадения поллютантов в различных функциональных зонах кампуса; 3) оценить суммарное загрязнение снежного покрова и иммиссию элементов; 4) идентифицировать основные источники загрязнения и их вклад в накопление ММ в твердой фазе снежного покрова на территории МГУ.

Изучаемая территория. Территория МГУ в районе Раменки относится к Западному административному округу (ЗАО) г. Москвы. Большая часть территории ЗАО расположена на Теплостанской возвышенности – пологоувалистой аккумулятивной равнине, расчлененной глубокими эрозионными долинами, балками и оврагами. Мощность четвертичных отложений здесь составляет 10–30 м; отложения представлены донской мореной и флювиогляциальными песками, перекрытыми валунными суглинками московской морены [Макарова, Григорьева, 2019]. Под влиянием техногенных факторов в ЗАО сформировались антропогенные почвы, представленные в основном урбаноземами, развитыми на насыпных или перемешанных грунтах [Антропогенные почвы..., 2003].

Климат Москвы умеренно континентальный со среднегодовой суммой осадков 600–700 мм. Метеорологическая зима длится с середины ноября по третью декаду марта, устойчивый снежный покров наблюдается, как правило, с конца ноября до начала апреля. За счет сжигания топлива зимой возникает «остров тепла» – в период морозов разница темпе-

ратур между центром и периферией может достигать до 5–7°C [Varentsov et al., 2018]. По данным Гидрометцентра России [<https://meteoinfo.ru/>], зимой 2021/22 г. средняя температура воздуха составила +4,4°C, по этому показателю данный период входит в десятку самых теплых зим. Осадков выпало на 30% больше нормы – 178 мм. Постоянный снежный покров установился 1 декабря, высота снежного покрова в январе достигла максимума – 49 см, а к концу февраля из-за интенсивного снеготаяния уменьшилась до 17 см.

На формирование геохимических аномалий в снежном покрове сильное влияние оказывает функциональная структура города. На территории МГУ выделены селитебная, рекреационная и транспортная функциональные зоны (рис. 1). Большая часть селитебной зоны занимает комплекс учебных и жилых корпусов, научная библиотека, метеообсерватория. Кроме того, она включает здания торгового и медицинского назначения. Рекреационная зона представлена Ботаническим садом, большим газон МГУ, спортивными площадками, скверами и неиспользуемой территорией (пустырем). К транспортной зоне относятся участки автомагистралей с интенсивным движением: проспекты Вернадского, Ломоносовский, Университетский и Мичуринский, а также автодороги с малоинтенсивным движением на территории МГУ: улицы Лебедева, Хохлова и Менделеевская.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Снегомерная геохимическая съемка территории МГУ с шагом 50–150 м (см. рис. 1) проводилась в январе–феврале 2022 г. Смешанные пробы снега состояли из 10 отдельных проб, отобранных на расстоянии 1–2 м друг от друга пластиковой трубой с площадью поперечного сечения 20 см². Всего получено 64 пробы снега и шесть фоновых проб в Можайском районе Московской области.

Основные физико-химические характеристики снега определялись в Эколого-геохимическом научно-образовательном центре географического факультета МГУ. Отобранные пробы помещались в пластиковые ведра и растапливались при комнатной температуре. Путем фильтрования через мембранные фильтры с диаметром пор 0,45 мкм (EMD Millipore) выделяли твердую (фильтр со взвесью) и жидкую (фильтрат) фазы. Гранулометрический состав взвеси определялся на лазерном гранулометре Analysette 22 MicroTec plus (Fritsch, 2015 г. выпуска). Концентрации ММ в твердой фазе анализировались в сертифицированной лаборатории ВНИИ минерального сырья методами масс-спектропии и атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS/AES) с использо-

ванием масс-спектрометра iCAP Qc (Thermo Fisher Scientific, 2017 г. выпуска) и атомно-эмиссионного спектрометра Optima-4300 DV (Perkin) Элмер, 2018 г. выпуска). Анализ проводился с использованием холостых проб и эталонных материалов. Пре-

делы обнаружения (ПО, мг/кг): Ag – 0,01; As – 0,1; Be – 0,01; Bi – 0,003; Cd – 0,004; Co – 0,02; Cr – 0,2; Cu – 0,20; Fe – 2,00; Mn – 0,20; Mo – 0,01; Ni – 0,020; Pb – 0,02; Sb – 0,004; Sn – 0,02; Sr – 0,02; Ti – 0,4; V – 0,1; W – 0,01; Zn – 0,20.

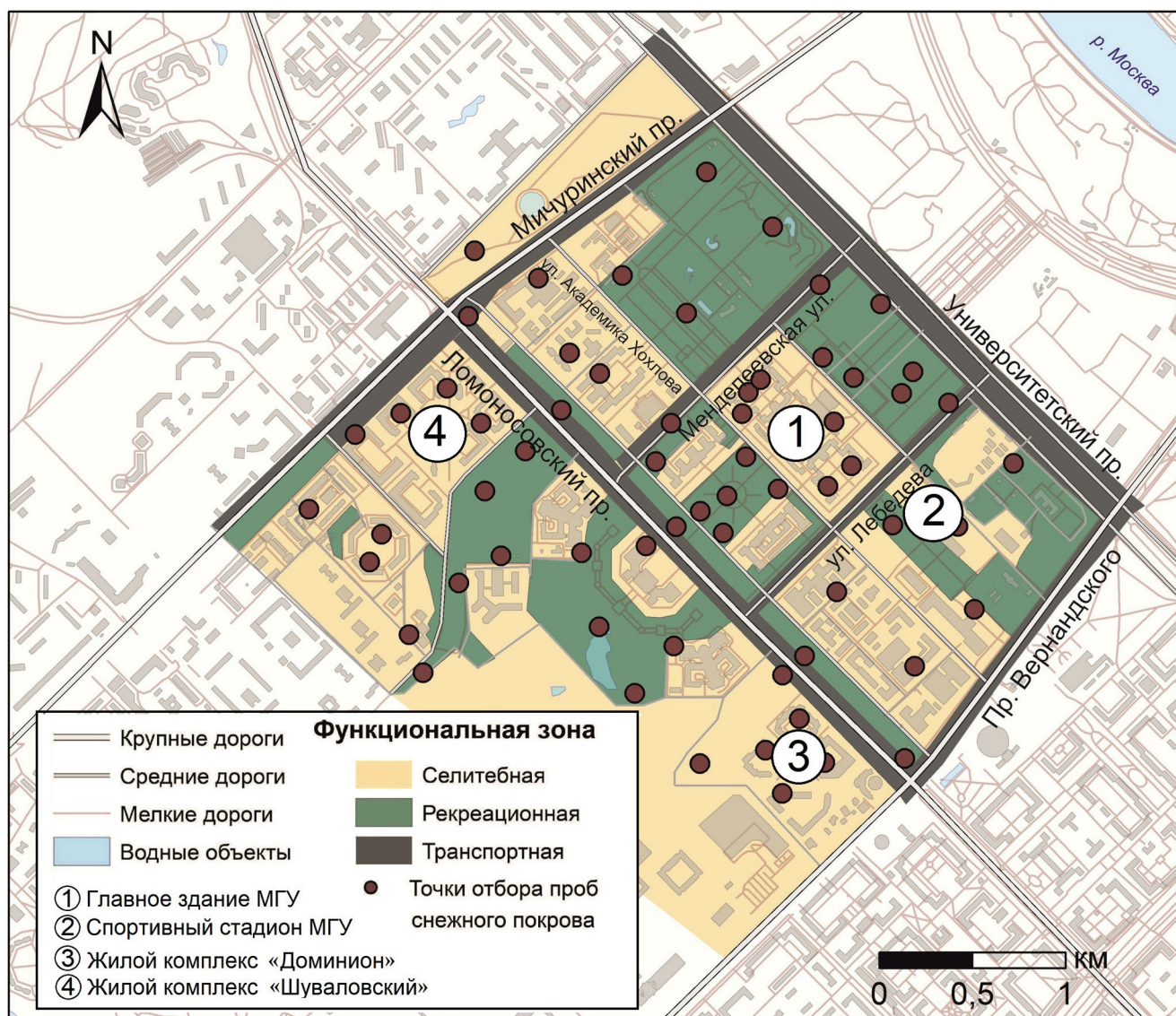


Рис. 1. Функциональное зонирование и точки отбора проб снега на территории МГУ

Fig. 1. Functional zoning and snow sampling points on the territory of Moscow State University

Для детального анализа выбрано 20 элементов: Zn, As, Cd, Pb (I класс опасности), Cr, Ni, Cu, Sb (II класс), V, Mn (III класс), а также Bi, Mo, Co, W, Sr, Be, Ti, Ag, Sn и Fe. Пылевая нагрузка P_n (кг/км² в сут.) в точках отбора проб на фоновой и городской территориях рассчитывалась по формуле:

$$P_n = m / (n \cdot l \cdot 2 \cdot 10^{-9}), \quad (1)$$

где m – масса взвеси на фильтре, кг; n – количество отобранных труб снега в точке; l – количество дней снегостава; $2 \cdot 10^{-9}$ – диаметр трубы, м². Масса каждого поступающего на единицу площади полю-

танта (мкг/м² в сут.) характеризовалась показателем имиссии

$$D = P_n \cdot C, \quad (2)$$

где C – концентрация элемента (мкг/г) во взвеси. Содержание ММ в твердой фазе снега на фоновой территории C_ϕ сравнивали с кларками K верхней части континентальной земной коры [Rudnick, Gao, 2014] путем расчета кларков концентрации

$$KK = C_\phi / K \text{ при } C_\phi > K \quad (3)$$

или рассеяния элементов

$$KP = K / C_\phi \text{ при } C_\phi < K. \quad (4)$$

Интенсивность накопления ММ в снежном покрове города оценивали с помощью коэффициента концентрации относительно фоновой территории:

$$K_c = C/C_{\phi} \quad (5)$$

и коэффициента превышения выпадений над фоном:

$$K_d = D/D_{\phi}, \quad (6)$$

где D_{ϕ} – показатель имиссии ММ на фоновой территории. Коэффициент обогащенности взвеси EF рассчитывался относительно среднего состава земной коры:

$$EF = (C/S_c)_{\text{проба}} / (C/S_c)_{\text{земн. кора}}, \quad (7)$$

где S_c – концентрация эталонного элемента (скандия) в пробе и в земной коре.

Общую геохимическую нагрузку на ландшафты оценивали двумя суммарными показателями – загрязнение твердой фазы снега Z_c и имиссии элементов Z_d , которые представляют собой сумму K_c и K_d над фоновым уровнем за вычетом $(n - 1)$ соответственно:

$$Z_c = \sum K_c - (n - 1); Z_d = \sum K_d - (n - 1), \quad (8)$$

где n – число химических элементов с K_c или $K_d > 1,0$. Показатели Z_c и Z_d имеют пять градаций: низкое, неопасное загрязнение при $Z_c < 32$ и $Z_d < 1000$; среднее, умеренно опасное с $Z_c = 32-64$ и $Z_d = 1000-2000$; высокое, опасное с $Z_c = 64-128$ и $Z_d = 2000-4000$; очень высокое, очень опасное с $Z_c = 128-256$ и $Z_d = 4000-8000$; максимальное, чрезвычайно опасное с $Z_c > 256$ и $Z_d > 8000$ [Геохимия ландшафтов..., 2016].

Источники ММ в твердой фазе снежного покрова на территории кампуса МГУ определялись на основе абсолютного анализа главных компонент с использованием множественной линейной регрессии (APCA-MLR) в Statistica 8. Это широко используемая и эффективная модель для выявления потенциальных источников загрязнения различных компонентов окружающей среды [Song et al., 2006; Huang et al., 2018; Vlasov et al., 2023].

Анализ главных компонент выполнен методом вращения Varimax. Пригодность данных для PCA проверялась с помощью тестов на сферичность Кайзера–Мейера–Олкина (КМО) и Бартлетта [Yang et al., 2020]. В качестве факторов использовались главные компоненты с собственными значениями >1 (критерий Кайзера). Чтобы избежать отрицательных значений вклада источника, была введена искусственная безразмерная стандартизированная концентрация Z_{0i} с истинно нулевой концентрацией $C_{0i} = 0$ для каждого i -го ММ, равная

$$Z_{0i} = \frac{(0 - \bar{C}_i)}{\sigma_i}, \quad (9)$$

где $\bar{C}_i$ – средняя концентрация i -го элемента, а σ_i – стандартное отклонение i -го элемента.

Исходные главные компоненты каждого i -го ММ оценивались методом PCA, а абсолютные главные

компоненты рассчитывались путем вычитания главных компонент (Factor score) выборки с нулевым значением из выборки с исходными концентрациями ММ. Далее использовалась модель множественной линейной регрессии (MLR) для расчета вклада источника p в концентрацию i -го ММ на всей территории исследования:

$$C_{\text{прог } i} = \delta_{0,i} + \sum_{p=1}^n (APCS_p \cdot \delta_{p,i}), \quad (10)$$

где $C_{\text{прог } i}$ – прогнозируемая на основе APCA-MLR концентрация i -го ММ, $\delta_{0,i}$ – константа регрессии для i -го элемента, $\delta_{p,i}$ – коэффициент множественной регрессии источника p для i -го элемента, $APCS_p$ – абсолютные главные компоненты, рассчитанные на основе анализа APCA. Среднее значение произведения $APCS_p \cdot \delta_{p,i}$ представляет собой общий вклад всех источников.

Неопределенность APCA-MLR (UNC, %) рассчитывалась как [Song et al., 2006]:

$$UNC = \frac{(C_i - C_{\text{прог } i})}{C_i} \cdot 100\%, \quad (11)$$

где C_i – измеренная концентрация ММ.

Пространственная локализация техногенных аномалий элементов в снежном покрове отражена на картах суммарных показателей Z_c и Z_d , а также Pn , построенных в пакете ArcGis 10.1 методом интерполяции сплайн.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Геохимический фон. Фоновая пылевая нагрузка в Можайском районе составила 5 кг/км² в сут., что в 2 раза ниже, чем для равнинной континентальной территории умеренных широт (10 кг/км²), удаленной от урбанизированных зон [Геохимия..., 1990]. Она близка к величинам, полученным в районе г. Звенигорода (8 кг/км² в сут.) в 2010 г. [Геохимия ландшафтов..., 2016] и в Можайском районе (9 кг/км² в сут.) в 2018 г. [Vlasov et al., 2020].

В фоновой снеговой взвеси концентрируются лишь $Ag_{5,0}Cd_{3,6}Cu_{3,1}$ (нижние индексы – кларки концентрации (КК)). Zn, Bi и Mo имеют околосреднее содержание. Большинство ММ рассеиваются: $Be^{18}Sr^{16}V^{12}Co^{8,4}Fe^{8,7}Mn^{7,9}As^{5,5}Cr^{4,8}W^{3,8}Ni^{3,0}Sb^{1,5}Sn^{1,3}$ (верхние индексы – кларки рассеяния (КР)) (табл. 1).

Расчет коэффициентов обогащенности EF показал, что содержащиеся в снеговой взвеси на фоновой территории Mo, Zn, Bi, Cu, Cd, Ag характеризуются значениями $EF = 10-100$. Это указывает на смешанные, природно-антропогенные источники поступления данных ММ из атмосферы при участии регионального переноса с прилегающих территорий. В выбросах промышленных предприятий, как правило, преобла-

дают халькофильные элементы [Геохимия ландшафтов..., 2016], к которым относятся указанные ММ, что также подтверждает их возможное антропогенное происхождение. Подобный уровень выпадений на фоновых территориях был неоднократно отмечен в научной литературе. Так, значения $EF > 10$ имеют Cu, Zn, Cd, Sb, W, Pb, Bi в твердой фазе снега в районе г. Звенигорода [Геохимия ландшафтов..., 2016]; Ag, Cd, Pb, Mo на фоновой территории в районе г. Тобольска [Московченко и др., 2021a].

Пылевая нагрузка. Пылевая нагрузка Pn на территории МГУ колеблется от 3 до 141 кг/км² в сут., составляя в среднем 27 кг/км² в сут., что в 5,4 раза выше, чем фоновые значения (рис. 2). Это соответствует низкой степени загрязнения (< 250 кг/км²

в сут.) [Геохимия ..., 1990]. В условиях городской застройки на аккумуляцию пылевых выпадений существенно влияют планировка улиц, высота и плотность застройки [Kosheleva et al., 2018]. Максимальное значение показателя $Pn = 141$ кг/км² в сут., в 28 раз превышающее фоновое значение, обнаружено на территории стадиона МГУ с натуральным покрытием, где большую часть года открытый незадернованный грунт подвергается ветровой эрозии. При этом высокие трибуны и посаженные по всему периметру стадиона деревья снижают скорость ветра и уменьшают возможность выноса пыли за пределы стадиона. Минимальное значение $Pn = 3$ кг/км² в сут. зафиксировано с наветренной стороны жилого комплекса «Доминион» (Ломоносовский пр., 25, к. 3).

Таблица 1

Кларки верхней части земной коры, средние концентрации ММ и пределы их колебаний (в скобках) в снеговой пыли на территории МГУ и в фоновых условиях

Элемент	Показатели				Элемент	Показатели			
	К	C_{ϕ} , мг/кг	C_p , мг/кг	K_c		К	C_{ϕ} , мг/кг	C_p , мг/кг	K_c
W	2,3	0,53	5,2	9,7	Zn	75	94	350	3,7
		(0,29–0,70)	(1,4–12)				(52–171)	(130–1806)	
Sb	0,81	0,55	5,1	9,2	Fe	40 600	4918	17672	3,6
		(0,36–0,89)	(1,5–61)				(1312–13 011)	(7149–43 952)	
Sn	2,5	2,0	12	5,9	Be	2,3	0,13	0,41	3,2
		(1,4–2,6)	(5,4–25)				(0,10–0,17)	(0,10–1,28)	
Sr	270	17	92	5,5	As	5,6	1,0	3,1	3,0
		(3,3–30)	(15–1343)				(0,86–1,2)	(0,98–6,6)	
Cd	0,09	0,32	1,7	5,2	Cr	92	19	56	2,9
		(0,14–0,47)	(0,27–18)				(15–24)	(27–154)	
Bi	0,23	0,39	2,1	5,2	Ni	50	17	44	2,7
		(0,21–0,61)	(0,64–14)				(3,9–51)	(11–322)	
V	106	8,8	42	4,8	Ti	3900	493	1281	2,6
		(1,2–13)	(12–82)				(134–853)	(337–3186)	
Pb	17	11	49	4,4	Mn	770	104	265	2,5
		(5,4–16)	(15–173)				(38–158)	(107–537)	
Cu	27	84	326	3,9	Mo	1,1	0,99	2,4	2,4
		(22–314)	(55–3980)				(0,25–3,3)	(0,97–4,6)	
Co	15	1,8	6,8	3,8	Ag	0,05	0,26	0,60	2,3
		(1,0–2,9)	(1,8–22)				(0,11–0,45)	(0,14–3,2)	

При высокой вариабельности внутри функциональных зон средние значения пылевой нагрузки Pn между зонами различаются слабо, что характерно для городской застройки. Ранее это было отмечено для почв Восточного округа Москвы [Kosheleva et al., 2018]. Наибольшая запыленность выявлена в рекреационной зоне (33 кг/км² в сут.), пылевая нагрузка в транспортной и селитебной зонах со-

ставляет 26 кг/км² в сут. Средняя за зимний период величина суточных выпадений твердых частиц из атмосферы на территории кампуса близка к данному показателю в Восточном округе Москвы (27 кг/км²) в марте 2010 г. [Геохимия ландшафтов..., 2016], в 1,4 раза выше, чем во дворах и на парковках, но в 2,3 раза ниже, чем вблизи автомобильных дорог в Западном округе Москвы в 2018 г. [Vlasov et al.,

2020]. Сравнение с другими городами показало превышение величины P_n в 1,8 раза по сравнению с Тобольском [Московченко и др., 2021a] и в 1,4 раза по сравнению с Тюменью [Московченко и др., 2021b].

Содержание и выпадение загрязнителей. По сравнению с фоновой территорией в снежном покрове на территории МГУ накапливаются все исследуемые элементы (см. табл. 1), что свидетельствует о многократном возрастании поступления в снежный покров антропогенных аэрозолей [Геохимия ландшафтов..., 2016].

Приоритетными загрязнителями для территории МГУ являются W, Sb, Sn, Sr, Cd, Bi ($K_c = 5,2-9,7$); несколько ниже накопление у V, Pb, Cu, Co, Zn, Fe, Be, As ($K_c = 3,0-4,8$), минимально – у Cr, Ni, Ti, Mn, Mo, Ag ($K_c = 2,3-2,9$). Эта же ассоциация

ММ присутствует в дорожной пыли и в аэрозолях ЗАО [Kasimov et al., 2024]. Наиболее загрязненным ММ является снежный покров жилой и транспортной зон (рис. 3), где по сравнению с фоном активно накапливаются Sb, W ($K_c = 7,4-12$), Cd, Bi, Sn и Sr ($K_c = 4,1-7,3$). Основное техногенное воздействие на территорию связано с выбросами автомобильного транспорта: Zn, Sb поступают при износе тормозных колодок [Limbeck, Puls, 2011], W, Zn, Cd – при абразии шин и дорожного покрытия [Limbeck, Puls, 2011; Vlasov et al., 2023], Mo – при износе выхлопных труб. Для Москвы показано, что транспорт поставляет в дорожную пыль Pb, Sb при износе тормозных колодок, Cd, Bi, Sn при абразии частей автомобилей, Zn, W, Cd при истирании шин и дорожного покрытия [Vlasov et al., 2023].

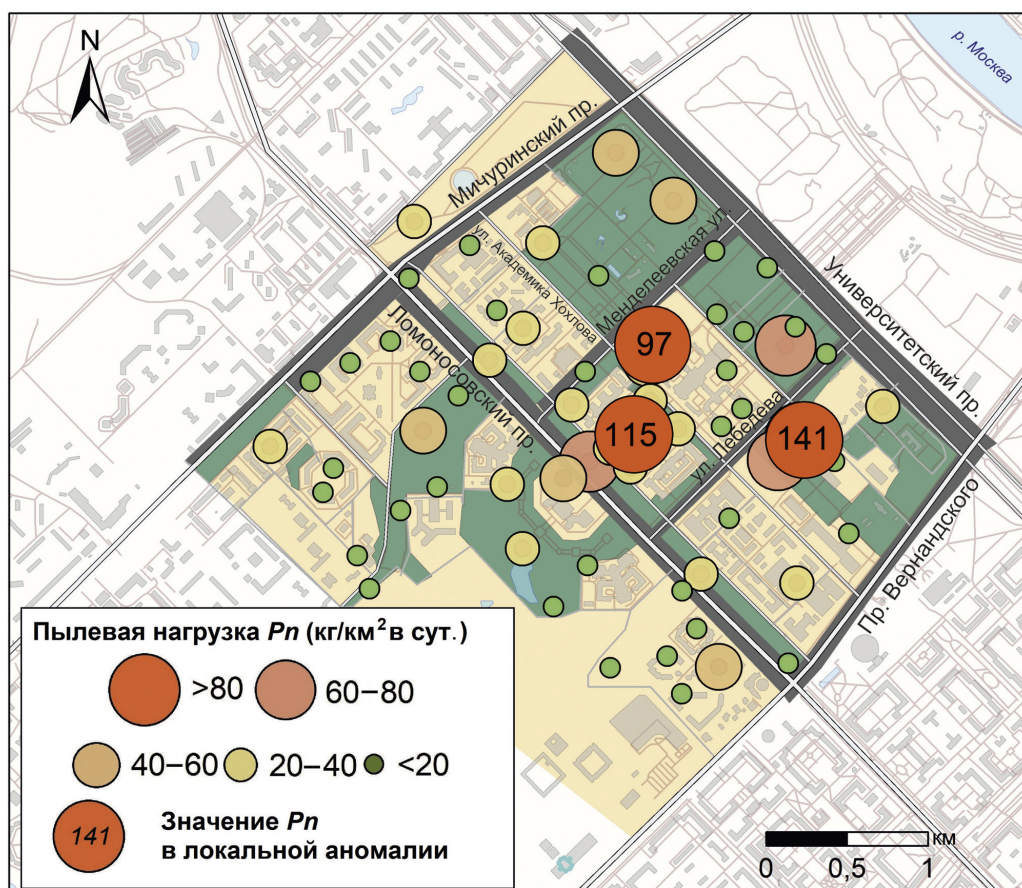


Рис. 2. Пылевая нагрузка P_n на территории МГУ

Fig. 2. Dust load P_n on the territory of Moscow State University

В отдельных точках отбора проб фоновые значения превышены в десятки раз: наибольшее значение для Sb ($K_c = 111$) обнаружено во дворе жилого дома, ограниченного со всех сторон высокими зданиями, образующими так называемые «колодцы-ловушки» [Kosheleva et al., 2018], в жилом комплексе «Доминион» (Ломоносовский пр., 25, к. 3), для Sr₈₁ – на газоне перед входом в здание химического

факультета. В снежном покрове транспортной зоны наибольшее превышение над фоном зафиксировано для Cd₅₆ вблизи жилого комплекса «Шуваловский» (Мичуринский проспект, 7), для Cu₄₇ рядом с автомобильной парковкой у корпуса физического факультета и для Bi₃₅ и W₂₃ на газоне вблизи автодублера Ломоносовского проспекта, рядом с остановкой общественного транспорта на ул. Лебедева.

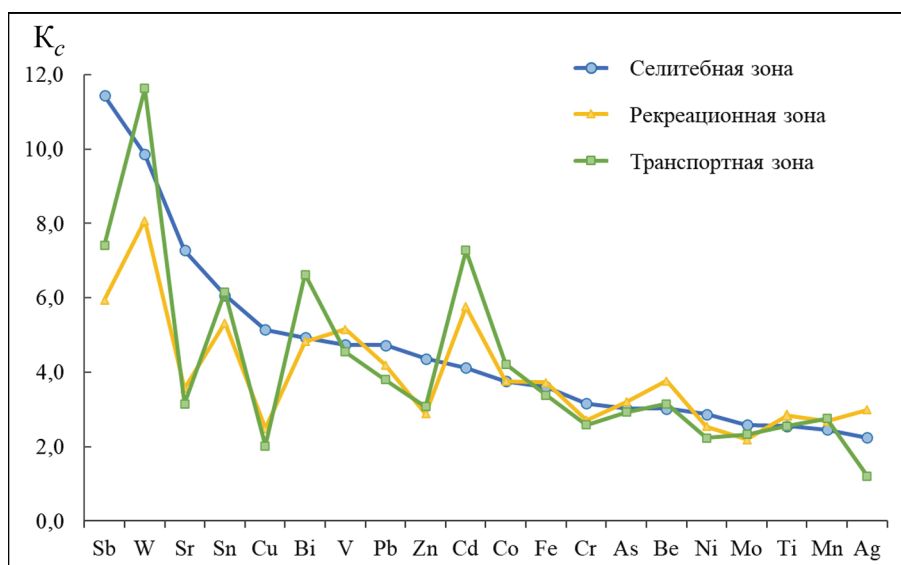


Рис. 3. Геохимические спектры ММ в твердой фазе снежного покрова функциональных зон на территории МГУ

Fig. 3. Geochemical spectra of MM in the solid phase of snow cover of functional zones on the territory of Moscow State University

Формирование техногенных геохимических аномалий в снежном покрове городов тесно связано с пространственным распределением выпадений ММ из атмосферы. Имиссия всех исследуемых загрязнителей в снежный покров на территории кампуса превысила фоновые значения в несколько раз, максимальные значения коэффициента выпадений K_d зафиксированы для Sb и W во всех функциональных зонах (табл. 2).

В снеге рекреационной зоны у большинства элементов выявлены самые высокие значения K_d : W_{39} , Be_{33} , V_{29} , Cd_{27} , Sn_{27} , As_{26} , Pb_{24} , Co_{21} , Bi_{21} , Fe_{20} , Ti_{20} , Mn_{18} , Cr_{16} , Ag_{15} , Mo_{11} , Ni_{10} . В селитебной зоне максимальные значения K_d имеют W_{41} , Sb_{40} , Sr_{37} , Cu_{20} , Zn_{17} . Высококонтрастные локальные максимумы выявлены у Sr ($K_d = 404$) на газоне между химическим корпусом и ул. Колмогорова, а также у Cd ($K_d = 311$) в сквере вблизи Шуваловского корпуса МГУ.

При сходстве геохимических спектров ММ рекреационной и транспортной зон (см. рис. 3) очевидно заметное отличие от них селитебной зоны. К его возможным причинам можно отнести беспрепятственное распространение выбросов от автотранспорта в скверы и парки, особенно в зимний период при отсутствии экранирования растительностью, тогда как в селитебной зоне застройка в зависимости от ориентации зданий относительно преобладающих ветров может либо экранировать их распространение, либо создавать «колодцы-ловушки», благоприятные для осаждения загрязненных аэрозолей, что приводит к изменениям в накоплении отдельных элементов по сравнению с другими зонами.

Суммарное загрязнение снежного покрова. Суммарный показатель загрязнения Z_c твердой

фазы снега на территории МГУ изменяется от 16 до 165 и составляет в среднем 68, что соответствует высокому уровню загрязнения и опасной для здоровья человека экологической ситуации. Очень высоким уровнем загрязнения ($Z_c > 128-256$) отличается лишь 5% площади кампуса в селитебной зоне (рис. 4). Высокое загрязнение снега ($Z_c = 64-128$) выявлено на 42% территории, 45% характеризуется средним уровнем загрязнения снега ($Z_c = 32-64$), это преобладающая часть селитебной и транспортной зон. Минимальный уровень загрязнения снега ($Z_c < 32$) выявлен на 8% территории, наибольшая площадь с таким уровнем загрязнения относится к рекреационной зоне. Приоритетными загрязнителями на большей части изучаемой территории являются W, Sb, Sn, Sr, Bi, Cd. В транспортной зоне помимо этих элементов велик вклад V со средним $K_c = 4,5$.

Наиболее высокий уровень загрязнения снежного покрова наблюдается в локальных полиэлементных аномалиях. Максимальное значение суммарного показателя $Z_c = 165$ с аккумуляцией $Sr_{80}Cu_{20}W_{11}Sb_{9,6}Bi_{7,9}Sn_{7,4}Cr_{6,3}V_{6,2}$ зафиксировано рядом с корпусом химического факультета. Две другие локальные аномалии с $Z_c = 157-161$ и приоритетными загрязнителями $Sb_{111}Cu_{47}Ni_{20}Sn_{12}Zn_{9,5}Bi_{8,9}W_{16}Fe_{9,0}As_{6,5}V_{5,7}$ сформировались во дворах жилых домов высокой этажности, образующих «колодцы-ловушки» – в жилом комплексе «Доминион» (Ломоносовский пр., 25, к. 3) и «Шуваловский» (Мичуринский пр., 5).

Показатель загрязнения твердой фазы снега Z_c зависит только от специализации источников выбросов и не учитывает объем пылевых выпадений, поэтому для оценки реального геохимического

воздействия на снежный покров территории МГУ рассчитан суммарный показатель иммиссии Z_d , показывающий интенсивность потока ММ в единицу времени на единицу площади. Средняя иммиссия элементов Z_d варьирует от 270 в транспортной зоне до 413 в рекреационной, составляя в среднем 370, что соответствует слабому загрязнению ($Z_d < 1000$) с неопасной экологической ситуацией (см. табл. 2).

Таблица 2

Интенсивность выпадений ММ с пылью в различных функциональных зонах на территории МГУ

Зона	Превышение выпадений ММ над фоном, K_d (в нижних индексах)					Z_d
	>40	30–40	20–30	10–20	4–10	
Селитебная	W_{41}	$Sb_{40}Sr_{37}$	$Sn_{26}Pb_{23}V_{21}$	$Cu_{20}Bi_{19}Be_{18}Bi_{18}As_{18}Co_{17}$ $Zn_{17}Cr_{16}Fe_{15}Mn_{13}Ti_{12}Mo_{11}$	$Ni_{10}Ag_{9,3}$	378
Рекреационная		$W_{39}Be_{33}$	$V_{29}Sb_{27}Sn_{27}$ $Cd_{27}As_{26}Pb_{24}$ $Sr_{24}Co_{21}Bi_{21}$	$Ti_{20}Fe_{20}Mn_{18}Cr_{16}$ $Ag_{15}Zn_{14}Mo_{11}$	$Ni_{10}Cu_{9,1}$	413
Транспортная	W_{40}	—	Sb_{23}	$Sn_{20}Bi_{19}V_{18}Be_{18}Cd_{18}Co_{15}$ $As_{15}Pb_{14}Fe_{12}Sr_{12}Mn_{11}Ti_{11}$	$Cr_{10}Zn_{9,5}Mo_{7,8}Ni_{6,7}Ag_{4,4}Cu_{4,2}$	270
Среднее по территории	W_{40}	Sb_{34}	$Sr_{28}Sn_{25}V_{23}$ $Pb_{22}Be_{23}Pb_{22}$	$As_{20}Co_{20}Bi_{20}Co_{18}Fe_{16}$ $Cr_{15}Zn_{15}Ti_{15}Cu_{14}Mo_{11}$	$Ag_{10}Ni_{9,1}$	370

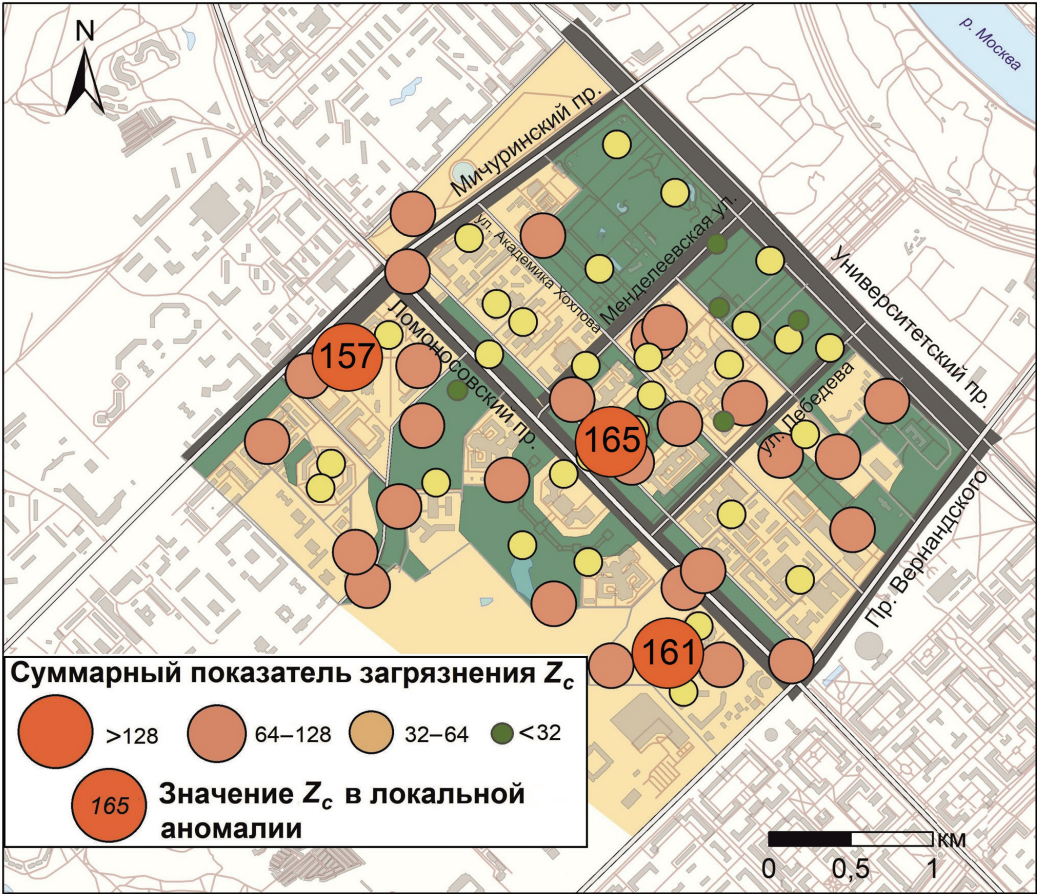


Рис. 4. Суммарное загрязнение твердой фазы снежного покрова Z_c металлами и металлоидами на территории МГУ в районе Раменки

Fig. 4. Total pollution of the solid phase of snow cover Z_c with metals and metalloids on the territory of Moscow State University in the Ramenki area

Максимум показателя $Z_d = 1764$ обнаружен в рекреационной зоне на территории стадиона МГУ (рис. 5). В снежном покрове внутреннего двора сектора В Главного здания МГУ $Z_d = 1528$; вблизи памятника М.В. Ломоносову – $Z_d = 1210$. Данные участки с умеренно опасным уровнем загрязнения отличаются максимальной пылевой нагрузкой $P_n = 97\text{--}141$ кг/км² в сут., что в 3,6–5,2 раза превышает среднее для изучаемой территории значение – 27 кг/км² в сут. При этом суммарный показатель загрязнения Z_c варьирует в пределах 44–77, что соответствует среднему уровню загрязнения. Макси-

мальным накоплением в снеге во дворе корпуса В Главного здания МГУ отличается Cu ($K_c = 17$), для W, Pb, V, Be $K_c = 6,0\text{--}7,8$, для остальных ММ значения K_c довольно низкие – 1,1–5,9. В точках, где установлены максимальные значения суммарного загрязнения $Z_c = 120\text{--}165$ (см. рис. 4), пылевая нагрузка, напротив, низкая ($P_n = 14\text{--}40$) и уровень имиссии элементов так же соответствует низкому загрязнению ($Z_d = 417\text{--}938$). Следовательно, выпадение ММ на изучаемой территории зависит, в первую очередь, от количества выпадающей пыли (см. рис. 2) и в меньшей степени от ее состава.



Рис. 5. Суммарное выпадение Z_d металлов и металлоидов на территории МГУ

Fig. 5. Total fallout of Z_d metals and metalloids on the territory of Moscow State University

Источники ММ в твердой фазе снежного покрова. С помощью абсолютного анализа главных компонент с использованием множественной линейной регрессии (метод APCs-MLR) определены возможные источники ММ в твердой фазе снежного покрова на территории МГУ. Критерий Кайзера–Мейера–Олкина (0,80) и тест сферичности Бартлетта ($p < 0,001$) показали пригодность набора данных для PCA. В связи с крайне низкими значениями коэффициента детерминации $R^2 < 0,30$ между исходными концентрациями ММ и расчетными данными

из анализа были исключены Ag и Cd. Для остальных ММ R^2 составил $>0,60$ (в большинстве случаев $>0,85$). Неопределенность оценок не превышала $\pm 25\%$ для всех элементов, кроме Cu и Sr (43 и 47% соответственно). Таким образом, полученные результаты позволяют установить хорошее согласие между смоделированными и фактическими значениями и надежность оценок вкладов источников [Yang et al., 2020].

Для твердой фазы снега выявлено три основных фактора, объясняющих в сумме 73% общей

дисперсии (рис. 6). *Первый фактор* PC1, вероятнее всего, характеризует выбросы автомобильного транспорта. На PC1 приходится 39% дисперсии, он связан с накоплением Ni, Mo, Sn, Sb, W, Bi, Pb, Zn, значения факторных нагрузок – 0,71–0,90. Истирание шин может привести к образованию твердых частиц, содержащих значительные количества W и Zn. Цинк содержится в шинах в виде неорганических (ZnS и ZnO) и органических (стеарат Zn) соединений и составляет 0,4–4,3% протекторов шин [Alves et al., 2020]. Истирание металлических деталей (тормозов, дисков, сцепления, подшипников) приводит к поступлению Ni, Sn, Sb, Pb и Zn [Alves et al., 2020]. Сплав Мо наносится на стальные изнашиваемые детали, его источником являются также разливы автомобильного масла, в состав которого в качестве антифрикционной присадки входит MoS₂. Свинец является индикатором выбросов двигателей внутреннего сгорания и содержится в дорожной разметке [Limbeck, Puls, 2011; Huang et al., 2018].

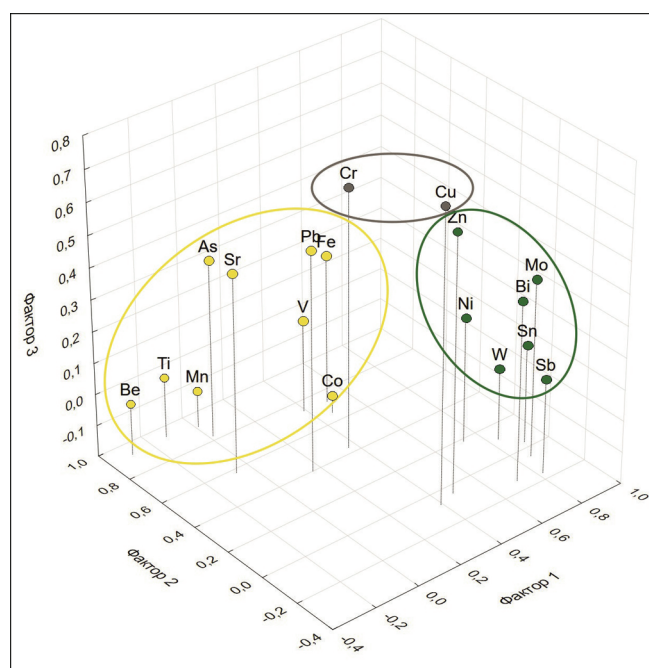


Рис. 6. Факторные нагрузки для концентраций ММ в твердой фазе снежного покрова на территории МГУ

Fig. 6. Factor loadings for MM concentrations in the solid phase of snow cover on the territory of Moscow State University

Второй фактор PC2 объясняет около 27% общей дисперсии и включает Be, V, Mn, Co, Cr, As, Ti, Sr, Fe с высокими факторными нагрузками (0,57–0,94). Эти ММ могут содержаться в частицах почвы, которые переносятся с газонов в бесснежные периоды [Vasić et al., 2012], а так-

же при разбрызгивании автомобилями частиц загрязненного материала, скопившегося на поверхности дороги и состоящего из снега, противогололедных реагентов (ПГР) и грязи от колес автомобилей [Seleznev et al., 2019; Vlasov et al., 2020]. Во многих исследованиях, включая [Jiang et al., 2020; Chen, Lu, 2021], авторы указывают в качестве источника Fe, V, Ni, Cr, Co материнские породы. Результаты корреляционного анализа в [Chen, Lu, 2021] показали, что концентрации Mn, V, As и Co в почвах положительно коррелируют с концентрациями Fe₂O₃ и MgO, которые образуются при почвообразовании в результате выветривания материнских пород. Марганец является характерным элементом, указывающим на вклад почвенных частиц. Ванадий входит также в состав смазочных масел и может присутствовать в выбросах дизельных двигателей [Shafer et al., 2012]. Источниками Sr могут быть ПГР и строительная карбонатная пыль, поскольку этот металл часто содержится в карбонатах Ca и Mg. Таким образом, данный фактор характеризует вклад природно-техногенных источников.

Вклад *третьего фактора* PC3 в общую дисперсию составляет 7%, он объясняет накопление Cu и Sr с наиболее низкими факторными нагрузками 0,50–0,73. Вероятно, этот фактор отражает влияние выбросов промышленных предприятий и авторемонтных мастерских. Вблизи территории МГУ отсутствуют крупные промышленные объекты, поэтому факторные нагрузки Cu и Sr и вклад в общую дисперсию относительно низкие. Поступление данных ММ обусловлено региональным и локальным переносом атмосферных частиц из промышленных зон Москвы и Московской области [Serdyukova et al., 2023].

С помощью модели PCA-MLR был рассчитан вклад выявленных источников в аккумуляцию исследуемых ММ в снежном покрове (рис. 7). Расчеты показали, что выбросы автомобильного транспорта (PC1) являются основным поставщиком Fe (80%), Cr, V, Ni (67,2–56,1%), Pb, Co, Mo (52,8–47,4%), W, Sn, Zn (43,6–38,4%) в снеге на территории МГУ. Вклад природно-техногенных источников (PC2) наиболее значителен у Be (75,3%), Ti (64,8%), Mn, Bi, Sb, Mo (55,9–51,3%), As, Sr (46–39,8%). Выбросы промышленных предприятий вносят наибольший вклад в накопление в снежном покрове Cu, Pb, Co и Cr (32,3–30,1%).

Оценка источников загрязнения в ЗАО для теплого периода получена путем анализа данных о содержании ММ в дорожной пыли [Vlasov et al., 2023]. При расхождении во вкладах отдельных ММ наборы элементов антропогенного и смешанного происхождения оказались довольно близкими.

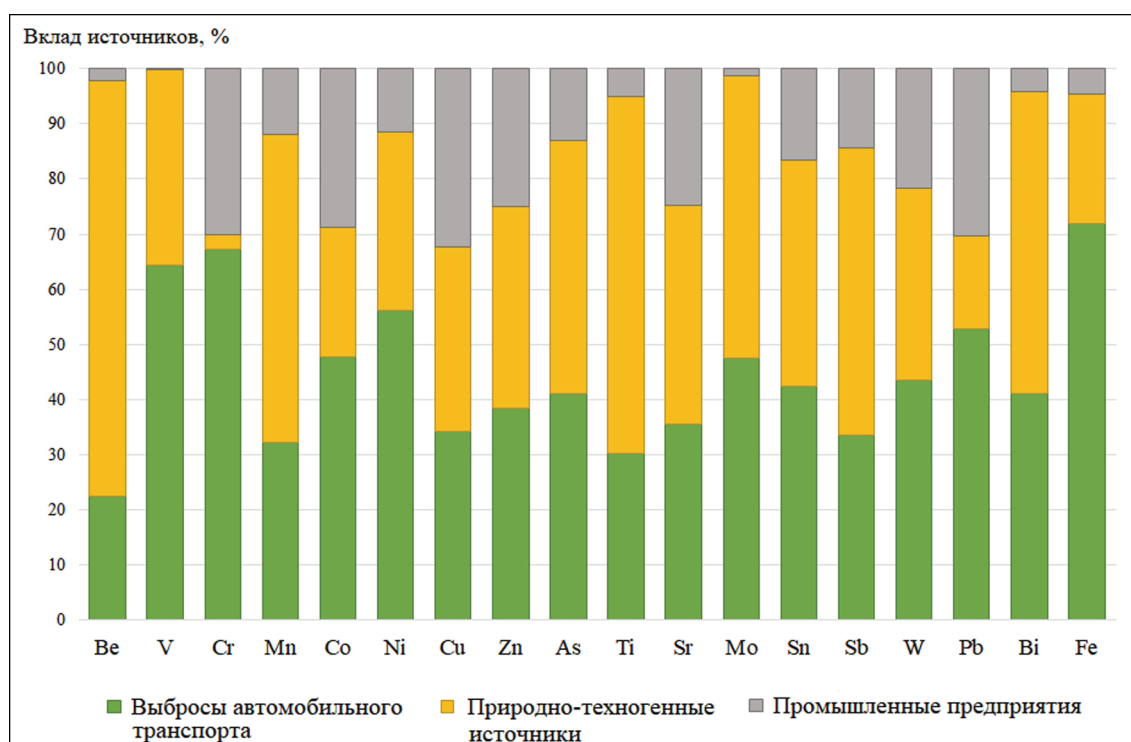


Рис. 7. Вклад источников в накопление ММ в твердой фазе снежного покрова на территории МГУ (по результатам PCA-MLR)

Fig. 7. Contribution of sources to the accumulation of MM in the solid phase of snow cover on the territory of Moscow State University (based on PCA-MLR results)

ВЫВОДЫ

На территории МГУ средняя за зимний период 2021/22 г. пылевая нагрузка составляет 27 кг/км² в сут., превышая фоновые значения в 5,4 раза. Максимальное значение (141 кг/км² в сут.) обнаружено на стадионе МГУ, минимальное (5 кг/км² в сут.) – во дворе жилого комплекса «Доминион». Приоритетными поллютантами являются W, Sb, Sn, Sr, Cd, Bi. Наиболее загрязнен снежный покров селитебной зоны, где зафиксировано более чем 100-кратное превышение фона Sb в закрытом дворе высокоэтажного жилого дома и 81-кратное у Sr на газоне вблизи корпуса химического факультета МГУ.

Выпадения всех изученных поллютантов на территории кампуса превысили фоновые значения в несколько раз, наибольшая иммиссия характерна для Sb и W ($K_d = 34–40$). В рекреационной зоне выявлены самые высокие значения K_d для большинства элементов, что можно объяснить осаждением ММ, поступающих из транспортной зоны. Для W, Sb, Cu, Sr, Zn и Cd максимальные значения приурочены к селитебной зоне.

Среднее значение суммарного показателя загрязнения твердой фазы снега $Z_c = 68$, что соответствует высокому уровню загрязнения и опасной для здоровья человека экологической ситуации. Почти для половины (45%) изученной территории характерен средний уровень загрязнения ($Z_c = 32–64$). Суммарная иммиссия элементов Z_d составляет в среднем 370, уменьшаясь от рекреационной зоны ($Z_d = 413$) к транспортной ($Z_d = 270$), что соответствует слабому загрязнению с неопасной экологической ситуацией. Максимум $Z_d = 1764$ со средним уровнем загрязнения установлен в рекреационной зоне на стадионе МГУ. Выявлены три локальных максимума Z_d , связанные с максимальной пылевой нагрузкой P_n . Таким образом, выпадения ММ на территории МГУ обусловлены, в первую очередь, количеством выпадающей пыли и в меньшей степени ее химическим составом.

Основными источниками ММ в пылевой составляющей снега на территории МГУ являются выбросы автомобильного транспорта, природно-техногенные источники (загрязненные почвы, дорожная пыль и стройматериалы) и, в меньшей степени, выбросы промышленных предприятий.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 19-77-30004-П). Авторы благодарны студентам кафедры геохимии ландшафтов и географии почв, принимавшим участие в полевых и лабораторных работах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антропогенные почвы: генезис, география, рекультивация / М.И. Герасимова и др. Смоленск: Ойкумена, 2003. 268 с.
- Геохимия окружающей среды / Ю.Е. Саэт и др. М.: Недра, 1990. 335 с.
- Геохимия ландшафтов Восточной Москвы / Н.С. Касимов и др. М.: АПР, 2016. 276 с.
- Макарова Н.В., Григорьева С.В. Геоморфологическое районирование территории Москвы в новых границах // Геоморфология и палеогеография. 2019. № 4. С. 56–68.
- Московченко Д.В., Пожитков Р.Ю., Соромотин А.В. Геохимическая характеристика снежного покрова г. Тобольск // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021а. Т. 332. № 5. С. 156–169.
- Московченко Д.В., Пожитков Р.Ю., Курчатова А.Н., Тимшианов Р.И. Геохимическая характеристика снежного покрова Тюмени // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2021б. № 3. С. 13–26.
- Alves C.A., Vicente A.M.P., Calvo A.I. et al. Physical and chemical properties of non-exhaust particles generated from wear between pavements and tyres, *Atmos. Environ.*, 2020, vol. 224, p. 24–35, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2019.117252.
- Chen X., Lu X. Contamination characteristics and source apportionment of potentially toxic elements in the topsoil of Huyi District, Xi'an City, China, *Environmental Earth Sciences*, 2021, vol. 80, p. 1–10.
- Huang Y., Deng M., Wu S. et al. A modified receptor model for source apportionment of heavy metal pollution in soil, *J. Hazard. Mater.*, 2018, no. 354, p. 161–169.
- Jiang H.H., Cai L.M., Wen H.H. et al. Characterizing pollution and source identification of heavy metals in soils using geochemical baseline and PMF approach, *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, no. 1, p. 6460.
- Kasimov N., Chalov S., Chubarova N. et al. Urban heat and pollution island in the Moscow megacity: Urban environmental compartments and their interactions, *Urban Climate*, 2024, no. 55, p. 101972, DOI: 10.1016/j.uclim.2024.101972.
- Kosheleva N.E., Vlasov D.V., Korlyakov I.D. et al. Contamination of urban soils with heavy metals in Moscow as affected by building development, *Science of the Total Environment*, 2018, no. 636, p. 854–863, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.308.
- Limbeck A., Puls C. Particulate emissions from on-road vehicles, *Urban Airborne Particulate Matter. Origin, Chemistry, Fate and Health Impacts*, Springer-Verlag Berlin, 2011, p. 63–76.
- Rudnick R., Gao S. Composition of the Continental Crust, *Treatise on Geochemistry*, Elsevier Ltd, 2014, vol. 4, p. 1–64.
- Seleznev A., Yarmoshenko I., Malinovsky G. et al. Snow-dirt sludge as an indicator of environmental and sedimentation processes in the urban environment, *Sci. Rep.*, 2019, no. 9, p. 17241.
- Serdyukova A.D., Vlasov D.V., Popovicheva O.B. et al. Elemental composition of atmospheric PM10 during COVID-19 lockdown and recovery periods in Moscow (April–July 2020), *Environmental Geochemistry and Health*, 2023, vol. 45, no. 11, p. 7909–7931.
- Shafer M.M., Toner B.M., Overdier J.T. et al. Chemical speciation of vanadium in particulate matter emitted from diesel vehicles and urban atmospheric aerosols, *Environmental Science & Technology*, 2012, vol. 46, no. 1, p. 189–195, DOI: 10.1021/es200463c.
- Sicard P., Agathokleous E., Anenberg S.C. et al. Trends in urban air pollution over the last two decades: A global perspective, *Science of The Total Environment*, 2023, vol. 858, p. 160064.
- Song Y., Xie S., Zhang Y. et al. Source apportionment of PM2.5 in Beijing using principal component analysis/ absolute principal component scores and UNMIX, *Science of the Total Environment*, 2006, vol. 372, no. 1, p. 278–286.
- Varentsov M., Wouters H., Platonov V. et al. Megacity-Induced Mesoclimatic Effects in the Lower Atmosphere: A Modeling Study for Multiple Summers over Moscow, Russia, *Atmosphere*, 2018, no. 9, DOI: 10.3390/atmos9020050.
- Vasić M.V., Mihailovic A., Kozmidis-Luburic U. et al. Metal Contamination of Short-term Snow Cover near Urban Crossroads: Correlation Analysis of Metal Content and Fine Particles Distribution, *Chemosphere*, 2012, no. 86, p. 585–592.
- Vlasov D., Vasil'chuk J., Kosheleva N., Kasimov N. Dissolved and suspended forms of metals and metalloids in snow cover of megacity: Partitioning and deposition rates in western Moscow, *Atmosphere*, 2020, vol. 11, no. 9, p. 907, DOI: 10.3390/atmos11090907.
- Vlasov D.V., Vasil'chuk J.Yu., Kosheleva N.E., Kasimov N.S. Contamination levels and source apportionment of potentially toxic elements in size-fractionated road dust of Moscow, *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, vol. 30, p. 38099–38120, DOI: 10.1007/s11356-022-24934-1.
- Yang Y., Yang X., He M. et al. Beyond mere pollution source identification: Determination of land covers emitting soil heavy metals by combining PCA/APCS, GeoDetector and GIS analysis, *Catena*, 2020, no. 185, p. 104297.

Электронный ресурс

Гидрометцентр России: итоги февраля и зимы в Москве. URL: <https://meteoinfo.ru/> (дата обращения 03.05.2023).

Поступила в редакцию 20.05.2024

После доработки 10.06.2024

Принята к публикации 26.06.2024

GEOCHEMISTRY OF SNOW COVER WITHIN THE TERRITORY OF THE LOMONOSOV MOSCOW STATE UNIVERSITY

N.E. Kosheleva¹, D.G. Sycheva², N.S. Kasimov³

¹⁻³ *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography*

¹ *Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: nataalk@mail.ru*

² *Ph.D. student; e-mail: lmsu@yandex.ru*

³ *Academician, D.Sc. in Geography; e-mail: nskasimov@geogr.msu.ru*

The concentrations of suspended forms of metals and metalloids in snow cover within the territory of the Moscow State University (MSU) and the rate of their deposition were determined for the 2021/22 winter period. The content of Zn, As, Cd, Pb, Cr, Ni, Cu, Sb, V, Mn, Bi, Mo, Co, W, Sr, Be, Ti, Ag, Sn and Fe was analyzed. Anthropogenic impact in Moscow caused an increase in solid fallout from the atmosphere to an average of 27 kg/km² per day, which is 5.4 times more than in the background area. W, Sb, Sn, Sr, Cd and Bi accumulate the most intensively in the solid phase of snow cover, their concentrations exceed the background by an average of 5.2–9.7 times. The snow cover of the residential zone is the most contaminated, where Sb, W, Cd, Bi, Sn and Sr accumulate; their content exceeds the background by 4.1–12 times. Medium level of total contamination of the solid phase of snow ($Z_c = 32–64$) was detected over 45% of the studied territory. The maximum intensity of pollutant fallout was recorded in the recreational zone ($Z_d = 413$). The highest levels of dust load (141 kg/km² per day) and the total immission indicator ($Z_d = 1764$) were recorded for the territory of the MSU stadium. Using the APCA-MLR method, three main sources of pollutants were identified, i. e. emissions from motor vehicles govern the influx of Fe, Cr, V, Ni, Pb, Co, Mo, W, Sn, and Zn, natural-technogenic sources determine the accumulation of Be, Ti, Bi, Mn, Sb, Mo, As, and Sr, while industrial emissions provide for Cu, Pb and Cr.

Keywords: metals, metalloids, Moscow, atmospheric deposition

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project 19-77-30004-II). The authors would like to thank the students of the department who participated in field and laboratory work.

REFERENCES

- Alves C.A., Vicente A.M.P., Calvo A.I. et al. Physical and chemical properties of non-exhaust particles generated from wear between pavements and tyres, *Atmos. Environ.*, 2020, vol. 224, p. 24–35, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2019.117252.
- Antropogennyye pochvy: genezis, geografiya, rekul'tivatsiya* [Anthropogenic soils: genesis, geography, reclamation], M.I. Gerasimova (ed.), Smolensk, Oikumena Publ., 2003, 268 p. (In Russian)
- Chen X., Lu X. Contamination characteristics and source apportionment of potentially toxic elements in the topsoil of Huyi District, Xi'an City, China, *Environmental Earth Sciences*, 2021, vol. 80, p. 1–10.
- Geokhimiya landshaftov Vostochnoi Moskvy* [Geochemistry of landscapes in the Eastern District of Moscow], N.S. Kasimov (ed.), Moscow, APR Publ., 2016. 276 p. (In Russian)
- Geokhimiya okruzhayushchei sredy* [Geochemistry of the environment], Yu.E. Saet (ed.), Moscow, Nedra Publ., 1990. 335 p. (In Russian)
- Huang Y., Deng M., Wu S. et al. A modified receptor model for source apportionment of heavy metal pollution in soil, *J. Hazard. Mater.*, 2018, no. 354, p. 161–169.
- Jiang H.H., Cai L.M., Wen H.H., Luo J. Characterizing pollution and source identification of heavy metals in soils using geochemical baseline and PMF approach, *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, no. 1, p. 6460.
- Kasimov N., Chalov S., Chubarova N. et al. Urban heat and pollution island in the Moscow megacity: Urban environmental compartments and their interactions, *Urban Climate*, 2024, no. 55, p. 101972, DOI: 10.1016/j.uclim.2024.101972.
- Kosheleva N.E., Vlasov D.V., Korlyakov I.D., Kasimov N.S. Contamination of urban soils with heavy metals in Moscow as affected by building development, *Science of the Total Environment*, 2018, no. 636, p. 854–863, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.308.
- Limbeck A., Puls C. Particulate emissions from on-road vehicles, *Urban Airborne Particulate Matter. Origin, Chemistry, Fate and Health Impacts*, Springer-Verlag Berlin, 2011, p. 63–76.
- Makarova N.V., Grigor'eva S.V. Geomorfologicheskoe raionirovanie territorii Moskvy v novykh granitsakh [Geomorphologic zoning of the territory of Moscow within the new boundaries], *Geomorfologiya i paleogeografiya*, 2019, no. 4, p. 56–68. (In Russian)
- Moskovchenko D.V., Pozhitkov R.Yu., Soromotin A.V. Geokhimicheskaya kharakteristika snezhnogo pokrova g. Tobol'sk [Geochemical characteristics of snow cover in the city of Tobolsk], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2021a, vol. 332, no. 5, p. 156–169. (In Russian)
- Rudnick R., Gao S. Composition of the Continental Crust. *Treatise on Geochemistry*, Elsevier Ltd, 2014, vol. 4, p. 1–64.
- Seleznev A., Yarmoshenko I., Malinovsky G. et al. Snow-dirt sludge as an indicator of environmental and sedimentation processes in the urban environment, *Sci. Rep.*, 2019, no. 9, p. 17241.

- Serdyukova A.D., Vlasov D.V., Popovicheva O.B. et al. Elemental composition of atmospheric PM10 during COVID-19 lockdown and recovery periods in Moscow (April–July 2020), *Environmental Geochemistry and Health*, 2023, vol. 45, no. 11, p. 7909–7931.
- Shafer M.M., Toner B.M., Overdier J.T. et al. Chemical speciation of vanadium in particulate matter emitted from diesel vehicles and urban atmospheric aerosols, *Environmental Science & Technology*, 2012, vol. 46, no. 1, p. 189–195, DOI: 10.1021/es200463c.
- Sicard P., Agathokleous E., Anenberg S.C. et al. Trends in urban air pollution over the last two decades: A global perspective, *Science of the Total Environment*, 2023, vol. 858, p. 160064.
- Song Y., Xie S., Zhang Y. et al. Source apportionment of PM2.5 in Beijing using principal component analysis/absolute principal component scores and UNMIX, *Science of the Total Environment*, 2006, vol. 372, no. 1, p. 278–286.
- Varentsov M., Wouters H., Platonov V., Konstantinov P. Megacity-Induced Mesoclimatic Effects in the Lower Atmosphere: A Modeling Study for Multiple Summers over Moscow, Russia, *Atmosphere*, 2018, no. 9, DOI: 10.3390/atmos9020050.
- Vasić M.V., Mihailovic A., Kozmidis-Luburic U. et al. Metal Contamination of Short-term Snow Cover near Urban Crossroads: Correlation Analysis of Metal Content and Fine Particles Distribution, *Chemosphere*, 2012, no. 86, p. 585–592.
- Vlasov D., Vasil'chuk J., Kosheleva N., Kasimov N. Dissolved and suspended forms of metals and metalloids in snow cover of megacity: Partitioning and deposition rates in western Moscow, *Atmosphere*, 2020, vol. 11, no. 9, p. 907, DOI: 10.3390/atmos11090907.
- Yang Y., Yang X., He M., Christakos G. Beyond mere pollution source identification: Determination of land covers emitting soil heavy metals by combining PCA/APCS, GeoDetector and GIS analysis, *Catena*, 2020, no. 185, p. 104297.
- Web sources*
Gidromettsentr Rossii [Hydrometeorological Center of Russia], Itogi fevralya i zimy v Moskve [Totals of February and winter in Moscow], URL: <https://meteoinfo.ru/> (access date 03.05.2023).

Received 20.05.2024

Revised 10.06.2024

Accepted 26.06.2024