

## ИСТОЧНИКИ, ПУТИ И МАСШТАБЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ

УДК 504.054631.41631.416.9

### ЗАГРЯЗНЕНИЕ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ И МЕТАЛЛОИДАМИ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЧВ г. СЕВЕРОБАЙКАЛЬСКА<sup>1</sup>

© 2022 г. Н. Е. Кошелева<sup>а</sup>, \*, Е. М. Никифорова<sup>а</sup>, И. В. Тимофеев<sup>а</sup>

<sup>а</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

\*e-mail: [natalk@mail.ru](mailto:natalk@mail.ru)

Поступила в редакцию 15.11.2021 г.

После доработки 14.12.2021 г.

Принята к публикации 30.12.2021 г.

На основе данных геохимической съемки территории г. Северобайкальска (Республика Бурятия) летом 2018 г. определены содержание и пространственное распределение 15-ти тяжелых металлов и металлоидов (ТММ) в верхнем почвенном слое (0–10 см). Приоритетными загрязняющими ТММ верхнего слоя почв г. Северобайкальска являются Sb, Pb и W. Наиболее загрязненными являются почвы транспортной, промышленной и селитебной усадебной зон. В первых двух интенсивно накапливаются Sb, Pb, Cu, в усадебной застройке – Sb, W, Pb, Cd, Zn. ТММ образуют три ассоциации: V–Cr–Co–Ni ← Mn; Zn–Cd–Pb; Sn–Sb–Mo, поступающие из общих источников и обладающих близким распределением в почвенном покрове города. Аккумуляция ТММ в верхнем слое городских почв определяется содержанием оксидов Fe,  $C_{орг}$ , pH, а также функциональным назначением территории, определяющим источники и уровень техногенного воздействия на почвы. Техногенное воздействие привело к изменению свойств городских почв, которое усилило их способность к закреплению ТММ. Экологическая опасность загрязнения почв ТММ в целом для города отсутствует, но в селитебной усадебной и промышленной зонах треть их площади занимает почвы со слабым и умеренно опасными уровнями загрязнения. Образование нескольких контрастных полиэлементных аномалий в почвах на берегу р. Тьи и вблизи озера Байкал представляет угрозу для их вод из-за возможности поступления токсичных металлов с поверхностным и внутрипочвенным стоком.

**Ключевые слова:** приоритетные поллютанты, функциональные зоны, факторы аккумуляции, почвенные свойства, полиэлементные аномалии

DOI: 10.31857/S0032180X22050045

#### ВВЕДЕНИЕ

При антропогенном воздействии на городские ландшафты формируется особая среда, в которой в настоящее время проживает более половины населения Земли. Однако она не всегда является комфортной и благоприятной для его жизни [22]. Интенсивное техногенное воздействие, токсичные выбросы, отходы и стоки промышленных производств, автотранспорта, коммунально-бытовые отходы приводят к загрязнению всех компонентов городской среды. В наибольшей степени в городах трансформируются почвы, служащие индикатором экологического состояния ландшафтов и отражающие многолетний уровень загрязнения [11]. В России эколого-геохимический мониторинг городских почв как основного депонирующего компонента в экосистемах проводится преимущественно в крупных городах и мегаполи-

сах. Почвы малых и средних промышленных городов исследуются в меньшей степени, поэтому оценка их загрязнения является важной и актуальной задачей.

Приоритетными загрязнителями городской среды повсеместно являются тяжелые металлы и металлоиды (ТММ) [11]. В их группу входят 58 химических элементов с порядковым номером от 23 до 92 таблицы Д.И. Менделеева, начиная с V и заканчивая U, кроме инертных газов и галогенов [6]. Некоторые ТММ обладают высокой токсичностью и канцерогенной активностью, поэтому считаются суперзагрязнителями городской среды. Несмотря на низкий природный кларк многих ТММ в компонентах ландшафтов, их техногенные аномалии в верхних горизонтах почв могут создавать экологические риски для здоровья человека. Например, миграция по пищевым цепям и накопление малоизученной в экологическом плане Sb приводит к поражению нервной и сердечно-сосудистой систем, а вдыхание пыли, содержащей Sb, – к пневмонии, фиброзу и раку легких [38]. Отравле-

<sup>1</sup> Дополнительные материалы к этой статье доступны по doi 10.31857/S0032180X22050045 для авторизованных пользователей.

ние человека Си через пищу и воду ведет к тяжелым заболеваниям желудочно-кишечного тракта, печени и нервной системы, а вдыхание загрязненного Си воздуха вызывает системные поражения органов дыхания [28].

Важность изучения ТММ в городских почвах подтверждается высокими объемами их добычи в мире, которая сопровождается большим количеством выбросов, отходов и стоков различных производств. Увеличение техногенной нагрузки на окружающую среду отражает показатель технофильности, равный отношению ежегодной добычи или производства металлов к кларку того или иного элемента в литосфере [19], который за вторую половину XX в. для большинства ТММ увеличился в 2–5 раз. Рост содержания ТММ в окружающей среде в процессе техно- и урбогенеза вызвал “металлизацию” поверхности Земли [13].

Цель работы – оценить уровни содержания и опасность загрязнения ТММ почв г. Северобайкальска на основе данных геохимической съемки летом 2018 г. Этот город расположен на берегу оз. Байкал – уникального объекта, внесенного в список Всемирного наследия ЮНЕСКО. Ранее установлены главные элементы-загрязнители в снежном покрове [3], эколого-геохимическое состояние почв города детально не оценивалось. Решались следующие задачи:

- определить содержание и пространственное распределение ТММ в верхнем слое почв различных функциональных зон города;

- проанализировать основные свойства фоновых и городских почв, влияющих на накопление ТММ;

- выявить техногенные источники ТММ и факторы, способствующие формированию в почвах аномалий ТММ;

- дать оценку экологической опасности загрязнения городских почв ТММ.

## ИЗУЧАЕМАЯ ТЕРРИТОРИЯ

Город Северобайкальск расположен в Республике Бурятия, на северо-западном берегу оз. Байкал, что определяет не только актуальность, но и значимость работы. Город основан в 1974 г. как базовый лагерь строителей Бурятского участка Байкало-Амурской магистрали, сейчас является крупным транспортным узлом и промышленным центром.

**Природные условия.** Территория города находится на Северо-Байкальском нагорье. В его геологическом строении доминируют метаморфические и интрузивные коренные породы протерозоя и рыхлые четвертичные отложения, представленные пылеватыми песками и супесями [5]. На состояние приземного воздуха в городе большое влияние оказывает азиатский антициклон, при котором зимой

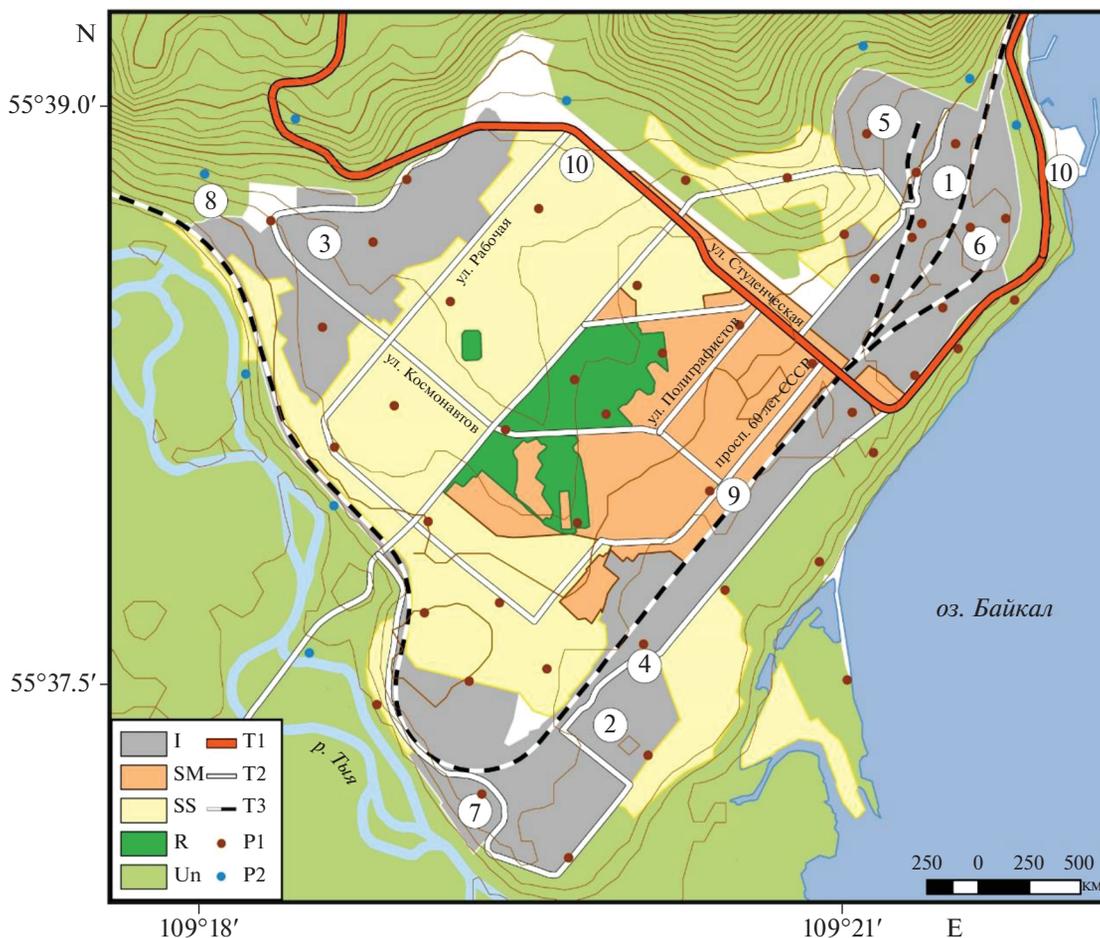
в понижениях рельефа происходит застой холодных масс, что приводит к температурным инверсиям, препятствующим выносу вредных примесей из атмосферы и их накоплению в почвах.

Природные (зональные) почвы относятся к Прибайкальской предгорной провинции грубогумусовых почв высоко- и среднегорного Байкальского округа [27]. Структура почвенного покрова горно-таежной зоны Северного Прибайкалья неоднородна и во многом связана с проявлением вертикальной поясности и экспозицией склонов. Основной фон почвенного покрова региона составляют подбуры (Entic Podzols), подзолы (Albic Podzols), дерново-подзолы (Albic Podzols), дерново-подбуры (Entic Podzols) и буроземы грубогумусовые (Folic Cambisols) [1, 25]. Почвы характеризуются слабой дифференциацией и малой мощностью профиля, которая в подзолах составляет около 40 см. Почвы имеют облегченный гранулометрический состав и высокую степень щебнистости, их водный режим относится к промывному типу, таежно-длительно-сезонномерзлотному подтипу, а температурный – к длительно-сезоннопромерзающему типу [26].

На городской территории многие природные типы почв в той или иной степени техногенно-трансформированы и химически преобразованы, в некоторых утрачены генетические признаки исходных зональных типов, снижена обеспеченность элементами минерального питания растений, заторможена минерализация отмерших остатков, изменено гумусное состояние, повышено содержание токсичных элементов [18]. Верхний слой получен перемешиванием, насыпанием, погребением или загрязнением урбаногенного материала. Такие почвы относятся к группе собственно городских почв – урбаноземов с одним или несколькими горизонтами “урбик” UR, состоящими из своеобразного пылеватого-гумусового субстрата разной мощности и качества с примесью строительного бытового мусора [8].

**Функциональная структура территории.** Функциональная структура города играет ведущую роль в формировании техногенных аномалий ТММ в почвах, поэтому проведено функциональное зонирование территории г. Северобайкальска и выделены пять зон: промышленная, транспортная, рекреационная, селитебная с усадебной застройкой и многоэтажная жилая зона (рис. 1). Карта функциональных зон составлена на основе “Схемы существующего использования территории городского округа” и дешифрирования космических снимков Google Earth.

Промышленная зона включает ряд предприятий, расположенных в разных частях города. Действующие предприятия: нефтебаза, Центральная и две районные ТЭЦ, очистные сооружения, производство строительных материалов (ОАО Трест



**Рис. 1.** Карта фактического материала. Функциональные зоны: I – промышленная, SM – селитебная с городской застройкой, SS – селитебная с одноэтажной застройкой, R – рекреационная, Un – незастроенные и малоиспользуемые территории. T1 – крупные автодороги, T2 – мелкие автодороги, T3 – железные дороги. Точки отбора проб из верхнего слоя почв: P1 – городских, P2 – фоновых. Цифрами на карте обозначены основные источники техногенного воздействия: 1 – центральная котельная, 2 – котельная № 11, 3 – котельная № 12, 4 – хлебозавод, 5 – нефтебаза, 6 – локомотивное депо, 7 – очистные сооружения, 8 – городская свалка, 9 – железнодорожная станция, 10 – воинская часть.

“Запбамстроймеханизация”) на северо-западе, сервисы для автомобилистов на северо-востоке (СТО “Мотор” и др.), хлебозавод и другие производства легкой и пищевой промышленности. К транспортной зоне относятся крупные автомагистрали (Усть-Кут–Уоян, автодублер БАМа, проспекты Ленинградский и 60 лет СССР), средние автомагистрали (ул. Рабочая, Космонавтов, Полиграфистов, Студенческая) и более мелкие внутриквартальные дороги. Селитебная зона объединяет жилые кварталы с разной плотностью застройки, здания обществено-делового назначения, культурного, образовательного и медицинского характера, торговые центры. Большая их доля сосредоточена в центральной части города. Рекреационная зона представлена парками в центре города, в нее входит также прибрежная часть озера Байкал, яхт-клуб, пляжи и набережная. Основную часть территории города (36%) занимает селитебная зо-

на, в том числе 26% – усадебная, 10% – многоэтажная, 25% – рекреационная зона, транспортная и промышленная зоны составляют 17 и 22% соответственно.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

На территории Северобайкальска и окрестностей проведено опробование верхнего (0–10 см) слоя почв по регулярной сетке с шагом 500–600 м, согласно европейской методике [30]. Он представляет собой верхнюю часть (UR1) горизонта “урбик” – гетерогенного гумусово-аккумулятивного горизонта буровато-серого или коричневатого цвета, непрочно комковатого, часто бесструктурного с большим количеством антропогенных включений. В качестве природного фона опробована верхняя часть (0–10 см) гумусово-аккумулятивного горизонта природных почв в

ненарушенных ландшафтах Северного Прибайкалья. В ходе съемки собрано 47 смешанных (в 3–4 повторностях) проб почв в различных функциональных зонах города, две смешанные пробы золы и каменного угля с территории Центральной ТЭЦ и 10 проб фоновых почв.

Валовое содержание ТММ в почвах, буром угле и золе ТЭЦ анализировалось масс-спектральными (ICP-MS) и атомно-эмиссионным (ICP-AES) методами с индуктивно-связанной плазмой во ВНИИ минерального сырья им. Н.М. Федоровского на приборах Elan-6100 и Optima-4300 (Perkin Elmer, США). Для детального анализа выбрано 15 элементов, относящихся к I (Zn, As, Pb, Cd), II (Cr, Co, Cu, Mo, Ni, Sb) и III (V, W, Mn) классам опасности, а также Sn и Bi.

Основные свойства почв определялись общепринятыми в РФ методами [16]: актуальная кислотность ( $\text{pH}_{\text{вод}}$ ) – в водной суспензии на стационарном приборе “Эксперт-pH”, содержание  $\text{C}_{\text{орг}}$  – методом Тюрина с титриметрическим окончанием, гранулометрический состав – на лазерном микроанализаторе размеров частиц Analyzette 22 comfort (Германия), растворимые вещества-электролиты – по удельной электропроводности ( $\text{EC}_{1:5}$ ) водной вытяжки на кондуктометре SevenEasy S30 (Mettler Toledo) в Эколого-геохимическом центре географического факультета МГУ.

Аналитические данные группировались по функциональным зонам и обрабатывались статистическими методами в программных пакетах MS Excel и Statistica 10. В верхнем слое городских почв рассчитывались коэффициенты накопления  $K_c = C_g/C_f$  и рассеяния  $K_p = C_f/C_g$  относительно фоновых аналогов, где  $C_g$ ,  $C_f$  – концентрации ТММ в городских и фоновых почвах соответственно. Суммарное загрязнение почв ТММ оценивалось по показателю  $Z_c = \sum K_c - (n - 1)$ , при расчете которого учитывались  $n$  элементов с  $K_c > 1$ . Показатель  $Z_c$  имеет 5 градаций: <16 – низкое, неопасное загрязнение, 16–32 – среднее, умеренно опасное, 32–64 – высокое, опасное, 64–128 – очень высокое, очень опасное, >128 – максимальное, чрезвычайно опасное [7, 12]. Региональные особенности фоновых почв определялись путем расчета кларков концентрации  $KK = C_f/K$  (при  $K < C_f$ ) или рассеяния  $KP = K/C_f$  (если  $K > C_f$ ) относительно среднемировых уровней элементов в почвах  $K$  [33]. Концентрации ТММ в бурых углях  $\text{Cu}$  и золе  $\text{C}_3$  Центральной ТЭЦ сравнивались со средними значениями ТММ в бурых углях  $K_u$  и золе мира  $K_z$  [28] с расчетом коэффициентов концентрации  $KK_u = C_u/K_u$  и  $KK_z = C_3/K_z$ .

Экологическая опасность отдельных ТММ в почвах оценивалась путем расчета коэффициента  $K_o = C_g(i)/\text{ПДК}i$ , где ПДК $i$  – ПДК (ОДК)  $i$ -го элемента, мг/кг. Содержания V, Sb сравнивались с ПДК в почвах, Cu, As, Cd, Ni, Pb, Zn – с ОДК [24].

Картографирование степени загрязнения почв по суммарному показателю  $Z_c$  выполнено в пакете ArcGIS 10 с помощью градуированных символов.

Для выделения парагенетических ассоциаций ТММ со сходными тенденциями к накоплению и выносу из почв в различных ландшафтно-геохимических условиях использовался алгоритм иерархической кластеризации Complete linkage в пакете Statistica 10 [23]. Теснота связей между элементами и их статистическая значимость оценивались с помощью корреляционного анализа. Ведущие факторы, влияющие на аккумуляцию ТММ в городских почвах, определялись по дендрограммам, построенным в пакете Splus методом регрессионных деревьев [15]. Моноэлементные геохимические карты составлялись в пакете ArcGIS 10.6.1 методом сплайн-интерполяции, карты функционального зонирования и фактического материала – в пакетах Global Mapper 8 и Google Earth Pro.

## ИСТОЧНИКИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОИДОВ

Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу Северобайкальска от стационарных источников в 2017 г. составили 2.6 тыс. т [9]. Основными поставщиками тепловой энергии в городе являются Центральная ТЭЦ и районные котельные, использующие в качестве топлива бурые угли Канско-Ачинского бассейна. Эти угли отличаются малой зольностью – 2–10%, низким содержанием серы – 0.2–1.2% и пониженными концентрациями большинства ТММ [10].

Анализ химического состава Канско-Ачинских бурых углей и золы с территории Центральной ТЭЦ г. Северобайкальска (табл. 1) выявил наибольшее накопление в углях Sr ( $KK_u = 3.07$ ), Ba (2.36), Mn (1.08), а в золе – Mn ( $KK_z = 2.4$ ) и Ni (1.04) относительно среднемировых данных [28], остальные ТММ характеризуются низкими содержаниями. Таким образом, углефилльность выражена только у Sr, Ba, Mn.

Сравнение фактического содержания ТММ в золе и рассчитанного по содержанию ТММ в углях и их средней зольности показало, что все рассматриваемые ТММ способны конденсироваться на выбрасываемых аэрозолях, улетучиваться с дымовыми газами ТЭЦ и осаждаться на поверхности городских почв. Наибольшей летучестью обладают Pb, Bi, Sn, Cd, Sr, Ba, Zn, Sb, W, имеющие в 16–5.5 раза более низкую концентрацию в золе по сравнению с рассчитанной.

Объектами транспортной инфраструктуры, оказывающими большое влияние на загрязнение атмосферы и почв г. Северобайкальска, являются локомотивное депо, вагонное хозяйство, площадки разгрузки угля и др., а также улично-дорожная сеть. Выбросы предприятий железнодоро-

**Таблица 1.** Среднее содержание тяжелых металлов и металлоидов в угле и золе Центральной ТЭЦ г. Северобайкальска в сравнении с их мировыми кларками [28]

Элемент	Уголь	Кларк угля	ККу	Зола	Кларк золы	ККз	Зола рас- считанная, мг/кг	Кл*
	мг/кг			мг/кг				
Sr	337.6	110	3.07	682.0	740	0.92	5627	8.25
Ba	353.5	150	2.36	748.6	920	0.81	5892	7.87
Mn	108.4	100	1.08	1316	550	2.4	1807	1.37
Ni	12.1	13	0.93	79.1	76	1.04	201.7	2.55
Zn	18.7	23	0.81	47.8	140	0.34	311.7	6.52
Co	2.88	5.1	0.56	21.8	32	0.68	48.0	2.20
Sn	0.51	1.1	0.46	0.73	6.4	0.11	8.5	11.64
Pb	3.31	7.8	0.42	3.42	47	0.07	55.2	16.13
Cr	5.72	16	0.36	26.8	100	0.27	95.3	3.56
V	8.71	25	0.35	48.8	155	0.31	145.2	2.97
Cu	4.78	16	0.30	17.7	92	0.19	79.7	4.50
Cd	0.05	0.22	0.23	0.1	1.2	0.08	0.8	8.33
W	0.2	1.1	0.18	0.61	6.9	0.09	3.3	5.46
Sb	0.1	0.92	0.11	0.27	6.3	0.04	1.7	6.17
Mo	0.22	2.2	0.10	1.57	14	0.11	3.7	2.34
Bi	0.075	0.97	0.08	0.09	5.9	0.02	1.3	13.9
As	0.28	8.3	0.03	2.44	47	0.05	4.7	1.91

\* Кл – коэффициент летучести, равный отношению рассчитанной и фактической концентраций элемента.

рожного транспорта содержат пыль, сажу, оксид углерода, диоксиды серы и азота, фтористые соединения, углеводороды, сероводород, ГММ и др. [35]. Высокие уровни Cd, Cu, Zn, Pb, As отмечены в почвах вблизи железнодорожных путей на Белорусском и трех вокзалах г. Москвы [17]. При мойке железнодорожных составов в локомотивных депо образуются значительные объемы стоков, содержащие Ni, Cr, Cu, Cd, Cl, Pb, Sb, Zn [21].

Воздействие автотранспорта обусловлено выхлопными газами, содержащими Pb, Cu, Sr; утечками моторного масла – Zn, Pb, Cu, Sb, Mo; а также истиранием шин – Cd, Zn, Pb, Co, Ni, Cr, Cu, Sb, тормозных колодок – Cu, Sb, Zn, Pb и дорожного полотна – Ag, Zn, As, W, Cr, V, Co [14]. Высокие уровни W и Zn обусловлены ускоренным истиранием шин и износом тормозных колодок при неравномерном режиме движения [29]. Исследования на востоке Москвы показали, что все компоненты городской среды накапливают Sb, W, Sn, а тонкие фракции дополнительно обогащены Cd, Zn, Cu, Pb, Mo, Bi, особенно сильно на крупных дорогах [34]. Sb и Pb зачастую используются для индикации истирания тормозных колодок и дисков [31, 32, 37], а Zn, W, Co и Cd – износа шин и дорожного полотна [29, 36].

Промышленные объекты – “Нижнеангарскстрой”, передвижная механизированная колон-

на, “ЛенБАМстрой”, асфальтобетонный завод – могут поставлять в городскую среду широкий спектр ГММ [3, 4]. Производство строительных материалов связано с переработкой природных пород (известняка, глины, песка, гранита и др.) и искусственных веществ. С выбросами этих производств в городскую атмосферу, как правило, поступают Ag, Pb, W, Sb, Zn [7], а также Al, As, Be, Cd, Co, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Tl, V [30].

Очистные сооружения образуют отходы и сточные воды, обогащенные широким спектром токсичных элементов; обычно со стоками в почву попадают Al, As, Ca, Cd, Cl, Cr, Cu, Fe, Hg, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Sb, Se, Zn [30]. Источниками загрязнения почв города также являются свалки бытовых и промышленных отходов, только за 2017 г. было сформировано 9.6 тыс. т отходов [9].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Основные свойства фоновых и городских почв.** Верхний слой фоновых почв Северного Прибайкалья супесчаный (19% физической глины – частиц диаметром менее 0.01 мм), с нейтральной реакцией среды (средний pH 6.9), низкой минерализацией водной вытяжки ( $EC_{1:5}$  102 мкСм/см) и невысоким содержанием органического углерода ( $C_{орг}$  2.8%). Воздействие источников загрязнения на город-

**Таблица 2.** Основные свойства верхнего (0–10 см) слоя фоновых почв Северного Прибайкалья и городских почв по функциональным зонам г. Северобайкальска

Функциональная зона (число проб)	Содержание физической глины, %	pH <sub>вод</sub>	ЕС <sub>1:5</sub> , мкСм/см	C <sub>орг</sub> , %
Фоновая (10)	19.1* (14.2–26.0)	6.9 (5.86–7.52)	102 (37.9–159)	2.8 (1.41–6.42)
Селитебная (усадебная) (9)	19.2 (15.1–24.2)	7.3 (6.94–8.14)	146 (54.3–328)	2.7 (1.18–6.45)
Селитебная (многоэтажная) (5)	19.4 (16.2–24.7)	7.7 (7.24–8.18)	131 (99.9–180)	1.7 (0.97–2.58)
Рекреационная (12)	18.8 (5.8–25.2)	6.8 (4.97–7.75)	121 (47.8–202)	3.0 (1.65–4.70)
Транспортная (9)	21.6 (9.6–29.1)	7.6 (6.77–8.22)	124 (72.5–158)	2.4 (0.71–4.4)
Промышленная (12)	23.4 (16.2–32.2)	7.7 (6.75–8.05)	128 (70.7–190)	4.1 (1.20–15.59)
Среднее по городу (47)	20.6 (5.8–32.2)	7.4 (4.97–8.22)	129 (47.8–328)	3.0 (0.71–15.59)

\* Средние, в скобках – минимальные и максимальные значения.

ские почвы привело к трансформации их физико-химических свойств, определяющих сорбционную способность по отношению к ТММ (табл. 2, рис. S1).

Гранулометрический состав городских почв не отличается от фоновых, за исключением промышленной и транспортной зон, где содержание физической глины увеличивается за счет поступления тонких частиц техногенного происхождения. В этих зонах преобладают почвы легкосуглинистого состава при супесчаных почвах на остальной территории.

Практически во всех функциональных зонах Северобайкальска, кроме рекреационной, происходит техногенное подщелачивание почв – среднее значение pH по сравнению с фоном (6.9) увеличилось до 7.4 при максимальном 8.2 в почвах транспортной зоны. Наиболее кислые почвы (pH 5.0) приурочены к заболоченным участкам рекреационной зоны на юго-востоке города, а наиболее щелочные (pH 8.2–8.1) встречаются локальными ареалами на северо-западе и северо-востоке города в селитебной многоэтажной, промышленной и транспортной зонах. Увеличение pH объясняется поступлением в городские почвы карбонатной пыли от промышленных производств, в особенности, строительных материалов, а также использованием противогололедных реагентов в зимний период. Среднее значение pH в почвах уменьшается в ряду функциональных зон: селитебная многоэтажная (7.69) > промышленная (7.65) > транспортная (7.56) > селитебная усадебная (7.33) > рекреационная (6.79). В первых трех зонах проявляется значимое подщелачиваю-

щее воздействие карбонатной строительной пыли, в усадебной зоне отличия pH от фоновых значений незначимы, в рекреационной зоне средняя величина pH практически совпадает с фоновой.

В городских почвах выявлена повышенная минерализация водной вытяжки по сравнению с фоновым уровнем, что указывает на развитие антропогенного засоления верхнего слоя. Величины ЕС<sub>1:5</sub> колеблются от минимального 47.8 мкСм/см в почвах рекреационной зоны до 328 мкСм/см в селитебной многоэтажной зоне, составляя в среднем 129.3 мкСм/см. Высокая минерализация водной вытяжки связана с использованием противогололедных реагентов в зимний период, солевыми отходами промышленных объектов и коммунально-бытовыми стоками. В городских почвах наблюдается также увеличение содержания C<sub>орг</sub> по сравнению с фоновыми почвами (табл. 2). При незначительном отличии среднего содержания C<sub>орг</sub> в городских почвах (3%) от фонового (2.8%) в промышленной зоне величина C<sub>орг</sub> составляет 4.1%. Повышенные до 15.6% значения C<sub>орг</sub> в почвах зафиксированы на северо-востоке города и обусловлены выбросами частиц золы от тепловой электростанции, котельных и узла железнодорожного транспорта (рис. S1). Другой максимум C<sub>орг</sub> приурочен к рекреационной зоне – парку в центре города.

**Содержание ТММ в фоновых и городских почвах.** Верхний слой фоновых почв Северного Прибайкалья относительно среднемировых уровней элементов в почвах [33] содержит низкие концентрации большинства ТММ. Природные почвы обогащены только Mn (KK = 2.4) и Zn (KK = 1.6),

**Таблица 3.** Среднее содержание тяжелых металлов и металлоидов (мг/кг) в верхнем (0–10 см) слое фоновых почв Северного Прибайкалья в сравнении со среднемировым содержанием [33] и почв г. Северобайкальска в сравнении с фоновыми почвами

Элемент	Фоновые почвы (число проб $n = 10$ )				Городские почвы ( $n = 47$ )		
	среднее содержание	мировой кларк [33]	<i>КК</i>	<i>Кр</i>	среднее содержание	<i>Кс</i>	<i>Кр</i>
Sb	0.27	0.67	–	2.5	0.74	2.7	–
Pb	20.7	27.0	–	1.3	33.9	1.6	–
W	1.12	1.70	–	1.5	1.66	1.5	–
Cu	22.0	38.9	–	1.8	27.9	1.3	–
Cd	0.23	0.41	–	1.8	0.28	1.2	–
Zn	115.0	70.0	1.6	–	125	1.1	–
Sn	3.25	2.50	1.3	–	3.55	1.1	–
Co	16.4	11.3	1.4	–	16.0	–	1.0
Ni	37.9	29.0	1.3	–	37.4	–	1.0
Bi	0.25	0.42	–	1.7	0.22	–	1.1
Cr	78.6	59.5	1.3	–	69.1	–	1.1
V	90.4	129	–	1.4	85.7	–	1.1
Mo	0.78	1.10	–	1.4	0.74	–	1.1
Mn	1166	488	2.4	–	897	–	1.3
As	6.83	3.79	–	1.8	2.13	–	1.8

Примечание. Прочерк – показатель не рассчитывался.

что объясняется их биогенной аккумуляцией в гумусовом горизонте. Остальные ТММ рассеиваются – Sb, Cu, Cd, As, Bi, W (*КР* 2.5–1.5), Mo, V (*КР* 1.4) или имеют содержания, близкие к фоновым Pb, Co, Cr, Sn (табл. 3).

В верхнем слое городских почв относительно местного фона накапливаются три элемента – Sb, Pb, W со средними *Кс* 2.6–1.5. Состав элементов-загрязнителей и уровни их содержания довольно существенно различаются по функциональным зонам (табл. S1), что наглядно отражают геохимические спектры (рис. 2). Эти различия обусловлены различным вкладом источников загрязнения – выбросов автотранспорта, ТЭЦ, котельных и предприятий по обслуживанию железной дороги, отходов других промышленных предприятий и бытовых отходов. Наиболее загрязненными ТММ являются почвы транспортной, промышленной и селитебной усадебной зон. В первых двух наиболее интенсивным накоплением отличаются элементы с высокой технофильностью – Sb, Pb, Cu (*Кс* 4.2–1.4) [13]. Почвы селитебной усадебной зоны накапливают Sb, W, Pb, Cd, Zn (*Кс* 2.7–1.4), а селитебной многоэтажной застройки – Cd, Sb, Pb (*Кс* 1.5–1.4). Поступление W, Cd, Zn в почвы жилой зоны связано с коммунально-бытовыми отходами, выбросами и стоками. Наименее загрязнены ТММ почвы рекреационной зоны, они незначительно обогащены Sb (*Кс* 1.9), Pb (1.4) и Cu (1.3).

Среди ТММ лидирует Sb в почвах транспортной (*Кс* 4.2), промышленной (3.2) и селитебной усадебной (2.6) зон. Два других пика накопления элементов в почвах имеют Pb и W, первый образует максимум в промышленной и селитебной усадебной зонах (*Кс* 2.1–2.0), второй – в селитебной усадебной (2.3). Наиболее интенсивно рассеиваются Bi в почвах транспортной и рекреационной зон (*Кр* 1.4) и Mn – в промышленной и селитебной усадебной зонах (*Кр* 1.4).

Таким образом, приоритетными загрязнителями почв г. Северобайкальска являются Sb, Pb и W, а геохимическая специализация верхнего горизонта почв характеризуется спектром (нижние индексы – *Кс*):  $Sb_{2.6}Pb_{1.7}W_{1.5}Cu_{1.3}Cd_{1.2}As_{1.2}Sn_{1.1}Zn_{1.1}Co_{1.0}Ni_{1.0}V_{1.0}Mo_{0.9}Cr_{0.9}Bi_{0.9}Mn_{0.8}$ . Выявленный состав ТММ в верхнем слое городских почв частично совпадает с данными Государственных докладов “О состоянии и охране окружающей среды в Республике Бурятия” в 1991–2003 гг., согласно которым главными загрязнителями почв Северобайкальского промузла являются Cd, Pb, Zn, Hg, F, Mo, Mn. Отсутствие Mo и Mn в нашем списке приоритетных поллютантов можно объяснить более низкой современной техногенной геохимической нагрузкой на территорию, а также высокой подвижностью этих элементов при  $pH < 8$ , способствующей выносу этих элементов из верхних горизонтов [20].

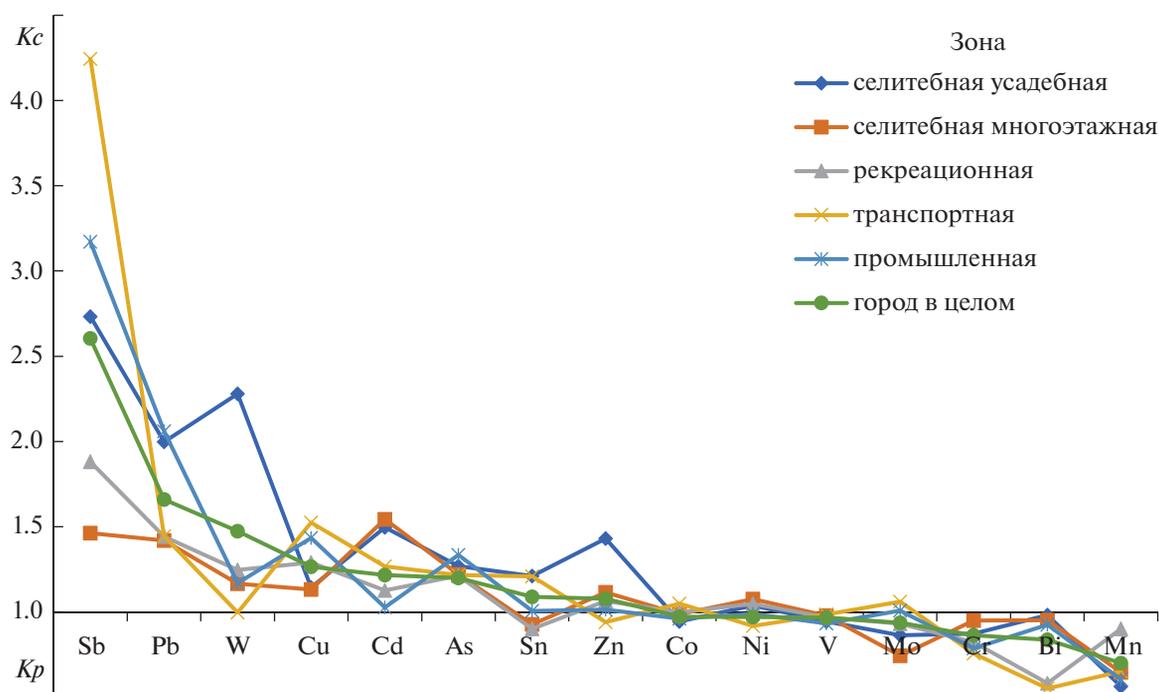


Рис. 2. Геохимические спектры тяжелых металлов и металлоидов в верхнем (0–10 см) слое почв по функциональным зонам г. Северобайкальска.

**Парагенетические ассоциации ТММ в городских почвах.** С помощью кластерного анализа выделены парагенетические ассоциации ТММ в верхнем слое городских почв, поступающие из общих источников загрязнения и характеризующиеся сходными тенденциями к накоплению и выносу в различных ландшафтно-геохимических условиях (рис. S2). В верхнем слое почв г. Северобайкальска выделены три ассоциации ТММ: V–Cr–Co–Ni ← Mn; Zn–Cd–Pb; Sn–Sb–Mo. Мышьяк, Bi, Cu и W с другими элементами не ассоциируются.

В ассоциацию V–Cr–Co–Ni ← Mn (с коэффициентами корреляции между элементами  $r = 0.50–0.81$  при более слабых связях с Mn –  $r = 0.50–0.18$ ) входят сидерофильные элементы, где Ni, Mn и Co – катионогенные металлы, образующие устойчивую связь с анионогенным V [20]. Образование данной ассоциации не приурочено к какому-либо конкретному источнику загрязнения, а объединяет элементы в основном природного происхождения с содержаниями в городских почвах, близкими к фоновым. Халькофильные Zn–Cd–Pb с высокими корреляционными связями ( $r = 0.50–0.87$ ) присутствуют в выбросах автотранспорта. Ассоциация Sb–Sn–Mo ( $r = 0.46–0.69$ ) в городских почвах объединяет анионогенные элементы.

**Техногенные аномалии ТММ в городских почвах.** На территорию города составлены карты для трех приоритетных загрязнителей Sb, Pb, W в верх-

нем слое почв (рис. 3). Для каждого элемента выделено несколько аномалий, которые не совпадают между собой по локализации, что говорит о разных источниках загрязнения. Некоторые техногенные аномалии металлов-загрязнителей, в частности, Sb и Pb, расположены на достаточно близком (до 500 м) расстоянии от уреза озера Байкал, что может сказаться на экологическом состоянии озерных вод [2].

Техногенные аномалии Sb в городских почвах занимают сравнительно небольшую площадь. Выявлены две крупные аномалии Sb на юго-западе и северо-востоке и одна небольшая и мало контрастная аномалия на северо-западе. Максимальные концентрации Sb (5–7.5 мг/кг) в центре крупных аномалий превышают фоновый уровень в 17–28 раз, а ПДК в почвах в 1.7 раза. Образование юго-западной аномалии связано с выбросами промышленной зоны и очистных сооружений, северо-восточной – с влиянием ТЭЦ, локомотивного депо и железнодорожного узла, северо-западной – с выбросами промышленной зоны и стоками со свалки бытовых отходов.

Техногенные аномалии Pb в верхнем слое почв занимают большую площадь, чем Sb. Самая крупная аномалия Pb, занимающая почти половину территории города, имеет максимальное содержание до 75–105 мг/кг с превышением фона в 3.5–4.8 раза, а ОДК в 2.3–3.1 раза. Вытянутая с севера на юг аномалия приурочена к промышленной и селитебной зонам, она сформировалась в

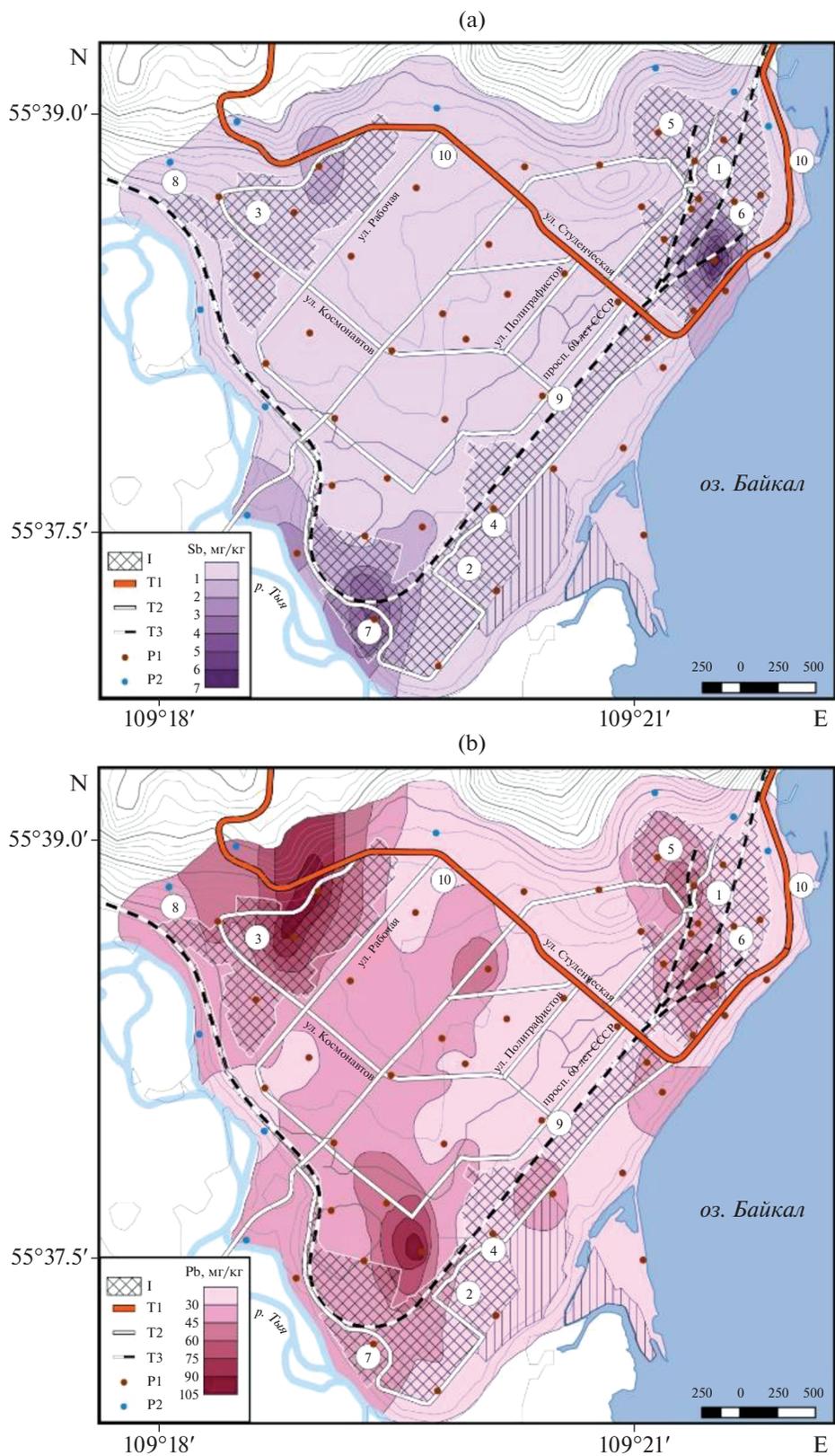


Рис. 3. Распределение Sb (a), Pb (b), W (c) в верхнем (0–10 см) слое почв г. Северобайкальска.

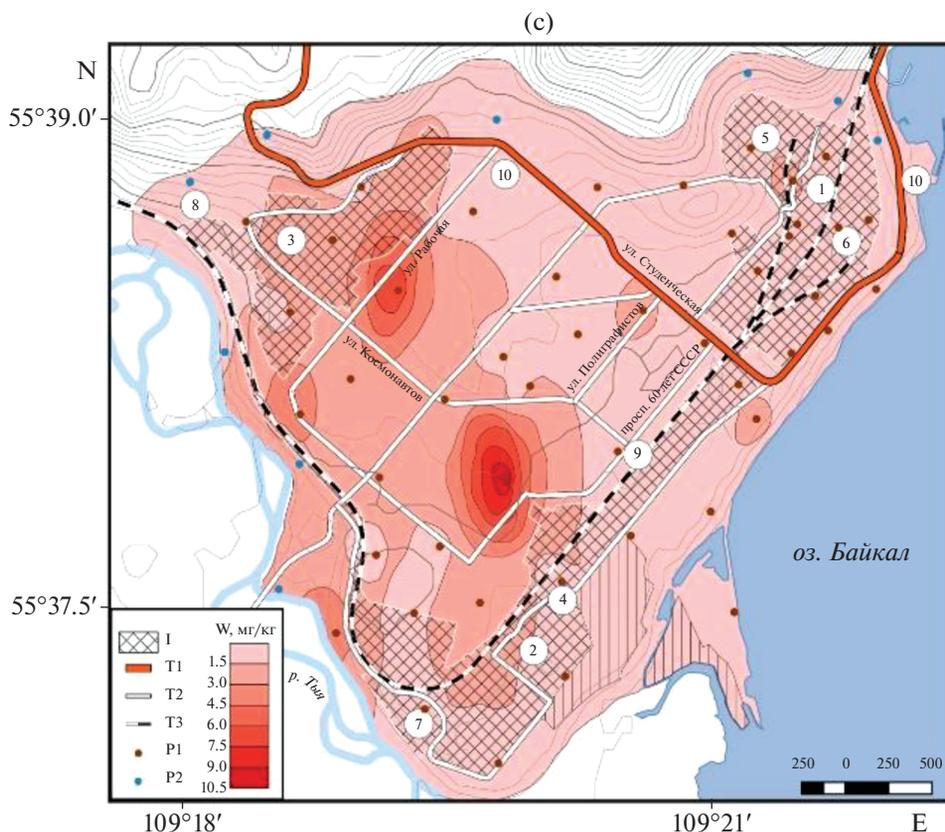


Рис. 3. Окончание

основном под воздействием отходов и стоков автотранспортных предприятий и автотранспорта. Вторая небольшая и слабоконтрастная аномалия Pb (до 60 мг/кг) на северо-востоке обусловлена комплексным влиянием промышленных производств, железнодорожного узла и выбросов ТЭЦ. Третья аномалия – самая небольшая по площади и контрастности (до 30–45 мг/кг) – находится на берегу оз. Байкал и обусловлена латеральной миграцией Pb вниз по склону от промышленной зоны и автомагистралей к урзу озера.

Основное загрязнение почв W, аналогично Pb, сосредоточено в западной части города, где элемент образует серию довольно контрастных аномалий, в центрах которых содержание W увеличивается до 9–10.5 мг/кг, что превышает фон в 8–9 раз. Аномалии W приурочены в основном к селитебной усадебной зоне, соседствующей с промышленными предприятиями. Аномалии сформировались, вероятно, под воздействием выбросов промышленных производств, где W использовался в твердосплавных материалах и буровых установках для прокладки тоннелей. Вольфрам входит в состав легированных сталей, которые широко применяются для производства режущего и горного инструмента [39].

**Факторы аккумуляции ТММ в городских почвах.** Для выявления ведущих факторов, контролирующих накопление приоритетных поллютантов в верхнем слое почв г. Северобайкальска, проведен статистический анализ с построением дендрограмм методом регрессионных деревьев (рис. S3). Учитывались две группы факторов: 1) антропогенные, воздействие которых характеризует принадлежность к той или иной функциональной зоне, 2) основные свойства почв – кислотность (рН), удельная электропроводность водной вытяжки ( $EC_{1:5}$ ), содержание органического вещества ( $C_{орг}$ ), физической глины (Ф.глина), оксидов Fe и Mn. Ландшафтные факторы (рельеф, почвообразующие породы, растительность) не рассматривались в связи с их небольшой изменчивостью на территории города.

Главным фактором распределения лидирующей среди ТММ в почвах г. Северобайкальска Sb является органическое вещество, содержание которого неодинаково в разных функциональных зонах города. Уровень накопления Sb максимален в наименее обогащенных  $C_{орг}$  почвах (1.3%), что нетипично для природных почв. Это связано с тем, что на наиболее загрязненных участках вблизи главных источников выбросов ТММ поч-

вы сильно трансформированы и содержат минимальное количество органических веществ. При концентрации  $C_{\text{орг}} > 1.3\%$  накопление Sb в почвах определяется количеством оксидов Fe – при их содержании  $>7.1\%$  содержание Sb повышается в 2.4 раза. При более низком содержании Fe сильное влияние на аккумуляцию Sb оказывают кислотнo-основные условия. В щелочной среде ( $\text{pH} > 7.9$ ) содержание Sb в почвах увеличивается в среднем в 2.1 раза.

Аккумуляция Pb в городских почвах контролируется функциональным назначением территории. По уровню загрязнения выделяются загрязненные селитебная многоэтажная, рекреационная и транспортная зоны со средним содержанием Pb 28.1 мг/кг и более интенсивно загрязненные промышленная и селитебная усадебная со средним содержанием 42.0 мг/кг, что говорит о наличии в г. Северобайкальске нескольких техногенных источников Pb. Повышенное ( $\text{EC}_{1.5} > 115$  мкСм/см) содержание легкорастворимых солей в почвах промышленной и усадебной жилой зон сопровождается увеличением содержания Pb в 1.7 раза. В селитебной многоэтажной, рекреационной и транспортной зонах различия в уровнях накопления Pb определяются оксидами Fe – в диапазоне их концентраций 6.4–6.9% содержание Pb увеличивается до 35.8 мг/кг.

Распределение W связано с гранулометрическим составом почв: максимальные содержания металла (4.3 мг/кг) выявлены при содержании физической глины 17.6–18.4% в почвах жилой усадебной зоны. При более тяжелом гранулометрическом составе накопление W зависит от реакции среды: при  $\text{pH} > 8$  его содержание в верхнем слое почв увеличивается в 1.3 раза. Повышенное содержание W (2.2 мг/кг) обнаружено также в супесчаных почвах промышленной и селитебных зон.

Таким образом, наиболее значимыми факторами накопления Sb, Pb, W в почвах Северобайкальска являются как принадлежность к той или иной функциональной зоне, так и почвенные свойства, определяющие сорбционную способность по отношению к ТММ: содержание физической глины, оксидов Fe и pH. Для Pb выявлено заметное увеличение накопления с ростом электропроводности водной вытяжки. Почвенное органическое вещество выполняет роль маркера: его низкий уровень приурочен к участкам с максимальным антропогенным воздействием.

**Экологическая опасность загрязнения городских почв ТММ.** Сравнение концентраций Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb с ОДК показало, что в зоне распространения супесчаных почв наибольшую экологическую опасность представляют Zn и Ni с превышением нормативов во всех исследуемых пробах, у As, Pb и Cu частота превышения нормативов так-

же довольно высока – 58, 46 и 21%. Для территории с легкосуглинистыми почвами значения ОДК в 4 раза больше, так как реакция среды близка к нейтральной. Поэтому в этой части города санитарно-гигиенические нормативы для Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb не нарушались. Единичные превышения обнаружены у V (в 8.5% проб), V + Mn (4.3%), Cd (4.3%), Sb, Mn (2%).

Оценка степени экологической опасности загрязнения городских почв проведена также по суммарному загрязнению ТММ – показателю Zc, который уменьшается в ряду функциональных зон: селитебная усадебная ( $Zc\ 7.1$ ) > транспортная (6.8) > промышленная (6.0) > селитебная многоэтажная (3.6) > рекреационная (3.3). Среднее значение показателя Zc для почв города равно 5.4, что позволяет отнести почвы города к категории очень слабого загрязнения. Анализ пространственного распределения показателя Zc в почвах города (рис. 4) позволил выделить две крупные аномалии: с умеренно-опасным загрязнением ассоциацией  $\text{Sb}_{15}\text{As}_{2.9}\text{Bi}_{2.2}\text{Sn}_{1.6}\text{Cu}_{1.6}\text{Pb}_{1.5}$  ( $Zc\ 20.6$ ) вблизи очистных сооружений на юге и опасным уровнем загрязнения ассоциацией  $\text{Sb}_{26.9}\text{Sn}_{2.7}\text{Pb}_{2.6}\text{Cd}_{2.1}\text{Cu}_{1.8}\text{Mo}_{1.6}$  ( $Zc\ 33.4$ ) вблизи локомотивного депо на севере.

По уровню загрязнения большая часть (83%) территории города характеризуется практически незагрязненными ТММ почвами ( $Zc < 8$ ), 10.6% – загрязненными неопасно ( $Zc\ 8\text{--}16$ ), 4.3% – умеренно опасно ( $Zc\ 16\text{--}32$ ) и 2.1% – опасно загрязненными. Наибольшим загрязнением отличаются селитебная усадебная и промышленная зоны, треть их площади занимают почвы со слабым и умеренно опасным уровнями загрязнения (рис. S4). Почвы рекреационной и жилой многоэтажной зон относятся к категории практически незагрязненных. Такая экологическая ситуация во многом определяется возрастом застройки – промышленная зона и усадебная застройка существуют с момента возникновения города, тогда как многоэтажная застройка и рекреационная зона появились относительно недавно.

Дифференциация городских почв по суммарному загрязнению ТММ зависит от их свойств (рис. 5). Максимальным загрязнением отличаются почвы с низким содержанием органического вещества ( $C_{\text{орг}} < 1.5\%$ ), в основном в многоэтажной жилой и транспортной зонах. Почвы с низким содержанием  $C_{\text{орг}}$  маркируют участки с высокой техногенной нагрузкой и отсутствием растительности. При  $C_{\text{орг}} > 1.5\%$  накопление поллютантов усиливается с ростом содержания оксидов Fe. Если их меньше 6.8%, то выделяются 3 группы в зависимости от гранулометрического состава и реакции среды. В супесчаных почвах наблюдается повышенное содержание ТММ, что можно объяснить близостью к источникам загрязнения. При более

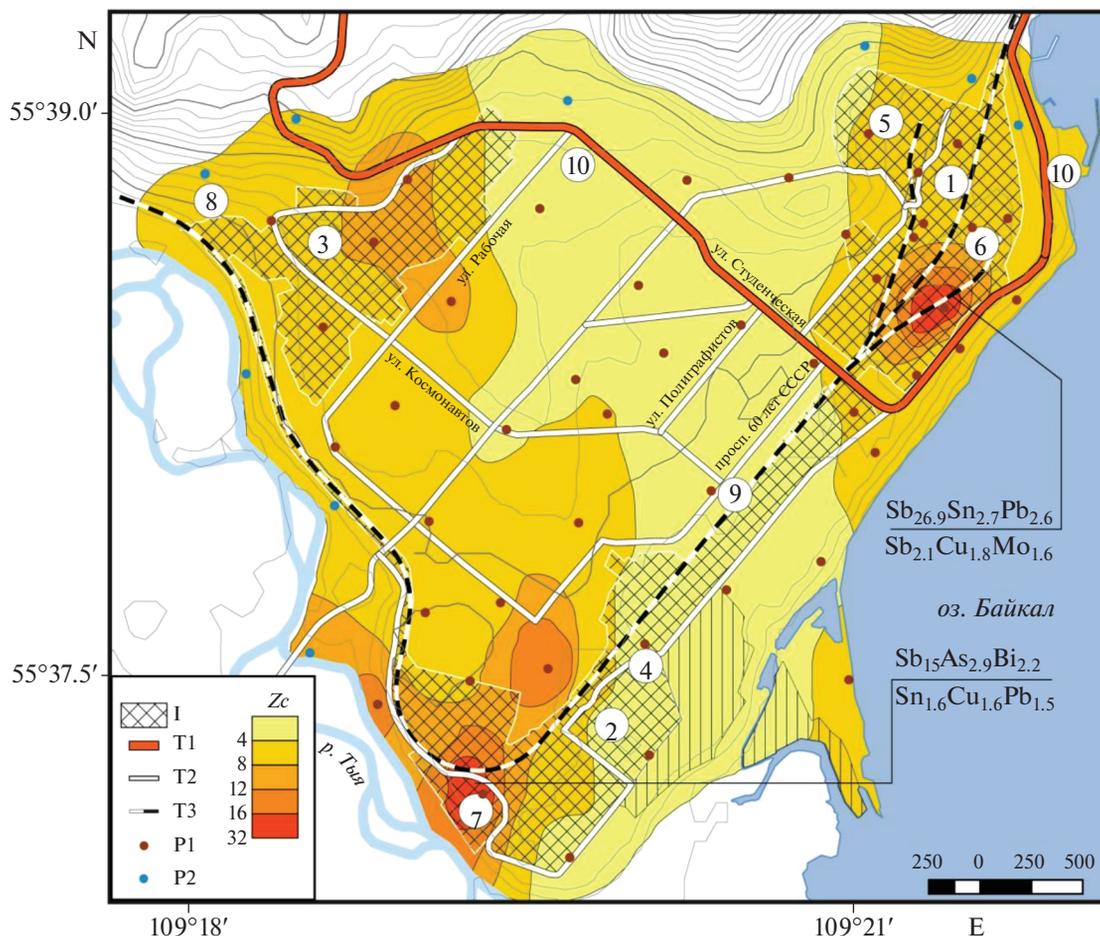


Рис. 4. Суммарное загрязнение тяжелыми металлами и металлоидами верхнего (0–10 см) слоя почв г. Северобайкальска.

тяжелом гранулометрическом составе аккумуляция ТММ зависит от реакции среды: в щелочном диапазоне ( $\text{pH} > 7.8$ ) она почти в 2 раза больше, чем при более низких значениях  $\text{pH}$ .

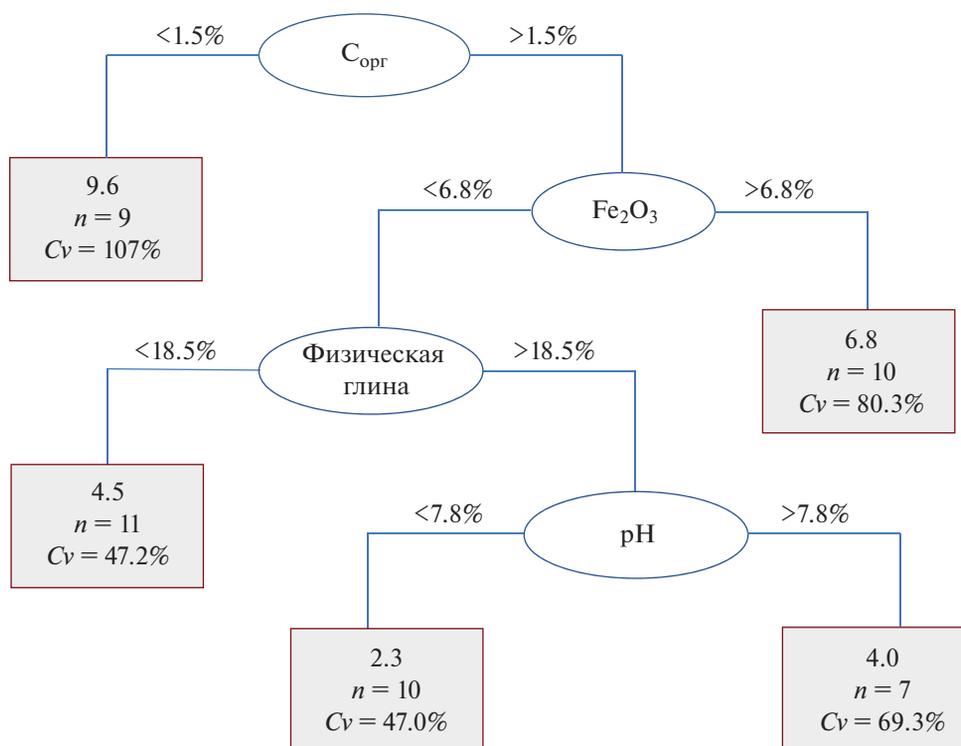
### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приоритетными загрязнителями ТММ верхнего слоя почв г. Северобайкальска являются три элемента – Sb, Pb, и W с коэффициентами накопления относительно фонового уровня  $K_c$  2.7; 1.6; 1.5 соответственно. Природные почвы отличаются низким содержанием большинства ТММ, они обогащены только Mn ( $K_c$  2.4) и Zn ( $K_c$  1.6), что объясняется их биогенной аккумуляцией в гумусовом горизонте. Наиболее загрязненными являются почвы транспортной, промышленной и селитебной усадебной зон. В первых двух интенсивно накапливаются Sb, Pb, Cu, в усадебной застройке – Sb, W, Pb, Cd, Zn.

В почвах города ТММ образуют три ассоциации: V–Cr–Co–Ni ← Mn; Zn–Cd–Pb; Sn–Sb–Mo, поступающие из общих источников и обла-

дающие сходным пространственным распределением. Не ассоциируются с другими элементами As, Bi, Cu и W. Приоритетные загрязнители Sb, Pb, W образуют в почвах несколько крупных аномалий разной площади и контрастности. Самой загрязненной Sb является транспортная зона, Pb преобладает в промышленной зоне, а W – в селитебной усадебной. Основными источниками загрязнения почв ТММ являются Центральная ТЭЦ и котельные, железнодорожный и автотранспорт, локомотивное депо, производство строительных материалов, очистные сооружения и свалки.

Главными факторами аккумуляции ТММ в верхнем слое почв являются повышенное содержание оксидов Fe и пониженное  $C_{\text{орг}}$ ,  $\text{pH}$ , а также функциональное назначение территории, определяющее источники и уровень техногенного воздействия на почвы. Антропогенное воздействие привело к трансформации основных свойств городских почв – подщелачиванию, засолению, изменению содержания органического вещества, утяжелению гранулометрического состава, которое усилило их способность к закреплению ТММ.



**Рис. 5.** Факторы (в овалах) накопления тяжелых металлов и металлоидов в верхнем (0–10 см) слое почв г. Северобайкальска. Для конечных узлов (в прямоугольниках) приводится среднее значение суммарного показателя загрязнения  $Z_c$ , коэффициент вариации  $C_v$  и число точек опробования  $n$ .

Экологическая опасность загрязнения почв ТММ в целом для города невелика: 89% территории считается незагрязненной ( $Z_c < 8$ ). Наибольшим загрязнением отличаются селитебная, промышленная и треть их площади занимают почвы со слабым ( $Z_c 8–16$ ) и умеренно опасным ( $Z_c 16–32$ ) уровнями загрязнения. Образование нескольких контрастных полиэлементных аномалий в почвах этих функциональных зон города создает реальные предпосылки для поступления токсичных металлов с поверхностным и внутрипочвенным стоком в воды р. Тыи и уникальной экосистемы озера Байкал.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы благодарны руководителю общественной организации “Теплый Северный Байкал” Е.А. Марьясову и И.А. Визовскому за помощь в организации и проведении полевых работ.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Полевые и лабораторные работы выполнены при финансовой поддержке РФФИ и РГО (проект № 17-29-05055 “Эколого-геохимическое состояние Байкальского региона в сфере воздействия городов и горнопромышленных центров”), анализ и интерпретация

данных – в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ им. М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды”.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Табл. S1. Среднее, минимальное и максимальное содержание тяжелых металлов и металлоидов (мг/кг) в фоновых почвах Северного Прибайкалья и в почвах функциональных зон г. Северобайкальска и коэффициент накопления ТММ в городских почвах  $K_c$  относительно фоновых.

Рис. S1. Распределение содержания физической глины, pH, удельной электропроводности ( $EC_{1:5}$ ) и органического углерода  $C_{орг}$  в верхнем (0–10 см) слое почв г. Северобайкальска.

Рис. S2. Парагенетические ассоциации тяжелых металлов и металлоидов в верхнем слое почв г. Северобайкальска. Метод удаленных соседей, мера сходства 1–г.

Рис. S3. Факторы накопления Sb, Pb и W в верхнем слое почв г. Северобайкальска. Для каждого конечно-

го узла приводится среднее значение концентрации ТММ, коэффициент вариации  $S_v$  и число точек опробования п. Функциональные зоны: Ф – фоновая, Су – селитебная усадебная, См – селитебная многоэтажная, Р – рекреационная, Т – транспортная, П – промышленная.

Рис. S4. Уровни суммарного загрязнения тяжелых металлов и металлоидов почв по показателю  $Z_c$  в разных функциональных зонах г. Северобайкальска. Градации показателя  $Z_c$  приводятся в разделе “Материалы и методы исследования”. Функциональные зоны: Ф – фоновая, Су – селитебная усадебная, См – селитебная многоэтажная, Р – рекреационная, Т – транспортная, П – промышленная.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белозерцева И.А., Владимиров И.Н., Убугунова В.И., Убугунов В.Л., Екимовская О.А., Бардаш А.В. Почвы водоохранной зоны озера Байкал и их использование // География и природные ресурсы. 2016. № 5. С. 70–82.
2. Белозерцева И.А., Воробьева И.Б., Власова Н.В., Гагаринова О.В., Янчук М.С., Лопатина Д.Н. Экологическое состояние побережья озера Байкал и его влияние на загрязнение озера // Успехи современного естествознания. 2018. № 11. С. 85–95.
3. Белозерцева И.А., Воробьева И.Б., Власова Н.В., Янчук М.С., Лопатина Д.Н. Химический состав снега акватории озера Байкал и прилегающей территории // География и природные ресурсы. 2017. № 1. С. 90–99.
4. Белозерцева И.А., Лопатина Д.Н. Техногенное воздействие на почвы урбанизированных территорий Сибири // Фундаментальные исследования. 2015. № 2. С. 5397–5403.
5. Бурятия = Buryatia: к 350-летию добровольного вхождения Бурятии в состав Российского государства. Т. 1. Природа. Общество. Экономика / Правительство РБ; Народный Хурал РБ; СО РАН; БИП; Фонд содействия сохранению озера Байкал. Улан-Удэ: ЭКОС, 2011. 340 с.
6. Водяницкий Ю.Н. Тяжелые и сверхтяжелые металлы и металлоиды в загрязненных почвах. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2009. 96 с.
7. Геохимия окружающей среды / Под ред.: Ю.Е. Савета, Б.А. Ревич, Е.П. Янина и др. М.: Недра, 1990. 335 с.
8. Герасимова М.И., Строганова М.Н., Можарова Н.В., Прокофьева Т.В. Антропогенные почвы: генезис, география, рекультивация. Смоленск: Ойкумена, 2003. 268 с.
9. Государственный доклад “О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2017 году”. Иркутск: АНО КЦ Эксперт, 2018. 340 с.
10. Еремина А.О., Головина В.В., Угай М.Ю., Рудковский А.В., Степанов С.Г., Морозов А.Б. Углеродные адсорбенты из бурого угля Канско-Ачинского бассейна // Современные наукоемкие технологии. 2004. № 2. С. 55.
11. Касимов Н.С. Экогеохимия ландшафтов. М.: ИП Филимонов М.В., 2013. 208 с.
12. Касимов Н.С., Битюкова В.Р., Кислов А.В., Кошелева Н.Е., Никифорова Е.М. и др. Проблемы экогеохимии крупных городов // Разведка и охрана недр. 2012. № 7. С. 8–13.
13. Касимов Н.С., Власов Д.В. Технофильность химических элементов в конце XX–начале XXI вв. // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2012. № 1. С. 15–22.
14. Касимов Н.С., Власов Д.В., Кошелева Н.Е., Никифорова Е.М. Геохимия ландшафтов Восточной Москвы. М.: АПР, 2016. 276 с.
15. Кошелева Н.Е., Касимов Н.С., Власов Д.В. Факторы накопления тяжелых металлов и металлоидов на геохимических барьерах в городских почвах // Почвоведение. 2015. № 5. С. 536–553.
16. Кречетов П.П., Дианова Т.М. Химия почв. Аналитические методы исследования. М.: Географический факультет МГУ, 2009. 148 с.
17. Макаров А.О. Оценка экологического состояния почв некоторых железнодорожных объектов ЦАО г. Москвы. Дис. ... канд. биол. н. М., 2014. 303 с.
18. Напрасникова Е.В. Реакция биотического компонента почвы на техногенное воздействие (долгосрочный эксперимент) // Тренды ландшафтно-геохимических процессов в геосистемах юга Сибири. Новосибирск: Наука, 2004. С. 121–128.
19. Перельман А.И. Геохимия ландшафтов. М.: Высшая школа, 1975. 342 с.
20. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрей-2000, 1999. 768 с.
21. Ратанова М.П. Экологические основы общественного производства. Смоленск: СГУ, 1999. 176 с.
22. Регионы и города России: интегральная оценка экологического состояния / Под ред. Н.С. Касимова. М.: ИП Филимонов М.В., 2014. 569 с.
23. Самонова О.А., Кошелева Н.Е., Касимов Н.С. Ассоциации микроэлементов в профиле дерново-подзолистых почв южной тайги // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 1998. № 2. С. 14–19.
24. СанПиН 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания”. 2021. С. 751–754.
25. Убугунов Л.Л., Убугунова В.И., Белозерцева И.А., Гынинова А.Б., Сороковой А.А., Убугунов В.Л. Почвы и почвенный покров бассейна оз. Байкал // География и природные ресурсы. 2018. № 4. С. 76–87.
26. Цыбжитов Ж.Х., Убугунов Л.Л., Гончиков Б.Н., Цыбжитов А.Ц., Бадмаев Н.Б. Почвы. Байкал. Природа и люди. Улан-Удэ: ЭКОС, Изд-во БНЦ СО РАН, 2009. 608 с.
27. Экологический атлас бассейна озера Байкал. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2015. 145 с.
28. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Токсичные элементы-примеси в ископаемых углях. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 655 с.
29. Apeagyei E., Bank M.S., Spengler J.D. Distribution of heavy metals in road dust along an urban-rural gradient

- in Massachusetts // *Atmos. Environ.* 2011. V. 45. P. 2310–2323.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.11.015>
30. Demetriades A., Birke M. *Urban Geochemical Mapping Manual: Sampling, Sample preparation, Laboratory analysis, Quality control check, Statistical processing and Map plotting.* Brussels: EuroGeoSurveys, 2015. 162 p.
  31. Grigoratos T., Martini G. Brake wear particle emissions: a review // *Environ. Sci. and Pollution Research.* 2015. V. 22. Iss. 4. P. 2491–2504.
  32. Hulskotte J.H.J., Roskam G.D., Denier van der Gon H.A.C. Elemental composition of current automotive braking materials and derived air emission factors // *Atmos. Environ.* 2014. V. 99. P. 436–445.
  33. Kabata-Pendias A. *Trace Elements in Soils and Plants.* 4th edition. Boca Raton, FL, USA: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2011. 505 p.
  34. Kasimov N.S., Vlasov D.V., Kosheleva N.E. Enrichment of road dust particles and adjacent environments with metals and metalloids in eastern Moscow // *Urban Climate.* 2020. Article ID: 100638.  
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100638>
  35. Mętrak M., Chmielewska M., Sudnik-Wójcikowska B., Witkomirski B., Staszewski T., Suska-Malawska M. Does the Function of Railway Infrastructure Determine Qualitative and Quantitative Composition of Contaminants (PAHs, Heavy Metals) in Soil and Plant Biomass? // *Water, Air, Soil Pollut.* 2015. V. 226, 253.  
<https://doi.org/10.1007/s11270-015-2516-1>
  36. Pant P., Harrison R.M. Estimation of the contribution of road traffic emissions to particulate matter concentrations from field measurements: A review // *Atmos. Environ.* 2013. V. 77. P. 78–97.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.04.028>
  37. Ramírez O., Sanchez de la Campa A., Amato F., Catacolí R., Rojas N., de la Rosa J. Chemical composition and source apportionment of PM10 at an urban background site in a high-altitude Latin American megacity (Bogota, Colombia) // *Environ. Pollut.* 2018. V. 233. P. 142–155.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.10.045>
  38. Rish M.A. *Antimony / Metals and their compounds in the Environment: Occurrence, analysis and biological relevance.* Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004. P. 659–670.
  39. Zheng J., Zhan C., Yao R., Zhang J., Liu H., Liu T., Xiao W., Liu X., Cao J. Levels, sources, markers and health risks of heavy metals in PM2.5 over a typical mining and metallurgical city of Central China // *Aerosol Sci. Eng.* 2018. V. 2. № 1. P. 1–10.  
<https://doi.org/10.1007/s41810-017-0018-9>

## Contamination with Heavy Metals and Metalloids of Soils in Severobaikalsk and Their Ecological State

N. E. Kosheleva<sup>1, \*</sup>, E. M. Nikiforova<sup>1</sup>, and I. V. Timofeev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

\*e-mail: [natalk@mail.ru](mailto:natalk@mail.ru)

Based on the data of the geochemical survey on the territory of the city of Severobaikalsk (Republic of Buryatia) in the summer of 2018, the content and spatial distribution of 15 heavy metals and metalloids (HMMs) in the upper soil layer (0–10 cm) were determined. The priority pollutants of the topsoils of Severobaikalsk are Sb, Pb, and W. The most polluted are the soils of the transport, industrial and residential estate zones. In the first two Sb, Pb, Cu are intensively accumulated, in residential estate zone – Sb, W, Pb, Cd, Zn. HMMs form three associations: V–Cr–Co–Ni ← Mn; Zn–Cd–Pb; Sn–Sb–Mo, coming from common sources and having a similar distribution in the soil cover of the city. HMM accumulation in the upper layer of urban soils is controlled by the content of Fe oxides, *Corg*, pH, as well as the type of land use, which determines the sources and level of anthropogenic impact on soils. The anthropogenic impact led to a change in the properties of urban soils, which enhanced their ability to fix HMMs. There is no environmental hazard of soil pollution with HMMs for the city, but in the residential estate and industrial zones, a third of their area is occupied by soils with low and moderately hazardous levels of pollution. Formation of several contrasting multielemental anomalies in soils on the bank of the Tyya river and near Lake Baikal poses a threat to their waters due to the possibility of the inflow of toxic metals with surface and subsurface runoff.

*Keywords:* priority pollutants, land use zones, accumulation factors, soil properties, multielemental anomalies