

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

УДК 504.54:504.054:669.018.674(517.3-25)

ГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТОВ УЛАН-БАТОРА¹

© 2013 г. Н.Е. Кошелева*, Н.С. Касимов*, О.И. Сорокина*,
П.Д. Гунин**, С.Н. Бажа**, С. Энх-Амгалан***

**Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова*

***Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова*

****Институт географии АН Монголии*

Поступила в редакцию 10.07.2012 г.

На основе данных геохимических съемок 2008–2010 гг. дана дифференцированная по функциональным зонам оценка загрязнения тяжелыми металлами (As, Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Sr, V и Zn) снежного покрова, почв и древесных растений г. Улан-Батора. Определена региональная специализация депонирующих сред и их техногенная геохимическая трансформация в условиях города. Установлены факторы, контролирующие аккумуляцию поллютантов в ландшафтах. Рассмотрено пространственное распределение тяжелых металлов в почвах и листьях тополя. На основании эколого-геохимической оценки снежного покрова, почв и древесной растительности степень загрязнения городских ландшафтов в целом охарактеризована как слабая. Загрязнение функциональных зон уменьшается в ряду промышленная > транспортная > селитебные > рекреационная.

Введение. Первые эколого-геохимические исследования Улан-Батора были выполнены в 1990-е гг. [22]. Высокие темпы урбанизации Монголии, отличавшие последние 20 лет, повлекли за собой удвоение численности населения столицы, перешагнувшей в 2007 г. рубеж в 1 млн жителей. Вместе с ростом населения постоянно увеличивается техногенное воздействие на городские ландшафты: выросли объемы промышленного производства, утроилось число автомобилей, достигшее 100 тыс. ед., на окраинах появились обширные районы юрточной застройки. Все это не могло не сказаться на экологической ситуации в столице. При высокой плотности населения, большом количестве и разнообразии источников эмиссии тяжелых металлов (ТМ) и других поллютантов в почвенно-растительном покрове города возникают техногенные геохимические аномалии и появляются зоны, крайне неблагоприятные для проживания людей.

Цель данной работы – оценить современное эколого-геохимическое состояние ландшафтов г. Улан-Батора, испытывающих комплексное воздействие промышленных предприятий, энергетики, транспорта и коммунально-бытовых отходов. Для этого решались следующие задачи: 1) определение геохимических параметров фоновых ландшафтов и их техногенной трансформации в разных функциональных зонах города; 2) анализ пространственной структуры загрязнения снега, почв и древесных растений; 3) выявление ландшафтных и техногенных факторов, контролирующих накопление ТМ в почвах и вегетативных органах деревьев; 4) характеристика загрязнения городских ландшафтов по данным о содержании ТМ в депонирующих средах.

Объект исследования. *Природные условия.* Город расположен в дренируемой р. Тола Ургинской котловине, вытянутой с запада на восток и представляющей собой полузамкнутую ландшафтно-геохимическую арену с широким развитием аккумулятивных, трансаккумулятивных и трансэлювиальных ландшафтов. Уклоны поверхности в днище котловины составляют первые градусы, по направлению к горному обрамлению они возрастают до 20–25° [9]. Долина р. Тола имеет ширину 5–10 км с абсолютными отметками уреза 1230–1240 м. Коренные породы представ-

¹ Результаты исследований являются итогом совместных работ географического факультета МГУ и Российско-монгольской комплексной биологической экспедиции РАН и АН Монголии (совместный проект РФФИ – РГО “Эколого-геохимическая оценка состояния и картографирование трансграничного бассейна реки Селенги”; грант РГО “Комплексная экспедиция Селенга–Байкал”, проект РФФИ № 13-05-92221-Монг_а; Госконтракт № 11.519.11.5008).

лены архейскими гранитами, каменноугольными метаморфическими глинистыми сланцами и неогеновыми пестроцветными глинами, часто содержащими легкорастворимые соли, гипс, пески и конгломераты. Сланцы и глины обогащены Fe, Mn, Cr, Co, Pb, Ni, Ti, а граниты и аллювиальные отложения обеднены ими [5].

Климат города резко континентальный. Среднегодовое количество осадков составляет 240–260 мм, из которых 60–90% приходится на июль и август и имеет ливневой характер. В зимний период выпадает около 2–3% осадков, максимальная высота снежного покрова составляет 20–30 см [6]. Из-за господства безветренного антициклонного режима погоды в зимнее время в городе формируются устойчивые температурные инверсии, создающие экологически неблагоприятную обстановку. Она обусловлена повышенным содержанием в воздухе многих токсичных веществ из техногенных источников, которые постепенно депонируются в снежном покрове и в верхних горизонтах почв.

Ургинская котловина относится к Предхэнтэйскому округу Хангайской почвенно-биоклиматической провинции с характерной экспозиционной лесостепью: на относительно холодных и влажных склонах северной экспозиции распространена лесная растительность, а на южных, более теплых и сухих – степная. Типичными ландшафтами на склонах северной экспозиции являются лиственничные и лиственнично-сосновые леса на горных дерново-таежных и горных лугово-лесных почвах; на склонах южной экспозиции – полынно-разнотравно-злаковые степи на каштановых и темно-каштановых мучнисто-карбонатных почвах, в долинах рек – ивово-тополевые сообщества на аллювиальных каменисто-галечниковых почвах [12, 26, 32].

Почвы, как правило, имеют супесчаный или легкосуглинистый гранулометрический состав, высокую водопроницаемость, низкое содержание гумуса (0.5–1.5%), реакцию среды от нейтральной до щелочной ($pH = 7.5–9.0$) и содержание $CaCO_3$ от 0.7 до 5.0% [20]. На южном борту котловины, на склонах г. Богдо-Ула формируются горные дерново-таежные и горные лугово-лесные почвы с более высоким (до 7.0%) содержанием гумуса. В пределах Улан-Батора почвы подвержены сильному антропогенному воздействию (перемешиванию, запечатыванию, уничтожению и др.), которое уменьшается от центральной части города к районам юрточной застройки. Естественная растительность на территории города практически полностью уничтожена, древесные насаждения

состоят в основном из тополя и лиственницы. В городе существует небольшая по площади зеленая зона, включающая парки и скверы, спортивный комплекс и Ботанический сад. Районы многоэтажной застройки на западе Улан-Батора практически не имеют пояса зеленых насаждений, отделяющего их от промышленной зоны.

Источники загрязнения и функциональное зонирование г. Улан-Батора. Площадь Улан-Батора в настоящее время составляет 4 704.4 км², население – 1 044 500 чел. [28]. Город включает территории с застройкой городского типа – многоэтажными жилыми домами и административными зданиями – и окружающие их обширные районы юрточной застройки, состоящие из традиционных юрт и небольших частных домиков [41]. Территория города увеличивается главным образом за счет разрастания юрточных районов, большая часть которых образовалась после 1990 г. Появление и быстрое развитие таких районов является отличительной особенностью урбанизации промышленных городов Монголии. Массивы юрточной застройки протягиваются вдоль притоков р. Тола и поднимаются на склоны холмов. Источниками загрязнения в этой зоне являются автотранспорт, индивидуальное отопление в зимнее время и стихийные свалки коммунально-бытовых отходов, которые по комплексу загрязнителей не уступают промышленным.

В центре города, расположенном на пойме и речных террасах р. Тола, сосредоточены крупные промышленные предприятия и многоэтажные жилые кварталы. Они пересекаются автомагистралями, идущими параллельно реке. В настоящее время центр представляет собой единый промышленно-транспортно-селитебный ареал, отличающийся наиболее длительным периодом накопления техногенных поллютантов. Значительное количество Pb и других загрязняющих веществ поступает с выхлопными газами автомобилей, работающих на этилированном бензине [39]. Зона многоэтажной застройки расширяется на запад и юг (рис. 1).

Основная часть промышленных предприятий сосредоточена на правом берегу Толы в юго-западной части города. В промышленной зоне расположены заводы по производству стройматериалов, металлоремонтные производства, предприятия деревообрабатывающей, текстильной, обувной, пищевой отраслей, в том числе монгольского табака, а также склады. Топливно-энергетический комплекс – один из главных источников загрязнения окружающей среды Улан-Батора – включает три действующие ТЭЦ и большое количество

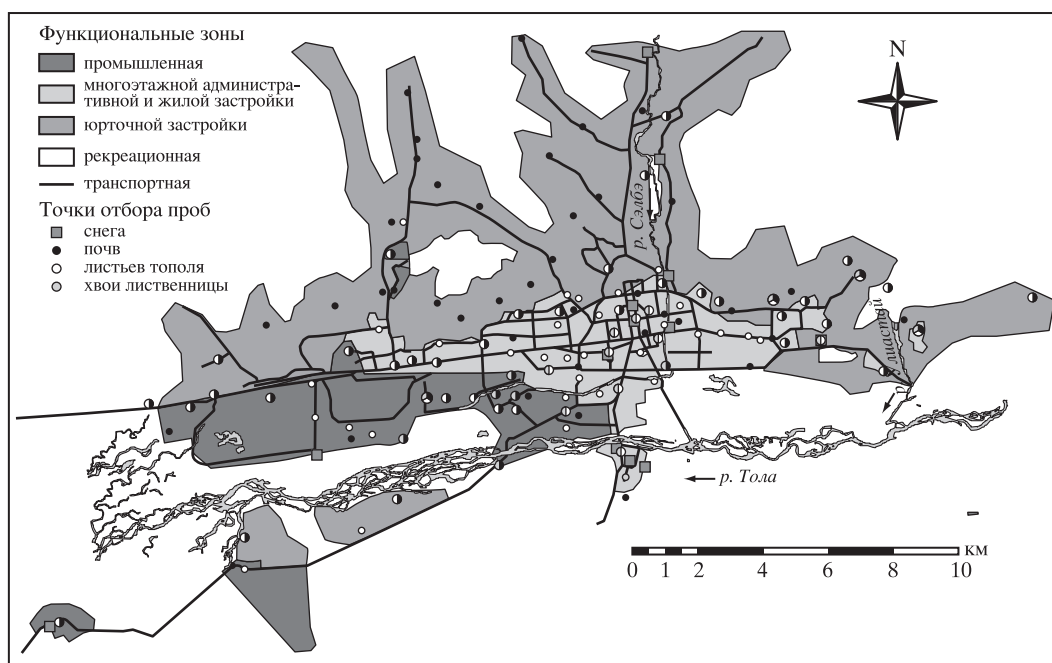


Рис. 1. Карта функциональных зон г. Улан-Батора с точками отбора проб.

котельных. Они работают на бурых углях месторождений Бага-Нур, Налайх и Чулут, которые в десятки раз по сравнению с кларками обогащены Pb, As, Mo, а также Cu, Sr, Cd, Ni [23]. К северу от основной промзоны находятся элеватор и мясокомбинат. С отходами и выбросами промышленных предприятий в окружающую среду могут поступать Zn, Pb, Co, Ni, Cu, Mo, Sr, Hg, V [10]. В западной части города находятся очистные сооружения, где стоки очищаются методом естественного разбавления и отстаивания, а затем выводятся за пределы города [12, 22]. Вода на выходе из очистных сооружений, как правило, бывает в десятки раз обогащена Cu, Cr, Ni, в разы – другими ТМ [10].

В соответствии с функциональным назначением территорий и специализацией источников загрязнения в Улан-Баторе выделены следующие функциональные зоны: промышленная, транспортная, многоэтажной застройки административного и жилого назначения, традиционной юрточной застройки, рекреационная (рис. 1).

Методика исследований. Для оценки загрязнения в 2008–2009 гг. опробовались почвы, древесные растения и снежный покров городских ландшафтов. Снег отбирался в феврале 2008 г. методом трубок площадью поперечного сечения 20 см². Из-за фрагментарности снежного покрова съемка велась в трех функциональных зонах: промышленной, многоэтажной и юрточной застройки, в основном на склонах северной экспо-

зиции (21 проба). В 10 км к западу от города были взяты 3 фоновые пробы. Снег растапливался при комнатной температуре, твердая и жидкая фазы разделялись путем фильтрования.

Почвенно-биогеохимическая съемка территории города выполнена летом 2008 и 2009 гг. (рис. 1). Смешанные пробы отбирались методом “конверта” 1×1 м из поверхностных (0–10 см) горизонтов городских почв по сетке с шагом 500–800 м. Среди растений изучались наиболее распространенные в городе виды: тополь лавролистный (*Populus laurifolia*), составляющий около 75% древесных насаждений, и лиственница сибирская (*Larix sibirica*), которая встречается на склонах северной экспозиции и иногда в виде посадок в центральной и восточной частях города. Отбирались листья и хвоя деревьев – органы с максимальной аккумуляцией микроэлементов (МЭ) [24].

Региональным фоном послужили почвы и растения из заповедников Богдо-Ула (в 2–3 км к югу), Тэрэлж (в 20 км к востоку) и сомона Алтан-Булак (в 50 км к западу от города), урбанизированным фоном служила рекреационная зона города. Всего было отобрано 90 поверхностных проб почв и 103 пробы растений (21 – хвои лиственницы и 82 – листьев тополя) в пределах Улан-Батора; 6 проб почв, 4 пробы хвои и 2 пробы листьев – в фоновых условиях. В 61 точке почвы опробовались вместе с растениями.

Растительный материал отбирался с деревьев примерно одинакового возраста в фазу вегетации после цветения, после пятидневного бездождевого периода. Листья промывались проточной водой и споласкивались дистиллятом для удаления элементов, осаждающихся на поверхности листа, но не участвующих в метаболизме растений [4]. Хвоя не отмывалась, так как воск на поверхности хвои прочно фиксирует попавшие на нее частицы. Образцы высушивались в течение суток при температуре 70–80°C.

В образцах воздушно-сухой почвы, сухого растительного материала, фильтрата и твердого осадка снеговой воды определялось валовое содержание элементов I (As, Cd, Pb, Zn), II (Co, Ni, Mo, Cu, Cr) и III (V, Sr) классов опасности методами масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS, масс-спектрометр Elan-6100 фирмы "Perkin Elmer", США) и атомно-эмиссионной спектрометрии (спектрометр Optima-4300 той же фирмы) во ВНИИ минерального сырья. В растениях дополнительно определялось содержание Fe и Mn, в почвах – основные физико-химические свойства: pH, количество гумуса, гранулометрический состав и содержание ионов CO_3^{2-} , SO_4^{2-} и Ca^{2+} в водной вытяжке.

Для каждой функциональной зоны города в программном пакете Statistica 7.0 вычислялись выборочные средние, стандартные отклонения, коэффициенты вариации C_v содержания элементов в снеге, почвах и растениях. Парагенетические ассоциации элементов с общими областями накопления и выноса выделялись с помощью кластерного анализа (алгоритм Complete Linkage), при этом сходство в поведении элементов оценивалось коэффициентами корреляции r . Регрессионные деревья, позволяющие выявить основные природные и антропогенные факторы дифференциации почв и растений по содержанию элементов-загрязнителей, построены в пакете SPLUS (MathSoft, 1999).

Для выявления региональной геохимической специализации фоновых территорий состав почв и взвеси снеговой воды сравнивался с кларками литосферы [8], растений – со средними концентрациями ТМ в ежегодном приросте растений суши [15]. Специализация почв, взвесей и растений определялась формулой, в числителе которой даются концентрирующиеся элементы с их коэффициентами накопления KK , в знаменателе – деконцентрирующиеся с коэффициентами рассеяния KP . Накопление и рассеяние ТМ на территории города по сравнению с региональным фоном оценивалось путем расчета коэффициентов концентрации (Kc) и рассеяния (Kp) для снеговой воды, взвесей, почв и растений в раз-

ных функциональных зонах: $Kc = Ca/C\phi$ и $Kp = C\phi/Ca$, где $C\phi$, Ca – средние концентрации элемента в фоновых и городских образцах соответственно. Для эколого-геохимической характеристики функциональных зон использовалась формула, аналогичная описанной для фоновых условий.

Суммарную полиэлементную нагрузку на снежный и почвенный покровы отражает суммарный показатель загрязнения Zc [10]:

$$Zc = \sum_{i=1}^n Kc_i - (n-1), \text{ где } n - \text{ количество ТМ с } Kc > 1.5.$$

Изменения в микроэлементном составе растительности характеризует предложенный нами комплексный показатель – коэффициент биогеохимической трансформации Zv , который рассчитывается по формуле

$$Zv = \sum_{i=1}^n Kc_i + \sum_{j=1}^{n_2} Kp_j - (n_1 + n_2 - 1),$$

где n_1 , n_2 – количество МЭ с $Kc > 1.5$ и с $Kp > 1.5$ соответственно. Как известно [4, 15, 17], растения реагируют на ухудшение состояния окружающей среды как накоплением, так и деконцентрацией МЭ, что обусловлено изменениями интенсивности биологических процессов. Коэффициент Zv отражает нарушение нормальных соотношений МЭ в органах растений, характерных для их фило- и онтогенетической специализации, и количественно описывает дисбаланс МЭ, возникающий в результате усиления антропогенной нагрузки.

Экологическое состояние растений диагностировалось по отношениям Fe/Mn, Cu/Zn и Pb/Mn. Отношение Fe/Mn является одним из наиболее информативных показателей процессов фотосинтеза, Cu/Zn – ферментосинтеза, а Pb/Mn характеризует соотношение токсичных и биофильных элементов [3, 16, 29, 30].

При санитарно-гигиенической оценке загрязнения почв использовались предельно допустимые концентрации (**ПДК**), принятые в Монголии [37]. При относительно равномерной сети опробования процент площади загрязненных почв определялся как число точек с превышением ПДК по отдельным элементам, отнесенное к общему количеству точек опробования на территории города.

Почвенно- и биогеохимическое картографирование выполнено в пакете ArcGIS 9.3 методом обратно взвешенных расстояний. Для предотвращения завышенной оценки загрязнения территории при интерполяции данных не использовались точки с экстремально высокими концентрациями ТМ, во много раз превышающими средний уровень на территории города [25]. На картах они показаны в виде точечных аномалий.

Таблица 1. Содержание тяжелых металлов в снеге, почвах и древесных растениях фоновых территорий

Показатель	As	Cd	Co	Cr	Cu	Mo	Ni	Pb	Sr	V	Zn
Взвешенная фракция снеговой воды ($k^* = 3$)											
Среднее, мг/кг	24.4	12.2	144	615	722	82.1	339	704	2628	692	2282
Cv, %	15.0	56.2	3.2	3.9	12.3	77.6	12.6	44.3	28.5	3.4	25.0
Растворенная фракция снеговой воды ($k = 3$)											
Среднее, мкг/л	1.9	0.07	0.3	2.0	7.8	0.4	0.3	0.4	42.3	3.0	14.3
Cv, %	78.4	150	61.6	0.0	58.4	0.0	0.0	59.9	61.0	0.0	24.5
Почвы ($k = 6$)											
Среднее, мг/кг	8.6	0.14	5.2	16.2	11.7	0.8	10.7	14.7	203	43.2	46.7
Cv, %	34.8	54.5	16.8	18.1	36.2	69.3	16.1	14.1	29.1	18.6	30.7
Листья тополя ($k = 2$)											
Среднее, мг/кг	0.48	0.08	1.7	2.2	5.1	0.16	1.3	0.37	125	0.05	22.5
сухого вещества											
Cv, %	4.2	12.5	29.7	6.4	8.2	6.3	16.8	8.1	17.0	141	28.3
Хвоя лиственницы ($k = 4$)											
Среднее, мг/кг	0.20	0.008	0.22	2.5	5.6	0.04	1.9	0.52	83.5	0.33	15.0
сухого вещества											
Cv, %	20.4	17.7	17.4	9.4	4.8	25.7	48.0	14.2	13.4	136	9.4

* здесь и далее в таблицах k – количество проб.

Результаты и обсуждение. Региональная геохимическая специализация снега, почв и древесных растений. Сопоставление концентраций ТМ в снеговой взвеси на фоновой территории (табл. 1) с кларками [8] позволило составить формулу ее геохимической специализации

$$\text{Cd}_{93}\text{Mo}_{75}\text{Pb}_{44}\text{Zn}_{28}\text{Cu}_{15}\text{As}_{14}\text{Co}_{8.0}\text{Sr}_{7.7}\text{V}_{7.7}\text{Cr}_{7.4}\text{Ni}_{5.8}$$

и выделить сильно концентрирующиеся (Cd, Mo, Pb), концентрирующиеся (Zn, Cu, As) и слабо концентрирующиеся (Co, Sr, V, Cr, Ni) металлы. Наибольшая концентрация во взвеси характерна для халькофильных элементов и Мо, которые интенсивно выбрасываются при сжигании углей и автомобильного топлива и достигают территории, где отбирались фоновые пробы снега. В то же время сидерофильные (Ni, Co) и литофильные (V, Cr, Sr) элементы накапливаются слабо, что согласуется с результатами исследований атмосферных аэрозолей [14, 16]. Концентрации ТМ в снеговой воде фоновой территории приводятся в табл. 1.

Геохимическая специализация фоновых почв (табл. 1) определяется формулой

$$\frac{\text{As}_{5.1}\text{Cd}_{1.0}}{\text{Ni}_{5.4}\text{Cr}_{5.1}\text{Cu}_{4.0}\text{Co}_{3.5}\text{V}_{2.1}\text{Zn}_{1.8}\text{Sr}_{1.7}\text{Mo}_{1.4}\text{Pb}_{1.1}} \cdot$$

По сравнению с кларками литосферы природные

почвы значительно (в 5.1 раза) обогащены As и обеднены многими ТМ, особенно Co, Cu, Cr и Ni (в 3.5–5.4 раза). Для Pb и Cd характерны околосредние содержания.

Концентрации МЭ в листьях тополя и в хвое лиственницы в фоновых условиях довольно близки, за исключением Sr и Co, что показывают формулы региональной биогеохимической специализации:

$$\frac{\text{As}_{4.0}\text{Sr}_{3.6}\text{Co}_{3.3}\text{Cd}_{2.3}\text{Cr}_{1.2}}{\text{Mo}_{3.3}\text{Pb}_{3.3}\text{V}_{3.3}\text{Cu}_{1.7}\text{Ni}_{1.7}\text{Zn}_{1.3}} \text{ для тополя}$$

$$\text{и } \frac{\text{Sr}_{2.4}\text{As}_{1.7}\text{Cr}_{1.4}}{\text{Mo}_{12.5}\text{V}_{5.0}\text{Cd}_{3.3}\text{Co}_{2.5}\text{Pb}_{2.5}\text{Zn}_{2.0}\text{Cu}_{1.4}\text{Ni}_{1.1}} \text{ для}$$

лиственницы. Содержание большинства ТМ в растениях фоновых территорий ниже среднемировых значений. Возможно, это связано с уменьшением интенсивности биологического поглощения элементов в аридных областях, а также с преобладанием при расчете мировых кларков данных по растениям гумидных ландшафтов, где интенсивность поглощения элементов выше [19].

Таким образом, геохимическую специфику региона определяют Mo, Pb и Cd, которыми обогащена взвесь фоновой снеговой воды, и As, высокие концентрации которого обнаружены в фоновых почвах и растениях. Аккумуляцию As в почвах и растениях определяет микроэлементный

Таблица 2. Содержание тяжелых металлов в снеге, почвах и древесных растениях г.Улан-Батора

Показатели	As	Cd	Co	Cr	Cu	Mo	Ni	Pb	Sr	V	Zn
Взвешенная фракция снеговой воды ($k = 17$)											
Среднее, мг/кг	62.1	14.3	310	1233	1201	242	826	1298	8226	1391	5627
C_v , %	123	120	115	87.9	116	246	161	108	161	107	132
K_c	2.5	1.2	2.2	2.0	1.7	2.9	2.4	1.8	3.1	2.0	2.5
Растворенная фракция снеговой воды ($k = 17$)											
Среднее, мкг/л	31.6	0.20	4.3	3.3	23.4	48.3	8.3	1.2	1283	9.9	64
C_v , %	107	158	114	83.1	78.4	210	117	85.8	137	171	136
K_c	33.1	2.7	13.8	1.7	3.0	121	33.2	3.1	30.3	3.3	4.5
Почвы ($k = 90$)											
Среднее, мг/кг	10.8	0.25	8.0	32.7	22.4	1.8	17.0	45.9	300	54.3	120
C_v , %	24.8	50.4	29.1	81.4	34.8	61.6	33.8	124	28.7	25.2	77.8
K_c	1.3	1.9	1.5	2.0	1.9	2.2	1.6	3.1	1.5	1.3	2.6
Листья тополя ($k = 82$)											
Среднее, мг/кг сухого вещества	0.29	0.25	0.69	1.2	6.6	0.44	1.14	0.78	172	0.17	70.7
C_v , %	60.3	57.5	60.9	97.5	27.8	61.1	46.5	62.9	26.5	231	57.5
K_c	—	3.1	—	—	1.3	2.8	—	2.1	1.4	—	3.1
K_p	1.7	—	2.5	1.8	—	—	1.1	—	—	2.8	—
Хвоя лиственницы ($k = 21$)											
Среднее, мг/кг сухого вещества	0.71	0.03	0.52	2.8	8.0	0.30	1.7	2.3	119	1.6	29.1
C_v , %	45.1	71.0	77.8	40.6	65.5	42.4	60.8	47.7	26.5	54.3	59.5
K_c	3.6	3.9	2.4	1.1	1.4	7.1	—	4.4	1.4	4.9	1.9
K_p	—	—	—	—	—	—	1.1	—	—	—	—

состав почвообразующих пород [20]. Бионакопление Sr, Co и Cd связано, скорее всего, с видовой избирательностью поглощения.

Техногенная геохимическая трансформация депонирующих сред. В условиях города взвесь снеговой воды по сравнению с фоном обогащена всеми рассматриваемыми ТМ:

$$\text{Sr}_{3.1}\text{Mo}_{2.9}\text{As}_{2.5}\text{Zn}_{2.5}\text{Ni}_{2.4}\text{Co}_{2.2}\text{V}_{2.0}\text{Cr}_{2.0}\text{Pb}_{1.8}\text{Cu}_{1.7}\text{Cd}_{1.2}$$

(табл. 2). Наиболее интенсивно накапливаются Sr, Mo и As, источниками которых являются продукты сжигания бурых углей [23, 38]. Концентрацию поллютантов в снеговой воде отражает формула

$$\text{Mo}_{121}\text{Ni}_{33}\text{As}_{33}\text{Sr}_{30}\text{Co}_{14}\text{Zn}_{4.5}\text{V}_{3.3}\text{Pb}_{3.1}\text{Cu}_{3.0}\text{Cd}_{2.7}\text{Cr}_{1.7}$$

Высокие коэффициенты K_c свидетельствуют о многократном возрастании поставок в атмосферу техногенных элементов, способных активно мигрировать в ландшафтах, с выбросами топливной энергетики. Контрастность аномалий твердофазных выпадений намного меньше, чем растворенной фракции, однако по массе они значительно

превосходят аэрозольные [3, 22, 27]. Низкие значения K_c объясняются повышенным фоновым содержанием ТМ, обусловленным значительной (более 10 км) дальностью переноса техногенной пыли. В растворенной фракции снега выделяются ассоциации Mo–Sr–Cd–V ($r = 0.53\text{--}0.97$), As–Zn–Ni–Co ($r = 0.79\text{--}0.96$) и Pb–Cu ($r = 0.78$ при минимально значимом $r_{\min} = 0.49$), во взвешенной фракции – Sr–Cd–Ni–Pb–Co–As ($r = 0.96\text{--}1.00$) и Zn–V–Cu–Cr ($r = 0.79\text{--}0.98$ при $r_{\min} = 0.65$). Ассоциация Pb–Cu связана с выбросами автотранспорта, остальные – с выбросами топливной энергетики.

Городские почвы обогащены относительно природного фона всеми рассматриваемыми элементами:

$$\text{Pb}_{3.1}\text{Zn}_{2.6}\text{Mo}_{2.2}\text{Cr}_{2.0}\text{Cd}_{1.9}\text{Cu}_{1.9}\text{Ni}_{1.6}\text{Co}_{1.5}\text{Sr}_{1.5}\text{As}_{1.3}\text{V}_{1.3}$$

(табл. 2). Наибольшим накоплением отличаются Pb и Zn – элементы с высокой технофильностью²,

² Технофильность – отношение ежегодной добычи или производства элемента в тоннах к его кларку в литосфере [31].

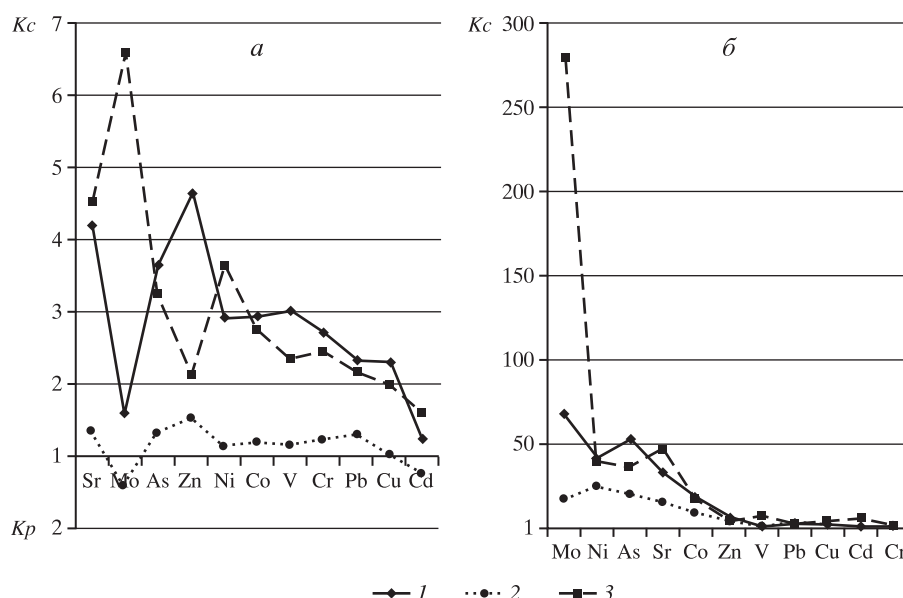


Рис. 2. Геохимические спектры тяжелых металлов во взвешенной (а) и растворенной (б) фракциях снеговой воды в г. Улан-Баторе. Функциональные зоны: 1 – промышленная, 2 – многоэтажной застройки, 3 – юрточной застройки.

поставляемые в окружающую среду различными производствами и транспортом. Наиболее устойчивые ассоциации в почвах образуют Ni–Co–V ($r = 0.73–0.85$), As–Sr ($r = 0.4$) и Cu–Cd–Cr–Zn ($r = 0.39–0.68$ при $r_{min} = 0.25$). Ассоциация Ni–Co–V, к которой иногда присоединяется Cr, обнаруживается как в фоновых, так и в городских почвах. Она унаследована от почвообразующих пород – сланцев и глин, обогащенных этими элементами [5]. К техногенным относятся ассоциации As–Sr и Cu–Cd–Cr–Zn, первая из которых прослеживается во многих зонах и обязана своим образованием выбросам золы при сжигании угля [23, 38]. Другая приурочена к промышленной и жилой зонам с современной застройкой, все входящие в нее элементы обладают высокой технофильностью и присутствуют в выбросах предприятий, автотранспорта, в промышленных и бытовых отходах [10, 31].

Микроэлементный состав листьев тополя по сравнению с фоном изменяется незначительно, формула его геохимической специализации:

$$\frac{Zn_{3.1} Cd_{3.1} Mo_{2.8} Pb_{2.1} Sr_{1.4} Cu_{1.3}}{V_{2.8} Co_{2.4} Cr_{1.8} As_{1.7} Ni_{1.1}}.$$

Для листьев тополя характерны ассоциации Ni–Cu–Zn ($r = 0.25–0.51$), Cr–As ($r = 0.4$) и V–Pb ($r = 0.61$ при $r_{min} = 0.23$). Механизм поглощения Zn и Cu, вероятно, один и тот же, и каждый из них может вследствие взаимной конкуренции ингибировать поглощение другого [17]. Хвоя лиственницы аккумулирует

$$\frac{Mo_{7.1} V_{4.9} Pb_{4.4} Cd_{3.9} As_{3.6} Co_{2.4} Zn_{1.9} Cu_{1.4} Sr_{1.4} Cr_{1.1}}{—},$$

которые образуют ассоциации Cr–Ni–Cu–Cd ($r = 0.48–0.86$), Zn–Sr ($r = 0.44$) и V–Pb ($r = 0.44–0.78$ при $r_{min} = 0.44$). Первая из них обусловлена промышленным производством, вторая, вероятно, – видовой избирательностью поглощения, а V–Pb, как и в листьях тополя, – поставками из атмосферы [17, 34, 35].

При высокой антропогенной нагрузке отличительной чертой ассоциаций ТМ в компонентах ландшафта является полиэлементность. При этом ассоциации в поверхностных горизонтах почв и вегетативных органах растений свидетельствуют об общих источниках и сходстве поведения поллютантов в различных ландшафтно-геохимических условиях.

Для всех депонирующих сред города характерна повышенная вариабельность концентраций ТМ (табл. 2), которая обусловлена техногенным загрязнением [29, 43, 44].

Функциональные зоны города заметно различаются уровнями содержания ТМ в почвах, растениях и снеге (рис. 2–3). В рекреационной зоне ТМ обычно накапливаются слабо [11, 33]. Для большинства металлов в почвах $Kc \leq 1.6$, небольшое накопление отмечается для $\frac{Mo_{2.1} Ni_{1.9} Cr_{1.8}}{—}$. В листьях тополя Kc не превы-

шают 2.4, для трех элементов наблюдается деконцентрация $\frac{—}{Cr_{7.3} Co_{3.7} As_{3.0}}$.

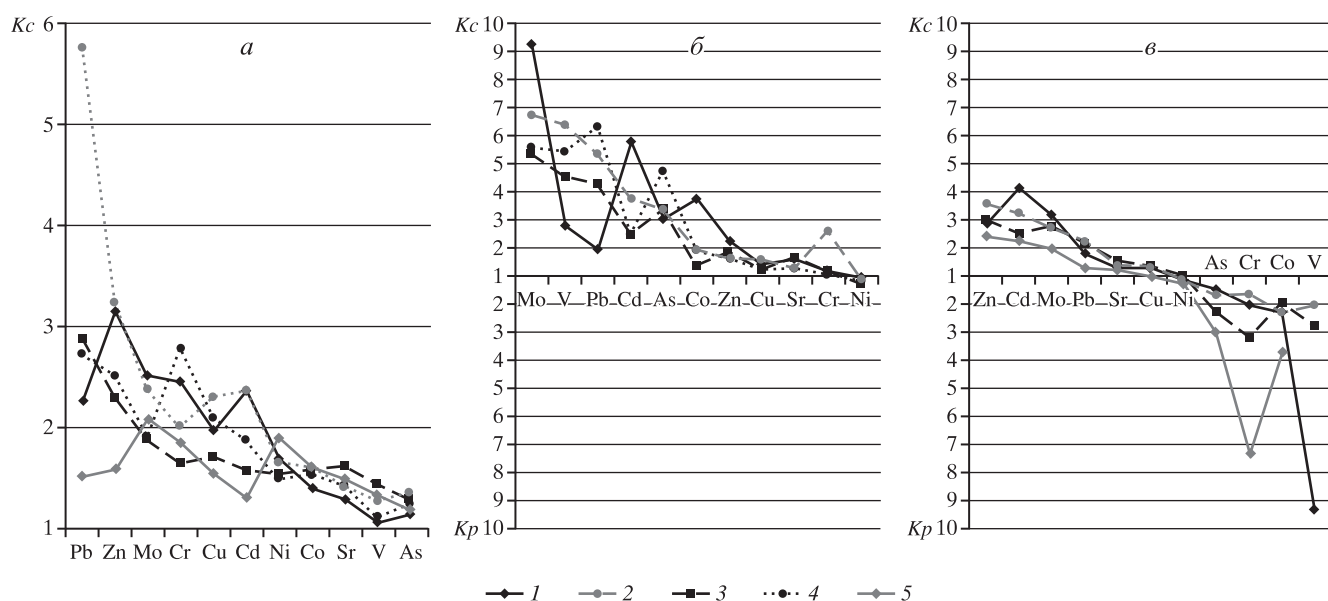


Рис. 3. Геохимические спектры тяжелых металлов в почвах (а), хвое лиственницы (б) и листьях тополя (в) в г. Улан-Баторе. Функциональные зоны: 1 – промышленная, 2 – многоэтажной застройки, 3 – юрточной застройки, 4 – транспортная, 5 – рекреационная.

Промышленные зоны, как правило, испытывают наиболее сильное антропогенное воздействие и отличаются максимальными уровнями концентраций поллютантов в депонирующих средах [10, 33]. Накопление ТМ в снежном покрове промышленной зоны Улан-Батора характеризуется формулами:

$$\frac{\text{Zn}_{4.6} \text{Sr}_{4.2} \text{As}_{3.6} \text{V}_{3.0} \text{Co}_{2.9} \text{Pb}_{2.9} \text{Cr}_{2.7} \text{Cu}_{2.3} \text{Ni}_{2.9}}{-}$$

для твердой фракции и $\frac{\text{Mo}_{67} \text{As}_{52} \text{Ni}_{41} \text{Sr}_{32} \text{Co}_{17} \text{Zn}_{6.4} \text{Pb}_{2.9}}{-}$ – для жидкой.

В почвах наиболее интенсивно аккумулируются Zn, Mo, Cr, Cd, Pb, Cu (K_c 2.8–2.0). Повышенное содержание Pb, Cu и Zn (K_c = 6–8) в почвах и Cd, Pb, Cr (K_c = 42, 19, 10 соответственно) в снеге центральной части города зафиксировано также в более ранних исследованиях [22]. Лиственница реагирует на техногенную нагрузку активным накоплением металлов в хвое $\frac{\text{Mo}_{9.3} \text{Cd}_{5.8} \text{Co}_{3.8} \text{As}_{3.1} \text{Zn}_{2.5}}{-}$, в листьях тополя на-

ряду с накоплением происходит деконцентрация: $\frac{\text{Cd}_{4.1} \text{Mo}_{3.2} \text{Zn}_{2.9}}{\text{V}_{9.3} \text{Co}_{2.3} \text{Cr}_{2.0}}$. Такие изменения в микроэлементном составе растений приводят к появлению хлорозов, некрозов и других биогеохимических эндемий [35].

Вблизи крупных автомагистралей в почвах аккумулируются $\frac{\text{Cr}_{2.8} \text{Pb}_{2.7} \text{Zn}_{2.5} \text{Cu}_{2.1}}{-}$, в ли-

стьях тополя – $\frac{\text{Co}_{2.9} \text{V}_{2.2}}{-}$, в хвое лиственницы – $\frac{\text{Pb}_{6.3} \text{Mo}_{5.6} \text{V}_{5.5} \text{As}_{4.7} \text{Cd}_{2.5}}{-}$. Локализация аномалий ТМ в городских промзонах и заметное влияние автомагистралей на концентрацию Pb, Zn, V, Cd в ландшафтах отмечены во многих других работах [1, 15, 17, 36, 43, 44, 45].

В загрязнении снежного покрова селитебной зоны выявлены существенные различия между двумя типами застройки. Районы многоэтажной застройки отличаются слабым накоплением поллютантов как во взвеси, так и в растворенной форме, что согласуется с данными [2, 7]. Юрточным районам свойственна интенсивная аккумуляция $\frac{\text{Mo}_{278} \text{Sr}_{46} \text{Ni}_{38} \text{As}_{36} \text{Co}_{17} \text{V}_{7.2} \text{Cd}_{5.7} \text{Cu}_{3.8} \text{Zn}_{3.6} \text{Pb}_{3.0}}{-}$

в растворенной форме и $\frac{\text{Mo}_{6.6} \text{Sr}_{4.5} \text{Ni}_{3.6} \text{As}_{3.2} \text{Co}_{2.8} \text{Cr}_{2.5} \text{V}_{2.3} \text{Pb}_{2.2} \text{Zn}_{2.1} \text{Cu}_{2.0}}{-}$

во взвешенной. Особенно выделяется Mo, концентрации которого в снеговой воде в сотни раз превышают фоновые значения. ТМ в растворенной фракции снеговой воды отличаются высокой миграционной способностью, вследствие чего выносятся из ландшафтов в период снеготаяния. Миграция ТМ происходит и во взвешенной форме, так как районы юрточной застройки расположены преимущественно на склонах.

Источниками элементов интенсивного накопления являются используемые для отопления

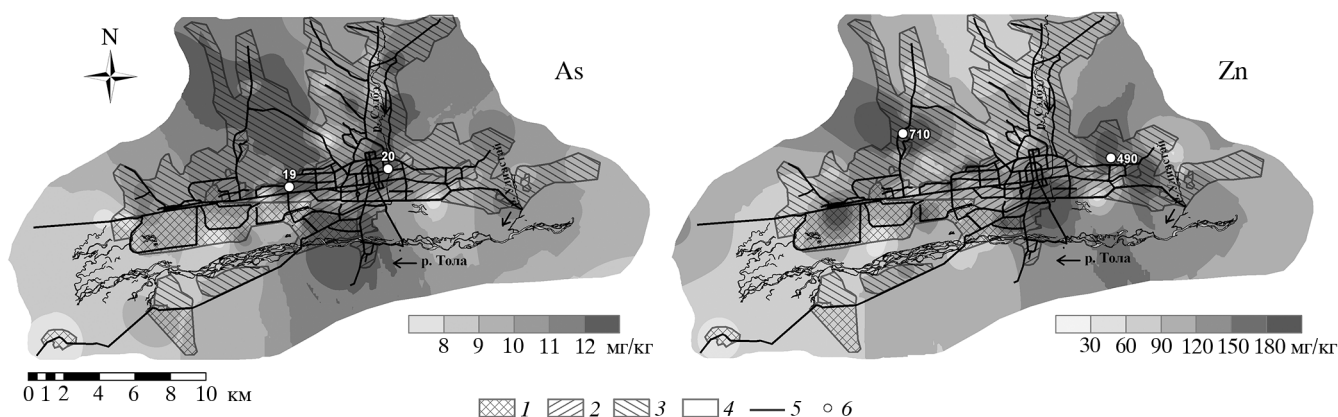


Рис. 4. Распределение As и Zn в поверхностных горизонтах почв г. Улан-Батора. Функциональные зоны: 1 – промышленная, 2 – многоэтажной застройки, 3 – юрточной застройки, 4 – рекреационная; 5 – транспортная; 6 – локальные аномалии, мг/кг.

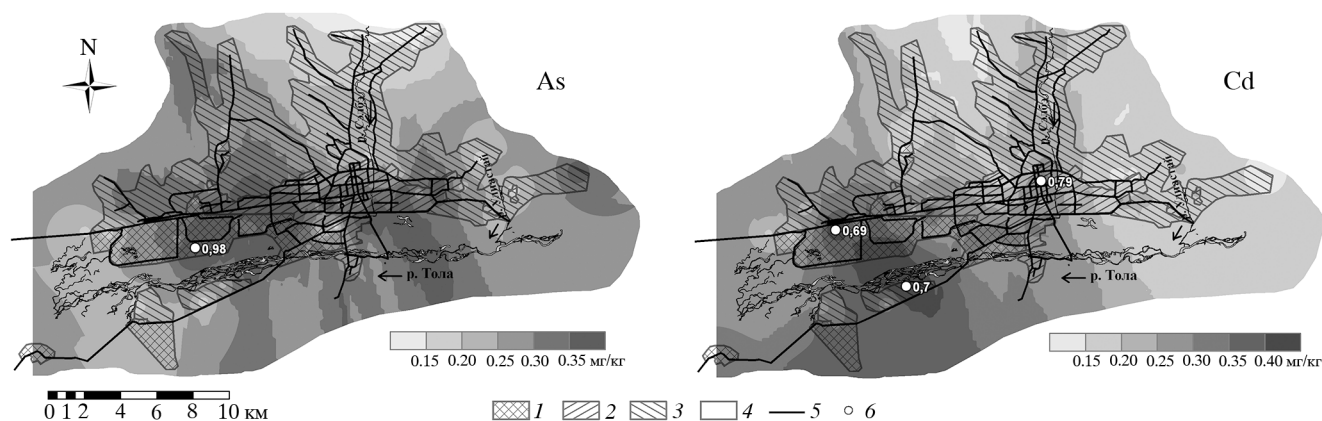


Рис. 5. Распределение As и Cd в листьях тополя г. Улан-Батора. Условные обозначения см. на рис. 4.

угли. Анализ парагенетических ассоциаций и коэффициентов K_c для снежного покрова позволил выявить специфику загрязнения продуктами сжигания угля: в промышленной зоне выпадают преимущественно As и Zn (и в растворенной, и во взвешенной формах), в юрточной – Mo, Sr, Cd. Различный состав выбросов объясняется разной температурой горения на установках ТЭЦ и в индивидуальных отопительных системах [12, 40].

Несмотря на значительную эмиссию, процессы аккумуляции ТМ в почвенно-растительном покрове юрточных районов идут менее интенсивно, чем в районах многоэтажной застройки. Почвы в многоэтажных кварталах обогащены $\frac{Pb_{5.8}Zn_{3.2}Cd_{2.4}Mo_{2.4}Cu_{2.3}Cr_{2.0}}{-}$, причем содержание Pb и Zn здесь максимальное в городе, тогда как в юрточной – $\frac{Pb_{2.9}Zn_{2.3}Mo_{1.9}}{-}$. Биогеохимические особенности этих зон проявляются в менее

интенсивном накоплении и более активной де-концентрации ТМ в юрточных районах. Для хвои лиственницы формулы специализации имеют вид $\frac{Mo_{6.7}V_{6.4}Pb_{5.4}Cd_{3.8}As_{3.4}Cr_{2.6}}{-}$ в зоне многоэтажной застройки и $\frac{Mo_{5.4}V_{4.6}Pb_{4.3}As_{3.4}Cd_{2.5}}{-}$ – в юрточной, для листьев тополя: $\frac{Zn_{3.6}Cd_{3.3}Mo_{2.7}Pb_{2.2}}{Co_{2.3}V_{2.0}}$

и $\frac{Zn_{3.0}Mo_{2.8}Cd_{2.5}Pb_{2.1}}{Cr_{3.2}V_{2.7}As_{2.3}}$ соответственно.

Пространственное распределение поллютантов в почвенно-растительном покрове. По данным о содержании ТМ в почвенном покрове и листьях тополя на территории Улан-Батора была построена серия геохимических карт (рис. 4, 5), характеризующих пространственное распределение поллютантов. Их анализ показал, что в почвенном покрове ряда функциональных

зон концентрируются ТМ, поступление которых связано в основном с выбросами автотранспорта – Cd, Cu, Pb, Zn. Точки с аномально высокими концентрациями этих элементов (K_c до 30) наблюдаются вдоль дорог в центре города, в восточной части промзоны, а также в юрточных районах на востоке и северо-западе города. Зависимость накопления этих ТМ в поверхностных горизонтах почв от автомобильных выбросов подчеркнута и в других исследованиях [22, 39, 45]. As, Sr и V отличаются повышенным содержанием в углях, используемых при отоплении, поэтому они накапливаются в почвах в северной и восточной частях города, вблизи ТЭЦ и в юрточной застройке. Концентрации Ni, Co, Cr в почвах нарастают в северо-западном направлении, в связи с выходами обогащенных ими глинистых сланцев. Другой максимум этих ТМ приурочен к промышленной зоне, где находится ряд строительных предприятий.

В листьях тополя отдельные ТМ концентрируются вблизи источников их выбросов в атмосферу: As и Cd в промышленной зоне, Zn и Cu – в промышленных и транспортных районах, Cr – в северо-западной части города. Pb и V накапливаются в растениях восточной части города, что связано с большей дальностью их атмосферного переноса и преобладанием западных ветров. Важная роль аэрогенного поступления Pb и V в растения под влиянием выбросов автотранспорта отмечена в работах [1, 15, 43, 44]. Выявлена деконцентрация Co и Ni в промышленно-транспортных районах, вероятно, из-за их антагонизма с Zn [17, 34]. Содержание Mo и в почвах, и в листьях тополя возрастает в долинах рек – наибольшие концентрации Mo с K_c до 10.4 в почвах и 9.4 в листьях тополя обнаружены вдоль р. Тола и Сэлбэ. В степных ландшафтах Mo переходит в анионную форму, активно мигрирует и накапливается в подчиненных позициях рельефа [17, 18, 31].

Таким образом, общей тенденцией для городских почв и растений является заметный рост концентраций ТМ вблизи источников загрязнения. Помимо этого, для листьев тополя важную роль играют атмосферный перенос и физиологические процессы в самих растениях.

Факторы, определяющие содержание ТМ в почвах и древесной растительности. Для определения природных и антропогенных факторов, контролирующих аккумуляцию ТМ в депонирующих средах, проведен многофакторный регрессионный анализ геохимических данных с достаточным объемом выборок – для почв и ли-

стьев тополя. Интерпретация результатов регрессионного анализа проводилась с использованием известных закономерностей поведения ТМ в ландшафтах [1, 4, 10, 15, 16, 17, 31].

Варьирование содержания ТМ в почвах оценивалось в зависимости от основных физико-химических свойств почв: pH, количества физической глины, содержания гумуса, ионов CO_3^{2-} и SO_4^{2-} , а также от ландшафтных факторов: абсолютной высоты, характеризующей положение точки опробования в рельефе, и почвообразующих пород (аллювий, сланцы, глины, граниты). В качестве комплексной антропогенной характеристики использовался фактор “функциональная зона”, определяющий вид использования городской территории, специфику источников загрязнения и интенсивность поступления ТМ в ландшафты.

Для листьев тополя анализировался следующий комплекс факторов и условий: абсолютная высота, почвообразующие породы (аллювий, сланцы, глины), сектор города (западный, центральный, восточный), отражающий воздействие воздушного переноса ТМ, и функциональная зона. В число факторов не было включено содержание ТМ в почвах, так как результаты корреляционного анализа показали его незначительное влияние [21]. При возрастании роли фолиарного поглощения в условиях города [4] слабую корреляцию между содержанием ТМ в почвах и листьях можно объяснить тем, что пыль переносится на большие расстояния и оседает на растения в других районах города.

Поведение поллютантов в почвах контролируется в основном физико-химическими свойствами самих почв (табл. 3). Определяющее влияние (с рангом 1 или 2) на накопление всех рассматриваемых элементов, кроме Cr и Ni, оказывает количество гумуса в поверхностных горизонтах, так как многие органо-минеральные соединения слабоподвижны, а с усилением гумификации прочность адсорбции на биогеохимическом барьере увеличивается [17, 20]. Содержание физической глины, определяющей емкость сорбционного геохимического барьера, является наиболее значимым фактором для Co и Ni в связи с их активной сорбцией глинистыми частицами и вторым по значимости фактором для остальных элементов, кроме Cd и Mo. Содержание сульфат-иона оказывает первостепенное влияние на поведение Pb и Sr, содержание которых уменьшается с возрастанием доли SO_4^{2-} в почвах. Для Mo данный фактор занимает второе по значимости место, с подкислением среды уменьшается доля подвижных анионных форм Mo и увеличиваются его концентрации.

Таблица 3. Влияние природных и антропогенных факторов на вариабельность концентраций тяжелых металлов в почвах и древесных растениях г. Улан-Батора

Факторы	As	Cd	Co	Cr	Cu	Mo	Ni	Pb	Sr	V	Zn	Zc/Zv
Почвы ($k = 90$)												
Содержание гумуса	1*	1	3	–	1	1	–	2	4	4	1	1
pH	2	2	–	1	–	–	3	4	2	3	2	3
Количество физической глины	2	5	1	2	–	–	1	3	2	2	2	2
Содержание иона CO_3^{2-}	–	2	–	–	2	2	2	–	–	–	2	2
Содержание иона SO_4^{2-}	–	4	–	3	–	2	–	1	1	3	–	–
Абсолютная высота (положение в рельефе)	2	–	2	–	–	–	–	–	3	2	–	4
Почвообразующие породы	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Функциональная зона	–	3	–	2	2	2	–	4	3	1	4	–
Листья тополя ($k = 82$)												
Абсолютная высота (положение в рельефе)	1	1	1	2	1	2	1	3	2	2	1	2
Почвообразующие породы	–	–	–	–	–	1	–	–	–	–	–	1
Сектор города	3	–	3	–	2	–	–	1	2	1	2	4
Функциональная зона	2	2	2	1	–	3	2	2	1	3	3	3

* Степень влияния факторов оценивалась рангами, показывающими уменьшение их значимости от 1 до 5.

Содержание иона CO_3^{2-} входит в число определяющих факторов (ранг 2) для Cd, Zn, Ni, Cu, Mo, которые образуют слаборастворимые карбонаты (кроме Mo). Величина pH оказывает влияние на вариабельность содержания почти всех ТМ. Ведущее значение она имеет для Cr, As, Sr, Cd и Zn, форма нахождения которых в почвенном растворе зависит от реакции среды [17, 20]. Абсолютная высота (положение в рельефе) значима для As, Co, V, Sr, источники которых – выбросы As, V, Sr в районах юрточной застройки и выходы элювия глинистых сланцев, обогащенных Co – расположены на более высоких гипсометрических уровнях. Фактор “функциональная зона” играет важную роль в вариабельности концентраций V (ранг 1) и Cr, Cu, Mo (ранг 2).

Для листьев тополя первостепенным фактором для большинства ТМ (As, Cd, Co, Cu, Ni, Zn) является абсолютная высота, характеризующая геохимический ландшафт и размещение источников загрязнения (табл. 3). Этот фактор проявляется на различных уровнях значимости для всех ТМ, кроме Pb. Линейной зависимости концентрации элементов от высоты не прослеживается, но, как правило, количество As, Cd, Cr в листьях тополя выше в долине реки, а Co, Cu, Ni, Zn – на склонах. Фактор “сектор города”, определяющий влияние воздушного переноса на концентрацию ТМ в листьях тополя, оказался наиболее важным для V и Pb. Летом в Улан-Баторе преобладают западные ветры, и концентрации V

и Pb в восточной части города в 2–4 раза выше, чем в других секторах, что говорит о повышенной миграционной способности этих элементов в атмосфере, отмеченной ранее в [10]. Функциональное использование территории наиболее сильно повлияло на концентрации Cr и Sr. Содержание Cr в зонах многоэтажной застройки и транспортной оказалось вдвое выше по сравнению с другими зонами, а содержание Sr в жилых зонах – в 1.5 раза выше. Влияние почвообразующих пород проявилось в повышенном (в 2–3 раза) бионакоплении Mo в ландшафтах с аллювиальными отложениями, что согласуется с особенностями миграции этого металла в степных ландшафтах [17, 18].

Как видно из рис. 6, тополя, произрастающие на глинах и сланцах (на склонах), подвержены меньшей биогеохимической трансформации, чем произрастающие на аллювии (в долине реки). Наибольшие коэффициенты Zv наблюдаются для тополей в восточной части города, в жилебно-транспортных районах на аллювиальных почвах у подножий склонов.

Эколого-геохимическая оценка состояния ландшафтов г. Улан-Батора. Геохимические данные об отдельных компонентах – снеге, почвах и растениях города – послужили основой для интегральной оценки состояния городских ландшафтов. При этом микроэлементный состав снежного покрова и почв дал информацию о раз-



Рис. 6. Регрессионное дерево для Z_v в листьях тополей г. Улан-Батора. В фигурах без заливки даны факторы дифференциации, на соединительных линиях указаны градации факторов. В фигурах с серой заливкой даны: среднее содержание элемента в листьях тополя при данном сочетании факторов; коэффициент вариации (C_v); количество проб (k).

мещении, специализации и интенсивности источников загрязнения, а растений – о направлении и дальности распространения загрязняющих веществ атмосферным путем.

Загрязнение снежного покрова. Ландшафты Улан-Батора испытывают максимальные техногенные нагрузки в зимний период, когда в атмосферу поступают продукты горения бурых углей. При низком потенциале самоочищения атмосферы города снежный покров принимает практически все атмосферные выпадения и накапливает их до начала снеготаяния.

Основная масса атмосферных поллютантов поступает на подстилающую поверхность в нерастворимой форме (взвеси), суммарный показатель загрязнения которой в среднем по городу составляет 14.4 и оценивается как низкий (табл. 4). По количеству растворенных форм ТМ городской снег характеризуется $Z_c = 240$, что соответствует очень высокой степени загрязнения. Часть твердофазных выпадений при таянии снега переходит в почвы, в то время как растворенная фракция снеговой воды просачивается через легкие песчаные и песчано-галечниковые отложения и попадает в поверхностные и грунтовые воды. Среди функциональных зон наиболее сильно загрязнены районы юрточной застройки: для твердой фазы снега $Z_c = 23.3$ (средний уровень загрязнения), для жидкой фазы – 431 (максимальный уровень).

Загрязнение почв. Для почв Улан-Батора показатель Z_c в среднем равен 11 (табл. 4), что указывает на низкий уровень их загрязнения. Более 50 % территории – почти вся рекреационная, жилая юрточная и транспортная зоны – характеризуется очень слабым загрязнением ($Z_c < 8$). Слабое загрязнение ($8 < Z_c < 16$) наблюдается на 38% территории, принадлежащей промышленной, обеим селитебным зонам, части рекреационной зоны. На остальных 12% территории отмечен средний уровень загрязнения ($Z_c > 16$), а в двух локальных аномалиях – высокий ($Z_c > 32$). Точки с $Z_c > 16$ попадают в промышленно-транспортно-селитебный ареал в центре города с максимальной техногенной нагрузкой. В целом западная часть города подвержена меньшему загрязнению, что связано с недавним освоением этой территории и с преобладанием ветров западных румбов. При сравнении содержания элементов в городских почвах с ПДК, принятыми в Монголии [37], фиксируется превышение норм для As, Cr, Mo, Pb и Zn. Экологическую опасность ТМ отражает процент территории с превышением ПДК, который уменьшается в ряду As (100%) > Zn (38) > Mo (20) > Pb (18) > Cr (4).

Состояние древесных растений. Экологическое состояние городских растений оценивалось по величине отношений Fe/Mn, Cu/Zn и Pb/Mn в листьях и хвое. На фоновых территориях отношение Fe/Mn выше среднемирового значения

Таблица 4. Оценка суммарного загрязнения компонентов ландшафтов г. Улан-Батора и его отдельных функциональных зон

Функциональная зона	Значения суммарных показателей загрязнения				
	<i>Z_c</i> снега		<i>Z_c</i> почв	<i>Z_v</i> растений	
	взвесь	вода		листья тополя	хвоя лиственницы
Промышленная	22	216	11	13	24
Жилая, многоэтажная	3	89	16	13	23
Жилая, юрточная	23	431	9	13	17
Транспортная	–	–	11	14	21
Рекреационная	–	–	7	8	–
Город в целом	14	240	11	13	22

Примечание. Уровни загрязнения почв и снега и соответствующей им экологической опасности (по [13], с изменениями): низкий / неопасный (*Z_c*: почвы <16, снега <32); средний / умеренно-опасный (почвы 16–32, снега 32–64); высокий / опасный (почвы 32–64, снега 64–128), очень высокий / очень опасный (почвы 64–128, снега 128–256), максимальный / чрезвычайно опасный (почвы >128, снега >256).

в 3.5 раза у лиственницы и в 5 раз у тополя, что может быть связано с региональными особенностями процессов поглощения элементов. В городской среде в хвое лиственницы отношение Fe/Mn в среднем возрастает еще в 3 раза, а в зоне автомагистралей – в 4 раза, отношение Cu/Zn изменяется слабо, а отношение Pb/Mn увеличивается почти в 10 раз. Наибольший техногенный пресс растения испытывают в транспортной зоне, где величина Pb/Mn в хвое превышает фоновую в 18 раз. Изменение отношений Fe/Mn, Cu/Zn и Pb/Mn в хвое с ростом антропогенной нагрузки свидетельствует о нарушении сбалансированности в микроэлементном обеспечении процессов метаболизма лиственницы и ухудшении ее жизнеспособности в городских ландшафтах. Для листьев тополя соотношение Fe/Mn не отличается от фонового, что говорит о нормальном протекании процессов фотосинтеза. Отношение Cu/Zn уменьшается в 2 раза, так как по мере усиления азротехногенного воздействия происходит опережающее накопление Zn в листовой ткани, приводящее к нарушению процессов ферментосинтеза. Значение Pb/Mn увеличивается по сравнению с фоном в 3 раза, а в транспортной зоне – в 4.5 раза. Меньшие по сравнению с лиственницей изменения отношений Fe/Mn и Pb/Mn в листьях тополя подтверждают, что этот вид развивает специальные адаптивные механизмы и формирует стратегии выживания в условиях повышенного запыления и загрязнения [42], хотя процессы ферментосинтеза у тополя оказались более уязвимыми. Толерантность тополя к загрязнению может объясняться тем, что растения с высокой зольностью более устойчивы

к воздействию газообразных веществ и токсикантов [13].

Предложенный нами коэффициент *Z_v* для листьев тополя в среднем по городу равен 13, для хвои лиственницы – 22 (табл. 4), то есть изменения микроэлементного состава хвои лиственницы почти в 2 раза более существенные, чем листьев тополя. *Z_v* для листьев тополя слабо дифференцирован по функциональным зонам, что согласуется с выводом о толерантности тополя к загрязнению; наибольшие изменения с аномальной величиной *Z_v* = 49 зафиксированы в транспортной зоне, наименьшие с *Z_v* = 5 – в рекреационной. Для хвои лиственницы максимум *Z_v* = 40 наблюдался в промышленной зоне, минимум *Z_v* = 17 – в зоне юрточной застройки.

Фитотоксичность содержания ТМ в листьях тополя оценивалась путем сравнения с известными диапазонами дефицитных, нормальных и токсичных концентраций МЭ в зрелых тканях листьев [17]. Выявлено избыточное содержание Zn в 15% опробованных растений, концентрации ряда других металлов подходят к верхней границе зоны оптимума. Обнаружен недостаток таких важных МЭ, как Cu (в 16% проб) и Mo (11%), катализирующих процессы окисления-восстановления в клетках растений [1, 17]. Аналогичные результаты были получены для древесных растений в зоне влияния ТЭЦ в Сербии, где установлен низкий общий уровень загрязнения и дефицит ряда МЭ, включая Cu и Mn [42].

Таким образом, в ландшафтах Улан-Батора тополь *Populus laurifolia* является видом, более толерантным к антропогенному воздействию.

Среди древесных и кустарниковых видов растений, произрастающих в условиях загрязнения, род *Populus* является одним из лучших биоконцентраторов, способных к нормальному функционированию даже в условиях значительной имиссии поллютантов [35, 46]. Хвоя лиственницы *Larix sibirica* оказалась более чувствительна к загрязнению. Частично это обусловлено методикой пробоподготовки, не предполагающей удаление пылевых частиц с поверхности хвои. Однако островное распространение лиственницы в Улан-Батаре затрудняет ее использование в качестве биоиндикатора.

Загрязнение ландшафтов. В целом ландшафты г. Улан-Батара можно оценить как слабозагрязненные (табл. 4), так как значения Z_c для твердой фракции снега и почв соответствуют низкому уровню загрязнения, а растения характеризуются слабой биогеохимической трансформацией. Очень высокий уровень загрязнения снега растворенными формами ТМ может представлять экологическую опасность при ее поступлении в грунтовые воды, хотя масса ТМ в снеговой воде на несколько порядков меньше, чем в других средах.

Ландшафты города обладают высоким потенциалом самоочищения. Несмотря на устойчивые температурные инверсии и существенное количество поллютантов, выпадающих из атмосферы, особенно в зимний период [40, 41], в снеге, почвах и растениях формируются в основном слабоконтрастные аномалии ТМ. Преобладание склоновых позиций рельефа, глубокое залегание грунтовых вод, летний ливневой максимум осадков, высокая водопроницаемость почв и их низкая сорбционная способность, а также адаптивные механизмы городских растений позволяют ландшафтам Улан-Батара справляться с ежегодной техногенной нагрузкой.

Геохимическая неоднородность территории города обусловлена в основном размещением источников загрязнения и варьированием сорбционных свойств почв. Слабо- и среднеконтрастные аномалии ТМ образуются в промышленной и юрточной зонах, а также вдоль крупных автомагистралей. Наиболее загрязненными выбросами различных предприятий являются ландшафты промышленной зоны, несколько слабее загрязнены почвы и древесная растительность в транспортной зоне. Селитебные ландшафты относятся к среднезагрязненным, причем районы юрточной застройки – в основном продуктами сжигания угля, а многоэтажной застройки – выбросами

автотранспорта. В ландшафтах рекреационной зоны выявлено минимальное загрязнение.

Заключение. В результате проведенных нами исследований получена дифференцированная по функциональным зонам оценка загрязнения ТМ снежного и почвенно-растительного покровов, определены характер и причины геохимической неоднородности ландшафтов в пределах города. Использованные для Улан-Батара методические приемы ландшафтно-геохимического анализа могут быть рекомендованы для организации сети и обработки данных геохимического мониторинга и анализа экологической ситуации в других мегаполисах.

Исследование состава снеговой воды дало возможность выявить количественные и качественные различия в поступлении ТМ с выбросами ТЭЦ (промышленная зона) и индивидуальных источников отопления (зона юрточной застройки), возникающие вследствие разной температуры горения в печах юрт и на установках ТЭЦ. Наиболее загрязненным оказался снежный покров в юрточной зоне. Накопление ТМ в почвенном покрове определяется близостью к источникам загрязнения, а также физико-химическими свойствами самих почв. Их низкая сорбционная способность, повышенная проницаемость и большие уклоны местности способствуют выносу ТМ из поверхностных горизонтов, вследствие чего формируются слабо- и реже среднеконтрастные аномалии ТМ. Наиболее сильное загрязнение характерно для почв в центре города, представляющем собой единый промышленно-транспортно-селительный ареал.

Химический состав растительности в меньшей степени зависит от размещения источников загрязнения. В городских условиях большое значение приобретают направление и повторяемость ветров, поскольку древесные растения способны перехватывать ТМ из атмосферы. На основе анализа биогеохимических данных выделяются две группы ТМ с различной площадью рассеяния, обусловленной дальностью атмосферного переноса от источника загрязнения. Тополь является толерантным к загрязнению видом, микроэлементный состав которого слабо трансформируется при антропогенном воздействии. В хвое лиственницы более контрастно проявилась геохимическая специализация функциональных зон города.

В целом ландшафты города характеризуются как слабозагрязненные, обладающие высоким потенциалом самоочищения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев В.А.* Геохимия ландшафта и окружающая среда. М.: Недра, 1990. 142 с.
2. Анализ состояния загрязнения снежного покрова для проектирования сети станций АНКОВ-1/В / Под ред. Артемова М., Парцева Д.П., Саева Ю.Е. и др. Методические и системотехнические вопросы контроля загрязнения окружающей среды. М.: Гидрометеиздат. 1982. С. 139–144.
3. *Аржанова В.С.* Геохимические методы при экологической оценке состояния природной среды // География и природные ресурсы. 1996. № 2. С. 133–140.
4. *Баргальи Р.* Биогеохимия наземных растений / Под ред. Н.С. Касимова. М.: ГЕОС, 2005. 457 с.
5. *Батхилиг О.* Почвенно-геохимические особенности долины р. Туул. автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. Улаанбаатар: Ин-т геоэкологии АН Монголии, 1999. 23 с.
6. *Береснева И.А.* Климаты аридной зоны Азии. М.: Наука, 2006. 285 с.
7. *Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д.* Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 184 с.
8. *Виноградов А.П.* Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–572.
9. Геоморфология Монгольской Народной Республики. М.: Наука, 1982. 259 с.
10. Геохимия окружающей среды / Под ред. Саева Ю.Е., Ревича Б.А., Янина Е.П. и др. М.: Недра, 1990. 335 с.
11. Геоэкологическая характеристика городов Сибири. Иркутск: Ин-т геогр СО АН СССР, 1990. 200 с.
12. *Гунин П.Д., Евдокимова А.К., Бажа С.Н., Сандарь М.* Социальные и экологические проблемы монгольского этноса в условиях урбанизированных территорий. Улан-Батор – Москва. 2003. С. 61–95.
13. *Давыдова Н.Д., Волкова В.Г.* Ландшафтно-геохимический анализ состояния геосистем территорий промышленного освоения // География почв и геохимия ландшафтов Сибири. Иркутск: Изд-во ИГ СО АН СССР, 1988. С. 56–75.
14. *Добровольский В.В.* География микроэлементов. Глобальное рассеяние. М.: Мысль, 1983. 272 с.
15. *Добровольский В.В.* Основы биогеохимии. М.: Высшая школа, 1998. 413 с.
16. *Елпатьевский П.В., Аржанова В.С.* Геохимия ландшафтов и техногенез. М.: Наука, 1990. 196 с.
17. *Кабата-Пендиас А., Пендиас Х.* Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
18. *Касимов Н.С.* Геохимия степных и пустынных ландшафтов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988. 254 с.
19. *Касимов Н.С., Евдокимова А.К., Ротшильд Е.В., Уртнасан Ж.* Биогеохимическая специализация растений Центральной Монголии // География и природные ресурсы. 1989. №2. С. 112–119.
20. *Касимов Н.С., Кошелева Н.Е., Сорокина О.И., Бажа С.Н. и др.* Эколого-геохимическое состояние почв г. Улан-Батор (Монголия) // Почвоведение. 2011. № 7. С. 771–784.
21. *Касимов Н.С., Кошелева Н.Е., Сорокина О.И., Бажа С.Н. и др.* Эколого-геохимическая оценка состояния древесной растительности в г. Улан-Батор (Монголия) // Аридные экосистемы. 2011. № 4. С. 5–16.
22. *Касимов Н.С., Лычагин М.Ю., Евдокимова А.К., Голованов Д.Л. и др.* Улан-Батор, Монголия (тепло-энергетика). Межгорная котловина/ Экогеохимия городских ландшафтов / Под ред. Касимова Н.С. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. С. 231–248.
23. *Кошелева Н.Е., Касимов Н.С., Бажа С.Н., Гунин П.Д. и др.* Загрязнение почв тяжелыми металлами в промышленных городах Монголии // Вест. Моск. ун-та. Сер. геогр. 2010. № 3. С. 20–27.
24. *Лозановская И.Н., Орлов Д.С., Садовникова Л.К.* Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении. М.: Высшая школа, 1998. 287 с.
25. Методические рекомендации по оценке загрязненности городских почв и снежного покрова тяжелыми металлами / Составители: В.А. Большаков, Ю.Н. Водяницкий, Т.И. Борисочкина, З.Н. Кахнович, В.В. Мясников. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 1999. 32 с.
26. *Мурзаев Э.М.* Монгольская Народная Республика: Физико-географическое описание. М.: Географиз, 1952. 472 с.
27. *Нечаева Е.Г., Макаров С.А.* Снежный покров как объект регионального мониторинга среды обитания // География и природные ресурсы. 1996. № 2. С. 43–48.
28. Нийслэл хотын эдийн засаг, нийгмийн байдал. Албан ёсны статистикийн мэдээллээр бэлтгэсэн 2008 оны 5-р сарын танилцуулга. Статистикийн газар, Улаанбаатар, 2008. 23 с.
29. *Новикова О.В.* Эколого-геохимическая оценка состояния древесной растительности городских ландшафтов (на примере гг. Москвы и Кито). дисс. на соиск. уч. ст. канд. геогр. наук: 25.00.36 / РУДН. М., 2005. 164 с.
30. *Парибок Т.А., Созыкина Н.А., Тэмн Г.А.* Содержание металлов в листьях деревьев в городе // Ботан. журн. 1982. Т. 67. № 11. С. 1533–1539.
31. *Перельман А.И., Касимов Н.С.* Геохимия ландшафта. М.: Астрель-2000, 1999. 768 с.
32. Почвенный покров и почвы Монголии / Под ред. Герасимова И.П., Ногиной Н.А. М.: Наука, 1984. 192 с.

33. Природный комплекс большого города: Ландшафтно-экологический анализ / Под ред. Э.Г. Коломыца, Г.С. Розенберга, О.В. Глебовой и др. М.: Наука; МАИК "Наука/Интерпериодика", 2000. 286 с.
34. Тэмн Г.А. Никель в растениях в связи с его токсичностью // Устойчивость к тяжелым металлам дикорастущих видов. Л.: Ленуприздат, 1991. С. 139–146.
35. Уфимцева М.Д., Терехина Н.В. Фитоиндикация экологического состояния урбогеосистем Санкт-Петербурга. СПб: Наука, 2005. 339 с.
36. Фролов А.К. Окружающая среда крупного города и жизнь растений в нем. СПб: Наука, 1998. 328 с.
37. Хөрсний чанар. Хөрс бохирдүүлэгч бодис, элементүүдийн зөвшөөргдөх дээд хэмжээ. Монгол улсын стандарт. Стандартчилал, хэмжилзүйн үндэсний төв. Улаанбаатар, 2008. 8 с.
38. Юдович Я.Э. Геохимия ископаемых углей. Л.: Наука, 1978. 262 с.
39. Batjargal T., Otgonjargal E., Baek K., and Yang J.-S. Assessment of Metals Contamination of Soils in Ulaanbaatar, Mongolia // J. Hazardous Materials. 2010. V. 184. P. 872–876.
40. Davy P.K., Gunchin G., Markwitz A., Trompeter W.J. *et al.* Air particulate matter pollution in Ulaanbaatar, Mongolia: determination of composition, source contribution and source location // Atmospheric Pollution Res. 2011. № 2. P. 126–137.
41. Gutticunda S. Urban air pollution analysis for Ulaanbaatar. The World Bank Consultant Report. Washington DC, USA. 2007. 125 p.
42. Pavlović P., Mitrović M., Djurdjević L. An ecophysiological study of plants growing on the fly ash deposits from the "Nikola Tesla-A" thermal power station in Serbia // Environm. Management. 2004. V. 33. № 5. P. 654–663.
43. Rucandio M.I., Petit-Domínguez M.D., Fidalgo-Hijano C., García-Giménez R. Biomonitoring of chemical elements in an urban environment using aboreal and bush plant species // Environm. sci. and pollution res. 2010. V. 18. № 1. P. 51–63.
44. Sawidis T., Marnasidis A., Zachariadis G., Stratis J. A study of air pollution with heavy metals in Thessaloniki city (Greece) using trees as biological indicators // Environm. contamination and toxicology. 1995. V. 28. № 1. P. 118–124.
45. Turer D., Maynard J.B., Sansalone J.J. Heavy metal contamination in soils of urban highways: comparison between runoff and soil concentrations at Cincinnati, Ohio // Water, Air and Soil Pollution. 2001. V. 132. P. 293–314.
46. Wang X., Jia Y. Study on adsorption and remediation of heavy metals by poplar and larch in contaminated soil // Environm. sci. and pollution res. 2010. V. 17. № 7. P. 1331–1338.

Landscape geochemistry of Ulan Bator

N.Ye. Kosheleva^{}, N.S. Kasimov^{*}, O.I. Sorokina^{*},
P.D. Gunin^{**}, S.N. Bazha^{**}, S. Enkh-Amgalan^{***}*

^{} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography*

*^{**} Severtsov Institute of Ecology and Evolution, RAS*

*^{***} Institute of Geography, Mongolia*

On the basis of geochemical surveys of 2008–2010, differentiated assessment of heavy metal contamination (As, Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Sr, V and Zn) of snow cover, soil and woody plants by functional zones of Ulan Bator is given. Regional specialization of depositing sources and their technogenic geochemical transformation in the city are measured. The factors that control the accumulation of pollutants in the landscape are singled out. The spatial distribution of heavy metals in soils and leaves of poplar is analyzed. On the basis of ecological and geochemical evaluation of the snow cover, soil and trees, the pollution of urban landscape as a whole is characterized as weak. Contamination of functional zones decreases from industrial to transportation, residential and recreational zone.