

Оригинальная статья

УДК 504.3.054

<https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.1.101-115>**Применение статистических методов в биомониторинге состояния
урбанизированной воздушной среды
(на примере г. Благовещенска, Приамурье)****В.И. Радомская¹✉, Д.В. Юсупов², Л.М. Павлова¹**¹ Институт геологии и природопользования ДВО РАН, г. Благовещенск, Россия² Амурский государственный университет, г. Благовещенск, Россия✉ radomskaya@ascnet.ru**Аннотация**

Проведена оценка атмосферных выпадений Sc, Cr, Fe, Co, Zn, As, Rb, Sr, Sb, Ba, Hf, Hg, Th и U в г. Благовещенске (Амурская область) с помощью листьев тополя бальзамического (*P. balsamifera* L.) в качестве биогеохимического индикатора. Непромытые, высушенные образцы листьев озоляли и определяли в золе содержание элементов методом инструментального нейтронно-активационного анализа. Для определения Hg в сухой биомассе использована атомно-абсорбционная спектроскопия. Установлены локальные фоновые и аномальные содержания элементов в листьях тополя бальзамического с применением Q-Q-графиков и методов статистической обработки данных. Показано, что минеральная пыль является основным источником загрязнения воздушной среды территории Благовещенска литофильными и сидерофильными химическими элементами.

Ключевые слова: воздушная среда, биогеохимический мониторинг, тополь, зола, методы статистического анализа.

Благодарности. Авторы выражают благодарность А.Ф. Судыко (Национальный исследовательский Томский политехнический университет) за проведение нейтронно-активационного анализа образцов.

Для цитирования: Радомская В.И., Юсупов Д.В., Павлова Л.М. Применение статистических методов в биомониторинге состояния урбанизированной воздушной среды (на примере г. Благовещенска, Приамурье) // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2025. Т. 167, кн. 1. С. 101–115. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.1.101-115>.

Original article

<https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.1.101-115>

Using statistical methods for biomonitoring of urban air quality (a case study from Blagoveshchensk, Amur region)

V.I. Radomskaya¹✉, D.V. Yusupov², L.M. Pavlova¹

¹ Institute of Geology and Nature Management, Far East Branch,
Russian Academy of Sciences, Blagoveshchensk, Russia

² Amur State University, Blagoveshchensk, Russia

✉radomskaya@ascnet.ru

Abstract

The atmospheric deposition of Sc, Cr, Fe, Co, Zn, As, Rb, Sr, Sb, Ba, Hf, Hg, Th, and U in Blagoveshchensk (Amur region) was examined using balsam poplar leaves (*P. balsamifera* L.) as a straightforward biogeochemical indicator. The unwashed, dried leaf samples were ashed. The amounts of elements in the resulting ash were determined by instrumental neutron activation analysis. Hg was quantified from the dry biomass by atomic absorption spectrometry. The local background and abnormal levels of all elements in the poplar leaves were identified using Q-Q plots and statistical methods. From the results obtained, it is evident that mineral dust is the main source of air pollution in Blagoveshchensk by litho- and siderophiles.

Keywords: air environment, biogeochemical monitoring, poplar, ash, methods of statistical analysis

Acknowledgments. A.F. Sudyko (Tomsk Polytechnic University) is gratefully acknowledged for his assistance in performing the neutron activation analysis of leaf samples.

For citation: Radomskaya V.I., Yusupov D.V., Pavlova L.M. Using statistical methods for biomonitoring of urban air quality (a case study from Blagoveshchensk, Amur region). *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2025, vol. 167, no. 1, pp. 101–115. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.1.101-115>. (In Russian)

Введение

Высокое содержание некоторых микроэлементов в воздушной среде городов вызывает серьезную озабоченность из-за их возможного влияния на повышение заболеваемости населения. Дисбаланс элементов в окружающей среде может привести к нарушению биохимических функций живых организмов. Микроэлементы делятся на эссенциальные и неэссенциальные. К эссенциальным относятся такие элементы, как Co, Cr, Fe, Mn, Cu, Zn и др., которые в определенных концентрациях необходимы живым организмам для обеспечения нормальной жизнедеятельности. К неэссенциальным элементам относятся элементы, не играющие важной роли в организме, в том числе, токсичные элементы (Pb, Cd, и т. д.). Причинами появления микроэлементов в атмосфере служат не только природные, но и антропо-

погенные факторы: добыча, выплавка, переработка металлов, автотранспортные средства, сжигание горючих ископаемых и т. д.

Ответные реакции живых организмов на изменения геохимических параметров природных сред используют для оценки состояния последних. Древесные растения также являются эффективным инструментом биогеохимического мониторинга состояния урбанизированной воздушной среды. В качестве биогеохимического индикатора традиционно используют вегетативную биомассу быстрорастущих видов, в частности, из рода *Populus* L. [1–5].

Благовещенск – административный центр Амурской области, территория которого располагается на окраине сочленения Амуро-Зейской равнины и Зейско-Буреинской равнины, характеризующейся наличием значительных площадей пахотных земель. Также территория города находится на границе с КНР в месте слияния рек Амура и Зеи. Своеобразное местоположение города предопределило составной характер потоков поллютантов, влияющих на состояние воздушного бассейна: пылевые массы с природных территорий и пахотных земель, выбросы промышленных комплексов, автомобильного транспорта в самом городе, трансграничный перенос загрязняющих веществ с территории КНР. Ранее в нескольких работах рассматривались концентрации микроэлементов в почве г. Благовещенска, в листьях тополя, снеге [4, 6, 7], но попытки выделения источников загрязнения (природные и антропогенные) были весьма ограниченными [5]. Биогеохимический анализ городской растительности с применением статистических методов позволяет не только оценить степень нагрузки поллютантов на воздушную среду города с учетом многофакторного влияния различных источников, но и рассчитать фоновые и аномальные содержания элементов в растительной биомассе.

Цель исследования заключалась в биогеохимической оценке атмосферных выпадений на территории г. Благовещенска с использованием растительной биомассы в качестве биогеохимического индикатора, определении наиболее вероятных источников поступления химических элементов с помощью экспериментальных и статистических методов анализа.

1. Материалы и методы исследований

1.1. Экспериментальная часть. Мониторинговые биогеохимические исследования проводили на территории города Благовещенска, в повсеместном озеленении которого преобладают сорта-клоны и гибриды тополя бальзамического (*P. balsamifera* L.), использованные в качестве биогеохимического индикатора. Отбор листьев производили в конце вегетационного периода по регулярной сети 1×1 км. Карта отбора проб приведена на рис. 1. Общее число отобранных проб равно 41.

Образцы листьев тополя высушивали при комнатной температуре и не промывали водой, чтобы сохранить пылевую составляющую пробы. Для элементного анализа сухие листья тополя озоляли в муфельной печи при 450 °С в течение 5 ч. Известно [8], что озоление биологического материала при температуре 450 °С приводит к удалению лишь органических веществ и легколетучих элементов (галогениды, сера, селен, ртуть и т. д.), неорганические компоненты остаются неизменными [9, 10].

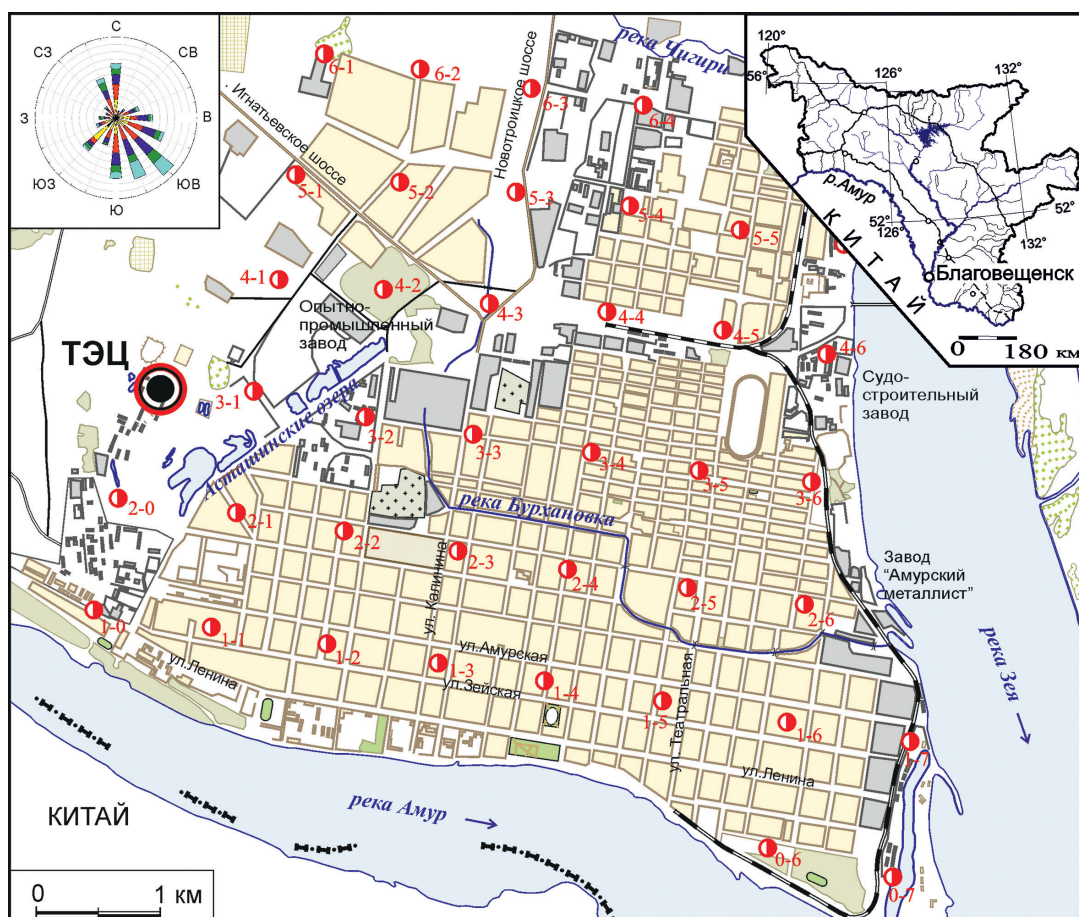


Рис. 1. Карта отбора проб листьев тополя баальзамического на территории г. Благовещенска. Красными пунсонами обозначены точки обора проб и их номера. Вверху слева представлена летняя роза ветров

Fig. 1. Map of balsam poplar leaf sampling in Blagoveshchensk. The red markers indicate the sampling sites and their corresponding numbers. The wind rose for summer is shown in the top-left corner

Элементный состав золы определяли методом инструментального нейтронно-активационного анализа в аккредитованной ядерно-геохимической лаборатории на базе исследовательского ядерного реактора ИРТ-Т Национального исследовательского Томского политехнического университета. Контроль качества результатов анализа осуществляли с использованием сертифицированного эталонного материала – стандартного образца состава листа березы (ГСО 8923-2007, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Россия). Полученные содержания элементов удовлетворительно сходятся с аттестованными значениями. Определение ртути проводили в сухой растительной биомассе на ртутном анализаторе «РА-915+» (ООО Люмэкс, Россия). Содержание ртути во всех таблицах представлены в пересчете на сухую биомассу.

1.2. Обработка данных. Данные инструментального нейтронно-активационного анализа по выбранным элементам (Sc, Cr, Fe, Co, Zn, As, Rb, Sr, Sb, Ba, Hf, Th, U) в золе и по ртути в сухих образцах были сведены в базу данных, которую обрабатывали с использованием программных пакетов Excel (Microsoft Corp., США) и Statistica 10 (StatSoft, США). При статистической обработке данных определяли размах значений, математическое ожидание (среднее значение), медиану, стандартное отклонение, эксцесс, асимметрию и коэффициент вариации. Для биогеохимической оценки фона и диапазона аномальных содержаний, опре-

деляющих состояние воздушного бассейна, применяли методы статистического анализа: диаграммы размаха, квантиль-квантильные (Q-Q) графики.

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Содержание химических элементов в золе листьев тополя. При определении содержания элементов в золе листьев тополя бальзамического методом инструментального нейтронно-активационного анализа для As и U в 46 % образцов, а Hf в 17 % образцов получены значения ниже предела обнаружения. Поэтому для последующих статистических расчетов использованы значения содержаний этих элементов, равные половине от предела обнаружения.

Содержание элементов в золе листьев тополя бальзамического варьируется в широких пределах (рис. 2, табл. 1). Порядок распределения средних значений содержаний имеет следующий вид: Fe > Zn > Sr > Ba > Rb > Hg > Co > Cr > As > Th > Sc > Sb > Hf > U. Наибольшие содержания наблюдаются для Zn и Fe, которые играют важную роль в росте растений. Zn, например, является компонентом нескольких белков и ферментов [11]. Уровень Zn и Fe в золе листьев тополя находится в пределах 359–4171 и 150–12189 мг/кг соответственно, что согласуется с данными по среднему содержанию этих элементов (900 мг/кг для Zn и 10000 мг/кг для Fe) в золе растений [12]. Высокое содержание микроэлементов в золе листьев тополя, в частности, экстремальные значения (крайние точки на рис. 2), можно рассматривать как показатель загрязнения воздушной среды, что, вероятно, обусловлено переносимой ветром почвенной пылью, а также антропогенной деятельностью человека.

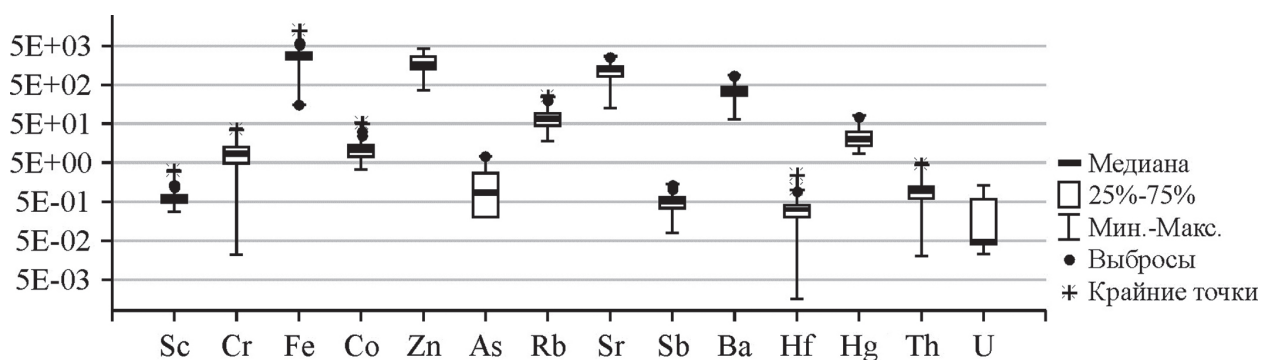


Рис. 2. Диаграммы размаха содержаний (мг/кг) некоторых элементов в золе листьев тополя бальзамического на территории г. Благовещенска

Fig. 2. Box plots showing the concentrations (mg/kg) of certain elements in the ash of balsam poplar leaves from Blagoveshchensk

Среднее содержание Zn в золе листьев тополя на территории г. Благовещенска составляет 1919 мг/кг, что значительно выше среднего значения для растений. Этот факт может быть связан с высоким содержанием Zn в осевших на листья частицах пыли или с избирательной способностью тополя преимущественно накапливать Zn [13]. Fe является одним из восьми порообразующих элементов земной коры. Выборка образцов золы, содержащих Fe, слабо дифференцирована (коэффициент вариации составляет 60 %). Fe попадает на листья с частицами почвы, разносимыми ветром, или поступает в атмосферу в результате сжигания угля, выбросов металлургических предприятий, автотранспорта, в том числе при истирании колодок, дисков сцепления, износе резины [14, 15]. Различия, наблюдаемые для отдельных точек отбора проб на территории города, указывают на влияние дополнительных локальных факторов.

Табл. 1. Содержание (мг/кг) элементов в золе листьев тополя бальзамического на территории г. Благовещенска**Table 1.** Concentrations (mg/kg) of elements in the ash of balsam poplar leaves from Blagoveshchensk

Элемент	$\bar{X}$	$X_{\text{геом}}$	X_{med}	X_{min}	X_{max}	S	A	ΔE	$V, \%$
Sc	0.68	0.60	0.56	0.28	3.23	0.48	4.11	20.9	70
Cr	9.79	8.22	8.70	2.30	37.1	6.33	2.19	7.91	65
Fe	3136	2703	2821	150	12189	1878	3.05	13.3	60
Co	12.8	10.9	11.0	3.30	53.3	8.83	2.80	10.7	69
Zn	1919	1701	1560	359	4171	917	0.63	-0.30	48
As	1.64	0.75	0.81	0.20	7.34	1.88	1.31	0.99	115
Rb	79.1	65.6	66.5	18.2	263	53.6	1.74	3.27	68
Sr	1187	1075	1211	127	2696	466	0.43	1.64	39
Sb	0.53	0.47	0.54	0.08	1.43	0.27	1.18	2.05	51
Ba	357	310	344	64	875	181	0.96	1.48	51
Hf	0.37	0.22	0.33	0.0016	2.38	0.39	3.65	17.6	106
Hg	61.3	56.9	58.2	27.6	118	23.6	0.46	-0.58	39
Th	0.98	0.75	0.91	0.02	4.80	0.76	3.27	15.7	77
U	0.34	0.15	0.05	0.02	1.31	0.40	1.14	0.13	117

Обозначения: $\bar{X}$ – среднее значение, $X_{\text{геом}}$ – среднее геометрическое значение, X_{med} – медиана, X_{min} – минимальное значение, X_{max} – максимальное значение, S – стандартное отклонение, A – коэффициент асимметрии E – коэффициент эксцесса, ΔE – стандартная ошибка коэффициента эксцесса, V – коэффициент вариации

Среди изученных элементов в золе листьев тополя бальзамического самый низкий уровень значений установлен для Hf (0.0016–2.32 мг/кг), Th (0.02–4.8 мг/кг), U (0.02–1.32 мг/кг), Sb (0.08–1.43 мг/кг), As (0.2–7.34 мг/кг) и Sc (0.28–3.2 мг/кг), а их среднее содержание составляет 0.37, 0.98, 0.34, 0.53, 1.64 и 0.68 мг/кг для Hf, Th, U, Sb, As и Sc соответственно. Согласно табл. 1, рассматриваемые элементы имеют положительную асимметрию распределения и демонстрируют высокую изменчивость. Положительная асимметрия распределения случайной величины вправо свидетельствует о том, что содержание этих элементов в золе листьев тополя бальзамического повышено вследствие либо естественного обогащения, либо антропогенного фактора. Наименьший коэффициент вариации, равный 39 %, отмечен для Sr и Hg, и соответствует однородной выборке. Коэффициенты вариации для As, Hf, U более 100 % соответствуют крайне неоднородной выборке. Таким образом, отличающиеся статистические параметры, которые характеризуют асимметрию данных, свидетельствуют о различном поведении элементов в воздушной среде.

Для выявления взаимосвязи в распределении содержаний элементов в образцах листьев тополя бальзамического проведен корреляционный анализ. Матрица коэффициентов ранговой корреляции Спирмена представлена в табл. 2.

Табл. 2. Корреляционные связи химических элементов в листьях тополя бальзамического на территории г. Благовещенска (корреляция Спирмена, $R_{\text{критическое}} \geq 0.39$ при $p < 0.01$, $n = 41$, полужирным шрифтом выделены значимые R)

Table 2. Correlations between elements in balsam poplar leaves from Blagoveshchensk (Spearman correlation, $R_{\text{critical}} \geq 0.39$ at $p < 0.01$, $n = 41$, significant R values are marked in bold)

Элемент	Sc	Cr	Co	As	Sb	Hf	Th	U	Fe	Sr	Zn	Ba	Hg
Cr	0.69	1											
Co	0.30	0.27	1										
As	0.35	0.24	0.15	1									
Sb	0.40	0.38	0.06	0.39	1								
Hf	0.63	0.41	0.10	0.46	0.15	1							
Th	0.83	0.56	0.30	0.31	0.32	0.53	1						
U	0.23	0.39	0.04	0.17	0.11	0.20	0.17	1					
Fe	0.87	0.72	0.43	0.37	0.41	0.45	0.73	0.24	1				
Sr	0.22	0.23	0.55	0.26	0.10	0.31	0.28	0.21	0.28	1			
Zn	-0.13	-0.35	0.33	0.12	0.00	-0.06	0.02	-0.20	-0.04	0.52	1		
Ba	0.42	0.25	0.46	0.24	0.20	0.41	0.44	0.06	0.42	0.71	0.30	1	
Hg	0.44	0.51	0.23	0.20	0.18	0.21	0.50	0.42	0.42	0.21	-0.05	0.32	1
Rb	-0.12	-0.04	-0.16	-0.33	-0.10	-0.18	-0.06	-0.07	0.01	-0.31	-0.37	-0.11	-0.06

Наиболее сильные значимые положительные связи обнаружены в парах Sc-Cr, Sc-Fe, Sc-Th, Cr-Fe, Fe-Th и Sr-Ba. Согласно [16] эти элементы характеризуются как типичные почвенные, поэтому в качестве источника их поступления можно рассматривать почвенную пыль.

2.1. Определение биогеохимических фоновых и аномальных содержаний. Для проверки нормального распределения данных по содержанию исследуемых элементов построены квантиль–квантильные (Q-Q) графики (рис. 3). Данные элементного анализа были нанесены по оси Y , а значения, ожидаемые для нормального распределения, – по оси X . Образцы с нормальным распределением содержаний элементов должны группироваться вдоль диагонали.

Согласно виду полученных графиков (рис. 3) содержание элементов не подчиняется нормальному распределению, так как они не точно соответствуют прямой линии. Распределение микроэлементов во многих случаях подчиняется логарифмически-нормальному распределению. На рис. 4 представлены Q–Q графики для логарифмически преобразованных (по основанию 10) значений содержаний некоторых изученных элементов. Распределение логарифмически преобразованных значений более приближено к прямой линии. Кроме того, в этом случае были удалены выбросы (высокие и низкие значения), присутствующие на рис. 3, путем последовательных итераций до достижения приемлемого соответствия прямой линии. Следовательно, можно считать, что распределение преобразованных значений содержания элементов соответствует логнормальному распределению или, по крайней мере, приближается к нему.

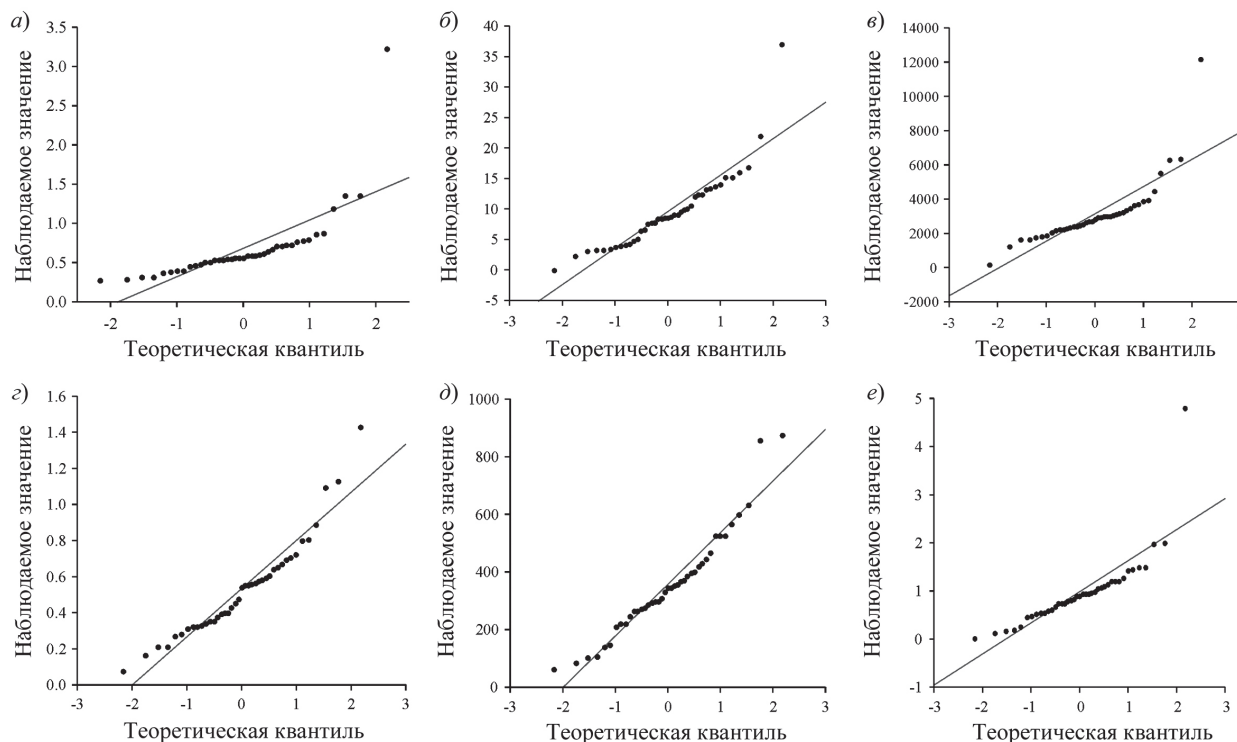


Рис. 3. Q-Q графики исходных данных по содержанию (мг/кг) химических элементов в золе листьев тополя бальзамического на территории г. Благовещенска: а) Sc, б) Cr, в) Fe, г) Sb, д) Ba, е) Th

Fig. 3. Q-Q plots of the initial data for the concentrations (mg/kg) of trace elements in the ash of balsam poplar leaves from Blagoveshchensk: а) Sc, б) Cr, в) Fe, г) Sb, д) Ba, and ф) Th

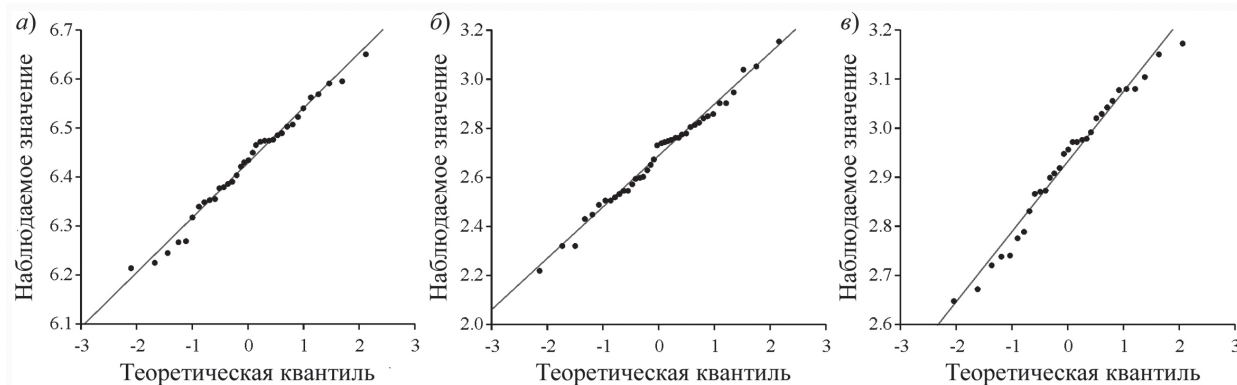


Рис. 4. Q-Q графики логарифмически преобразованных (по основанию 10) содержаний (мкг/кг) Fe (а), Sb (б) и Th (в)

Fig. 4. Q-Q plots of the log-transformed (base 10) concentrations ($\mu\text{g/kg}$) of Fe (а), Sb (б), and Th (с)

В табл. 3 приведены статистические данные логарифмически преобразованных значений содержания элементов без выбросов. Распределение считается достоверно нормальным, если абсолютная величина показателей асимметрии и эксцесса меньше их ошибок репрезентативности в три и более раз. На основании полученных соотношений можно заключить, что характер распределения логарифмически преобразованных содержаний элементов является нормальным.

Табл. 3. Статистические данные логарифмически преобразованных содержаний химических элементов (мкг/кг) в золе листьев тополя бальзамического**Table 3.** Statistical data on the log-transformed concentrations ($\mu\text{g/kg}$) of elements in the ash of balsam poplar leaves

Элемент	$\bar{X}$	$X_{\text{геом}}$	X_{med}	X_{min}	X_{max}	S	A	ΔA	E	ΔE
Sc	2.75	2.75	2.75	2.49	2.93	0.11	-0.43	0.41	-0.09	0.80
Cr	3.85	3.84	3.92	3.36	4.15	0.22	-0.54	0.40	-0.87	0.79
Fe	6.43	6.43	6.44	6.21	6.65	0.11	-0.17	0.40	-0.49	0.78
Co	4.06	4.05	4.05	3.74	4.51	0.19	0.30	0.39	-0.29	0.77
Zn	6.22	6.22	6.19	5.83	6.50	0.18	-0.14	0.39	-0.92	0.76
As	2.73	2.69	2.30	2.30	3.62	0.50	0.46	0.40	-1.63	0.78
Rb	4.84	4.84	4.84	4.42	5.42	0.25	0.45	0.38	-0.27	0.74
Sr	6.07	6.06	6.10	5.75	6.43	0.15	-0.23	0.38	-0.27	0.74
Sb	2.69	2.68	2.74	2.23	3.16	0.21	-0.03	0.37	-0.14	0.73
Ba	5.55	5.55	5.55	5.32	5.80	0.13	0.17	0.41	-0.72	0.80
Hf	2.40	2.35	2.52	1.48	3.38	0.46	-0.89	0.37	0.63	0.73
Hg	4.71	4.71	4.73	4.44	4.92	0.15	-0.22	0.41	-1.03	0.81
Th	2.97	2.96	2.97	2.65	3.30	0.17	0.02	0.40	-0.42	0.78
U	2.79	2.78	2.76	2.54	3.05	0.14	0.41	0.60	-0.29	1.15

Обозначения: $\bar{X}$ – среднее значение, $X_{\text{геом}}$ – среднее геометрическое значение, X_{med} – медиана, X_{min} – минимальное значение, X_{max} – максимальное значение, S – стандартное отклонение, A – коэффициент асимметрии, ΔA – стандартная ошибка коэффициента асимметрии, E – коэффициент эксцесса, ΔE – стандартная ошибка коэффициента эксцесса

Так как распределение логарифмически преобразованных содержаний элементов удовлетворительно согласуется с логнормальным законом, то можно использовать оценки среднего геометрического значения и среднеквадратического отклонения логарифмов содержаний элементов для расчета параметров распределения при статистической обработке [17]. С учетом преобразования значений содержаний для расчета фоновых и аномальных значений использованы антилогарифмы. Диапазон фоновых содержаний элемента рассчитывали как $X_{\text{геом}}/S$ для нижней границы и $X_{\text{геом}} \times S$ для верхней границы [18, 19]. Кроме фоновых содержаний элементов, для определения нагрузки загрязнения на окружающую среду города необходимо определить диапазоны аномальных содержаний. Для этого применяются как графические, так и расчетные способы. Отрицательная аномалия, обусловленная выносом элементов, будет отмечаться в тех точках пробоотбора, в которых содержание элементов будет меньше нижней границы фона. Диапазон низкоконтрастной положительной аномалии рассчитан как интервал от $X_{\text{геом}} \times S$ до $X_{\text{геом}} \times S^2$, а среднеконтрастной аномалии – как интервал от $X_{\text{геом}} \times S^2$ до $X_{\text{геом}} \times S^3$. Высококонтрастная аномалия характерна для содержаний элементов, превышающих $X_{\text{геом}} \times S^3$ [18–20]. В табл. 4 приведены показатели геохимического фона и аномальные значения содержаний элементов в листьях тополя бальзамического, произрастающего на территории г. Благовещенска.

Табл. 4. Геохимические параметры содержаний некоторых элементов в золе листьев тополя бальзамического на территории г. Благовещенска**Table 4.** Geochemical parameters of the concentrations of certain elements in the ash of balsam poplar leaves from Blagoveshchensk

Элемент	Фоновые содержания, мг/кг	Диапазон фоновых содержаний, мг/кг	Аномальные содержания, мг/кг			
			отрицательная	низко-контрастная	средне-контрастная	высоко-контрастная
Sc	0.56	0.44–0.73	< 0.44	0.73–0.94	0.94–1.21	> 1.21
Cr	7.24	4.26–12.3	< 4.26	12.3–20.9	20.9–35.6	> 35.6
Co	11.2	7.24–17.4	< 7.24	17.4–27.0	27.0–41.8	> 41.8
As	0.50	0.16–1.55	< 0.16	1.55–4.79	4.79–14.8	> 14.8
Sb	0.49	0.30–0.79	< 0.30	0.79–1.29	1.29–2.08	> 2.08
Hf	0.26	0.095–0.72	< 0.095	0.72–1.99	1.99–5.47	> 5.47
Th	0.93	0.63–1.38	< 0.63	1.38–2.04	2.04–3.03	> 3.03
U	0.62	0.45–0.85	< 0.45	0.85–1.17	1.17–1.62	> 1.62
Fe	2692	2086–3472	< 2086	3472–4479	4479–5778	> 5778
Sr	1148	814–1618	< 814	1618–2283	2283–3219	> 3219
Zn	1660	1099–2506	< 1099	2506–3784	3784–5714	> 5714
Ba	354	263–479	< 263	479–647	647–873	> 873
Hg	52.5	37.2–74.0	< 37.2	74.0–104	104–147	> 147
Rb	69.2	38.9–123	< 38.9	123–219	219–390	> 390

В табл. 5 представлены данные геохимической оценки территории г. Благовещенска (согласно точкам отбора) по содержанию химических элементов в золе вегетативной биомассы тополя бальзамического.

Таким образом, согласно данным, представленным в табл. 5, только в четырех точках (0-7, 5-4, 6-1 и 6-3) отбора листьев тополя бальзамического в городе выявлены высокие аномальные содержания некоторых элементов, что в целом не является опасным для проживания населения. Точка 0-7 расположена в устье р. Зеи вблизи затона. По-видимому, повышенная пылевая нагрузка от береговых песчаных отмелей и кос р. Зеи способствовали атмосферному загрязнению данного района. В районе точки 5-4 отмечается повышенная интенсивность дорожного движения. Точки 6-1 и 6-3 расположены в северо-западном промышленном районе города, который претерпевает интенсивное жилищное строительство и промышленное освоение, в результате чего пылевой фактор здесь является основным источником загрязнения атмосферы.

Табл. 5. Точки отбора листьев тополя бальзамического, характеризующиеся аномальными содержаниями химических элементов (— означает отсутствие аномальных содержаний)

Table 5. Sampling sites of balsam poplar leaves with the abnormal concentrations of the studied elements (— means the absence of abnormal concentrations)

№ точки отбора	Элементы с высококонтрастной аномалией содержания	Элементы со среднеконтрастной аномалией содержания	Элементы с низкоконтрастной аномалией содержания
1-6, 2-3, 2-6, 3-3, 3-5, 5-6, 6-4	—	—	—
0-6	—	—	Sc, Cr, Fe, Hg
0-7	Sc, Fe	—	Cr, Hf, As, Th, Ba, Hg, Rb
1-1	—	—	U
1-2	—	—	As, Th, Hg, Sr
1-3	—	As	Sc, Cr
1-4	—	—	As
1-5	—	U	As, Rb
1-7	—	—	Rb, Co, Zn
2-0	—	—	As, Co, Zn
2-1	—	—	Sc, As, Th, Fe, Hg, Zn
2-2	—	—	Zn
2-4	—	—	Rb
2-5	—	Rb	—
3-1	—	—	U, Zn, As
3-2	—	—	Hg
3-4	—	U	Hg, Sc
3-6	—	Sb	As, Ba, Zn
4-0	—	—	As
4-1	—	Zn	As
4-2	—	As, Sr	Fe, Hg, Zn
4-3	—	—	Zn
4-4	—	Hg	Co
4-5	—	Sc	Cr, As, Fe, Ba, Co, Sr
4-6	—	—	Zn
5-1	—	—	Hg
5-2	—	—	Cr, Hg, Co
5-3	—	—	Sc, Fe, Cr, Hg
5-4	Sc, Ba	Cr, Fe,	Th, Co, U, Sr
5-5	—	Fe	Sc, Cr, Th
6-1	Sc, Cr, Th, Fe	As, Hf	Ba, Hg
6-2	—	Ba, Hg	Sc, Cr, As, Th
6-3	Co	Zn	Ba, Rb
6-5	—	—	As, Ba

Заключение

Настоящее исследование показывает, что биогеохимический мониторинг в сочетании с методами статистической обработки данных является эффективным инструментом для оценки сезонного состояния приземного атмосферного воздуха и определения источников поступления химических элементов.

Рассчитанные местные фоновые значения содержаний элементов составили 0.56, 7.24, 2692, 11.2, 1660, 0.50, 69.2, 1148, 0.49, 354, 0.26, 52.5, 0.93 и 0.62 мг/кг для Sc, Cr, Fe, Co, Zn, As, Rb, Sr, Sb, Ba, Hf, Hg, Th и U соответственно. Установленные диапазоны аномальных содержаний преимущественно литофильных и сидерофильных элементов в биогеохимических пробах свидетельствуют о том, что пылевой фактор является основным источником загрязнения воздушной среды на территории Благовещенска.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest. The authors declare no conflicts of interest.

Литература

1. Царев А. П. Сортоведение тополя. Воронеж: ВГУ, 1986. 152 с.
2. Tózsér D., Horváth R., Simon E., Magura T. Heavy metal uptake by plant parts of *Populus* species: A meta-analysis // Environ. Sci. Pollut. Res. 2023. V. 30, No 26. P. 69416–69430. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27244-2>.
3. Гончаров Г.А., Соктоев Б.Р., Ляпина Е.Е., Фархутдинов И.М. Эколого-геохимическая оценка состояния территории города Уфы по данным изучения листьев тополя (*Populus balsamifera* L.) // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2024. Т. 166, кн. 3. С. 476–494. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2024.3.476-494>.
4. Дорохова Л.А., Юсупов Д.В., Рихванов Л.П. Геохимические и минералогические индикаторы ветровой дефляции на урбанизированных территориях с использованием листьев тополя // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331, № 11. С. 137–146. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/11/2893>.
5. Yusupov D.V., Baranovskaya N.V., Robertus Y.V., Radomskaya V.I., Pavlova L.M., Sudyko A.F., Rikhvanov L.P. Rare earth elements in poplar leaves as indicators of geological environment and technogenesis // Environ. Sci. Pollut. Res. 2020. V. 27, No 21. P. 27111–27123. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09090-8>.
6. Павлова Л.М., Радомская В.И., Юсупов Д.В. Высокотоксичные элементы в снежном покрове на территории г. Благовещенска // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2015, № 1. С. 27–35.
7. Радомская В.И., Бородина Н.А. Оценка антропогенного загрязнения почвы урбанизированной территории на примере города Благовещенска // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2019, № 6. С. 79–93. <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019679-93>.
8. Saarela K.-E., Lill J.-O., Hernberg F.J., Harju L., Lindroos A., Heselius S.-J. Preconcentration of trace elements in biological materials by dry ashing for TTPIXE analysis. A study of matrix effects // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B. 1995. V. 103, No 4. P. 466–472. [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(95\)00643-5](https://doi.org/10.1016/0168-583X(95)00643-5).
9. Weiss D., Shotyk W., Cheburkin A.K., Gloor M. Determination of Pb in ashed peat and plants using an Energy-dispersive Miniprobe Multielement Analyser (EMMA) // Analyst. 1998. V. 123, No 10. P. 2097–2102. <https://doi.org/10.1039/A805741I>.
10. Harju L., Lill J.-O., Saarela K.-E., Heselius S.-J., Hernberg F.J., Lindroos A. Analysis of trace elements in trunk wood by thick-target PIXE using dry ashing for preconcentration // Fresenius' J. Anal. Chem. 1997. V. 358, No 4. P. 523–528. <https://doi.org/10.1007/s002160050459>.

11. Tsonev T., Lidon F.J.C. Zinc in plants – an overview // *Emirates J. Food Agric.* 2012. V. 24, No 4. P. 322–333.
12. Алексеенко В.А. Экологическая геохимия. М.: Логос, 2000. 627 с.
13. Liu Y., Yang Z., Zhu M., Yin J. Role of plant leaves in removing airborne dust and associated metals on Beijing roadsides // *Aerosol Air Qual. Res.* 2017. V. 17, No 10. P. 2566–2584. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2016.11.0474>.
14. Kousehlar M., Widom E. Sources of metals in atmospheric particulate matter in Tehran, Iran: Tree bark biomonitoring // *Appl. Geochem.* 2019. V. 104. P. 71–82. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.03.018>.
15. Negral L., Suárez-Peña B., Zapico E., Fernández-Nava Y., Megido L., Moreno J., Marañón E., Castrillón L. Anthropogenic and meteorological influences on PM₁₀ metal/semimetal concentrations: Implications for human health // *Chemosphere.* 2020. V. 243. Art. 125347. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125347>.
16. Tume P., Bech J., Tume L., Bech J., Reverter F., Longan L., Cendoya P. Concentrations and distributions of Ba, Cr, Sr, V, Al, and Fe in Torrelles soil profiles (Catalonia, Spain) // *J. Geochem. Explor.* 2008. V. 96, Nos 2–3. P. 94–105. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2007.03.003>.
17. Беус А.А., Григорян С.В., Ойзерман М.Т., Чолакян П.Г., Стояновский А.А. Руководство по предварительной математической обработке геохимической информации при поисковых работах. М.: Недра, 1976. 87 с.
18. Miesch A.T. Methods of computation for estimating geochemical abundance. *Geol. Surv. Prof. Pap.* 574-B. Ser.: Statistical Studies in Field Geochemistry. Washington, DC: U. S. Gov. Print. Office, 1967. B15 p. <https://doi.org/10.3133/pp574B>.
19. Papastergios G., Fernandez-Turiel J.-L., Filippidis A., Gimeno D. Determination of geochemical background for environmental studies of soils via the use of HNO₃ extraction and Q–Q plots // *Environ. Earth Sci.* 2011. V. 64, No 3. P. 743–751. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0894-7>.
20. Инструкция по площадным геохимическим работам. СПб.: АО «Полиметалл УК», «Лема», 2023. 167 с.

References

1. Tsarev A.P. *Sortovedenie topolya* [Poplar Variety Research]. Voronezh, VGU, 1986. 152 p. (In Russian)
2. Tőzsér D., Horváth R., Simon E., Magura T. Heavy metal uptake by plant parts of *Populus* species: A meta-analysis. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2023, vol. 30, no. 26, pp. 69416–69430. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27244-2>.
3. Goncharov G.A., Soktoev B.R., Lyapina E.E., Farhutdinov I.M. Ecological and geochemical assessment of the urban environment in the Ufa city based on the study of poplar leaves (*Populus balsamifera* L.). *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta Seriya Estestvennye Nauki*, 2024, vol. 166, no. 3, pp. 476–494. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2024.3.476-494>. (In Russian)
4. Dorokhova L.A., Yusupov D.V., Rikhvanov L.P. Geochemical and mineral indicators of deflation in urban areas using poplar leaves. *Izv. Tomsk. Politekh. Univ. Inzh. Resur.*, 2020, vol. 331, no. 11, pp. 137–146. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/11/2893>. (In Russian)
5. Yusupov D.V., Baranovskaya N.V., Robertus Y.V., Radomskaya V.I., Pavlova L.M., Sudyko A.F., Rikhvanov L.P. Rare earth elements in poplar leaves as indicators of geological environment and technogenesis. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2020, vol. 27, no. 21, pp. 27111–27123. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09090-8>.
6. Pavlova L.M., Radomskaya V.I., Yusupov D.V. High toxic elements in snow cover in the Blagoveshchensk territory. *Geoekol. Inzh. Geol., Gidrogeol., Geokriol.*, 2015, no. 1, pp. 27–35. (In Russian)
7. Radomskaya V.I., Borodina N.A. Assessment of anthropogenic contamination in an urban territory by the example of Blagoveshchensk city. *Geoekol. Inzh. Geol., Gidrogeol., Geokriol.*, 2019, no. 6, pp. 79–93. <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019679-93>. (In Russian)

8. Saarela K.-E., Lill J.-O., Hernberg F.J., Harju L., Lindroos A., Heselius S.-J. Preconcentration of trace elements in biological materials by dry ashing for TTPIXE analysis. A study of matrix effects. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*, 1995, vol. 103, no. 4, pp. 466–472. [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(95\)00643-5](https://doi.org/10.1016/0168-583X(95)00643-5).
9. Weiss D., Shotyk W., Cheburkin A.K., Gloor M. Determination of Pb in ashed peat and plants using an Energy-dispersive Miniprobe Multielement Analyser (EMMA). *Analyst*, 1998, vol. 123, no. 10, pp. 2097–2102. <https://doi.org/10.1039/A805741I>.
10. Harju L., Lill J.-O., Saarela K.-E., Heselius S.-J., Hernberg F.J., Lindroos A. Analysis of trace elements in trunk wood by thick-target PIXE using dry ashing for preconcentration. *Fresenius' J. Anal. Chem.*, 1997, vol. 358, no. 4, pp. 523–528. <https://doi.org/10.1007/s002160050459>.
11. Tsonev T., Lidon F.J.C. Zinc in plants – an overview. *Emirates J. Food Agric.*, 2012, vol. 24, no. 4, pp. 322–333.
12. Alekseenko V.A. *Ekologicheskaya geokhimiya* [Environmental Geochemistry]. Moscow, Logos, 2000. 627 p. (In Russian)
13. Liu Y., Yang Z., Zhu M., Yin J. Role of plant leaves in removing airborne dust and associated metals on Beijing roadsides. *Aerosol Air Qual. Res.*, 2017, vol. 17, no. 10, pp. 2566–2584. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2016.11.0474>.
14. Kousehlar M., Widom E. Sources of metals in atmospheric particulate matter in Tehran, Iran: Tree bark biomonitoring. *Appl. Geochem.*, 2019, vol. 104, pp. 71–82. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.03.018>.
15. Negral L., Suárez-Peña B., Zapico E., Fernández-Nava Y., Megido L., Moreno J., Marañón E., Castrillón L. Anthropogenic and meteorological influences on PM₁₀ metal/semimetal concentrations: Implications for human health. *Chemosphere*, 2020, vol. 243, art. 125347. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125347>.
16. Tume P., Bech J., Tume L., Bech J., Reverter F., Longan L., Cendoya P. Concentrations and distributions of Ba, Cr, Sr, V, Al, and Fe in Torrelles soil profiles (Catalonia, Spain). *J. Geochem. Explor.*, 2008, vol. 96, nos. 2–3, pp. 94–105. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2007.03.003>.
17. Beus A.A., Grigoryan S.V., Oizerman M.T., Cholakyan P.G., Stoyanovskii A.A. *Rukovodstvo po predvaritel'noi matematicheskoi obrabotke geokhimicheskoi informatsii pri poiskovykh rabotakh* [Guidelines for Preliminary Mathematical Processing of Geochemical Data during Exploration]. Moscow, Nedra, 1976. 87 p. (In Russian)
18. Miesch A.T. Methods of computation for estimating geochemical abundance. Geol. Surv. Prof. Pap. 574-B. Ser.: Statistical Studies in Field Geochemistry. Washington, DC, U. S. Gov. Print. Office, 1967. B15 p. <https://doi.org/10.3133/pp574B>.
19. Papastergios G., Fernandez-Turiel J.-L., Filippidis A., Gimeno D. Determination of geochemical background for environmental studies of soils via the use of HNO₃ extraction and Q–Q plots. *Environ. Earth Sci.*, 2011, vol. 64, no. 3, pp. 743–751. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0894-7>.
20. *Instruktsiya po ploshchadnym geokhimicheskim rabotam* [Guidelines for Areal Geochemical Studies]. St. Petersburg, AO “Polimetall UK”, “Lema”, 2023. 167 p. (In Russian)

Информация об авторах

Валентина Ивановна Радомская, кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории биогеохимии, Институт геологии и природопользования ДВО РАН

E-mail: radomskaya@ascnet.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3023-7565>

Дмитрий Валерьевич Юсупов, доктор геолого-минералогических наук, профессор, и.о. заведующего кафедрой геологии и природопользования, Амурский государственный университет

E-mail: yusupovd@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6837-3538>

Людмила Михайловна Павлова, кандидат биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник – руководитель лаборатории биогеохимии, Институт геологии и природопользования ДВО РАН

E-mail: pav@ascnet.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3734-1445>

Author Information

Valentina I. Radomskaya, Cand. Sci. (Chemistry), Leading Researcher, Laboratory of Biogeochemistry, Institute of Geology and Nature Management, Far East Branch, Russian Academy of Sciences

E-mail: radomskaya@ascnet.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3023-7565>

Dmitry V. Yusupov, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Acting Head of Department of Geology and Nature Management, Amur State University

E-mail: yusupovd@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6837-3538>

Lyudmila M. Pavlova, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Head of Laboratory of Biogeochemistry, Institute of Geology and Nature Management, Far East Branch, Russian Academy of Sciences

E-mail: pav@ascnet.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3734-1445>

Поступила в редакцию 23.05.2024

Принята к публикации 16.07.2024

Received May 23, 2024

Accepted July 16, 2024