

УДК 550.424

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОМЕРНОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКОЛОГО- ГЕОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВ г. БЛАГОВЕЩЕНСКА

*В.И. Радомская¹, Д.В. Юсупов², Л.М. Павлова¹,
А.Г. Сергеева¹, Е.Н. Воропаева¹*

¹*Институт геологии и природопользования ДВО РАН, г. Благовещенск, 675000, Россия*

²*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск, 634034, Россия*

Аннотация

С помощью факторного анализа коэффициентов концентраций кислоторастворимых форм группы элементов дана оценка и выявлены основные причины, обуславливающие загрязнение урбанизированных почв малопромышленного города Благовещенска 14 тяжелыми металлами и металлоидами, в том числе I–III классов опасности. Было выявлено четыре фактора, главный из которых с 52.5%-ным вкладом в общую дисперсию ассоциации элементов Co–Zn–Be–Ni–Sb–W–SO₄²⁻ свидетельствует о промышленном пирогенезе как основной причине их поступления. Два фактора характеризуют общее техногенное загрязнение от выбросов котельных, работающих на угле и мазуте, частных домовладений с печным отоплением, а также от воздействия выхлопных газов автотранспорта. Незначительная доля суммарной дисперсии – 7.4%, характеризующая 4-й фактор, связана с увеличением в почвах города содержания кадмия.

Ключевые слова: Благовещенск, количественный химический анализ, факторный анализ, минералогический анализ, тяжелые металлы, металлоиды

Введение

За последние десятилетия существенно возросло значение вопросов охраны окружающей среды, одним из важнейших аспектов которых является сохранение и улучшение условий жизни и деятельности человека в городах. Актуальность проблемы определяется тем, что большая часть населения России (более 73%) проживает в городской среде. В настоящее время серьезную угрозу состоянию природных экосистем и здоровью человека представляет загрязнение почв тяжелыми металлами (ТМ). В отличие от органических поллютантов, большинство ТМ не подвержено микробиологической или химической деградации и способно накапливаться в почвах за длительный период поступления [1]. Период полувыведения ТМ из почв в результате вымывания, потребления растениями, эрозии и дефляции длится от 13 до 110 лет для Cd, от 70 до 510 лет для Zn, от 310 до 1500 лет для Cu, от 740 до 5900 лет для Pb [2], до 250 лет для Hg [3]. Аккумуляция ТМ в почвах, их проникновение в поверхностные и грунтовые воды, попадание

в пищевые цепи может сопровождаться токсичным воздействием на живые организмы, включая человека.

Среди городов, где загрязнение окружающей среды значительно выше, чем предполагает их отраслевая специализация, 83% составляют малые города [4]. Некрупные города, как правило, не могут полностью самостоятельно решить проблему улучшения качества окружающей среды, характеризующейся неудовлетворительным состоянием городской инфраструктуры, из-за чрезмерно большой доли издержек в структуре общих расходов на транспортную составляющую.

В общем комплексе эколого-геохимических проблем остро стоит вопрос определения вклада различных источников в загрязнение окружающей среды. В настоящей работе с помощью факторного анализа изучены геохимические особенности почв г. Благовещенска и определены источники элементов-загрязнителей. Благовещенск является административным центром Амурской области, он расположен на границе с КНР и слиянии двух крупных рек – Амура и Зеи. Численность населения – более 224 тыс. человек (2016 г.). Площадь города занимает порядка 321 км². Напротив Благовещенска, на сопредельной территории, находится китайский город Хэйхэ, район Айгунь с населением более 211 тыс. чел.

В Благовещенске резко-континентальный климат с муссонными чертами, что выражается в больших годовых (45–50 °С) и суточных (до 20 °С) колебаниях температур воздуха. Преобладающее влияние на климат зимой оказывает азиатский антициклон, а летом – дальневосточный муссон, оба обуславливают неравномерное распределение осадков по сезонам года. Среднегодовое количество осадков составляет 580 мм, наибольшее количество которых выпадает в теплый период года. Продолжительность периода с устойчивым снежным покровом – 135–140 дней, высота снежного покрова в среднем достигает 14–17 см [5]. Господствующими ветрами являются северо-западные особенно в осенне-зимний период.

На состояние окружающей среды территории города кроме природно-климатических оказывают влияние и техногенные факторы. Большую долю техногенной нагрузки на окружающую среду дают промышленные предприятия и транспорт. Основными источниками загрязнения атмосферного воздуха и почв на территории города являются работающие на буром угле Благовещенская ТЭЦ (использует бурые угли Райчихинского, Ерковецкого и Харанорского месторождений), золоотвал, полигон твердых бытовых отходов, отопительные котельные коммунального хозяйства, заводы «Амурский металлист», судостроительный, мельзавод, предприятия железнодорожного и автомобильного транспорта, опытно-промышленный завод (обогащительная фабрика), полиграфический центр «Приамурье» и др.

Высокая антропогенная нагрузка на атмосферный воздух создается на фоне неблагоприятных метеорологических условий, характерных для данного региона, особенно в холодный период года, и влияющих на рассеивание взвешенных твердых веществ и аэрозольных примесей (небольшая сила ветра, частая повторяемость приземных инверсий). Кроме того, на состояние атмосферного воздуха в городе значительное влияние оказывает естественная запыленность,

обусловленная значительной площадью береговых кос и отмелей крупных рек. Запыленность зависит также от состояния дорог, проездов и дворовых территорий. В теплое время года возможно дополнительное поступление пыли за счет трансграничного переноса – весной с юго-запада циклоны периодически приносят мелкодисперсный пылеватый песок со степей Монголии и северного Китая.

Летом с юга и юго-востока с сопредельной территории китайской провинции Хэйлуцзян возможен перенос выбросов предприятий теплоэнергетики [6] и предприятий по добыче строительных материалов. Кроме того, наличие крупных рек Амур и Зея способствуют возникновению локальных конвекционных перемещений воздушных масс, влияющих на перераспределение поллютантов.

По данным [7], среднегодовая запыленность по г. Благовещенску в 1993 г. превышала ПДК (предельно допустимую концентрацию) в 3 раза. За двадцатилетний период произошло значительное снижение концентрации взвешенных частиц в атмосфере (среднегодовая и максимальная разовая концентрации не превышают 1 ПДК) [8].

Материалы и методы исследований

На территории г. Благовещенска летом 2013 г. были отобраны пробы городских почв по равномерной площадной сети в масштабе 1:100 000 (шаг опробования 1×1 км). Всего для анализа отобрано 40 проб городских почв (рис. 1). В качестве геохимического фона выбран поверхностный гумусовый горизонт бурых лесных почв элювиального и трансэлювиального типов элементарных геохимических ландшафтов, расположенных в 35 км севернее урбанизированной части города с наветренной стороны. Отобрано 30 проб. Шаг опробования 500×500 м. Отбор почв производился точечным способом методом конверта из верхнего слоя 0–10 см. Из пяти точечных проб составляли объединенную пробу весом примерно 1 кг [9]. Отобранные пробы высушивали, просеивали через сито с диаметром 1 мм.

Водородный показатель pH почвенной суспензии определяли потенциометрическим методом [10]. Содержание углерода измеряли на анализаторе углерода SHIMADZU серии TOC-V CPN в Аналитическом центре минералогеохимических исследований Института геологии и природопользования ДВО РАН (г. Благовещенск). Каждую пробу характеризовали валовым содержанием элементов и содержанием их кислоторастворимых форм (1 М вытяжка HNO₃, которая извлекает из почв до 95% металлов техногенного происхождения) [11].

Определение содержания элементов проведено в сертификационном испытательном центре Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН (г. Москва). Анализ элементов в пробах производили масс-спектральным (X-7, Thermo Elemental, США) и атомно-эмиссионным (ICAP-61, Thermo Jarrell Ash, США) методами с индуктивно связанной плазмой. Для контроля качества анализа использовали стандартные образцы состава габбро СГД-1А (ГСО 521-84П) и СГД-2А (ГСО 8670-2005). Суммарная ошибка определения содержания элементов не превысила 30%.

Рассчитаны коэффициенты концентраций (K_k) как отношение валового содержания определяемого элемента в урбанизированной почве к его содержанию в почве фонового участка. Подобным образом вычислялись коэффициенты

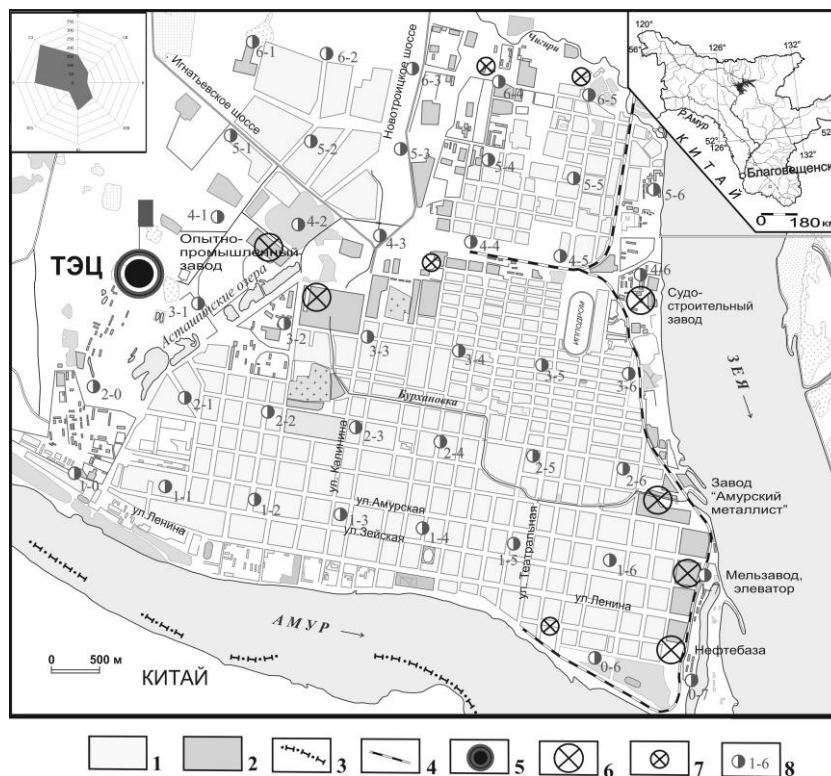


Рис. 1. Карта фактического материала опробования почв на территории г. Благовещенска: 1) селитебная территория; 2) территория промышленных предприятий, 3) Государственная граница России с Китаем; 4) железная дорога, 5) ТЭЦ; 6) заводы, производственные базы; 7) котельные, работающие на буром угле; 8) места отбора проб городских почв и их номера. Врезки: роза ветров (сверху слева), карта-схема Амурской области (сверху справа)

концентраций кислоторастворимых форм (K) ТМ и сульфатов: как отношение содержания элемента в кислотной вытяжке в урбанизированной почве к среднему содержанию в кислотной вытяжке в почве фонового участка.

Геохимические индексы почв выражали формулой, в числителе которой указаны концентрирующиеся элементы с их коэффициентами накопления, в знаменателе – деконцентрирующиеся – с коэффициентами рассеяния.

Данные по коэффициентам концентраций кислоторастворимых форм обрабатывали с помощью факторного анализа методом главных компонент с использованием корреляционной матрицы. Для определения числа факторов использовали критерии Кэттелла и Кайзера, а для упрощения решения применяли «варимакс-вращение». Все расчеты выполняли в пакете Statistica 7.0. Главной целью применения факторного анализа в эколого-геохимических исследованиях является сокращение числа рассматриваемых микроэлементов и определение структуры взаимосвязей между микроэлементами [12].

Самую важную информацию, на которой базируется интерпретация факторов, содержат факторные нагрузки. Факторные нагрузки рассмотрены нами как коэффициенты в уравнении линейной регрессии, допускающей пересчет геохимических полей в поля факторные. Принадлежность элемента к фактору

определялась величиной факторной нагрузки. Результаты пересчетов значений факторов представлены на картах пространственного распределения. Карты построены в программе SURFER 10 методом «ближайших соседей» и оформлены с помощью программы Corel Draw 16.

Факторный анализ является мощным статистическим методом обобщения и интерпретации геохимической информации. Метод позволяет по величинам и знакам коэффициентов факторных нагрузок статистически достоверно выявить ассоциации геохимических параметров, которые обусловлены влиянием определенных факторов. Сами факторы и соответствующие им ассоциации ранжируются по степени влияния, которая оценивается по вкладу фактора в общую дисперсию. Расшифровка физического смысла факторов несет в себе элементы субъективизма. Предполагаемые расшифровки факторов имеют вероятностную природу, и их следует рассматривать как наиболее вероятные гипотезы, а не как однозначные утверждения. Согласно [13], особенно большую долю условности имеет интерпретация факторов с низким вкладом в общую дисперсию (обычно это четвертый и последующие факторы).

Результаты и их обсуждение

Основную часть минерального состава верхнего горизонта почв г. Благовещенска составляют природные силикаты – кристаллы кварца и полевого шпата (в среднем 72%) (табл. 1). Техногенная составляющая представлена шлаком, обломками угля, магнитными и силикатными сферулами, на долю которых приходится в среднем 27%. Соотношение между минеральными образованиями в верхнем слое почвы изменяется в пользу техногенной составляющей в зонах подфакельных выбросов крупных котельных и в промышленных зонах города – 52% и 48% соответственно [14].

Табл. 1

Минеральный состав верхнего горизонта почв г. Благовещенска

Минералы	Содержание в пробах, %							
	0–6	1–0	1–2	1–3	1–7	2–4	3–2	6–5
Шлак магнитный	4	0.2	0.3	0.1	1	0.2	2	0.2
Шлак	40	35.8	11	4	6.7	23	7.3	36
Обломки углей	21.8	1.8	1.7	3.2	12	10	1	15
Магнитные сферулы	3	0.1	ед.	ед.	0.2	зн.	0.2	0.4
Силикатные сферулы	0.1	ед.	ед.	ед.	зн.	–	ед.	0.3
Кварц	12	36	40	49.7	37	37	48	30
Полевые шпаты	19	26	45.7	42	43	28.5	37	18
Амфиболы	0.1	0.1	0.3	0.7	0.1	0.8	4	0.1
Биотит, мусковит	зн.	ед.	1	0.2	ед.	0.4	0.3	–
Гранат	ед.	ед.	зн.	ед.	зн.	зн.	0.1	ед.
Пироксен	ед.	–	зн.	–	–	–	ед.	–
Эпидот	ед.	ед.	зн.	0.1	зн.	0.1	0.1	–
Турмалин	ед.	–	ед.	–	–	–	ед.	–
Циркон	ед.	–	–	–	?	–	?	–
Пирит	ед.	–	зн.	–	ед.	–	–	–

Примечание: ед. – содержание зерен от 1 до 10 знаков; зн. – содержание зерен от 11 до 100 знаков; “–” – не обнаружено.

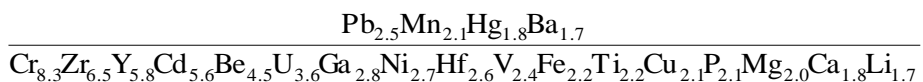
Табл. 2

Валовое содержание породообразующих оксидов (%) и микроэлементов (мг/кг) в урбопочвах г. Благовещенска ($n = 40$) и почвах на фоновом участке ($n = 30$)

Металл	Городская территория			Фоновый участок			Kк	Почвы [15]
	среднее	мин.	макс.	среднее	мин.	макс.		
Na ₂ O	1.60	0.81	2.50	1.26	0.60	1.68	1.3	0.85
MgO	0.65	0.43	1.00	0.53	0.29	0.90	1.2	1.04
Al ₂ O ₃	10.92	7.70	13.60	9.76	6.73	12.51	1.1	13.48
P ₂ O ₅	0.23	0.10	0.55	0.16	0.07	0.41	1.4	0.18
S _{общ}	0.05	0.02	0.13	0.04	0.02	0.13	1.3	0.085
K ₂ O	2.49	1.40	3.20	2.53	1.99	3.55	1.0	1.96
CaO	1.72	0.80	6.20	1.07	0.45	3.03	1.6	1.92
TiO ₂	0.37	0.22	0.57	0.34	0.20	0.58	1.1	0.76
MnO	0.08	0.04	0.30	0.15	0.03	0.32	0.5	0.07
Fe ₂ O ₃	2.97	1.50	4.40	2.48	1.46	4.45	1.2	5.48
Li	18.05	9.77	28.90	17.63	11.00	26.73	1.0	30
Be	1.91	1.19	4.33	1.32	0.77	1.94	1.4	6
Sc	5.94	3.65	9.35	5.01	3.34	8.90	1.2	7
V	47.05	28.86	75.44	41.54	26.88	69.65	1.1	100
Cr	30.28	16.28	74.71	24.00	15.57	40.54	1.3	200
Co	7.70	4.57	18.78	6.17	3.03	11.53	1.2	8
Ni	20.07	10.11	47.50	14.59	8.68	24.26	1.4	40
Cu	22.52	11.17	163	9.48	5.42	15.96	2.4	20
Zn	222	55.11	1956	52.84	31.42	89.34	4.2	50
Ga	11.86	8.18	15.63	10.86	7.00	15.11	1.1	30
As	7.26	4.57	13.29	4.88	2.54	8.74	1.5	5
Rb	85.43	47.04	103	101	74.1	117	0.8	100
Sr	258	163	621	197	102	265	1.3	300
Y	16.00	9.30	33.68	8.62	5.10	13.67	1.9	50
Zr	47.65	27.32	76.29	46.26	22.08	79.91	1.0	300
Nb	7.63	4.60	10.62	6.29	3.37	10.01	1.2	–
Ag	0.12	0.04	0.59	0.054	0.032	0.12	2.1	0.1
Cd	0.46	0.02	7.82	0.089	0.020	0.27	5.1	0.5
Sb	1.46	0.48	8.36	0.76	0.33	1.13	1.9	–
Cs	3.73	2.46	6.28	3.93	2.70	6.09	0.9	5
Ba	871	541	3058	835	625	1038	1.0	500
Hf	1.63	0.97	2.39	2.29	0.83	21.99	0.7	6
W	1.32	0.76	2.29	1.00	0.58	1.74	1.3	–
Hg	0.06	0.01	0.45	0.018	0.0076	0.047	3.4	0.01
Tl	0.51	0.37	0.62	0.57	0.42	0.69	0.9	–
Pb	55.40	25.63	183	24.56	16.46	30.17	2.3	10
Bi	0.26	0.14	0.83	0.22	0.13	0.33	1.2	–
Th	8.08	4.80	12.52	6.04	3.78	10.60	1.3	6
U	2.27	1.43	4.74	1.37	0.90	2.24	1.7	5

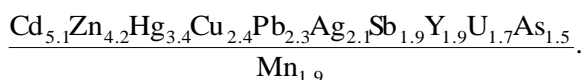
Усредненные данные о химическом составе (валовое содержание) почв урбанизированной и фоновой территорий представлены в табл. 2. По этим данным были рассчитаны коэффициенты концентраций (K_k) и определены формулы геохимической специализации фоновой и урбанизированной почв.

Для поверхностных горизонтов почв фонового участка характерна нейтральная реакция среды со средней величиной рН 6.97 при варьировании от 5.66 до 7.48. Содержание органического углерода составляет в среднем 5.8% при колебаниях от 1.61% до 16.05%. В сравнении со средним составом почв мира по [15], почвы фонового участка характеризуются относительным дефицитом редкоземельных элементов, а также Mg, Al, S, Ca, Ti, Fe, Li, Be, Sc, V, Cr, Ni, Cu, Sr, Y, Zr, U, в меньшей степени P, Co, Cs. Концентрации Na, Ba, Pb, Hg, наоборот, повышены. Геохимическая специализация фоновых почв определяется формулой (коэффициентами накопления и рассеяния больше 1.5):



Техногенная трансформация исходных природных почв на территории г. Благовещенска проявляется в изменении основных физико-химических свойств и микроэлементного состава. По сравнению с фоном повышается рН поверхностных горизонтов до 7.31 (нейтральная, местами с повышением до 8.04 – щелочной реакции). Содержание органического углерода в верхнем горизонте почв г. Благовещенска колеблется от 1.72% до 17.92% при среднем значении 6.14%. Максимальные значения установлены в промышленных зонах и связаны с выбросами пыли недожога угля от крупных котельных.

Изменения физико-химических свойств почв в результате техногенного воздействия приводят к концентрированию с различной интенсивностью химических элементов в поверхностных горизонтах. Рассчитанный коэффициент концентрации варьирует от 0.5 до 5.1. К рассеивающимся элементам отнесены Mn, Rb, Cs, Hf, Tl. Значения коэффициента K_k для K, Li, Zr, Ba равны 1. Элементный состав поверхностного горизонта почв Благовещенска существенно отличается от геохимической специализации фоновых почв:



Существует два подхода к исследованию городских почв: генетический и санитарно-химический. В первом случае проводятся исследования глубоких профилей почв, что важно для установления скорости урботехнопедогенеза и для получения исторической информации о городских почвах. Во втором случае, при санитарно-химическом подходе, основное внимание уделяется верхней части корнеобитаемой толщи почвы с целью оценки ее экологического состояния. Государственный документ, регламентирующий процедуру санитарно-химического исследования почв [16], предусматривает определение в городских почвах показателя рН, тяжелых металлов и других параметров.

Согласно международным нормативным документам рекомендуется контролировать содержание в почвах Sb, As, Ba, Be, Cd, Cr, Cu, Fe, Zn, Pb, Hg, Ni, Ag [17] (см. также [18, 19]). В действующем в России ГОСТе «Классификация химических веществ для контроля загрязнения» [20] выделено три класса химических веществ в соответствии со степенью их опасности. К высокоопасным отнесены As, Cd, Hg, Se, Pb, Zn, к умеренно опасным – В, Co, Ni, Mo, Cu, Sb, Cr, к малоопасным – Ba, V, W, Mn, Sr. По мнению Ю.Н. Водяницкого [21],

Табл. 3

Статистические параметры распределения кислоторастворимых форм тяжелых металлов/металлоидов и сульфатов в почве на территории г. Благовещенска, мг/кг

Элемент	Благовещенск							Фон
	m_1	σ	Xmed	Min	Max	A	V, %	m_2
Be	0.72	0.46	0.62	0.27	3.00	3.46	63.6	0.04
V	5.46	1.80	5.20	2.40	10.5	0.54	32.9	0.33
Cr	1.71	0.96	1.60	0.72	5.70	2.55	56.0	0.32
Co	2.41	1.09	2.30	0.70	6.60	1.68	45.2	0.46
Ni	4.68	1.72	4.40	1.80	10.6	1.18	36.8	0.27
Cu	11.02	11.43	8.25	4.00	76.9	5.15	104	0.34
Zn	117	210	58.45	6.30	1251	4.45	179	0.94
As	0.92	0.40	0.91	0.20	2.00	0.62	43.8	0.036
Cd	0.32	0.92	0.13	0.03	5.80	5.78	291	0.0067
Sb	0.06	0.07	0.04	0.01	0.36	3.52	125	0.0012
W	0.02	0.01	0.01	0.00	0.05	1.20	80.4	0.0004
Pb	33.0	27.87	25.5	4.60	149.6	2.26	84.4	0.64
Th	0.16	0.10	0.14	0.04	0.51	1.43	63.3	0.0029
U	0.53	0.18	0.51	0.25	1.20	1.50	33.3	0.023
SO ₄ ²⁻	124	135	78.37	27.28	800	3.71	109	13.31

Примечание: m – среднее, σ – стандартное отклонение, Xmed – медиана, Min – минимум, Max – максимум, A – асимметрия, V – коэффициент вариации.

необходимы нормативы для урана, техногенная доля которого после Второй мировой войны стремительно возросла.

На основании нормативных документов, а также величин коэффициента концентрации ($K_k \geq 1.5$), приведенных в табл. 2, выбрано 14 тяжелых металлов/металлоидов – V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Sb, Be, W, Pb, Th, U, являющихся наиболее опасными для человека.

Вклад техногенной составляющей в общее содержание химического элемента в почве можно оценить по содержанию химического элемента в вытяжке 1 М HNO₃. Статистические параметры распределения кислоторастворимых форм тяжелых металлов/металлоидов и сульфатов приведены в табл. 3.

Исходя из представлений о том, что при нормальном распределении показатели среднего значения и медианы примерно равны, абсолютная величина показателя асимметрии меньше ошибки репрезентативности в 3 и более раз и значения коэффициент вариации не превышают 33%, данные, представленные в табл. 3, свидетельствуют о неравномерном распределении кислоторастворимых форм изученных элементов в почвах г. Благовещенска. Для всех элементов среднее арифметическое значение концентраций кислоторастворимых форм выше, чем медиана. Наибольшую величину стандартного отклонения имеет массив данных по содержанию кислоторастворимых форм Zn, ассиметрии – Cd, Cu, Zn.

Согласно табл. 2, 3 наибольший вклад техногенной составляющей (в среднем около 70%) в валовое содержание ТМ в индустриоземах и урботехноземах г. Благовещенска отмечен для Cd: Cd (70%) > Pb (60%) > Zn (53%) > Cu (49%) > Be (38%) > Co (31%) > Ni ~ U (23%) > V ~ As (12%) > Cr (6%) > Sb (4%) > W ~ Th (2%). Таким образом, Cd, Pb, Zn, и Cu – основные техногенные загрязнители урбаноземов г. Благовещенска.

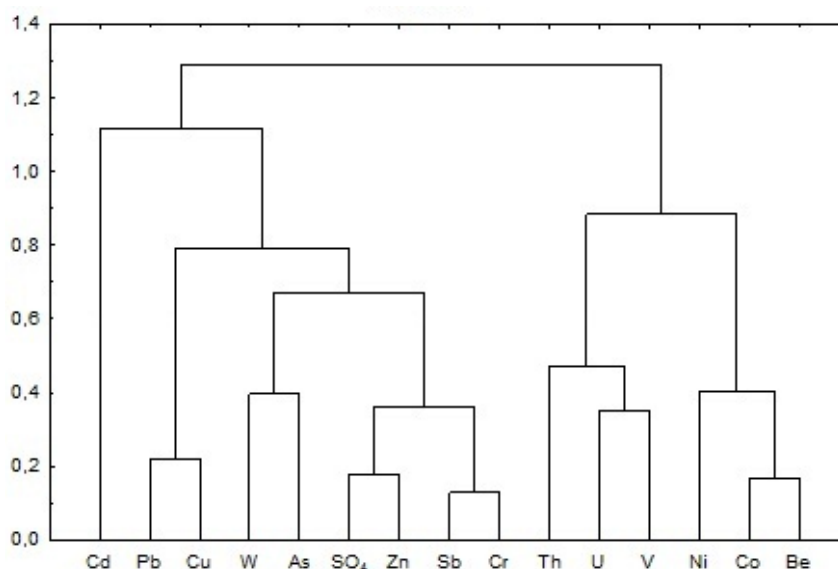


Рис. 2. Дендрограмма корреляционной матрицы кислоторастворимых форм элементов в почвах г. Благовещенска

По коэффициентам концентраций кислоторастворимых форм ТМ и сульфатов была построена дендрограмма (рис. 2), которая позволяет разбить изученные химические элементы (15) на группы, которые объединяют элементы с наивысшими значениями меры сходства (парных коэффициентов корреляции Пирсона, r).

Геохимические спектры кислоторастворимых тяжелых металлов в почве г. Благовещенска образуют значимые ассоциации (рис. 2). Наиболее сильные корреляционные связи на дендрограмме установлены для ассоциаций тяжелых металлов: Pb–Cu, W–As, SO_4^{2-} –Zn–Sb–Cr, Th–U–V, Ni–Co–Be.

Результаты факторного анализа коэффициентов концентраций кислоторастворимых форм представлены в табл. 4. Наибольший вклад в общую дисперсию (52.5%) дает первый фактор (табл. 4). Фактор с наибольшей дисперсией может отражать влияние любых геохимических процессов, способствующих накоплению химических элементов в почвах города. Идентификация фактора зависит от набора элементов-маркеров. Для кислоторастворимых форм элементов в почвах г. Благовещенска характерна ассоциация Co–Zn–Be–Ni–Sb–W– SO_4^{2-} . Наличие ассоциации Co–Ni–Zn, как характерное для городских почв, отмечается многими исследователями [13, 22, 23], а содержание таких элементов, как Be, Sb, W, в городских почвах менее изучено. Согласно [13], Fe, Mn, Co, Ni, Zn, Cu, Pb, Cd, V и др. являются элементами-индикаторами промышленного пирогенеза – всей совокупности процессов, включая плавку, переплавку, обжиг, огневое рафинирование, сжигание.

Когда эти элементы или их часть образуют устойчивую ассоциацию первого порядка, следует вывод о том, что ведущим фактором загрязнения почв является промышленный пирогенез.

Табл. 4

Коэффициенты факторных нагрузок для четырех факторов, определяющих геохимические особенности загрязнения почв г. Благовещенска

Компонент	1-й фактор (52.5)*	2-й фактор (11.4)	3-й фактор (9.4)	4-й фактор (7.4)
Be	0.90	-0.08	0.32	0.19
V	0.21	0.15	0.89	0.09
Cr	0.52	0.74	0.32	0.05
Co	0.77	0.25	0.31	0.27
Ni	0.66	0.08	0.41	0.11
Cu	0.07	0.91	0.19	0.07
Zn	0.85	0.42	-0.04	-0.14
As	0.21	0.67	0.43	0.05
Cd	0.07	0.19	0.02	0.92
Sb	0.66	0.64	0.15	-0.05
W	0.64	0.37	0.10	0.22
Pb	0.20	0.84	0.00	0.34
Th	0.46	0.40	0.53	-0.19
U	0.17	0.20	0.82	-0.05
SO ₄ ²⁻	0.77	0.39	0.15	-0.14

* В скобках указан вклад каждого фактора в общую дисперсию в процентах.

Приведенные в табл. 4 факторные нагрузки были рассмотрены нами как коэффициенты в уравнении линейной регрессии. Результаты пересчетов по первому фактору приведены на рис. 3, а. Из рисунка видно, что области с максимальными значениями данного фактора распространены в зоне подфакельных выбросов ТЭЦ, котельных и в районе частной застройки с печным отоплением. Вероятно, ассоциация Co–Zn–Be–Ni–Sb–W–сульфат-ион связана с поступлением в почву аэрозолей, образующихся при сжигании топлива. Очевидно, что специфическая ассоциация загрязнителей зависит от состава используемого органического топлива (угля), в частности от содержания в нем определенных элементов-примесей. Известно, что при сжигании углей с золой уноса происходит вынос в атмосферу многих химических элементов, которые, как правило, связаны с органической составляющей твердого топлива [24].

Максимальные значения Cr, Cu, Pb соответствуют второму фактору. На долю этого фактора приходится 11.4% дисперсии (табл. 4), он характеризуется микроассоциацией Pb и Cu, связанных положительной корреляционной связью. Загрязнение почв этими металлами определяется воздействием выхлопных газов вследствие того, что медь входит в топливо в виде естественной примеси, а свинец считается маркером автотранспортного загрязнения нижних слоев воздуха (в последние годы несколько снизившимся в связи с уменьшением использования этилированного бензина). В состав дизельного топлива вводятся металлоорганические соединения на основе Pb, Cu, Ni, Cr (0.02–0.25%) для уменьшения в составе отработанных газов сажи [25]. Следует отметить, что для пирогенной ассоциации тяжелых металлов в аэрозолях от автотранспортных выбросов характерен дальний воздушный перенос, приводящий к загрязнению почв на расстоянии до 200 м от дороги (рис. 3, б).

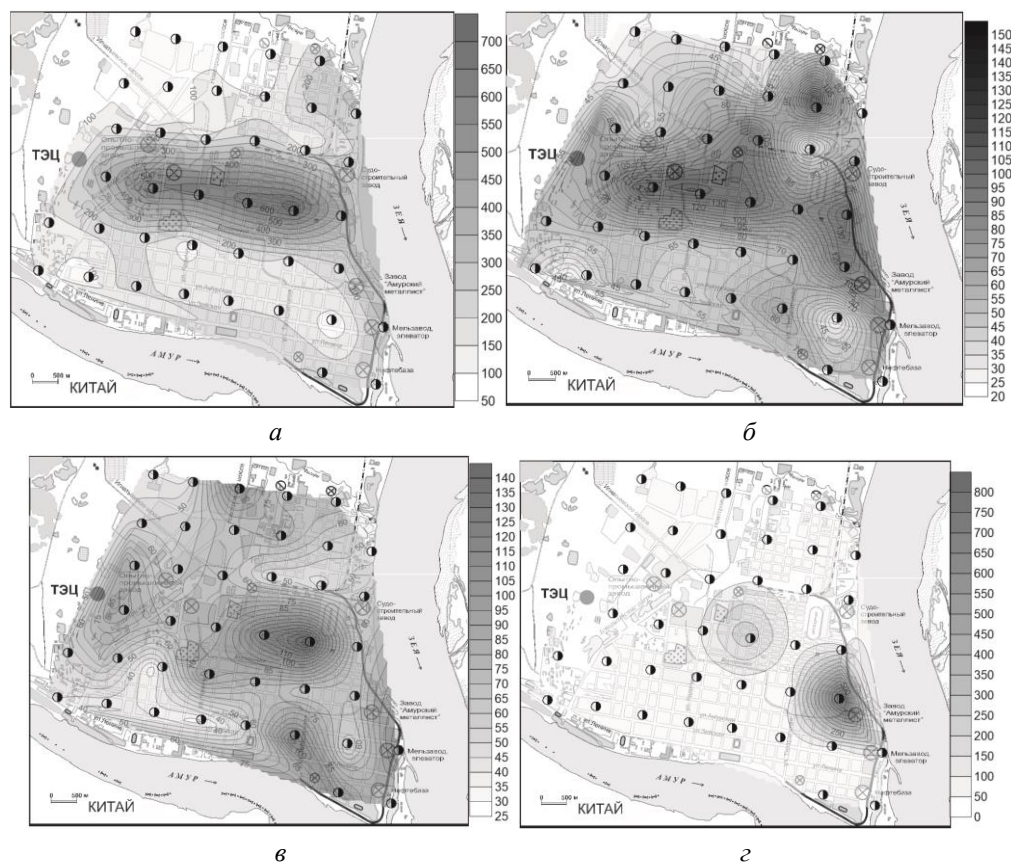


Рис. 3. Распределение вращаемых факторных нагрузок микроэлементов в выбранной 4-факторной модели на территории г. Благовещенска: *а* – I ассоциативная группа Co–Zn–Be–Ni–Sb–W–сульфат-ион; *б* – II ассоциативная группа Cr, Cu, Pb; *в* – III ассоциативная группа V, U, Th; *г* – IV ассоциативная группа Cd

Третий фактор отражает увеличение в городских почвах V, U, а также Th, по-видимому, характеризует общее техногенное загрязнение почвы, связанное с выбросами ТЭЦ, завода «Амурский металлист» и т.д., имеющих свои котельные, сжигающие уголь и мазут, а также локализующиеся на территории с малоэтажной застройкой (рис. 3, *в*). Этот вывод согласуется с данными [26] о том, что основной причиной обогащения городских почв г. Благовещенска высокотоксичными элементами являются пылеаэрозоли от сжигания органического топлива.

Согласно литературным данным ванадий в почвах считается элементом-маркером углеводородного загрязнения (его концентрации в них в условиях разливов нефти и нефтепродуктов, как правило, повышены), а в воздухе – маркером загрязнения от выбросов теплоэнергетики, особенно работающих на мазуте [27].

Четвертый фактор, на который приходится 7.4% суммарной дисперсии, отражает увеличение в почвах города содержания кадмия. Наибольшая выраженность этого фактора строго приурочена к заводу «Амурский металлист» (рис. 3, *г*), специализирующемуся на производстве оборудования для предприятий горнодобывающего, угольного, золотодобывающего, мостостроительного, дорожно-строительного комплексов.

Выводы

Возросшее количество цифровой информации, получаемой в процессе эколого-геохимических исследований, требует использования современных способов ее обработки и анализа, в том числе с помощью методов статистического анализа, обеспечивая тем самым более высокий научный уровень исследования окружающей среды.

На примере малопромышленного дальневосточного г. Благовещенска изучены устойчивые геохимические ассоциации элементов-загрязнителей в почвенном покрове. Использование методов многомерного статистического анализа для обработки обширного блока геохимической информации, характеризующей почву, позволило со значительной степенью достоверности выявить причинно-следственные связи между геохимическими особенностями урбанизированной почвы и предполагаемыми источниками их загрязнения. По величинам и знакам коэффициентов факторных нагрузок на урбанизированной территории выделено четыре фактора. Главный фактор с 52.5%-ным вкладом в общую дисперсию обусловлен ассоциацией элементов $\text{Co-Zn-Be-Ni-Sb-W-SO}_4^{2-}$, свидетельствующих о промышленном пирогенезе как основной причине их поступления. Суммарная доля второго и третьего факторов характеризует общее техногенное загрязнение от выбросов автотранспорта и малых сжигающих установок (котельных, работающих на угле и мазуте, частных домовладений с печным отоплением). Незначительная доля суммарной дисперсии четвертого фактора (7.4%) отражает тенденцию увеличения содержания кадмия в почвах города за счет деятельности промышленных предприятий.

Литература

1. Lasat M.M. Phytoextraction of toxic metals: A review of biological mechanisms // J. Environ. Qual. – 2002. – V. 31, No 1. – P. 109–120. – doi:10.2134/jeq2002.1090.
2. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях / Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 439 с.
3. Батян А.Н., Фрумин Г.Т., Базылев В.Н. Основы общей и экологической токсикологии. – СПб.: Спец-Лит, 2009. – 352 с.
4. Регионы и города России: интегральная оценка экологического состояния / Под ред. Н.С. Касимова. – М.: ИП Филимонов М.В., 2014. – 560 с.
5. Радомская В.И., Юсупов Д.В., Павлова Л.М. Макрокомпонентный состав снежного покрова г. Благовещенска // Вода: химия и экология. – 2014. – № 8. – С. 95–103.
6. Состав атмосферы над Северной Евразией: эксперименты TROICA. – М.: Агроспас, 2009. – 80 с.
7. Отчет о результатах геоэкологических исследований в г. Благовещенске Амурской области в 1990–1991 гг. Рег. № 47-90-10/24. – Благовещенск: Изд-во ГПП «Амур-геология», 1992. – 92 с.
8. Государственный доклад об охране окружающей среды и экологической ситуации в Амурской области за 2014 год. – URL: http://www.amurobl.ru/wps/portal!/ut/p/c5/rc1LDoIwFADAs3gB3ispYJcgEEGBKOUjGwLEIH-iBkJPrxdwZ-YAAxl8jcXS1MW7mcaihxQyNaeIgw4QHVGPNXQUO4pPLJAPLoEEUqR52G6zIzpxbXFD33Q9v3RW72w7XkQCzgpKpiV4NwmOK_KIIlheujxUjsX2xdCMJX323A_84DXe4Qab9HA0Z-B9HF7KmHKS1GiSUYEYJyupeZSgrjFJIDZiH5fFU6t0HDMdfbg!!/dl3/d3/L2dBISEvZ0FBIS9nQSEh/

9. *Гуляева Н.Г.* Методические рекомендации по эколого-геохимической оценке территорий при проведении многоцелевого геохимического картирования масштабов 1:1 000 000 и 1:200 000. – М.: ИМГРЭ, 2002. – 72 с.
10. *Аринушкина Е.В.* Химический анализ почв. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1962. – 491 с.
11. Методика выполнения измерений массовой доли кислоторастворимых металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом. РД 53.18.191-89. – М.: Госкомитет СССР по гидрометеорологии, 1990. – 37 с.
12. *Радомская В.И., Юсупов Д.В., Павлова Л.М.* Анализ выпадения химических элементов с атмосферными осадками на территории города Благовещенска // Изв. Сам. науч. центра РАН. – 2016. – Т. 18, № 2–2. – С. 488–492.
13. *Тутуунник Y.G., Gorlitskii B.A.* The factor analysis of geochemical peculiarities of urban soils in Ukraine // *Eurasian Soil Sci.* – 1998. – № 1. – P. 92–100.
14. *Юсупов Д.В., Степанов В.А., Радомская В.И., Павлова Л.М., Трутничева Н.В.* Минеральный и геохимический состав поверхностного горизонта почв г. Благовещенска // Сергеевские чтения. Инженерная геология и геоэкология. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи. – М.: РУДН, 2016. – С. 370–375.
15. *Виноградов А.П.* Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – 238 с.
16. ГОСТ 17.4.2.01–81. Охрана природы. Почвы. Номенклатура показателей санитарного состояния. – М.: Стандартинформ, 2008. – 4 с.
17. Состояние окружающей среды. Программа ООН по окружающей среде. – М.: Изд-во ВИНТИ, 1980. – 162 с.
18. *Водяницкий Ю.Н.* Тяжелые металлы и металлоиды в почвах. – М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. – 164 с.
19. *Добровольский В.В.* География микроэлементов. Глобальное рассеяние. – М.: Мысль, 1983. – 271 с.
20. ГОСТ 17.4.1.02-83. Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения. – М.: Стандартинформ, 2008. – 3с.
21. *Vodyanitskii Y.N.* Contamination of soils with heavy metals and metalloids and its ecological hazard (analytic review) // *Eurasian Soil Sci.* – 2013. – V. 46, No 7. – P. 793–801. – doi: 10.1134/S1064229313050153.
22. *Радомская В.И., Радомский С.М., Куимова Н.Г.* Оценка загрязнения почвенного покрова г. Благовещенск // Вестн. Дальневост. отд. РАН. – 2008. – № 3. – С. 37–43.
23. *Бородин Н.А.* Влияние антропогенных факторов на содержание тяжелых металлов в почвах малопромышленных городов Приамурья // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2012. – № 12. – С. 29–33.
24. *Арбузов С.И., Волостнов А.В., Ершов В.В., Рихванов Л.П., Миронов В.С., Машенькин В.С.* Геохимия и металлоносность углей Красноярского края. – Томск: СГТУ, 2008. – 300 с.
25. *Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П., Смирнова Р.С., Башаркевич И.Л., Онищенко Т.Л., Павлова Л.Н., Трефилова Н.Я., Ачкасов А.И., Саркисян С.Ш.* Геохимия окружающей среды. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
26. *Павлова Л.М., Радомская В.И., Юсупов Д.В.* Высотокисичные элементы в почвенном покрове на территории г. Благовещенска // Экология и промышленность России. – 2015. – № 5. – С. 50–55.
27. *Волох А.А., Ревич Б.А.* Особенности микроэлементного состава атмосферного воздуха в зоне влияния различных типов производств // Экологогеохимические исследования в районах интенсивного техногенного воздействия. – М.: ИМГРЭ, 1990. – С. 128–133.

Поступила в редакцию
23.03.17

Радомская Валентина Ивановна, кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории биогеохимии

Институт геологии и природопользования ДВО РАН
пер. Релочный, д. 1, г. Благовещенск, 675000, Россия
E-mail: *radomskaya@ascnet.ru*

Юсупов Дмитрий Валерьевич, кандидат геолого-минералогических наук, доцент

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
пр-т Ленина, д. 30, г. Томск, 634050, Россия
E-mail: *yusupovd@mail.ru*

Павлова Людмила Михайловна, кандидат биологических наук, заведующий лабораторией биогеохимии

Институт геологии и природопользования ДВО РАН
пер. Релочный, д. 1, г. Благовещенск, 675000, Россия
E-mail: *pav@ascnet.ru*

Сергеева Алена Геннадьевна, научный сотрудник лаборатории биогеохимии

Институт геологии и природопользования ДВО РАН
пер. Релочный, д. 1, г. Благовещенск, 675000, Россия
E-mail: *skomoroshko@mail.ru*

Воропаева Елена Николаевна, научный сотрудник лаборатории рудогенеза

Институт геологии и природопользования ДВО РАН
пер. Релочный, д. 1, г. Благовещенск, 675000, Россия
E-mail: *levorglav@mail.ru*

ISSN 2542-064X (Print)
ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI
(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2017, vol. 159, no. 4, pp. 602–617

Using Multivariate Statistical Analysis to Study the Ecological and Geochemical Properties of Soils in Blagoveshchensk (Russia)

V.I. Radomskaya^{a}, D.V. Yusupov^{b**}, L.M. Pavlova^{a***}, A.G. Sergeeva^{a****},
E.N. Voropaeva^{a*****}*

^a*Institute of Geology and Nature Management, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,
Blagoveshchensk, 675000 Russia*

^b*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634034 Russia*

E-mail: ^{*}*radomskaya@ascnet.ru*, ^{**}*yusupovd@mail.ru*, ^{***}*pav@ascnet.ru*,
^{****}*skomoroshko@mail.ru*, ^{*****}*levorglav@mail.ru*

Received March 23, 2017

Abstract

The study is extremely relevant, because most people in Russia (over 73%) live in urban environments, which are significantly influenced by various pollutants. According to N.S. Kasimov et al. (2014), small towns account for 83% of urban areas where the pollution rate is much higher as established by their industry specialization. Thus, the problem of the contribution of different sources into environmental pollution in small industrial towns is acute. For this reason, the geochemical characteristics of urban soils (in the Far Eastern city of Blagoveshchensk (Russia)) have been studied with the help of factor analysis and the sources of polluting elements have been identified. In order to determine stable geochemical associations of pollutants in the soil cover, various geochemical methods and multivariate

statistical analysis have been used. Having processed the geochemical data on the soil by the methods of multivariate statistical analysis, we have revealed with a high degree of reliability the cause-and-effect relations between the geochemical characteristics of urban soils and the potential sources of their contamination. Four factors have been found. The main factor has the contribution of 45.9% to the total variance of association elements Co–Ni–Zn–Sb–Be– SO_4^{2-} and indicates industrial pyrogenesis as the main cause of their arrival. The other two factors characterize general technogenic pollution from the emission of coal- and oil-fired boilers, households with stove heating, and auto pollution. The last factor with the total variance of 7.4% relates to the cadmium content increase in soils of the city.

Keywords: Blagoveshchensk, quantitative chemical analysis, factor analysis, mineralogical analysis, heavy metals, metalloids

Figure Captions

Fig. 1. The map of actual soil sampling sites in Blagoveshchensk: 1) residential area; 2) territory of industrial enterprises, 3) state border of Russia with China; 4) railway, 5) thermal power station; 6) factories, production bases; 7) boiler houses operating on brown coal; 8) sampling sites of urban soils and their numbers. Insets: rose of winds (top, left), map of the Amur region (top, right).

Fig. 2. The dendrogram showing the correlation matrix of acid-soluble forms of the pollutants in the soils of Blagoveshchensk.

Fig. 3. The distribution of rotated factorial loads of trace elements in the selected 4-factor model in Blagoveshchensk: *a* – associative group I Co–Zn–Be–Ni–Sb–W–sulfate ion; *b* – associative group II Cr, Cu, Pb; *c* – associative group III V, U, Th; *d* – associative group IV Cd.

References

1. Lasat M.M. Phytoextraction of toxic metals: A review of biological mechanisms. *J. Environ. Qual.*, 2002, vol. 31, no. 1, pp. 109–120. doi: 10.2134/jeq2002.1090.
2. Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press, Inc. Fourth Printing, 1984. 315 p.
3. Batyan A.N., Frumin G.T., Bazylev V.N. Fundamentals of General and Environmental Toxicology. St. Petersburg, Spets-Lit, 2009. 352 p. (In Russian)
4. Regions and Cities of Russia: Integrated Assessment of the Environment. Kasimov N.S. (Ed.). Moscow, IP Filimonov M.V., 2014. 560 p. (In Russian)
5. Radomskaya V.I., Yusupov D.V., Pavlova L.M. Macrocomponent composition of Blagoveshchensk snow cover. *Voda: Khim. Ekol.*, 2014, no. 8, pp. 95–103. (In Russian)
6. Atmospheric Composition over Northern Eurasia: TROICA Experiments. Moscow, Agrosplas, 2009. 80 p. (In Russian)
7. Report on Results of Geoecological Research in Blagoveshchensk City of Amur Region during 1990–1991. Regist. No. 47-90-10/24. Blagoveshchensk, Izd. GGP Amurgeologiya, 1992. 92 p. (In Russian)
8. State Report on Environmental Protection and Environmental Situation in the Amur Region for 2014. Available at: http://www.amurobl.ru/wps/portal/lut/p/c5/rc1LDoIwFADAs3gB3ispYJcgEEGBKOUjGwLEIH-iBkJPrxdwZ-YAAxl8jcXS1MW7mcaihxQyNaeIgw4QHVGPNXQUO4pPLJAPLoEEUqR52G6zIzpxbXFD33Q9v3RW72w7XkQCzgPkpiV4NwmOK_KIIheujxUjsX2xdCMJX323A_84DXe4Qab9HA0Z-B9HF7KmHKS1GiSUYEYJyupeZSgrjFJIDZiH5fFU6_t0HDMdfbg!!/dl3/d3/L2dBISvZ0FBIS9nQSEh/.
9. Gulyaeva N.G. Methodical Recommendations for Ecological and Geochemical Assessment of Territories during Multi-Purpose Geochemical Mapping on 1:1000 000 and 1:200 000 Scales. Moscow, IMGRE, 2002. 72 p. (In Russian)
10. Arinushkina E.V. Chemical Analysis of Soils. Moscow, Izd. Mosk. Gos. Univ., 1962. 491 p. (In Russian)
11. Technique for Measuring Mass Fraction of Acid Metals (Copper, Lead, Zinc, Nickel, Cadmium) in Soil Samples by Atomic Absorption Analysis. RD 53.18.191-89. Moscow, Goskom. SSSR Gidrometeorol., 1990. 37 p. (In Russian)

12. Radomskaya V.I., Yusupov D.V., Pavlova, L.M. The analysis of chemical elements fallout within atmospheric precipitation at the Blagoveshchensk city territory. *Izv. Samar. Nauchn. Tsentera Ross. Akad. Nauk*, 2016, vol. 18, no. 2–2, pp. 488–492. (In Russian)
13. Tyutyunnik Y.G., Gorlitskii B.A. The factor analysis of geochemical peculiarities of urban soils in Ukraine. *Eurasian Soil Sci.*, 1998, no. 1, pp. 92–100.
14. Yusupov D.V., Stepanov V.A., Radomskaya V.I., Pavlova L.M., Trutneva N.V. Mineral and geochemical composition of Blagoveshchensk soils surface horizon. *Sergeevskie chteniya. Inzhenernaya geologiya i geoekologiya. Fundamental'nye problemy i prikladnye zadachi* [Sergeev's Lect. Engineering Geology and Geoecology. Fundamental Problems and Applied Tasks]. Moscow, RUDN, 2016, pp. 370–375. (In Russian)
15. Vinogradov A.P. Geochemistry of Rare and Dispersed Chemical Elements in Soils. Moscow, Izd. Akad. Nauk SSSR, 1957. 238 p. (In Russian)
16. State Standard 17.4.2.01–81. Protection of nature. Soil. Sanitary indicators nomenclature. Moscow, Standartinform, 2008. 4 p. (In Russian)
17. United Nations Environment Programme. *The State of Environment*. Moscow, Izd. VINITI, 1980. 162 p. (In Russian)
18. Vodyanitskiy Yu.N. Heavy Metals and Metalloids in Soils. Moscow, Pochv. Inst. im. V.V. Dokuchaeva, 2008. 164 p. (In Russian)
19. Dobrovol'skii V.V. Geography of Trace Elements. Global Scattering. Moscow, Mysl', 1983. 271 p. (In Russian)
20. State Standard 17.4.1.02-83. Nature protection. Soils. Classification of chemicals for pollution control. Moscow, Standartinform, 2008. 3 p. (In Russian)
21. Vodyanitskiy Yu.N. Contamination of soils with heavy metals and metalloids and its ecological hazard (analytic review). *Eurasian Soil Sci.*, 2013, vol. 46, no. 7, pp. 793–801. doi: 10.1134/S1064229313050153.
22. Radomskaya V.I., Radomskii, S.M., Kuimova N.G. Assessment of soil pollution in Blagoveshchensk. *Vestn. Dal'nevost. Otd. Ross. Akad. Nauk*, 2008, no. 3, pp. 37–43. (In Russian)
23. Borodina N.A. The influence of anthropogenic factors on heavy metals content in soils of Amur region small industrial cities. *Aktual. Probl. Gumanit. Estestv. Nauk*, 2012, no. 12, pp. 29–33. (In Russian)
24. Arbuzov S.I., Volostnov A.V., Ershov V.V., Rikhvanov L.P., Mironov V.S., Mationkin V.S. Geochemistry and Metal Content in Coals of Krasnoyarsk Krai. Tomsk, STT, 2008. 300 p. (In Russian)
25. Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P., Smirnova R.S., Basharkevich I.L., Onishchenko T.L., Pavlova L.N., Trefilova N.Ya., Achkasov A.I., Sarkisyan S.Sh. Geochemistry of Environment. Moscow, Nedra, 1990. 335 p. (In Russian)
26. Pavlova L.M., Radomskaya V.I., Yusupov D.V. Highly toxic elements in soil cover at the territory of Blagoveshchensk. *Ekol. Prom-st. Ross.*, 2015, no. 5, pp. 50–55. (In Russian)
27. Volokh A.A., Revich B.A. Ecological and Geochemical Research in Areas of Intensive Technogenic Impact. Moscow, IMGRE, 1990, pp. 128–133. (In Russian)

Для цитирования: Радомская В.И., Юсупов Д.В., Павлова Л.М., Сергеева А.Г., Воропаева Е.Н. Использование многомерного статистического анализа для исследования эколого-геохимических свойств почв г. Благовещенска // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2017. – Т. 159, кн. 4. – С. 602–617.

For citation: Radomskaya V.I., Yusupov D.V., Pavlova L.M., Sergeeva A.G., Voropaeva E.N. Using multivariate statistical analysis to study the ecological and geochemical properties of soils in Blagoveshchensk (Russia). *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2017, vol. 159, no. 4, pp. 602–617. (In Russian)