

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ ГЕОСИСТЕМ В ПРЕДЕЛАХ ГОРОДА ПЕТРОЗАВОДСКА И ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ

Рыбаков Д.С., Крутских Н.В., Лазарева О.В., Слукровский З.И., Кричевцова М.В.

Институт геологии Карельского научного центра РАН

ASSESSMENT OF THE CONDITION OF NATURAL-MAN-INDUCED GEOSYSTEMS IN PETROZAVODSK AND ADJACENT AREAS

Rybakov D.S., Krutskikh N.V., Lazareva O.V., Slukovsky Z.I., Krichevtsova M.V.

Institute of Geology, Karelian Research Centre, RAS, Petrozavodsk

The authors describe the environmental-geochemical condition of an urbanized territory exemplified by the City of Petrozavodsk, using available data from some adjacent areas. Such a study is an integral part of the initial stage in environmental risk assessment, and is accompanied by prediction of changes in environmental conditions caused by natural and anthropogenic processes. In this context, the man-induced geochemical anomalies revealed are an essential factor which affects environmental risk assessment in the study area.

To reveal a relationship between a geological environment, a technosphere and the condition of ecosystems, study of an urban environment should be based on analysis of the external and internal factors of a geotechnical system (urbanized area). The functional pattern of the study area and artificial load are understood as external factors. The natural factors contributing to the formation of environmental-geological conditions, including the landscape and geomorphological and geochemical characteristics of the study area, are assessed as internal factors.

Assessment of environment components comprises analysis of the industrial pollution of the soil, ground, bottom sediments and vegetation in Petrozavodsk. The pollution levels of environment components are estimated relative to MACs, TACs and abundance ratios.

Our study has shown that Zn and lesser Pb are major polluting elements of the urban soils. Cu and Mn concentrations exceed control values in scarce samples.

Bottom sediments of the rivers Neglinka and Lososinka, flowing through Petrozavodsk, are more heavily polluted than those of the suburban river Shuya. The average concentrations of the elements estimated for the river Lososinka differ most substantially. Cu, Zn and As concentrations in these bottom sediments exceed MAC in all samples. The Pb concentrations, which exceed MAC, could be due to both pollutants from the urbanized territory and the close proximity of suburban highways to the city (scarce samples from the river Shuya). High Cd concentrations (6-25 times the abundance ratio) in bottom sediments from all the streams assessed are demonstrative. Bottom sediments from Lake Chetyrekhverstnoye are polluted with As.

Bioindication study was based on analysis of pollen fertility/sterility. The male inflorescences of white birch (*Betula pubescens Ehrh.*) and ramanas rose (*Rosa rugosa Thunb.*) anthers were used for assessment.

Cu is the most potentially hazardous element because its concentrations in the soil correlate positively with the pollen sterility index of both plants.

Основной целью настоящих исследований является характеристика эколого-геохимического состояния геотехнических систем (ГТС) урбанизированных территорий на примере города Петрозаводска и эколого-геологических систем (ЭГС) прилегающих территорий. Подобные исследования относятся к начальному этапу оценки экологического риска и сопровождаются прогнозом изменения состояния окружающей среды под воздействием природных и техногенных процессов. В этом контексте выявленные техногенные геохимические аномалии являются важнейшим фактором, влияющим на оценку экологических рисков на изучаемой территории (Рыбаков, 2006; Рыбаков, 2008).

Петрозаводск расположен на юго-восточной окраине Балтийского кристаллического щита к

северу от Олонецкой возвышенности и Шокшинской гряды на озерных террасах Петрозаводской губы Онежского озера.

Геоморфологически город приурочен к холмистым моренным и озерно-ледниковым равнинам с общим понижением в сторону Онежского озера. В целом преобладает трансаккумулятивный тип ландшафта. Элювиальные-трансэлювиальные типы ландшафта выделены в пределах микрорайонов Кукковка, Древлянка, западной части микрорайона Перевалка, водоразделов рек Неглинка и Лососинка, районе ТЭЦ. К трансупераквальным ландшафтам относятся поймы рек Неглинка и Лососинка, прибрежная часть Онежского озера (рис. 1).

Водный перенос и аккумуляция в осадках химических элементов на изучаемой территории связаны с нижним течением средней по размерам

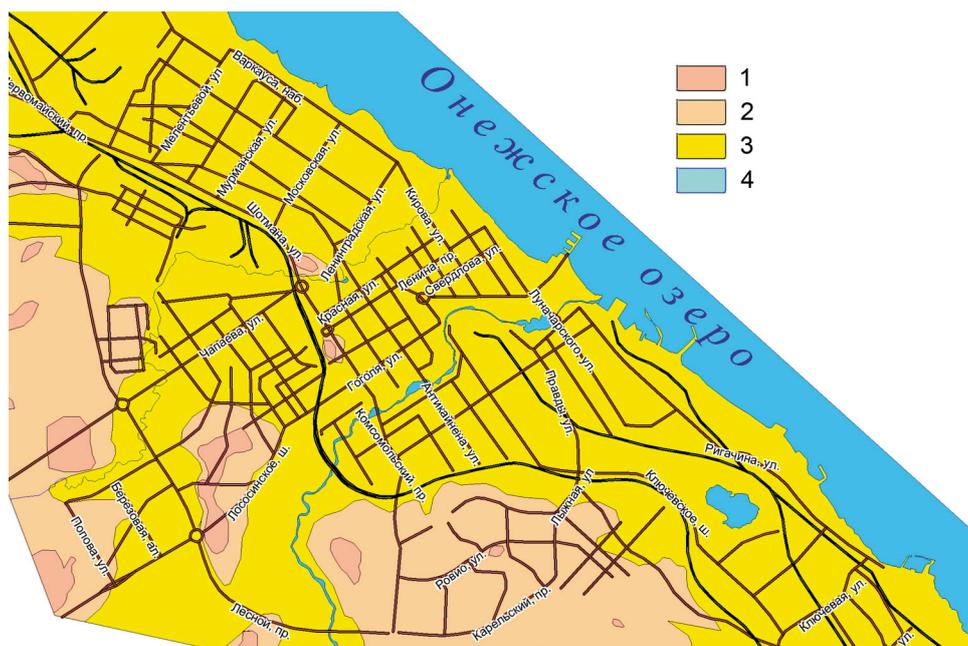


Рис. 1. Ландшафты города Петрозаводска: 1 – трансупераквальные (ложа долин, болота, реки), 2 – трансаккумулятивный (нижние части склонов), 3 и 4 – совмещенные элювиальные-трансэлювиальные (водоразделы и верхние части склонов)

Fig.1. Landscapes of Petrozavodsk: 1 – trans-superaquatic (valley floor, swamp bottom and river bed), 2 – trans-accumulative (lower portions of slopes), 3 and 4 – overlapping eluvial-trans-eluvial (watersheds and upper portions of slopes).

реки Шуи, впадающей через озеро Логозеро в Петрозаводскую губу Онежского озера, и несколькими малыми реками и небольшими ручьями в границах городского округа: Лососинка, Неглинка, Томица, Сельгская речка, Каменный, Студенец, Студёный, Большой.

В центральной части Петрозаводска развиты преимущественно подзолистые почвы песчано-лупесчаного состава. Правобережная часть реки Лососинки и левобережная часть реки Неглинка сложены торфяными и торфяно-глеевыми почвами на глинах и суглинках (Федорец, 2005). В связи с техногенным воздействием почвенный покров города в значительной мере изменен и нередко представляет собой техногенный грунт.

В границах Петрозаводского городского округа выделены следующие функциональные зоны (Крутских, 2008), рассматриваемые в соответствии с методическими рекомендациями (Учет и оценка..., 1996) как системы взаимодействия человеческого общества и природной среды: селищная, промышленная, транспортная, водохозяйственная, рекреационная (рис. 2).

Исследование состояния природных и природно-техногенных систем с учетом функционального деления территорий позволяет проводить дифференциацию этих систем (территорий) по степени экологических изменений. При этом оценка состояния компонентов окружающей среды включает анализ техногенного загрязнения почв, грунтов, донных отложений различными химическими элементами, а также анализ состояния рас-

тительности, подвергающейся вредному воздействию в местах произрастания.

Лабораторный анализ проб на химические элементы проведен в аналитической лаборатории Институт геологии КарНЦ РАН методами полуквантитативного спектрального анализа и ICP-MS.

Уровни химического загрязнения компонентов природной среды определялись относительно предельно или ориентировочно допустимых концентраций (ПДК, ОДК) и кларков, степень изменения растительности контролировалась тестом на определение количественного соотношения стерильной и фертильной пыли.

Пространственные закономерности загрязнения почв и грунтов

По данным опробования в пределах Петрозаводска выявлены несколько основных элементов-загрязнителей почв и грунтов, превышающих ПДК, ОДК и среднее содержание в почве, в том числе: Pb, Zn, Cu, V, Mn. В табл. 1 приведены основные статистические характеристики концентраций тяжелых металлов в почвах, исследованных в течение нескольких лет.

Основными техногенными источниками Pb в окружающей среде являются выхлопы автомобильных двигателей, сжигание топлива (уголь, мазут) и литейное производство. Pb не входит в список жизненно необходимых элементов, он токсичен и относится к первому классу опасности. В целом территорию города Петрозаводска

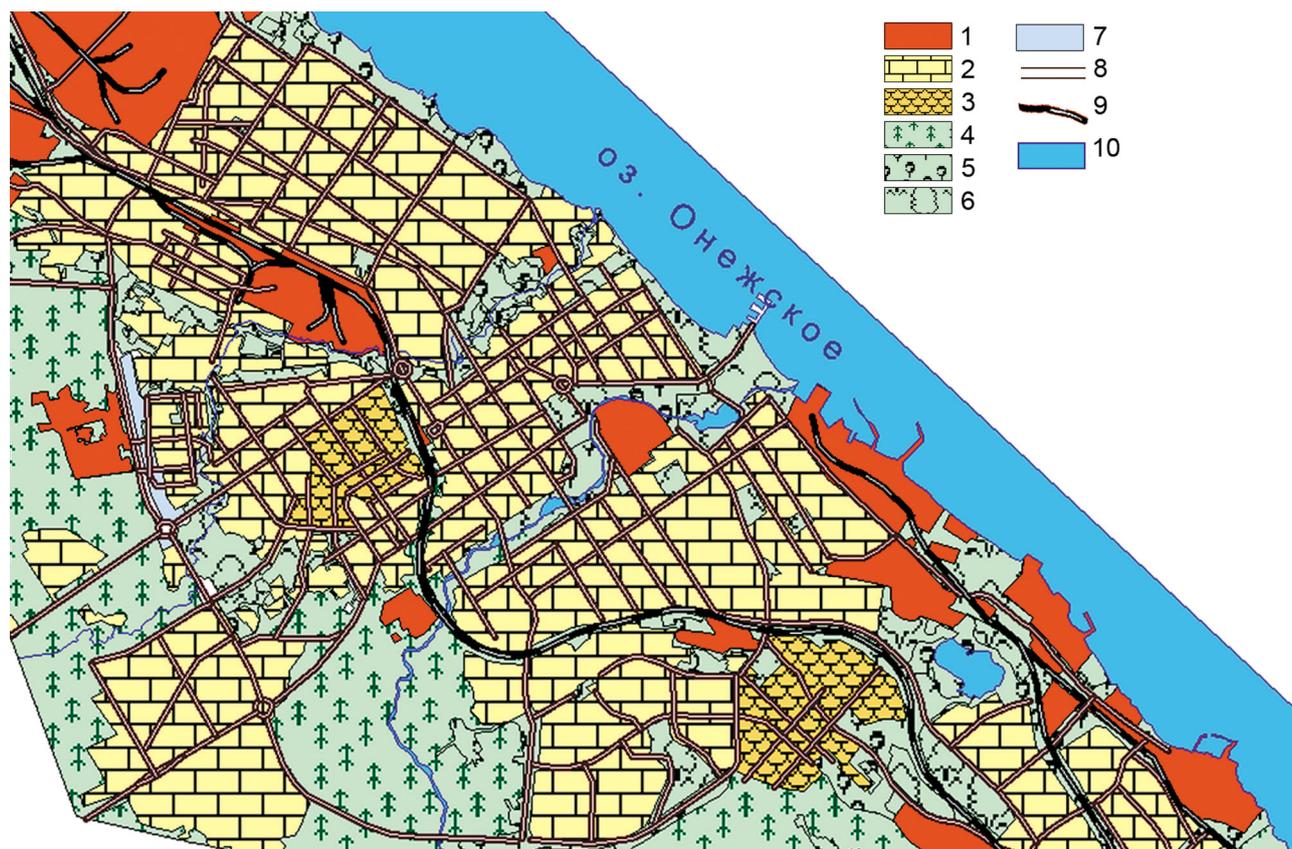


Рис. 2. Функциональная организация города Петрозаводска. Типы использования земель:

1 – промышленный тип; селитебный тип: 2 – высотная застройка, 3 – частный сектор; рекреационный тип: 4 – леса и лесопарки, 5 – кустарники, 6 – парки, скверы; транспортный тип: 7 – гаражные кооперативы, 8 – автодороги, 9 – железные дороги, 10 – водохозяйственный тип

Fig. 2. Functional pattern of Petrozavodsk. Types of land use:

1 – industrial type; residential type: 2 – high-rise development, 3 – private sector; recreational type: 4 – forests and forest-parks, 5 – bushes, 6 – parks and public gardens; transport type: 7 – garage co-operatives, 8 – highways, 9 – railways, 10 – water management type.

Таблица 1. Статистические характеристики данных геохимического опробования почв, г/т

Table 1. Statistical characteristics of geochemical soil sampling data, ppm

	Mn	Pb	Zn	Cu	V
Данные спектрального анализа за 2008 год					
X _{ср.}	420	26	102	35	94
X _{min}	220	6,8	<46	<15	68
X _{max}	1000	100	460	68	150
S (ε)	(1,40)	(1,69)	(1,72)	13,06	25,78
n	42	42	42	42	42
Данные спектрального анализа за 2009 год					
X _{ср.}	550	25	113	31	–
X _{min}	320	<10	<46	15	46
X _{max}	1000	150	220	46	100
S (ε)	(1,41)	(1,93)	(1,73)	8,12	–
n	30	30	30	30	30
Данные Н.Г. Федорца и М.В. Медведевой (2005)					
X _{ср.}	610	19	108	31	–
X _{min}	123	5,6	18	8	–
X _{max}	3530	106	1100	112	–
S (ε)	(1,93)	(1,84)	(2,29)	(1,74)	–
n	55	55	55	55	–
ПДК	1500	32	100*	55*	150
Среднее содержание в почве**	850	10	50	20	100

Примечания: * – валовое содержание – ориентировочное; ** – по Д.П. Малюге (Справочник..., 1990); в расчетах не учитывались 6 проб за 2008 год с аномальными значениями концентраций Cu_{max}=100 г/т, 1500≤Mn_{max}≤2200 г/т, Pb_{max} = 460 г/т и V_{max} = 220 г/т.

можно характеризовать как слабозагрязненную Pb. Около 80% точек отбора проб характеризуются допустимыми значениями его концентрации в почвах. По значениям $K_{\text{пдк}}$ выявлено несколько зон, отличающихся высоким уровнем загрязнения. Так в промышленной зоне на улице Новосулажгорская концентрации Pb превышает ПДК в 14 раз (статистически аномальное значение). Также высокие значения $K_{\text{пдк}}$ (>3) зафиксированы в районах железнодорожного вокзала, станкостроительного завода, по берегу Онежского озера в пределах улицы Ригачина. Высокие уровни загрязнения почвенного покрова Pb наблюдаются в центральной части города, что объясняется значительным количеством автомобильного транспорта в пределах данной территории. Наименьшие показатели $K_{\text{пдк}}$ по Pb отмечены в рекреационных зонах.

Zn может поступать в городскую среду в результате истирания автомобильных покрышек при движении транспорта. В пределах изучаемой территории значительная часть проб характеризуется высоким и очень высоким уровнем загрязнения Zn ($K_{\text{одк}} > 3$). Территориально они расположены в селитебной зоне в пределах улицы Мурманская, в центральной части города, а также на улице Правды и берега Онежского озера в районе улицы Чернышевского. Низкий уровень загрязнения характерен для проб, отобранных в зонах с низкой транспортной нагрузкой и рекреационных зонах. Одной из причин накопления Zn в поверхностных почвенных горизонтах является его способность сорбироваться минеральными и органическими компонентами с образованием устойчивых соединений.

Концентрации Cu в почвах Петрозаводска варьируют от <15 до 220 г/т. При этом более 40% проб превышают значения ОДК. К наиболее загрязненным относятся пробы, взятые у берега Онежского озера в районе улицы Чернышевского ($K_{\text{одк}}=6,7$), а также на пересечении улиц Ключевая и Корабелов ($K_{\text{одк}}=4,5$). Основными техногенными источниками Cu для почв Петрозаводска могут быть автотранспорт и стационарные объекты сжигания топлива.

Природное содержание Mn в растениях, животных и почвах высоко, в определенных количествах он относится к эссенциальным элементам. Вместе с тем по уровню токсичности Mn относится к третьему классу опасности. Содержание Mn в большинстве случаев не превышает кларковых значений для почв (табл. 1). Исключение представляют единичные пробы, в том числе относимые к статистически аномальным ($K_{\text{пдк}} \geq 1$).

Превышение ПДК V наблюдается лишь в одной пробе, расположенной в пределах промзоны на улице Новосулажгорская ($K_{\text{пдк}}=1,5$).

Полученные данные в целом соответствуют данным Н.Г. Федорца и М.В. Медведевой (2005) по концентрациям ряда элементов в минеральном горизонте почв Петрозаводска (табл. 1).

Закономерности загрязнения донных осадков

Важную информацию о загрязнении водных экосистем несут данные о концентрации потенциально опасных химических элементов в донных осадках, являющихся, в отличие от водной среды, относительно инертной системой и, соответственно, хорошим объектом для интегральной оценки аккумулированного загрязнения.

В промышленно-урбанизованных районах поверхностные слои донных осадков представляют собой так называемые техногенные илы (Янин, 2002). Они отличаются от природного руслового аллювия гранулометрическим составом, главной особенностью которого является высокое содержание в нем алевритовых и глинистых частиц. Это и определяет повышенную способность техногенных илов к накоплению загрязняющих веществ. Основными концентраторами тяжелых металлов являются глинистые частицы, а главным носителем – алевритовая фракция отложений (размер частиц от 0,1 до 0,01 мм).

В качестве объектов исследований послужили донные осадки городских рек Петрозаводска Неглинка и Лососинка (в русловой части реки в районе городского пляжа, в зоне аккумуляции техногенных илов), реки Шуя (в нижнем течении за пределами города), а также озера Четырехверстного и ручья Каменный.

Пробы отбирались по единой методике (Методические..., 1982) на расстоянии от берега не более 0,5 м. Для анализа выделялась фракция $<0,1$ мм. Анализ проводился в аналитической лаборатории УРАН Институт геологии Карельского научного центра РАН методом ICP-MS. Для расчетов использовались значения концентраций следующих экологически важных элементов: Mn, Cu, Zn, Cd, Pb, Sb, Ag, Mo, As.

Для корректного расчета статистических параметров проведена проверка гипотез о законах распределения концентраций химических элементов с выявлением статистически аномальных значений в выборках. В расчетах использовался пакет «Анализ данных» программы Microsoft Excel.

В табл. 2 приведены значения средних, стандартных отклонений, стандартных множителей концентраций тяжелых металлов и As в речных осадках. Для сравнения приведены также ПДК и ОДК для почв (нормативы для донных осадков в России не разработаны), а также кларки элементов в земной коре по А.П. Виноградову (Справочник..., 1990).

Анализ табл. 2 показывает, что донные осадки рек Неглинка и Лососинка, протекающих через территорию города, более загрязнены, чем донные осадки загородной реки Шуя. Особенно сильное отличие наблюдается по значениям средних концентраций всех представленных элементов для донных осадков реки Лососинки. При этом концентрации многих элементов выше установленных законодательством допустимых норм, в том числе Cu, Zn и As – по всем пробам. Зафиксированные

Таблица 2. Концентрации тяжелых металлов и As во фракции <0,1 мм донных осадков рек Неглинка, Лососинка и Шуя, г/т

Table 2. Heavy metal and As concentrations in <0.1 mm fraction of bottom sediments from the rivers Neglinka, Lososinka and Shuya, ppm.

	Mn	Cu	Zn	Cd	Pb	Sb	Ag	Mo	As
Река Неглинка									
x_{cp}	670	36	82	1,3	25	0,80	0,21	0,6	–
x_{min}	410	22	49	0,79	15	0,37	0,08	0,4	<0,85
x_{max}	1260	101	114	2,1	40	1,4	0,60	1,2	4,9
S (ϵ)	(1,41)	(1,53)	22,01	0,38	7,70	(1,50)	0,16	0,28	–
n	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Река Лососинка									
x_{cp}	4450	83	208	2,5	42	3,7	0,32	3,4	11,5
x_{min}	1370	69	144	2,1	22	2,1	0,16	1,9	6,3
x_{max}	15520	107	278	3,3	58	6,0	0,71	6,2	15,5
S (ϵ)	(1,89)	(1,13)	44,88	0,33	12,59	1,25	(1,46)	1,30	3,03
n	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Река Шуя									
x_{cp}	1710	19	82	1,6	21	0,35	–	0,56	4,1
x_{min}	400	11	33	1,2	11	0,15	<0,04	0,28	<3,6
x_{max}	30000	75	131	2,1	38	1,5	0,17	1,7	19,5
S (ϵ)	(3,11)	(1,63)	28,97	0,25	6,67	(1,68)	–	(1,68)	(2,03)
n	22	22	22	22	22	22	22	22	22
ПДК	1500	55*	100*		32	4,5			2
Кларк	1000	47	83	0,13	16	0,5	0,07	1,1	1,7

Примечания: x_{cp} – среднее значение: для нормального закона распределения – среднее арифметическое, для логнормального – среднее геометрическое; S – стандартное отклонение, ϵ – стандартный множитель; * – валовое содержание – ориентировочное.

выше значений ПДК концентрации Pb могут объясняться как техногенным загрязнением с урбанизированной территории, так и непосредственной близостью автомобильных дорог за пределами города (некоторые единичные пробы донных осадков реки Шуи). Обращают на себя внимание высокие (в 6–25 раз выше кларка) концентрации Cd в донных осадках всех исследованных водотоков.

Анализ данных микроэлементного состава проб донных осадков озера Четырехверстное проведен с использованием коэффициентов Кпдк и Кодк (отношение содержания химических элементов к ПДК/ОДК). Самыми распространенными загрязнителями являются As, Pb, Zn, Cu, Sb, Mn. Особенно высока концентрация As ($3 < K_{пдк} < 20$). Загрязнение Zn относится к высокому уровню (среднее значение $K_{одк} = 2,7$). Общий уровень загрязнения Pb так же высокий (среднее значение $K_{пдк} = 2$).

В большей части анализов уровень загрязнения донных осадков водоема Cu отмечен значениями $1 < K_{одк} < 3,5$, но в целом характеризуется как низкий (среднее значение $K_{одк} = 1,6$). Концентрация Sb имеет незначительное превышение ПДК только в одной пробе, что говорит о минимальном загрязнении исследованных осадков этим элементом.

Содержание Mn характеризуется низким уровнем загрязнения (среднее значение $K_{пдк} = 1,6$), однако в двух пробах отобранных в ручье Каменный, вытекающем из озера Четырехверстное, $K_{пдк}$ равен 18,8 и 15,1, что соответствует «очень высокому» уровню загрязнения.

Состояние растительного покрова

В ходе биоиндикационных исследований непосредственно в местах отбора проб почвы на детских игровых площадках в начале цветения собраны мужские соцветия березы пушистой (*Betula pubescens Ehrh.*), а вдоль пешеходных дорожек – пыльники шиповника морщинистого (*Rosa rugosa Thunb.*). Концентрации химических элементов определялись методом ICP-MS. Для определения стерильной/фертильной пыльцы использовался тест, основанный на дифференциальной окраске фертильных и стерильных пыльцевых зерен. Внутреннее содержимое фертильных пыльцевых зерен после обработки красящим препаратом (ацетокармином, йодом) полностью и равномерно окрашивается в яркий цвет. Стерильные зерна остаются прозрачными или их внутреннее содержимое окрашивается неравномерно. Изучено 2000–2500 пыльцевых зерен каждой пробы. Количественные показатели исследуемых объектов определены как частота встречаемости стерильных или фертильных пыльцевых зерен, выражаемая в процентах от общего количества исследуемой пыльцы. Фактор прямого воздействия атмосферного загрязнения на растительность не учитывался.

Результаты проведенного исследования позволили оценить уровень фертильности пыльцы *Betula pubescens Ehrh.* и *Rosa rugosa Thunb.* и сравнить полученные данные с уровнем загрязнения почв тяжелыми металлами.

Корреляционная связь между показателем стерильности пыльцы *Betula pubescens Ehrh.* и содержанием Pb в верхнем почвенном горизонте

(13-61 г/т) не является статистически значимой ($r=0,51$, $r_{\text{крит.}}=0,71$ при $f=6$ и $P=0,95\%$), что может свидетельствовать о недостижении предельных в отношении фитотоксичности концентраций. Такие концентрации определяются разными авторами на уровне 100-500 г/т сухой массы почвы (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989). Значения коэффициентов корреляции выше уровня значимости отмечены между показателем стерильности и содержанием в почвах Cu (0,78), Be (0,76), Sr (0,76). Однако в почвах наблюдаются довольно «спокойные» концентрации этих элементов (не выше 39, 1,3 и 260 г/т, соответственно).

Для *Rosa rugosa Thunb.* отмечена значимая положительная связь ($r_{\text{крит.}}=0,40$ при $f=22$ и $P=0,95\%$) со значениями концентраций еще большего числа элементов: Cu (0,61), Co (0,56), Yb (0,54), V (0,53), Y (0,50), Sc (0,50) и другие. В этом ряду, также как и в случае *Betula pubescens Ehrh.* обращает на себя внимание Cu. Ее максимальная концентрация в данном случае достигает 78 г/т. Этот элемент рассматривается как сильно токсичный для растений. Предельные в отношении фитотоксичности концентрации Cu в почве устанавливаются по разным авторам на уровне 60-125 г/т сухой массы (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989). Для V, концентрации которого в обследованных почвах достигают 150 г/т, предельными в отношении фитотоксичности являются значения 50-100 г/т. Для Co эти значения устанавливаются на уровне 25-50 г/т, в то время как максимальная концентрация Co в почвах Петрозаводска равна 19 г/т.

Из сказанного выше можно сделать вывод, что уровень загрязнения приповерхностных слоев почв города рядом токсичных элементов может отражаться на состоянии компонентов изме-

ненных экосистем. Полученные корреляционные зависимости между содержанием химических элементов в почвах и состоянием растительного покрова в определенной мере подтверждают такую возможность.

Литература

Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 439 с.

Крутских Н.В. Функциональное зонирование территории г. Петрозаводска // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 11. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. С. 272-274.

Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения территорий городов химическими элементами. М.: ИМГРЭ, 1982.

Рыбаков Д.С. Геологическая классификация факторов экологического риска в регионе Карелия // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 9. Петрозаводск: Институт геологии КарНЦ РАН, 2006. С. 167-170.

Рыбаков Д.С. Критерии оценки экологических рисков на примере Республики Карелия / Отчет о НИР. Петрозаводск: Институт геологии КарНЦ РАН, 2005. 73 с.

Справочник по геохимии / Г.В. Войткевич, А.В. Кокин, А.Е. Мирошников В.Г. Прохоров. М.: Недра, 1990. 480 с.

Учет и оценка природных ресурсов и экологического состояния территорий различного функционального использования. Методические рекомендации. М., 1996. 98 с.

Федорец Н.Г., Медведева М.В. Эколого-микробиологическая оценка состояния почв города Петрозаводска. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. с. 96.

Янин Е.П. Техногенные речные илы в зоне влияния промышленного города (формирование, состав, геохимические особенности). М.: ИМГРЭ, 2002. 100 с.