

УДК 504.75+631.4

DOI: 10.17072/1994-9952-2018-1-70-80.

О. З. Еремченко<sup>a</sup>, В. С. Артамонова<sup>b</sup>, С. Б. Бортникова<sup>c</sup>, Н. Е. Бельшева<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

<sup>b</sup> Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>c</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия

## ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА В СВЯЗИ С НАКОПЛЕНИЕМ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВАХ ГОРОДСКИХ ЛЕСОВ

Проведена оценка экологического риска, связанная с продолжающимся накоплением Cd и Pb в песчаных почвах ООПТ г. Перми. Почвообразующие пески древнеаллювиального происхождения и сформированные на них почвы характеризовались пониженным содержанием V, Mn, Ni, Zn, Zr, Mo, Cd, Sn, Pb относительно мировых кларков. Серогумусовые горизонты песчаных почв обогащены тяжёлыми металлами по сравнению с почвообразующей породой, в том числе, Cd и особенно Pb. Фитотестирование показало, что при относительно небольшом загрязнении (из расчета 0.01 ОДК Cd и Pb) почвы переходили в неудовлетворительное экологическое состояние, приобретая умеренную токсичность. При внесении этих металлов из расчета 0.25 ОДК Cd и 0.1 ОДК Pb почвы становились экологически опасными и сильно токсичными. В целом песчаные почвы ООПТ г. Перми характеризовались низкой устойчивостью к загрязнению тяжёлыми металлами; критические последствия для биocenозов городских лесов из-за токсичности почв, вероятно, следует ожидать при накоплении Cd до 0.4 мг/кг, Pb – до 21 мг/кг.

**Ключевые слова:** экологический риск; тяжёлые металлы; устойчивость почв; фитотестирование.

O. Z. Eremchenko<sup>a</sup>, V. S. Artamonova<sup>b</sup>, S. B. Bortnikova<sup>c</sup>, N. E. Belysheva<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Perm State University, Perm, Russian Federation

<sup>b</sup> Institute of Soil Science and Agrochemistry, SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>c</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

## THE ESTIMATION OF ECOLOGICAL RISK IN CONNECTION WITH THE HEAVY METALS ACCUMULATION IN SOIL OF URBAN FORESTS

The ecological risk associated with the continued accumulation of Cd and Pb in sandy soils of the Perm Protected Areas was investigated. Soil-forming sands of ancient alluvial origin and the soils formed on them were characterized by a lower content of V, Mn, Ni, Zn, Zr, Mo, Cd, Sn, and Pb relative to the world clarks. The gray humus horizons of sandy soils are enriched with heavy metals in comparison with the soil-forming rock, including Cd and especially Pb. Phytotesting showed that with relatively little contamination (at a rate of 0.01 of Approximate Permissible Concentration (APC) of Cd and Pb), the soils turned into unsatisfactory ecological conditions and acquired moderate toxicity. When these metals were applied at the rate of 0.25 APC of Cd and 0.1 APC of Pb, soils became environmentally hazardous and highly toxic. In general, the sandy soils of the Perm Protected Areas were characterized by low resistance to heavy metal contamination; the critical consequences for biocenoses of urban forests due to soil toxicity are likely to be expected with the accumulation of Cd to 0.42 mg/kg, and Pb to 21.4 mg/kg.

**Key words:** ecological risk, heavy metals, soil stability, phytotesting.

### Введение

Одной из важнейших задач, стоящих перед прикладным почвоведением, является прогноз состояния почвенного покрова техногенных территорий. При этом особенно важна корректная оценка последствий вероятного загрязнения почв токсиче-

скими веществами, в том числе тяжёлыми металлами (ТМ), в концентрациях, вредных для живых организмов. Угроза отрицательных изменений в окружающей природной среде или их отдалённых неблагоприятных последствий называется экологическим риском. Основной методический приём, используемый в работах по оценке экориска, – сопоставление реальной и критической нагрузки за-

грязняющих веществ [Овчинникова, 2003; Макаров, Макаров, 2016]. ТМ, прежде всего те, чьи концентрации попадают в категорию опасных, вызывают пристальный интерес почвоведов, экологов, биологов. В списке, составленном Агентством по токсическим веществам и регистрации болезней (The Agency for Toxic Substances and Disease Registry – ASTDR) совместно с Агентством по защите окружающей среды (Environmental protection Agency – EPA), 1-, 2-, 3- и 7-е места среди самых опасных токсикантов занимают As, Pb, Hg, Cd соответственно [Квеситадзе и др., 2005].

В почву большинство из них попадают с выхлопными газами транспортных средств, с отходами сточных вод, пестицидами, удобрениями, аэрогенными осадками предприятий. В Пермском крае, как в промышленно развитом регионе, имеющем также высокую транспортную нагрузку, в почвах накапливаются Pb, Cd, Zn, Cu, Cr и другие ТМ [Ворончихина, Запоров, 1998; Еремченко, Москвина, 2005; Васильев, Чащин, 2011; О состоянии ..., 2014].

Поглощение и распределение ТМ по формам соединений – основа устойчивости почв к внешнему химическому воздействию [Мотузова, 1999], основа барьерной функции почв в экосистеме [Минкина, Мотузова, Назаренко, 2009; Minkina et al., 2010]. Аккумуляция ТМ зависит от состава почвенного раствора, гранулометрического состава почв и входящих в него фракций ила и физической глины [Антоненко и др., 2012; Манджиева и др., 2012]. Установлено [Минкина и др., 2012], что прочность фиксации Cd в почвах техногенных ландшафтов обуславливается преимущественным вкладом гидроксидов железа и органического вещества. Важную роль играют гумусированность почв, произрастающие растения, метаболическая активность почвенных микроорганизмов [Ильин, Сысо, 2001]. При этом почвы способны сохранять (до известного предела техногенного воздействия) нормальное функционирование, что реализуется за счет взаимодействия буферных систем, поддерживающих определённую концентрацию ионов водорода, то есть определённую кислотность среды. Буферность почв по отношению к ТМ зависит от кислотно-основных, ионообменных, окислительно-восстановительных свойств, от качества и количества органических веществ, прочности поглощающего комплекса и других показателей. Буферная ёмкость почв – количество загрязнителя, которое почва может поглотить без заметных отрицательных последствий для неё. Способность почвы противостоять химическому воздействию, рассматриваемая как устойчивость, – важнейшее её свойство, определяющее уникальные экологические функции [Мотузова, 2000, 2012; Устойчивость почв ..., 2018].

Доказано, что для каждого типа (подтипа) почв существует свой предел устойчивости. В почвах, обладающих буферной способностью, концентра-

ция ТМ в растворе изменяется медленно. При поступлении высоких (избыточных) количеств ТМ большая часть их прочно фиксируется, опасность загрязнения растений, произрастающих на таких почвах, снижается [Глазовская, 1997; Горбовская, 2006; Мотузова, 2012]. При одинаково высоком общем содержании загрязняющих веществ в почвах состояние растений ухудшается в том случае, когда эти соединения им доступны. Если доступность ограничена, растения могут не проявлять признаков угнетения.

В качестве критериев определения величины критической нагрузки (экологической нормы воздействия) используют момент перехода загрязнителя из почвы в растения, при котором его концентрация не превышает ПДК для пищевых продуктов [Овчинникова, 2003]. Однако следует отметить, что превышение ПДК химических элементов является лишь косвенным показателем. Почва может быть сильнозагрязнённой, но нетоксичной или слаботоксичной и, наоборот, слабозагрязнённой, но сильно токсичной. Кроме того, негативное действие одних компонентов может быть нейтрализовано или усилено присутствием других. Поэтому в последние годы зарекомендовал себя показатель интегральной токсичности, который определяют биотестированием – по реакции живых организмов. Определение степени опасности их среды обитания данным способом оперативно и доступно.

Чувствительность растений к экзогенному химическому воздействию проявляется в ростовых и морфологических характеристиках [Бакина и др., 2004; Маячкина, Чугунова, 2009; Лисовицкая, Терехова, 2010; Терехова, 2011; Бардина и др., 2014; Николаева, Терехова, 2017]. В качестве критерия экологической нормы воздействия техногенных загрязнений Е.Л. Воробейчик, О.Ф. Садыков, М.Г. Фарафонов [1994] предложили использовать зависимость между дозой загрязнения и биотическим откликом.

Фитотестирование лежит в основе метода оценки токсичности почв, устойчивости их к загрязнению [Колесников и др., 2010; Тимофеев, Терехова, Кожевин, 2010]. Однако оценка почвенной устойчивости к воздействию ТМ в настоящее время до конца не разработана [Глазовская, 1997; Горбовская, 2006; Мотузова, 2012]. Предполагается, что почва, сохранившая на фоне загрязнения свои экологические функции по обеспечению роста и развития растений, будет более устойчивой, чем загрязнённая почва, на которой растения заметно снизили биометрические показатели.

Знания об уровне устойчивости почв необходимы для нормирования антропогенной нагрузки, не понижающей их способности к выполнению экологических функций.

Целью наших исследований было определение устойчивости песчаных почв ООПТ г. Перми и последствий продолжающегося их загрязнения свинцом и кадмием. Ранее был разработан способ

оценки токсичности и биологической активности почв и почвогрунтов [Еремченко, Митракова, 2017], который мы использовали в настоящем исследовании.

### Объекты и методы исследований

В границах г. Перми находятся охраняемые ландшафты, представляющие собой лесные участки, в большей степени, коренных сосновых боров. К ним относятся расположенный на I и II надпойменных террасах левобережья р. Камы ООПТ «Черняевский лес», а на нижних камских террасах правого берега – ООПТ «Закамский бор», «Верхнекурьянский», а также «Сосновый бор» [Бузмаков и др., 2012]. Городские леса вследствие развитой контактирующей поверхности интенсивно задерживают аэрозольные формы ТМ. Сосновые боры Прикамья произрастают на слабо дифференцированных почвах песчаного гранулометрического состава – псаммозёмах и серогумусовых почвах [Еремченко, Митракова, Липин, 2017], сформировавшихся на древнеаллювиальных отложениях.

Оценка экологического риска последствий тяжёлометалльного загрязнения для биоценозов городских ООПТ крайне важны, поскольку лёгкие почвы характеризуются наименьшей буферностью к загрязнению ТМ.

В этой связи, объектом нашего внимания были серогумусовые почвы. Свойства серогумусовых почв ООПТ «Черняевский лес» изучали в 5 разрезах по генетическим горизонтам, в пробах определяли:

- содержание органического углерода – по методу Тюрина;
- $pH_{вод}$  и  $pH_{сол}$  – потенциометрическим методом;
- сумму оснований в кислых почвах – по Каппену – Гильковицу;
- гидролитическую кислотность – титриметрическим методом по Каппену;

- ёмкость катионного обмена рассчитали по сумме оснований и гидролитической кислотности;
- общее содержание тяжёлых металлов – методом РФА-СИ для твёрдых проб;
- подвижность Cu, Pb, Cd, Zn (в профиле почв и в загрязнённых почвенных пробах после выращивания кресс-салата) – ионоселективным методом на иономере «Экотест».

Для изучения устойчивости почв к Pb и Cd был заложен лабораторный опыт по выращиванию кресс-салата на почве, предварительно загрязнённой металлами. Использованы смешанные пробы серогумусовых горизонтов (0–10 см) из 5 почвенных разрезов. Дозы загрязнения были предварительно рассчитаны относительно их ориентировочно-допустимых концентраций (ОДК). В песчаных и супесчаных почвах ОДК составляют: для Cd – 0.5 мг/кг, для Pb – 32.0 мг/кг [Ориентировочно-допустимые ..., 2017]. Исходя из этого, в почвенные пробы были внесены:  $Pb(CH_3COO)_2$  и  $Cd(CH_3COO)_2$  из расчета Pb и Cd 0.01; 0.02; 0.1; 0.25; 0.5; 0.75; 1.0 ОДК.

Оценка токсичности и биологической активности почв проводилась согласно патенту по реакции кресс-салата [Еремченко, Митракова, 2017]. При этом следует отметить, что почвы, загрязнённые Pb из расчета 0.1 ОДК и выше, стали токсичными настолько, что всходы кресс-салата, как биотеста, не появились. В качестве тест-контроля использовались растения, выращенные на вермикулите. Замеры высоты и массы наземной части 7-дневных проростков кресс-салата проводились в 25-кратной повторности.

Серогумусовые песчаные почвы характеризовались сильноокислой реакцией среды и невысоким содержанием гумуса. В серогумусовом горизонте при низкой ёмкости поглощения (10–13 мг-экв/100 г) доля обменного Ca и Mg составляла всего 0–12% (табл. 1).

Таблица 1

Свойства серогумусовых песчаных почв (среднее ± ошибка)

Горизонт	Глубина взятия, см	Повторность	Гумус, %	$pH_{вод}$	$pH_{сол}$	Сумма оснований, мг-экв/100 г	Гидролитическая кислотность, мг-экв/100 г
AУ	0–10	5	4.88±0.63	5.07±0.24	3.95±0.15	2.00±1.36	7.99±1.36
AУС	12–22	5	1.61±0.40	5.26±0.20	4.13±0.08	0	4.00±0.74
С	100–110	5	-	5.98±0.27	4.40±0.05	0	1.11±0.25

### Результаты и их обсуждение

Поскольку первоисточником химических элементов для почв служат материнские породы, мы сравнили содержание ТМ в почвообразующих породах (древнеаллювиальные пески с глубины 100–130 см) с их кларками в гранитном слое планеты (рис. 1). Оказалось, что по большинству элементов (V, Mn, Ni, Zn, Zr, Mo, Cd, Sn, Pb) пески отлича-

лись пониженным уровнем их содержания. Одновременно обнаружено превышение кларков по Sr и Cu, что типично для приуральского рудного региона. Количество стронция находилось на уровне кларка в гранитах.

Следует сказать, что почвообразование и современное техногенное загрязнение могут существенно изменять химический состав почв, поэтому количество ТМ в верхних горизонтах почв ООПТ мы сравнили как с мировыми, так и региональными

ми кларками почв (рис. 2). По всем элементам, кроме Cu, исследуемые нами почвы характеризовались заметно пониженными показателями относительно кларков почв мира по Е.В. Склярору и др., [Интерпретация геохимических..., 2001], что, очевидно, обусловлено химизмом почвообразующих песков. По сравнению с региональными кларками [Копылов, 2013], почвы бедны микроэлементами, за исключением биогенного Мо.

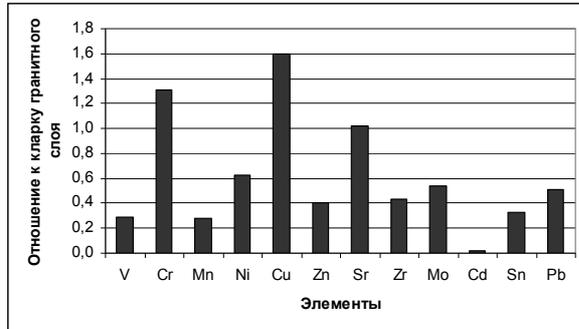


Рис. 1. Отношение между содержанием элемента в почвообразующей породе (с глубины около 1 м) к кларку в гранитном слое по А.А. Беусу, Л.И. Грабовской, Н.В. Тихоновой [1976]

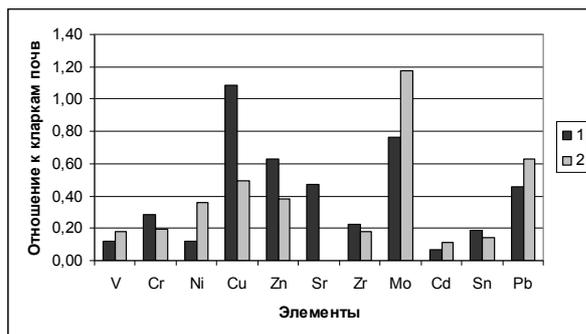


Рис. 2. Содержание ТМ в верхних горизонтах почв относительно:

1 – кларков почв мира по Е.В. Склярору и др. [Интерпретация ..., 2001], 2 – относительно региональных кларков почв по И.С. Копылову [2013]

Коэффициенты радиальной дифференциации отразили миграцию, концентрацию и рассеивание химических элементов в почвенном профиле (рис. 3). Так, органогенному слою исследуемых почв присущи в несколько раз повышенное количество Mn, Ni, Zn, Mo, Cd, Sn и особенно Pb по отношению к почвообразующей породе, а также некоторая аккумуляция Sr и Cu. В гумусовых горизонтах выявлено накопление Mn, Zn, Mo, Cd, Sn, Pb. Аккумуляцию Zn, Sn, Pb и Cu в почвах и почвогрунтах г. Перми связывают с техногенным загрязнением [Еремченко, Шестаков, Москвина, 2016]. Однако нужно отметить, что органо-гумусовые горизонты может обогащать биогенными элементами на бедных микроэлементами почвах растительность, хотя вычленив долю участия биогенного фактора в обогащении песков такими элементами,

как Mn, Zn, Mo, представляется маловероятным.

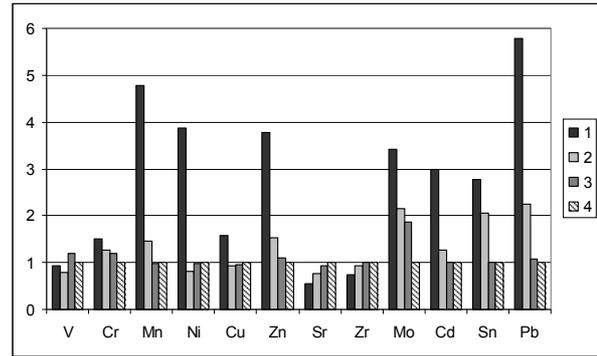


Рис. 3. Коэффициенты радиальной дифференциации ТМ в профиле песчаных почв ООПТ «Черняевский лес»:

1 – органогенный слой, 2 – гумусовые горизонты, 3 – переходные минеральные горизонты, 4 – почвообразующая порода

Таким образом, при общем пониженном почвенно-геохимическом фоне на территории охраняемого ландшафта в органогенных и гумусовых горизонтах почв прослеживается некоторая аккумуляция ТМ, прежде всего техногенного происхождения. В то же время, уровень содержания ТМ в почвенных горизонтах не достигал ОДК (или при его отсутствии – ПДК) (рис. 4). Количество Mn и Cd в почвах оказалось в 5 раз меньше ПДК.

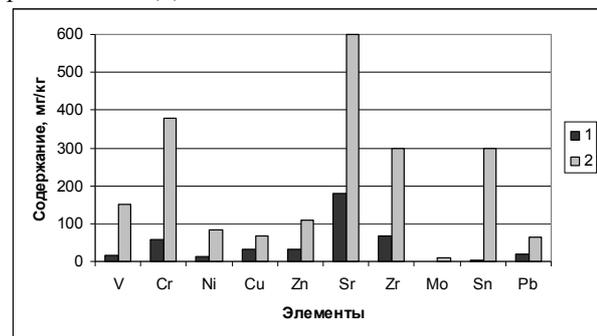


Рис. 4. Содержание ТМ в гумусовых горизонтах по сравнению с ОДК (или при его отсутствии – ПДК):

1 – содержание в почве, 2 – ОДК или ПДК

Известно, что биодоступность ТМ зависит от типа почвы, уменьшается при повышении pH, наличии других металлов и хелаторов [Серегин, Иванов, 2001; Духовский и др., 2003; Багдасарян, 2005; Колесников, Спивакова, Казеев, 2011; Колесников и др., 2013]. В природных почвах Пермского края подвижность ТМ возрастала пропорционально усилению почвенной кислотности [Митракова, 2012]. В урбостратозёмах г. Перми подвижность ТМ была низкой из-за щелочной среды и  $-\lg[\text{Pb}]$  колебался в пределах 8,8-8,0,  $-\lg[\text{Cu}]$  – в пределах 9,5-6,7 [Митракова, Агафонова, 2017]. Но подвижность Cd была выше:  $-\lg[\text{Cd}] = 7,1-6,2$ . В исследуемых нами почвах городского

леса подвижность этих элементов была выше на порядок и более (рис. 5). Миграция ТМ в верхних горизонтах почв была наибольшей, с глубиной она уменьшалась, что вызвано понижением почвенной кислотности. Наиболее подвижным был Pb.

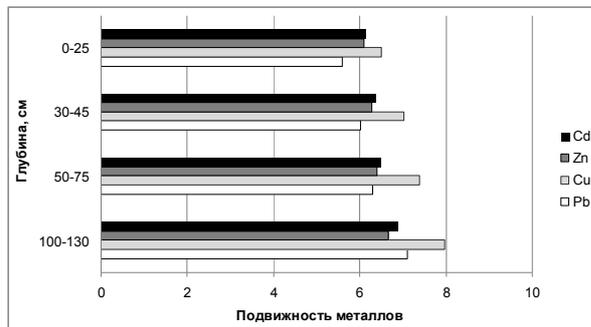


Рис. 5. Подвижность ТМ в профиле серогумусовых почв (среднее по 5 разрезам),  $-\lg [ТМ]$

Корреляционный анализ подтвердил зависимость подвижности ТМ от почвенной кислотности (табл. 2).

Н.В. Митраковой [2012] установлено, что токсическое воздействие загрязнения на тест-культуру проявилось при уровне подвижности Pb и Cd менее 6 ( $-\lg [ТМ]$ ), поэтому можно допустить, что в песчаных почвах, где подвижность Pb относительно высокая, металл может оказать негативное воздействие на состояние растений в верхних горизонтах.

Наше определение показало, что после выращивания растений на загрязнённых почвах миграция Cd заметно увеличилась при дозе 0.75 ОДК (0.37 мг/кг) и при внесении 1 ОДК (0.5 мг/кг) (рис. 6). Интересно, что Pb в серогумусовой почве оказался на порядок подвижнее, а по мере увеличения дозы загрязнителя его подвижность существенно возрастала. Следовательно, буферность почвы в отношении этого металла очень мала, так как каждое добавление в неё Pb по 0.32 мг/кг (0.01 ОДК) усиливало его подвижность.

Таблица 2

**Коэффициенты корреляции между подвижностью ТМ и свойствами почв ООПТ «Черняевский лес»**

Элемент	$pH_{вод}$	$pH_{сол}$	Гидролитическая кислотность	Гумус
Pb	<b>0,85</b>	<b>0,73</b>	<b>0,62</b>	-0,18
Cu	<b>0,76</b>	<b>0,64</b>	<b>0,51</b>	-0,11
Zn	<b>0,81</b>	<b>0,77</b>	<b>0,64</b>	-0,23
Cd	<b>0,86</b>	<b>0,79</b>	<b>0,67</b>	-0,35

Примечание. Полу жирным шрифтом выделены достоверные коэффициенты корреляции при уровне значимости нулевой гипотезы  $p < 0.05$ .

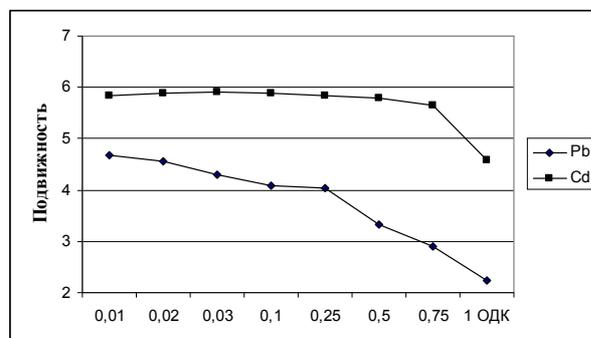


Рис. 6. Изменение подвижности Cd и Pb при внесении в почву загрязнителей,  $-\lg [ТМ]$

На надземную часть проростков кресс-салата загрязнение действовало угнетающе, достоверно ингибируя их развитие. Так, на почвах, загрязнённых Cd из расчета 0.01 и 0.02 ОДК, отмечено почти одинаковое состояние растений. На фоне Cd 0.1 ОДК растения были почти в два раза ниже, чем на фоне 0.01 ОДК; одновременно снизилась масса надземной части растений (рис. 7). Фитотоксичность почв, загрязнённых Pb, проявилась при дозах 0.01–0.02 ОДК, а добавление свинца в дозе 3 мг/кг (0.1 ОДК) сделало почву настолько токсичной, что семена тест-культуры не проросли.

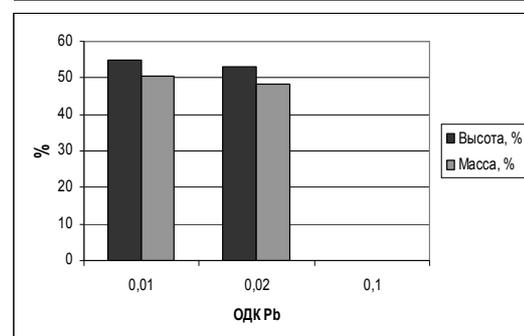
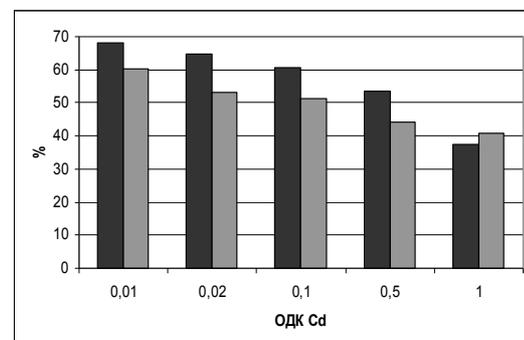


Рис. 7. Высота и масса кресс-салата при загрязнении почвы Cd и Pb (относительно тест-контроля, %)

Согласно патенту [Еремченко, Митракова, 2017], при снижении показателей развития кресс-салата на 10–30% можно говорить, что состояние почвы или почво-грунта следует считать удовлетворительным; при снижении на 30–50% – неудовлетворительным; а при уровне снижения показателей на более чем 50% – считать экологически опасным. В нашем случае, снижение высоты и массы растений при загрязнении на уровне 0.01–0.25 ОДК Cd и 0.01–0.02 ОДК Pb свидетельствует о неудовлетворительном экологическом состоянии почв (понижение в пределах 34–50%). В вариантах загрязнения выше 0.25 ОДК Cd показатели развития кресс-салата уменьшались более чем на 50%, что позволяет утверждать об экологически опасном состоянии почвы. Уровень загрязнения почв Pb в 0.1 ОДК также переводит почву в экологически опасное состояние, так как семена в ней не прорастают.

Информацию о токсичности почв ранее было рекомендовано уточнить на основе редокс-активности растительных экстрактов тест-культуры [Еремченко, Митракова, 2017]. При повышении редокс-активности растительного экстракта на 10–30% следует считать почву или почвогрунт умеренно токсичным; при повышении на 30–50% – сильно токсичным; а при уровне повышения показателя на более чем 50% – считать экологически опасными. В настоящей работе достоверное превышение относительно тест-контроля свидетельствует о токсичности почвенного объекта, вызывающей активизацию антиоксидантной системы растений.

При загрязнении почвы дозами Cd от 0.02 до 0.5 ОДК, редокс-активность достоверно (согласно критерию Стьюдента при уровне значимости нулевой гипотезы  $p = 0.0476–0.0007$ ; критерию Фишера при  $p=0.0001–1.24*10^6$ ) возрастала на 6.5–14.3%. Максимального значения (выше на 33%) редокс-активность достигла при дозе Cd 1 ОДК, что говорит о сильной токсичности почвы (рис. 8).

Загрязнение почвы дозой Pb 0.01–0.03 ОДК редокс-активность достоверно повышалась на 12–30% относительно фона; это свидетельствует об умеренной токсичности почвы при данных уровнях загрязнения.

Обобщая материалы по воздействию разных доз Cd и Pb, обращаем внимание на то, что уже на фоне минимального загрязнения (из расчета 0.01 ОДК) по состоянию кресс-салата можно говорить о неудовлетворительном экологическом состоянии почвы и её умеренной токсичности. При этом добавочное внесение Cd и Pb составило всего 2.3–2.5% от современного общего содержания этих элементов в гумусовых горизонтах почв ООПТ.

При загрязнении Pb из расчета 0.1 ОДК и Cd 0.25 ОДК фитотестированием установили экологи-

чески опасное состояние и сильную токсичность почвы. Чтобы перевести её в этот статус, было добавлено Cd 0.12 мг/кг (60% от общего содержания) и Pb 3.2 мг/кг (23% от общего содержания). Сложив данные по уровню загрязнения Cd и Pb с общим содержанием этих элементов в почве, мы получили, что критические последствия для биоценозов городских лесов из-за токсичности серогумусовых почв, вероятно, следует ожидать при накоплении кадмия – до 0.42 мг/кг, свинца – до 21.4 мг/кг. Данная токсичность песчаных почв установилась при 84% от принятой ОДК Cd и 66% ОДК Pb.

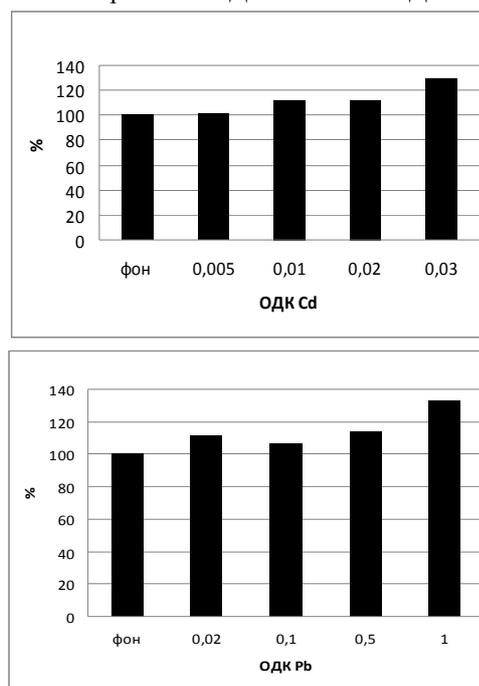


Рис. 8. Изменение редокс-активности кресс-салата при загрязнении почвы Cd и Pb, % относительно фона

## Выводы

1. По сравнению с мировыми кларками в границах почвообразующие пески древнеаллювиального происхождения и песчаные почвы ООПТ характеризовались пониженным содержанием V, Mn, Ni, Zn, Zr, Mo, Cd, Sn, Pb; одновременно в песках повышено количество Cr и Cu, в почвах – Cu.

2. Серогумусовые горизонты почв относительно почвообразующей породы обогащены Cr, Cu, Mn, Ni, Zn, Mo, Cd, Sn и особенно Pb, что в значительной степени обусловлено техногенным загрязнением; одновременно уровень содержания тяжёлых металлов не достигал ОДК.

3. В серогумусовых горизонтах почв установлена повышенная подвижность Pb. Внесение растворимых солей из расчета 0.75 ОДК Cd (или 0.37 мг/кг) и 0.01 ОДК Pb (или 0.32 мг/кг) способство-

вало заметному усилению подвижности этих металлов.

4. Фитотестирование показало, что при относительно небольшом загрязнении Cd и Pb (из расчета 0.01 ОДК) серогумусовые песчаные почвы переходили в неудовлетворительное экологическое состояние, приобретали умеренную токсичность. При внесении тяжёлых металлов из расчёта 0.25 ОДК Cd и 0.1 ОДК Pb почвы становились экологически опасными и сильно токсичными.

5. Песчаные почвы ООПТ г. Перми обладают низкой устойчивостью к тяжёлым металлам; критические последствия для биоценозов городских лесов из-за токсичности почв, вероятно, следует ожидать при накоплении кадмия до 0.4 мг/кг, свинца – до 21 мг/кг.

### Библиографический список

- Антоненко Е.М. и др. Влияние состава почвенного раствора на адсорбцию меди, цинка и свинца твердыми фазами почв // Почвы России: современное состояние, перспективы изучения и использования: материалы докл. VI съезда о-ва почвоведов им. В.В. Докучаева. Петрозаводск, 2012. Кн. 2. С. 230–232.
- Багдасарян А.С. Биотестирование почв техногенных зон городских территорий с использованием растительных организмов: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Ставрополь, 2005. 24 с.
- Бакина Л.Г. и др. К методике фитотестирования техногенно загрязненных почв и грунтов // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: материалы междунар. конф. Апатиты, 2004. Ч. 1. С. 167–169.
- Бардина Т.В. и др. Биологическая оценка токсичности городских почв в почвенно-экологическом мониторинге // Экология урбанизированных территорий. 2014. № 2. С. 87–91.
- Беус А.А., Грабовская Л.И., Тихонова Н.В. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1976. 248 с.
- Бузмаков С.А. и др. Особо охраняемые природные территории г. Перми. Пермь, 2011. 204 с.
- Васильев А.А., Чащин А.Н. Тяжелые металлы в почвах города Чусового: оценка и диагностика загрязнения. Пермь, 2011. 197 с.
- Ворончихина Е.А., Запоров А.Ю. Экологические аспекты загрязнения среды тяжелыми металлами // Вопросы физической географии и геоэкологии Урала: межвуз. сб. науч. тр. Пермь, 1998. С. 139–147.
- Воробейчик Е.Л., Садыков О.Ф., Фарафонов М.Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем. Екатеринбург: Наука, 1994. 280 с.
- Глазовская М.А. Методологические основы оценки эколого-геохимической устойчивости почв к техногенным воздействиям: метод. пособие. М.: Изд-во МГУ, 1997. 102 с.
- Горбовская А.Д. Оценка устойчивости буферных систем почв к факторам воздействия: учеб. пособие. СПб., 2006. 444 с.
- Духовский П.В. и др. Реакция растений на комплексное воздействие природных и антропогенных стрессоров // Физиология растений. 2003. Т. 50, № 2. С. 165–173.
- Еремченко О.З., Митракова Н.В. Способ оценки биологической активности и токсичности почв и техногенных почвогрунтов: пат. Рос. Федерации № 2620555. 2017.
- Еремченко О.З., Митракова Н.В., Липин И.Н. Морфогенетические свойства песчаных почв камских террас // Теоретические и прикладные аспекты лесного почвоведения. Петрозаводск, 2017. С. 56–58.
- Еремченко О.З., Москвина Н.В. Свойства почв и техногенных поверхностных образований в районах многоэтажной застройки г. Пермь // Почвоведение. 2005. № 7. С. 782–789.
- Еремченко О.З., Шестаков И.Е., Москвина Н.В. Почвы и техногенные поверхностные образования урбанизированных территорий Пермского Прикамья. Пермь, 2016. 252 с.
- Ильин В.Б., Сысо А.И. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 229 с.
- Интерпретация геохимических данных / под ред. Е.В. Склярова. М.: Интернет Инжиниринг. 2001. 288 с.
- Квеситадзе Г.И. и др. Метаболизм антропогенных токсикантов в высших растениях. М.: Наука, 2005. 199 с.
- Колесников С.И. и др. Устойчивость биологических свойств почв юга России к нефтяному загрязнению // Экология. 2010. № 5. С. 357–364.
- Колесников С.И. и др. Сравнительная оценка устойчивости биологических свойств черноземов юга России к загрязнению Cr, Cu, Ni, Pb в модельном эксперименте // Почвоведение. 2013. № 2. С. 195–201.
- Колесников С.И., Спивакова Н.А., Казеев К.Ш. Влияние модельного загрязнения Cr, Cu, Ni, Pb на биологические свойства почв сухих степей и полупустынь юга России // Почвоведение. 2011. № 9. С. 1094–1101.
- Копылов И.С. Закономерности формирования почвенных ландшафтов Приуралья, их геохимические особенности и аномалии // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 4. 8 с.

- Лисовицкая О.В., Терехова В.А. Фитотестирование: основные подходы, проблемы лабораторного метода и современные решения // Доклады по экологическому почвоведению. 2010. № 1. Вып. 13. С. 1–18.
- Макаров О.А., Макаров А.А. Подходы к оценке риска химического загрязнения городских почв // Почвоведение. 2016. № 9. С. 1147–1156.
- Маячкина Н.В., Чугунова М.В. Особенности биотестирования почв с целью их экотоксикологической оценки // Вестник Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского. 2009. № 1. С. 84–93.
- Минкина Т.М., Мотузова Г.В., Назаренко О.Г. Состав соединений тяжёлых металлов в почвах. Ростов н/Д: Эверест, 2009. 208 с.
- Минкина Т.М. и др. Состав соединений Mn, Cr, Ni и Cd в почвах техногенных ландшафтов // Почвы России: современное состояние, перспективы изучения и использования: материалы докл. VI съезда о-ва почвоведов им. В.В. Докучаева. Петрозаводск, 2012. Кн. 2. С. 271–272.
- Митракова Н.В. Оценка устойчивости почв, находящихся под угрозой исчезновения, методами биотестирования // Вестник молодых ученых ПГНИУ: сб. науч. тр. в 2 т. Пермь, 2012. Т. 1. С. 14–24.
- Митракова Н.В., Агафонова Е.В. Наследуемые и приобретенные свойства почв и техногенных поверхностных образований разных урбопедокомплексов г. Перми // Почва и устойчивое развитие государства: материалы Междунар. науч. конф. «XX Докучаевские молодежные чтения». СПб., 2017. С. 311–313.
- Мотузова Г.В. Соединения микроэлементов в почвах: системная организация, экологическое значение, мониторинг. М.: Эдиториал УРСС, 1999. 168 с.
- Мотузова Г.В. Устойчивость почв к химическому воздействию. М.: Изд-во МГУ, 2000. 57 с.
- Мотузова Г.В. Роль почв в формировании эколого-геохимической устойчивости ландшафтов к загрязнению тяжелыми металлами // Геохимия ландшафтов и география почв: доклады Всерос. науч. конф. М., 2012. С. 227–228.
- Николаева О.В., Терехова В.А. Совершенствование лабораторного фитотестирования для экотоксикологической оценки почв // Почвоведение. 2017. № 9. С. 1141–1152.
- О состоянии и об охране окружающей среды Пермского края в 2013 году: доклад. Пермь, 2014. 264 с.
- Овчинникова И.Н. Экологический риск и загрязнение почв. М.: Альтекс, 2003. 363 с.
- Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве. [Электронный ресурс] URL: [https://ohranatruda.ru/ot\\_biblio/normativ/data\\_normativ/46/46590/](https://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/46/46590/) (дата обращения: 05.09.2017).
- Серегин И.В., Иванов В.Б. Физиологические аспекты токсического действия кадмия и свинца на высшие растения // Физиология растений. 2001. Т. 48, № 4. С. 606–630.
- Терехова В.А. Биотестирование почв: подходы и проблемы // Почвоведение. 2011. № 2. С. 190–198.
- Тимофеев М.А., Терехова В.А., Кожевин П.А. Биотестирование почв при загрязнении кадмием // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2010. № 4. С. 44–47.
- Устойчивость почв к воздействию тяжёлых металлов [Электронный ресурс]. URL: [http://soil.msu.ru/himia-issledovania/sovremennye-nauchnye-napravleniya/1841-napravlenie-ustojchivost-pochv-k-vozdдействию-tyazhelykh-metallor](http://soil.msu.ru/himia-issledovania/sovremennye-nauchnye-napravleniya/1841-napravlenie-ustojchivost-pochv-k-vozdйствию-tyazhelykh-metallor) (дата обращения: 29.01.2018)
- Minkina T.M. et al. Heavy metal compounds in soil: Transformation upon soil pollution and ecological significance. New York: Nova Since Publ., 2010. 184 p.

## References

- Antonenko E.M., Pinskiy D.L., Minkina T.M., Sushkova S.N. [Influence of composition soil solution an adsorbtion Cu, Zn and Pb solid phasa of soil]. *Počvy Rossii: sovremennoe sostojanie, perspektivy izučeniya i ispol'zovaniya* [Soils of Russia: current state, prospects of study and use: proceedings of the VI Congress of the society of soil scientists]. Petrozavodsk, 2012, B. 2, pp. 230–232. (In Russ.).
- Baghdasaryan A.S. *Biotestirovanie pochv tekhnogenykh zon gorodskikh territorij s ispol'zovaniem rastitelnykh organizmov. Avtoref. diss. kand. biol. nauk* [Bioassay of soil technogenic zones in urban areas with the use of plant organisms: Abstract kand. dis]. Stavropol, 2005. 25 p. (In Russ.).
- Bakina L.G. et al. [To the method of phytotesting of technogeneously contaminated soils and grounds]. *Ėcjljgičeskie problemy severnykh regioniv i puti ich rešenija* [Ecological problems of northern regions and ways of their solution: Proceedings of the International conference]. Apatity, 2004, Part 1, pp.167–169. (In Russ.).
- Bardina T.V. et al. [Biological assessment of toxicity of urban soils for soil-ecological monitoring]. *Ėkologija urbanizirovannykh territorij*, N 2 (2014): pp. 87–91. (In Russ.).
- Beus A.A., Grabovskaya L.I., Tikhonova N.V. *Geochemija okružajuščej sredy* [Geochemistry of the Environment]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 248 p. (In Russ.).

- Buzmakov S.A. et al. *Osobo ochranjaemye prirodnye territorii g. Permi*. [Specially protected natural territories of Perm]. Perm, 2011. 204 p. (In Russ.).
- Vasil'ev A.A., Chashchin A.N. *Tjazelye metally v počvach goroda Čusovogo: ocenka i diagnostika zagrjaznenija* [Heavy metals in soils of Chusovoi town: estimation and contamination diagnostics]. Perm, 2011. 197 p. (In Russ.).
- Voronchikhina E.A., Zaporov A.Yu. [Ecological aspects of environment pollution]. *Voprosy fizičeskoj geografii i geoëkologii Urala* [Questions of physical geography and geoecology of the Urals: Interuniversity collected scientific papers]. Perm, 1998, pp. 139-147. (In Russ.).
- Vorobeychik E. L., Sadykov O.F., Farafontov M.G. *Ėkologičeskoe normirovanie technogennyh zagrjaznenij nazemnyh ėkosistem*. [Ecological standardization of technogenic pollution of terrestrial ecosystems]. Ekaterinburg, Nauka Publ., 1994. 280 p. (In Russ.).
- Glazovskaya M.A. *Metodologičeskie osnovy ocenki ėkologo-geochimičeskoj ustojčivosti počv k technogennym vozdejsťvijam* [Methodological framework for the assessment of ecological and geochemical stability of soils to technogenic impacts: manual]. Moscow, MSU Publ., 1997. 102 p. (In Russ.).
- Gorbovsckaya A.D. *Ocenka ustojčivosti bufernyh sistem počv k faktoram vozdejsťvija* [Assessment of stability of buffer systems of soils to an influence factor: manual]. St. Petersburg, State University Publ., 2006. 44 p. (In Russ.).
- O sostojanii i ob ochrane okružajuščey sredy Permskogo kraja v 2013 godu. Doklad* [The report "On the state and environmental protection of the Perm region in 2013"]. Perm, 2014. 264 p. (In Russ.).
- Dukhovskii P.V. et al. [The reaction of plants to the combined effects of natural and anthropogenic stressors]. *Fiziologija rastenij*, V. 50. N 2 (2003): pp. 165-173. (In Russ.).
- Eremchenko O.Z., Mitrakova N.V. *Sposob ocenki biologičeskoj aktivnosti i toksičnosti počv i technogennyh počvogruntov* [A method for assessing the biological activity and toxicity of soils and man-caused soil grounds]. Patent of the Russian Federation. N 2620555. 2017. (In Russ.).
- Eremchenko O.Z., Mitrakova N.V., Lipin I.N. [The morphogenetic properties of sandy soils of the terraces of the Kama]. *Teoretičeskie i prikladnye aspekty lesnogo počvovedenija* [Theoretical and applied aspects of forest soil science]. Petrozavodsk, 2017, pp. 56–58. (In Russ.).
- Eremchenko O.Z., Moskvina N.V. [Characteristics of soils and anthropogenic and surface formations in the multistorey housing districts of Perm]. *Počvovedenie*, N 7 (2005): pp. 782-789. (In Russ.).
- Eremchenko O.Z., Shestakov I.E., Moskvina N.V. *Počvy i technogennye poverchnostnye obrazovanija urbanizirovannyh territorij Permskogo Prikam'ja* [Soils and technogenic grounds of urbanized territories of Perm Kama region]. Perm, 2016. 252 p. (In Russ.).
- Ilijin V.B., Syso A.I. *Mikroželementy i tjazelye metally v počvach Novosibirskoj oblasti* [Mikroelements and heavy metals in soils of Novosibirsk region]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2001. 229 p. (In Russ.).
- Interpretacija geochimičeskich dannyh* [Interpretation of geochemical data]. Moscow, Internet Engineering Publ., 2001. 288 p. (In Russ.).
- Kolesnikov S.I. et al. [Biological properties of south russian soils: tolerance to oil pollution]. *Ėkologija*, N 5 (2010): pp. 357–364. (In Russ.).
- Kolesnikov S.I., Spivakova N.A., Kazeev K.Sh. [Influence of modeling pollution with Cr, Cu, Ni, and Pb on biological properties of soils of dry steppes and semi-deserts of the south of Russia]. *Počvovedenie*, N 9 (2011): pp.1094-1101. (In Russ.).
- Kolesnikov S.I. et al. [Comparative assessment of the stability of the biological properties of the chernozem in southern Russia for the contamination with Cr, Cu, Ni, and Pb in a model experiment]. *Počvovedenie*, N 2 (2013): pp. 195–201. (In Russ.).
- Kopylov I.S. [Regularities in the formation of soil landscapes of the Urals, their geochemical features and anomalies]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija*, N 4 (2013): 8 pp. (In Russ.).
- Kvesitadze G.I. et al. *Metabolizm antropogennyh toksikantov v vysšich rastenijach* [The metabolism of antropogenic toxicity in higher plants]. Moscow, Nauka Publ., 2005. 199 p. (In Russ.).
- Lisovitskaya O.V., Terekhova V.A. [Phytotesting: basic approaches, problems of the laboratory method and modern solutions]. *Doklady po ėkologičeskomu počvovedeniju*, N 1(13) (2010): pp. 1–18. (In Russ.).
- Makarov O.A., Makarov A.A. [Approaches to assessing the risk of chemical contamination of urban soils]. *Počvovedenie*, N 9 (2016): pp. 1147–1156. (In Russ.).
- Mayachkina N.V., Chugunova M. V. [Peculiarities of soil biotests to evaluate soil ecotoxicity]. *Vestnik Nižgorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*, N 1 (2009): pp. 84–93. (In Russ.).
- Minkina T.M., Motuzova G.V., Nazarenko O.G. *Sostav soedinenij tjazelych metallov v počvach* [Composition of compounds heavy metal in soil]. Rostov-na-Donu, Everest Publ., 2009. 208 p. (In Russ.).

- Minkina T.M., Motuzova G.V., Nazarenko O.G., Mandzhieva S.S. Heavy metal compounds in soil: Transformation upon soil pollution and ecological significance. New York, Nova Science Publ., 2010. 184 p.
- Minkina T.M. et al. [Composition of compounds Mn, Cr, Ni and Cd in soils technogenic landscapes]. *Počvy Rossii: sovremennoe sostojanie, perspektivy izučeniya i ispol'zovaniya* [Soils of Russia: current state, prospects of study and use: proceedings of the VI Congress of the society of soil scientists]. Petrozavodsk, 2012, B. 2, pp. 271-272. (In Russ.).
- Mitrankova N.V. [Assessment of soil stability, endangered, biotesting methods]. *Vestnik molodych učenych PGNIU: sb. nauč. trudov*. Perm, V. 1 (2012): pp. 14-24. (In Russ.).
- Mitrankova N.V., Agafonova E.V. [Hereditary and acquired properties of soil and technogenic surface ground of different urbopedo complexes of Perm]. *Počva i ustojčivoje razvitie gosudarstva* [Soil and sustainable development of the state. International scientific conference "XX Dokuchaevsky youth readings"]. St-Petersburg, 2017, pp. 311-313. (In Russ.).
- Motuzova G.V. *Soedinenija mikroelementov v počvach: sistemnaja organizacija, ekologičeskoe značenie, monitoring* [Compounds microelements in soil: system organization, ecological significance, monitoring]. Moscow, Ėditorail URSS, 1999. 168 p. (In Russ.).
- Motuzova G.V. *Ustojčivost počv k chimičeskomu vozdejsťviyu* [Stability of soil to chemical impact]. Moscow, MSU Publ., 2000. 57 p. (In Russ.).
- Motuzova G.V. [The role of soil in the formation of ecological and geochemical stability of landscapes to contamination by heavy metal]. *Geochimija landšaftov i geografiya počv* [Geochemistry of landscapes and geography of soils. Vseros. Scientific conference]. Moscow, 2012, pp. 227-228. (In Russ.).
- Nikolaeva O.V., Terekhova V.A. [Perfection of laboratory phytotesting for ecotoxicological assessment of soils]. *Počvovedenie*, N 9 (2017): pp. 1141-1152. (In Russ.).
- Ovchinnikova I.N. *Ėkologičeskij risk i zagrjaznenie počv* [Ecological Risk and Soil Pollution]. Moscow, Al'teks Publ., 2003. 363 p. (In Russ.).
- Orientirovočno dopustimye koncentracii (ODK) chimičeskich veščestv v počve* [Approximate permissible concentration (APC) of chemical substances in soils]. Available at: [https://ohranatruda.ru/ot\\_biblio/normativ/data\\_normativ/46/46590/](https://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/46/46590/) (reference date: 05.09.2017). (In Russ.).
- Terekhova V.A. [Biotesting of soils: approaches and problems]. *Počvovedenie*, N 2 (2011): pp. 190-198. (In Russ.).
- Timofeev M.A., Terekhova V.A., Kozhevnikov P.A. [Biotesting for Cd pollution in soils]. *Vestnik Mosk. Universiteta*, ser. 17. *Počvovedenie*, N 4 (2010): pp. 44-47. (In Russ.).
- Ustojčivost' počv k vozdejsťviyu tjažmetallov* [The resistance of soils to the effects of heavy metals]. Available at: <http://soil.msu.ru/himii-issledovania/sovremennye-nauchnye-napravleniya/1841-napravlenie-ustojchivost-počv-k-vozdejsťviyu-tyazhelykh-metallov> (дата обращения: 29.01.2018). (In Russ.).

Поступила в редакцию 05.02.2018

### Об авторах

Еремченко Ольга Зиновьевна, доктор биологических наук, профессор, зав. кафедрой физиологии растений и микроорганизмов ФГБОУВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»  
**ORCID:** 0000-0003-3581-0874  
614990, Пермь, ул. Букирева, 15;  
eremch@psu.ru; (342)2396412

Артамонова Валентина Сергеевна, доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории рекультивации почв Института почвоведения и агрохимии СО РАН  
**ORCID:** 0000-0002-1635-6779  
630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 8/2;  
artamonova@issa.nsc.ru; (383)3639016

### About the authors

Eremchenko Olga Zinovevna, doctor of biology, professor, head of the Department of physiology of plant and microorganisms Perm State University.  
**ORCID:** 0000-0003-3581-0874  
15, Bukirev str., Perm, Russia, 614990;  
eremch@psu.ru (342)2396412

Artamonova Valentina Sergeevna, doctor of biology, associate professor, senior researcher laboratory of recultivation soils Institute of Soil and Agrochemistry, SB of the RAS.  
**ORCID:** 0000-0002-1635-6779  
8/2 Lavrentjev pr., Novosibirsk, Russia, 630099;  
artamonova@issa.nsc.ru; (383)3639016

Бортникова Светлана Борисовна, доктор геолого-минералогических наук, профессор, зав. лабораторией

Институт нефтегазовой геологии им. А.А. Трофимука, СО РАН

**ORCID:** 0000-0003-2395-7406

630090, Новосибирск, пр. Коптюга, 3; bortnikovasb@ipgg.sbras.ru; (383)3309536

Bortnikova Svetlana Borisovna, doctor of geology, professor

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB of the RAS.

**ORCID:** 0000-0003-2395-7406

Russia, Novosibirsk, pr. academician Koptug, 3, 630099; bortnikovasb@ipgg.sbras.ru; (383)3309536

Бельшева Наталья Евгеньевна, магистрант биологического факультета

ФГБОУВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

**ORCID:** 0000-0002-5091-8552

614990, Пермь, ул. Букирева, 15; natasha-belyshev@mail.ru (342)2396412

Belysheva Natalia Evgen'evna, master student of the biological faculty

Perm State University.

**ORCID:** 0000-0002-5091-8552

15, Bukirev str., Perm, Russia, 614990; natasha-belyshev@mail.ru; (342)2396412

#### **Информация для цитирования:**

Оценка экологического риска в связи с накоплением тяжёлых металлов в почвах городских лесов / О.З. Еремченко, В.С. Артамонова, С.Б. Бортникова, Н.Е. Бельшева // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2018. Вып. 1. С. 70-80. DOI: 10.17072/1994-9952-2018-1-70-80.

Eremchenko O.Z., Artamonova V.S., Bortnikova S.B., Belysheva N.E. [The estimation of ecological risk in connection with the heavy metals accumulation in soil of urban forests]. *Vestnik Permskogo universiteta. Biologija*. Iss. 1 (2018): pp. 70-80. (In Russ.). DOI: 10.17072/1994-9952-2018-1-70-80.



