

В. Г. Авдощенко, А. В. Климова

# ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ

## В ПОЧВЕ И РАСТЕНИЯХ

### ГОРОДА ПЕТРОПАВЛОВСКА-КАМЧАТСКОГО (КАМЧАТСКИЙ КРАЙ)



Zn

Cd

Zn

Cu

Cu

Pb

Cd

Zn

Pb

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Камчатский государственный технический университет»

**В. Г. Авдощенко, А. В. Климова**

**ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В ПОЧВЕ И РАСТЕНИЯХ  
ГОРОДА ПЕТРОПАВЛОВСКА-КАМЧАТСКОГО  
(КАМЧАТСКИЙ КРАЙ)**

*Монография*

Издательство



КамчатГТУ

Петропавловск-Камчатский  
2021

УДК 504.054:631.4(571.66-25)

ББК 20.1

A18

Рекомендовано к изданию научно-техническим и ученым советами  
ФГБОУ ВО «Камчатский государственный технический университет»

Рецензенты:

*О. А. Дахно,*

кандидат сельскохозяйственных наук,

зам. директора по научной работе ФГБНУ «Камчатский НИИСХ»

*Е. В. Касперович,*

кандидат биологических наук,

директор ФГБУ «Камчаттехмوردирекция»

### **Авдощенко, Виктория Геннадьевна**

A18 Тяжелые металлы в почве и растениях города Петропавловска-Камчатского (Камчатский край) : монография / В. Г. Авдощенко, А. В. Климова. – Петропавловск-Камчатский : КамчатГТУ, 2021. – 127 с.

ISBN 978-5-328-00420-6

Монография содержит сведения об уровне содержания и особенностях накопления тяжелых металлов (меди, цинка, свинца, кадмия) в почве и растениях Петропавловск-Камчатского городского округа в летний период 2017, 2018 и 2020 гг. Впервые выделены виды растений Камчатского края, которые могут являться индикаторами содержания тяжелых металлов на его территории. В работе приведена оценка металлического загрязнения разных районов г. Петропавловска-Камчатского как по отдельным элементам, так и по их совокупности, также установлена межгодовая динамика полиэлементного загрязнения почвы и растительного покрова города.

Книга представляет интерес для экологов, специалистов-природопользователей, специалистов по охране окружающей среды, работников природоохранных структур и научных организаций, преподавателей и студентов.

УДК 504.054:631.4(571.66-25)

ББК 20.1

ISBN 978-5-328-00420-6

© КамчатГТУ, 2021

© Авторы, 2021

Kamchatka State Technical University

**V. G. Avdoshchenko, A. V. Klimova**

**HEAVY METALS IN SOIL AND PLANTS  
OF PETROPAVLOVSK-KAMCHATSKY  
(KAMCHATKA REGION)**

*Monograph*

Издательство



КамчатГТУ

Petropavlovsk-Kamchatsky  
2021

Recommended for publication by scientific-technical and academic councils  
of Kamchatka State Technical University

Reviewers:

*O. A. Dakhno,*  
Candidate of Agricultural Sciences,  
Deputy Director for Scientific Work,  
Kamchatka Research Institute of Agriculture

*E. V. Kasperovich,*  
Candidate of Biological Sciences,  
Director of FSBI «KamchatTechMorDirectsiya»

Heavy metals in soil and plants of Petropavlovsk-Kamchatsky (Kamchatka region) : monograph / V. G. Avdoshchenko, A.V. Klimova. – Petropavlovsk-Kamchatsky : KamchatSTU, 2021. – 127 p.

ISBN 978-5-328-00420-6

The monograph presents information on the content level and characteristics of the heavy metals accumulation, including copper, zinc, lead, and cadmium in the soil and plants of Petropavlovsk-Kamchatsky city in the summer of 2017, 2018 and 2020. The plant species of Kamchatka region, which can serve as bioindicators for heavy metal pollution in this region, were identified for the first time. An assessment of heavy metal pollution in different areas of Petropavlovsk-Kamchatsky, both for individual and combined elements, is given and also the interannual dynamics of polyelement contamination of city's soil and vegetation are provided (an increase in 2017–2018, followed by a subsequent decrease in 2018–2020).

To be recommended for ecologists, environmental specialists, environment protection specialists, employees of environment protection structures and scientific organizations, teachers and students.

**ISBN 978-5-328-00420-6**

© KamchatSTU, 2021  
© Authors, 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	7
<b>ГЛАВА 1. Тяжелые металлы в окружающей среде</b> .....	9
1.1. Виды, источники поступления, токсичность тяжелых металлов.....	9
1.2. Пути поступления тяжелых металлов в почву и растения .....	12
1.3. Тяжелые металлы в растениях: закономерности распределения по тканям и органам, воздействие на физиологические процессы и механизмы устойчивости .....	17
1.4. Фитоиндикация и мониторинг металлического загрязнения территорий.....	20
<b>ГЛАВА 2. Объекты и методы исследования</b> .....	24
2.1. Районы сбора растительных и почвенных проб.....	24
2.2. Древесные и травянистые растения районов исследования .....	27
2.3. Методика отбора проб растений и почвы .....	29
2.4. Подготовка и химический анализ проб .....	30
2.5. Методы оценки степени металлического загрязнения районов исследования .....	31
<b>ГЛАВА 3. Эколого-географическая характеристика Петропавловск-Камчатского городского округа</b> .....	36
3.1. Характеристика почвенного и растительного покрова Петропавловск-Камчатского городского округа .....	36
3.2. Природные (естественные) и антропогенные источники загрязнения тяжелыми металлами окружающей среды.....	40
<b>ГЛАВА 4. Оценка загрязнения тяжелыми металлами почв города Петропавловска-Камчатского</b> .....	46
4.1. Валовое содержание тяжелых металлов в почвенном покрове .....	46
4.2. Оценка степени металлического загрязнения почв г. Петропавловска-Камчатского .....	59

<b>ГЛАВА 5. Содержание Cu, Zn, Pb, Cd в растениях</b>	
<b>территорий г. Петропавловска-Камчатского .....</b>	<b>76</b>
5.1. Тяжелые металлы в растениях	
территорий г. Петропавловска-Камчатского .....	76
5.2. Оценка степени накопления металлов растениями	
и их загрязнение.....	93
5.3. Оценка загрязнения территорий	
Камчатского края.....	102
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>107</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>110</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность исследования.** Городская среда характеризуется загрязнением окружающей среды, источники и виды загрязнителей которой разнообразны. Особое место занимает загрязнение тяжелыми металлами, в большинстве случаев имеющее антропогенную природу (Duruibe et al., 2007; Chibuike, Obiora, 2014; Salgare, Acharekar, 1992; Sharma, Agrawal, 2005; Davydova, 2005). В результате поступления тяжелых металлов в окружающую среду происходит загрязнение главным образом почвы, т. к. в этот компонент попадают тяжелые металлы, в том числе из атмосферы и водной среды. Также из почвы тяжелые металлы могут ассимилироваться растениями. В условиях городской среды они активно аккумулируют различного рода загрязнители, в том числе и тяжелые металлы, которые накапливаются и оказывают длительное негативное воздействие (Воскресенский, Воскресенская, 2011; Масленников и др., 2015, 2016; Nazrat et al., 2019). Таким образом, растения являются надежным индикатором присутствия тяжелых металлов в окружающей среде.

В различных районах города уровень загрязнения тяжелыми металлами может варьировать. Способность к накоплению тяжелых металлов у каждого вида древесных и травянистых растений различна. Кроме того, накопление тяжелых металлов зависит от условий произрастаний, комплекса абиотических факторов.

Во многих городах России и промышленных центрах ведутся непрерывные исследования содержания тяжелых металлов в почвах и растительности, поскольку именно их состояние во многом определяет качество среды обитания и условия жизнедеятельности человека. Однако в северных районах страны с активной вулканической деятельностью подобные работы не проводились. Исследования содержания тяжелых металлов в почвах территорий полуострова Камчатка

и произрастающих на них растений выполнены Л. В. Захариной и Ю. С. Литвиненко (2019а, 2019б). Однако проведенные работы не затрагивают районы, испытывающие постоянное антропогенное воздействие.

Петропавловск-Камчатский – город линейного типа, вся территория которого разделена на отдельные районы, различные по эдафическим, климатическим и орографическим условиям, а также функциональному использованию. Уровень загрязнения атмосферного воздуха различных районов города варьирует и зависит от расположения стационарных источников загрязнения, а также от наличия дорожных магистралей, которые часто характеризуются перегруженностью. Таким образом, вопрос о содержании тяжелых металлов в почве, а также в травянистых и древесных растениях города с выделением видов-индикаторов является актуальным.

# ГЛАВА 1. ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

## 1.1. Виды, источники поступления, токсичность тяжелых металлов

Ежедневно в окружающую среду поступает множество химических соединений и веществ, часто оказывающих неблагоприятное воздействие на компоненты окружающей среды, среди них особое место занимают тяжелые металлы (ТМ). Критерии отнесения химических элементов к тяжелым металлам используют различные. Как правило, к ним относят более 40 химических элементов периодической системы Д. И. Менделеева, масса атомов которых выше 50 атомных единиц (Вальков и др., 2008). Однако в других источниках литературы к ТМ относят все металлы, за исключением щелочных и щелочноземельных (Снакин, 2000). Н. Ф. Реймерс относил к тяжелым металлы с плотностью 8 тыс. кг/м<sup>3</sup> и более (кроме благородных и редких), т. е. Pb, Cu, Zn, Ni, Cd, Co, Sb, Sn, Bi и Hg (Реймерс, 1994). Таким образом, количество элементов, относимых к этой группе, может изменяться в широких пределах.

В настоящее время при отнесении химических элементов к группе тяжелых металлов чаще применяют первый вариант, т. е. использование массы атомов, соответственно к ТМ относят Cu, Zn, Hg, Cd, Pb, Sn, Fe, Mn, Ag, Cr, Co, Ni, As, Al и др. Некоторые из них относятся к микроэлементам, которые имеют важное значение в процессах метаболизма. В экологических исследованиях часто рассматривают только те ТМ, которые обладают наиболее высокой токсичностью, а также являются частыми загрязнителями окружающей среды (Васин, 2007; Корчагина, 2014; Неведров и др., 2016; Эргашева, 2019; Duruibe et al., 2007).

Источники поступления ТМ в окружающую среду могут быть разделены на две группы: природные (естественные)

и антропогенные (техногенные). Валовое содержание тяжелых металлов в естественных незагрязненных почвах обусловлено их концентрацией в исходной материнской породе и находится под влиянием почвообразовательных процессов и почвенных характеристик, таких как содержание органического вещества, реакция среды, гранулометрический состав.

Также значимым источником поступления тяжелых металлов в окружающую среду могут являться извержения вулканов, природные пожары, выветривание горных пород и т. п. (Теплая, 2013; Медведев, Деревягин, 2017).

Уровень содержания тяжелых металлов в окружающей среде в настоящее время сильно изменен под воздействием антропогенного фактора. Основными источниками их техногенного поступления в окружающую среду являются металлургические предприятия, тепловые электростанции, карьеры и шахты по добыче полиметаллических руд, транспорт, химические средства защиты сельскохозяйственных культур от болезней и вредителей, сжигание нефти и различных отходов. Наиболее мощные ореолы тяжелых металлов возникают вокруг предприятий черной и особенно цветной металлургии в результате атмосферных выбросов (Чикенёва, Абузярова, 2011; Чикенёва, 2012; Байсеитова, 2014). Действие загрязнения может распространяться на десятки километров от источника их поступления, что связано с преимущественной приуроченностью металлов к пылевой фракции выбросов. Метеорологические условия и рельеф местности могут вносить свои поправки (Корчагина, 2014).

Предприятия теплоэнергетики являются одним из основных источников загрязнения окружающей среды, а приоритетными загрязнителями данных предприятий выступают ТМ. Сжигание угля и мазута, которые в топливной структуре преобладают, является существенным источником поступления всего спектра металлов (Делигодина и др., 2017).

Еще одним из значимых источников поступления ТМ в окружающую среду является автомобильный транспорт, т. к. рост количества единиц автотранспорта – актуальная проблема практически каждого крупного населенного пункта

в целом и города Петропавловска-Камчатского в частности (Лобанов, 2005; Слепнев, Маршалкович, 2010; Авдощенко, 2017; Парфенова, 2011, 2020). ТМ попадают в окружающую среду с выхлопными газами двигателей и при истирании дорожного покрытия. В результате от автотрасс в почву поступают свинец, кадмий, железо, никель, цинк, марганец и другие элементы (Корчагина, 2014). Так, износ шин, использование асфальтобетона, смазочные и дизельные масла, некоторые детали двигателей, шасси привносят в окружающую среду кадмий. Проблема может усугубляться использованием кадмийсодержащих отходов для изготовления дорожных покрытий. Никель и хром являются продуктами износа покрытий кузовов, а при истирании частей двигателя выделяется железо (Миронов, Евгеньев, 1986).

Экологической проблемой всех населенных пунктов, включая Петропавловск-Камчатский городской округ, является формирование локальных несанкционированных точечных свалок, которые могут являться источником поступления в окружающую среду ТМ. В зависимости от состава и вида размещенного отхода будут изменяться привнесенные им загрязнители. Загрязнение почвы свинцом может соответствовать участкам, на которых содержатся остатки устройств электроники, отработанные аккумуляторные батареи, провода и кабели, лакокрасочные покрытия (Морачевский, 2014).

Предметы бытовой утвари с цинковым покрытием в условиях агрессивной среды (действие осадков, солнечного света) свалки проявляют слабую коррозионную устойчивость, быстро разрушаются и загрязняют субстрат цинком. Источником кадмия на свалках являются отходы, содержащие лаки и краски, люминесцентные лампы, аккумуляторы, красящие пигменты и др. Встречаются случаи, когда в придомовой территории сжигают отходы различной природы, в результате чего происходит загрязнение среды ТМ. Они также постоянно высвобождаются из искусственных включений, которые содержатся в профиле городских почв – обломках кирпича, штукатурки и металлических изделий. Даже после ликвидации свалки в почве остаются ТМ, изменяя качество почвенного покрова

и оказывая влияние на фитоценоз экосистемы (Иванова, 2011; Иванова, Горбачев, 2012; Воскресенская и др., 2013; Корчагина, 2014).

Тяжелые металлы представляют собой одну из приоритетных групп загрязнителей, являющихся факторами деградации окружающей среды. При избыточном попадании их в объекты окружающей среды ведут себя как токсиканты и экотоксиканты.

В соответствии с СанПиН 2.1.7.1287-03 (в ред. от 25.04.2007) и СанПиН 2.1.3684-21 тяжелые металлы по степени опасности подразделяются на три класса:

- I класс (высокоопасные): мышьяк, кадмий, ртуть, свинец, цинк;
- II класс (умеренноопасные): бор, кобальт, никель, молибден, медь, сурьма, хром.
- III класс (малоопасные): барий, ванадий, вольфрам, марганец, стронций.

Соответственно, металлы, отнесенные к группе высокоопасных, являются приоритетными загрязнителями и подлежат контролю в первую очередь. Все ТМ обладают способностью накапливаться в живых организмах, увеличивая концентрации по трофическим цепям, что в конечном счете представляет опасность для здоровья человека, особенно при попадании в его организм высокотоксичных тяжелых металлов (Барышев и др., 2006). Помимо трех классов опасности ТМ, можно выделить группу с неизвестной опасностью, к которой можно отнести германий, олово, цезий, лантан, церий, висмут и ряд других (Водяницкий, 2008).

Токсичность и биологическая доступность тяжелых металлов в почвах зависят от реакционной способности и химической формы элемента (степень окисления элемента, молекулярная структура соединения элемента и др.) (Водяницкий, 2008; Brown et al., 1999).

## **1.2. Пути поступления тяжелых металлов в почву и растения**

Большая часть ТМ, поступающая в окружающую среду из техногенных и природных источников, рано или поздно попадает

в почву. Последняя, благодаря своим биогеохимическим свойствам и огромной площади активной поверхности тонкодисперсной части, превращается в «депо» токсичных соединений: минеральных удобрений, пестицидов, тяжелых металлов, нефтепродуктов (Попова, 2012). Одновременно она становится одним из важнейших биогеохимических барьеров для большинства этих поллютантов на пути их миграции из атмосферы в грунтовые воды и речную сеть (Попова, Наквасина, 2014).

Попадая в почвенную среду, ТМ вступают в различные химические, физические, биохимические и другие взаимодействия, в ходе которых они могут выщелачиваться, аккумулироваться и поступать в растения. В результате этих взаимодействий опасность металлов для живых организмов может существенно меняться (Парфенова, 2020).

Тяжелые металлы могут вымываться поверхностными водами, накапливаться в водных организмах, донных отложениях, а элементы, накапливающиеся в почвах, медленно удаляются при выщелачивании, потреблении растениями, эрозии и дефляции. Продолжительность нахождения загрязнителей в почвах гораздо больше, чем в других частях биосферы, а загрязнение почв токсичными компонентами является долговечным.

ТМ концентрируются в приповерхностном слое почвы (0–20 см), где они присутствуют в форме обменных ионов, входят в состав гумусовых веществ, карбонатов, оксидов Al, Fe и Mn. Доля водорастворимой формы невелика, однако при сильном загрязнении их абсолютное количество становится самостоятельным экологически опасным фактором (Ильин, 1991). Состав и количество удерживаемых в почве элементов зависят от содержания и состава гумуса, кислотно-основных и окислительно-восстановительных условий, сорбционной способности и интенсивности биологического поглощения.

Почвенный покров является основным источником поступления ТМ в растения. Большинство исследований направлено на изучение закономерности поступления элементов в системе «почва – растение», не учитывая аэральный путь. Характеристики почвенного покрова во многом определяют количество и природу потребляемого элемента, а также могут

увеличивать токсичность металла для растений. Наиболее важными характеристиками почв, влияющими на поступление ТМ в растения, являются кислотность, емкости катионного обмена и содержание органического вещества (Лебедевский, 2007; Кравченко, 2016).

Сохранение кислотности в почвах с существенным содержанием ТМ близкой к 7,0 предотвращает фитотоксичность многих из них, но те же концентрации металлов при рН равном или ниже 5,5 могут стать летальными для растений. Важно отметить, что кислотность почв влияет на подвижность металлов и усвоение их корневой системой растений (Лебедевский, 2007; Кравченко, 2016).

Органическое вещество почвы неодинаково удерживает различные металлы. Одни из них фиксируются им сильно, другие – слабо. Кроме того, внесение удобрений и известкование могут снижать или усиливать токсический эффект металлов (Ильин, 1991).

Главными механизмами поступления ТМ в растения через корневую систему являются: пассивный (неметаболический) перенос элементов в клетку в соответствии с градиентом их концентрации и активный (метаболический), т. е. поглощение клеткой против градиента концентрации (Godbold, 1991). Соотношение пассивного и активного путей поступления металлов в растения значительно зависит от их содержания в почве (Ильин, 1991).

В пределах почвенного профиля техногенный поток веществ встречает ряд почвенно-геохимических барьеров (Sarapulova, 2018). Часть высокотоксичных элементов может переходить в труднодоступные для растений соединения. Другие элементы, мобильные в данной обстановке, способны мигрировать в почвенной толще, представляя потенциальную опасность для биоты. В нейтральных почвах подвижны соединения Zn, V, As, Se, которые могут выщелачиваться при сезонном промачивании почв. Накопление подвижных форм металлов зависит от водного и воздушного режима почв (Соболева, Шишлова, 2018). Так, наименьшая аккумуляция ТМ наблюдается в водопроницаемых почвах промывного

режима, увеличивается в почвах с непромывным режимом, а наибольшая – в почвах с выпотным режимом (сумма осадков значительно меньше испарения).

При испарительной концентрации и щелочной реакции в почве могут накапливаться Se, As, V в легкодоступной форме, а в условиях восстановительной среды – Hg в виде метилированных соединений. Следует отметить, что в условиях промывного режима реализуется потенциальная подвижность металлов, и они могут быть вынесены за пределы почвенного профиля, являясь источниками вторичного загрязнения подземных вод. В кислых почвах с преобладанием окислительных условий (почвы подзолистого ряда, хорошо дренированные) такие тяжелые металлы, как Cd и Hg, образуют легкоподвижные формы. Напротив, Pb, As, Se образуют малоподвижные соединения. В заболоченных почвах Mo, V, As, Se присутствуют в малоподвижных формах. Значительная часть элементов в кислых заболоченных почвах существует в относительно подвижных и опасных для живого вещества формах. Таковы соединения Pb, Cr, Ni, Co, Cu, Zn, Cd и Hg. В слабокислых и нейтральных почвах с хорошей аэрацией образуются труднорастворимые соединения Pb, особенно при известковании (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989).

В почве и растениях существуют явления антагонизма и синергизма между ТМ. Присутствие определенных элементов может способствовать или препятствовать поступлению других в растения и взаимно усиливать или уменьшать токсический эффект друг друга. Так, содержание кадмия в растениях снижается при повышении концентрации в почве цинка (Зубкова, 2003). Кадмий при высоких концентрациях в растениях может выступать в роли цинка во многих биохимических процессах. Бор по мере увеличения концентрации снижает накопление марганца (Алексеев, 1987). Все ТМ отличаются по токсическому действию на растительный организм особенностями миграции и аккумуляции в почве, механизмами поглощения фитоценозами.

Техногенное загрязнение почвы ТМ вызывает большие перегрузки в отношении ее самоочищающей способности.

Снижается численность микроорганизмов, меняется структура микробоценозов, сокращается их разнообразие, падает интенсивность основных микробиологических процессов и ферментативная активность, в конечном счете изменяются свойства самой почвы. В свою очередь, загрязнение почвы ТМ приводит к поступлению их в различные ткани и органы растений (Заболотских, 2014).

В условиях выпадения значительных количеств тяжелых металлов из атмосферы существенную роль в загрязнении растительного организма начинает играть фолиарное поступление поллютантов. Вблизи источников загрязнения аэраль-ный путь их поступления может превышать корневой (Янту-рин, Аминова, 2013; Ветрова, 2015).

Содержание металлов в воздухе и атмосферных осадках, а также морфологические особенности листьев растений являются важнейшими факторами, которые определяют долю их внекорневого поступления. Соединения металлов в составе аэрозолей и пыли, попадающие из атмосферы на поверхность листьев, удерживаются на ней в виде поверхностных отложений, часть их может быть вымыта дождевой водой. Для разных элементов характерна неодинаковая эффективность вымывания (Козаренко, Козаренко, 1996). В основном ТМ проникают в листья через устьица или кутикулу, далее они могут транспортироваться в корни, побеги и другие органы растения (Shahid et al., 2016).

Коэффициент захвата растениями атмосферных аэрозолей природного и техногенного происхождения колеблется в пределах 40–100%. При этом максимальными скоростями поглощения характеризуются элементы-токсиканты:  $Cd > Pb > Zn > Cu > Mn > Fe$ . Однако вопрос о соотношении корневого и листового поглощения в городских ландшафтах изучен недостаточно полно. Если в природных ландшафтах накопление металлов зависит от особенностей системы «почва – растение», то в городских ландшафтах следует уделять особое внимание системе «почва – растение – атмосферный воздух» (Коновалова, 2019).

### **1.3. Тяжелые металлы в растениях: закономерности распределения по тканям и органам, воздействие на физиологические процессы и механизмы устойчивости**

Фитоценозы – неотъемлемая часть городских ландшафтов и важнейшее звено биологического круговорота веществ. Для нормального функционирования растений необходимы определенные группы химических элементов (Прохорова, Матвеев, 1996). В соответствии с потребностью растений все элементы почвенного питания делятся на две группы: макро- и микроэлементы (табл. 1.1).

*Таблица 1.1*

**Элементы почвенного питания растений**

Макроэлементы		Микроэлементы	
Основные	Второстепенные	Жизненно необходимые	Полезные
N, P, K	Ca, Mg, S	Fe, Mn, B, Zn, Cu, Mo, Cl, Ni	Na, Si, Co, Se

Известно, что элементный состав растений является изменчивой величиной, на которую влияет большое количество одновременно действующих факторов. Суммарное количество каждого из химических элементов, составляющих растительный организм, определяется сложным сочетанием нескольких факторов, которые условно можно объединить в три большие группы (Алексеенко, 2001):

- 1) внутренние, биохимические факторы, определяемые биологическими особенностями конкретного вида;
- 2) внешние, ландшафтно-геохимические факторы, определяемые условиями среды обитания;
- 3) внутренние, кристаллохимические факторы, определяемые свойствами ионов, входящих в состав растений.

Помимо отмеченных выше природных факторов, определенный вклад в элементный состав растений вносит также и антропогенный фактор, в результате воздействия которого может изменяться макро- и микроэлементный состав растений.

Проникая в избытке в растительные организмы, ТМ подавляют ход метаболических процессов, тормозят развитие, снижают продуктивность (Эвембе, 2002). Фитотоксичность металлов и устойчивость к ним растений зависят от многих условий. Существенное значение имеет количество металла, находящегося в почвенном растворе. Есть виды растений, которые способны накапливать отдельные ТМ без видимых признаков угнетения. Устойчивость растения к одному металлу, как правило, не распространяется на другие.

О механизмах устойчивости, накопления и поглощения различными видами растений ТМ сведений не так много, т. к. все это видоспецифично и сильно зависит от местности произрастания. У многих авторов встречается обобщенная информация о растениях в целом, также есть множество диссертаций и научных публикаций о конкретных видах определенного ареала, однако следует понимать, что другой вид того же рода, либо этот же вид, но в других условиях, может значительно отличаться по показателям накопления и поглощения от изученного (Романькова, Батлуцкая, 2011; Бородина, 2012; Зокиров, Неверова, 2012; Сибиркина, 2014; Baker, Brooks, 1989; Vidar et al., 2007; Nailu, Gebeyehu, 2020).

Насыщенность растительной ткани тяжелыми металлами изменяется в течение вегетационного периода. С возрастом растения становятся более устойчивыми к избытку ТМ в среде обитания (Титов и др., 2011). ТМ распределяются по органам растений неравномерно, что обусловлено многими причинами, например, аттрагирующей способностью определенного органа (органеллы), локальным накоплением в результате перехода в малоподвижную форму (Титов и др., 2011; Седельникова, Чанкина, 2017; Узакон, 2018).

Растения по способности накапливать тяжелые металлы разделяют на три группы (Baker, Brooks, 1989):

1) аккумуляторы, накапливающие металлы главным образом в надземных органах как при низком, так и высоком содержании их в почве;

2) индикаторы, концентрация металла в которых отражает его содержание в окружающей среде;

3) исключения, накапливающие металлы в основном в корнях, поступление ионов в побеги ограничено даже при высокой их концентрации в окружающей среде. К этой группе относится большинство растений (Титов и др., 2011).

Характер распределения ТМ по органам и тканям в большинстве случаев не зависит от экологических факторов и определяется в основном свойствами металлов и видовыми особенностями растений (Титов и др., 2011). На незагрязненных участках наименьшее количество металлов свойственно органам запасаания ассимилятов (зерно, плоды, корнеплоды и т. д.), в большем количестве они накапливаются в стеблях и листьях. У некоторых видов ситуация с накоплением ТМ на фоновых участках отличается (Ильин, 1991).

На загрязненной почве по уровню накопления ТМ органы растений в большинстве случаев располагаются в следующей последовательности: корни > стебли > листья > плоды (семена, соцветия) (Ильин, 1991; Ягафарова, 2006; Титов и др., 2011). Однако для растений-аккумуляторов характерна значительная концентрация ТМ в надземных органах, многократно превышающая их содержание в почве. Также выделяют растения-гипераккумуляторы (сверхнакопители), которые способны аккумулировать в побеге чрезвычайно высокие концентрации ТМ без отрицательных последствий (Титов и др., 2011).

При очень сильном загрязнении среды обитания растения прекращают развитие и в конечном счете гибнут. Признаки избытка ТМ схожи у различных видов. При постепенном возрастании концентрации ионов ТМ в среде наблюдается поэтапное проявление признаков угнетения растительного организма: 1 – торможение роста, 2 – хлороз листьев, 3 – некрозы верхушек и краев листьев и 4 – отмирание корней. Если высокая концентрация элемента резко начинает оказывать воздействие, данная последовательность изменяется и выявляются признаки сильного нарушения процессов жизнедеятельности растения. В результате избыточной концентрации ТМ в среде обитания могут уменьшаться размеры органов растений, биомасса, снижается продуктивность (Титов и др., 2011, 2014).

#### **1.4. Фитоиндикация и мониторинг металлического загрязнения территорий**

Химический состав растений отражает в целом элементный состав среды роста. Однако степень проявления этой связи чрезвычайно изменчива и зависит от многих разнородных факторов. Изменение элементного состава растений часто связано с загрязнением окружающей среды. В источниках литературы использование растений для индикации металлического загрязнения часто связано с морфологическими изменениями без учета их элементного состава (Аугустайтис, 1992; Афанасьева, 2005; Неверова, Еремеева, 2006; Якушевская, Якимова, 2013).

Фитоиндикация может осуществляться по ответной реакции растений у видов, наиболее чувствительных к отдельным ингредиентам, или по накоплению вредных веществ в тканях растений. Поэтому среди растений выделяют (1) биоиндикаторы с высокой чувствительностью к загрязнителям и (2) биоиндикаторы-накопители (Неверова, 2009). Использование высших растений (кроме мохообразных) в фитоиндикации осложняется из-за ряда эколого-физиологических особенностей этой группы.

Процессы поглощения и дифференциации загрязняющих веществ у сосудистых растений (в отличие от водорослей, мхов и лишайников) очень сложны и обусловлены множеством внешних и внутренних факторов. Загрязнители поступают в их организм посредством разных механизмов: корневого питания, воздушного (газообмен) и внекорневого (через листовую пластинку). Наличие кутикулы в листьях, коры и эндодермы в корнях затрудняет поступление и аккумуляцию токсичных веществ в органах и тканях растений (Черненкоова, 2002). По этой причине чаще в качестве фитоиндикаторов используют мхи и лишайники (Жидков, 2008; Опекунова, Гизетдинова, 2014; Мучник, 2015; Тарханов, 2016; Симонова, Калашникова, 2018). Однако они не всегда способны отражать степень загрязнения городских систем, т. к. некоторые виды более чувствительны к поллютантам в среде обитания и в урбанизированных зонах могут отсутствовать.

В связи с особенностями метаболизма (наличие высокочувствительного фотосинтетического аппарата, который поглощает токсические вещества из окружающей среды), растения больше используются для диагностики загрязнения атмосферного воздуха, а не почвенного покрова. Почва, являясь основным источником минерального питания растений, влияет на их элементный состав опосредованно из-за наличия у растений защитно-приспособительных свойств, проявляющихся в избирательном поглощении элементов из среды. Особенно это характерно для урбосистем.

В работах многих авторов прямой корреляции между содержанием ТМ в почве и растениях не наблюдается (Неверова, 2004; Дрогайцева, Петрова, 2014; Гусев и др., 2015; Яковлева, Фаткуллин, 2019). В связи с этим использование растительных организмов как индикатора качества городской среды во многих случаях происходит для оценки загрязнения атмосферного воздуха, что связано с почти беспрепятственным поступлением поллютантов через устьица или кутикулу (Неверова, 2009; Коновалова, 2019). Лист растения – один из самых надежных и информативных индикаторов состояния воздушной среды. Способность к поглощению из воздушной среды и аккумуляции ТМ листовыми пластинами зависит от их размера и формы, степени их опушения и покрытия воском, положения относительно стебля и от характера загрязнения (Уфимцева, 2015; Ташекова, Торопов, 2017; Andre et al., 2006).

Кроме того, для оценки и мониторинга металлического загрязнения территорий с помощью растительного покрова, для выявления растений-индикаторов во многих случаях рассчитывают такие показатели, как степень биологического поглощения, биогеохимическая активность вида, коэффициент обогащения и суммарный показатель загрязнения (Валеева, 2004; Корельская, Попова, 2012). С целью более высокой точности индикации часто используют несколько коэффициентов.

Растительные организмы проявляют видоспецифическую реакцию на присутствие в среде загрязнителя – некоторые виды устойчивы, некоторые накапливают его в высоких концентрациях. Благодаря исследованию закономерностей

накопления и поглощения металлов, возможно выявить растения-индикаторы, позволяющие оценить содержание ТМ в почве и воздухе. Сложно выделить универсальный вид-индикатор для любых территорий, т. к. показатели накопления и поглощения зависят от экологических факторов мест произрастания и вида растительного организма.

В работах разных авторов информация о способности некоторых видов поглощать или накапливать ТМ различается. Так, различные виды березы проявляют специфическую реакцию на присутствие металлов в окружающей среде. Береза бородавчатая (*Betula verrucosa*) обладает низкой металлоаккумулирующей способностью и деконцентрирует ТМ ниже фонового уровня (Неверова, Позняковский, 2005). Согласно исследованиям И. Я. Григорьевой (2015), береза повислая (*B. pendula*) является индикатором загрязнения среды цинком, в то время как по другим данным этот вид наименее устойчив к высокому загрязнению цинком и активно концентрирует медь (Ларионов, 2014). Также она отмечается как устойчивая к промышленным загрязнениям (Franiel, Babczyńska, 2011).

Среди других представителей древесного яруса непальская ольха (*Alnus nepalensis*) является накопителем высоких концентраций Zn, Pb и Cd (Jing et al., 2014). Ольха серая (*A. incana*), напротив, может выступать как исключитель Zn, Cd и Cu (Mertens et al., 2004). Ива белая (*Salix alba*) может быть индикатором загрязнения цинком и свинцом (Григорьева, 2015).

К числу видов-индикаторов из травянисто-кустарникового яруса относят полынь австрийскую (*Artemisia austriaca*), отличающуюся наиболее высокой способностью к концентрации Cu, Zn и Mn (Сомов, 2018). Полынь горькая (*A. absinthium*) в условиях антропогенного влияния накапливает в фитомассе повышенное количество ТМ, превышающее ПДК (Кудряшова, 2003). Полынь полевая (*A. campestris*) имеет высокую аккумулялирующую способность в отношении Al, As, Cr, Ni, Pb, Sr, а полынь метельчатая (*A. scoparia*) – Al, As, Pb, V. Плоды шиповника майского (*Rosa majalis*) способны накапливать Pb, Cd и Co выше предельно допустимых концентраций (Русанов, Турлибекова, 2011).

При использовании растений в качестве биоиндикаторов загрязнения необходимо учитывать особенности местности произрастания, а также комплекс индивидуальных характеристик вида, включая физиологические и морфологические адаптации. В исследованиях разных авторов предлагаются различные виды, по которым можно было бы судить о загрязнении ТМ окружающей среды. На данный момент универсальный фитоиндикатор присутствия ТМ в окружающей среде, согласно литературным данным, выявить невозможно.

## ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1. Районы сбора растительных и почвенных проб

Полевой сбор растительного и почвенного материала для настоящего исследования осуществляли в разных районах Петропавловск-Камчатской городской агломерации в летний период 2017, 2018 и 2020 гг. Пробы отбирали преимущественно в июле и августе на следующих участках: «Автостанция 10-й км», «Краевая библиотека», «Ботанический переулок», «Стадион “Спартак”» и «Госпиталь» (рис. 2.1). Дополнительно за пределами города, близ озера Синичкино, был выделен условно чистый участок, на котором также проводили сбор проб. В настоящей работе данные, полученные для этого участка, использовали как контрольные при сравнении с данными, полученными для городской среды, т. е. он выступал в качестве фонового района. На всех исследованных участках были собраны почвенные образцы. Всего за период исследования отобрано 172 растительных и 46 почвенных проб, выполнено около 900 аналитических определений тяжелых металлов. В исследованной городской среде в транспортно-селитебной зоне преобладают естественные, поверхностно и глубоко антропогенно-преобразованные почвы. Для фонового участка характерны охристые вулканические почвы. Ниже приведена краткая характеристика для каждого из районов исследований.

*Фоновый участок* располагается юго-западнее озера Синичкино (53°04'39.1"N, 158°41'24.9"E). Выбор именно этого района в качестве референсного для экологического мониторинга был основан на минимальном антропогенном воздействии на его природную среду. В частности, участок значительно удален от транспортных путей, производственной и жилой застройки. Также здесь отсутствуют несанкционированные свалки. Кроме того, в растительном сообществе фонового

участка присутствуют виды, характерные для всех остальных исследуемых районов г. Петропавловска-Камчатского. Здесь были отобраны растительные образцы ольхи волосистой, березы Эрмана, ивы, шиповника тупоушкового и полыни обыкновенной. В 2020 г. дополнительно был отобран *Calamagrostis langsdorffii*.

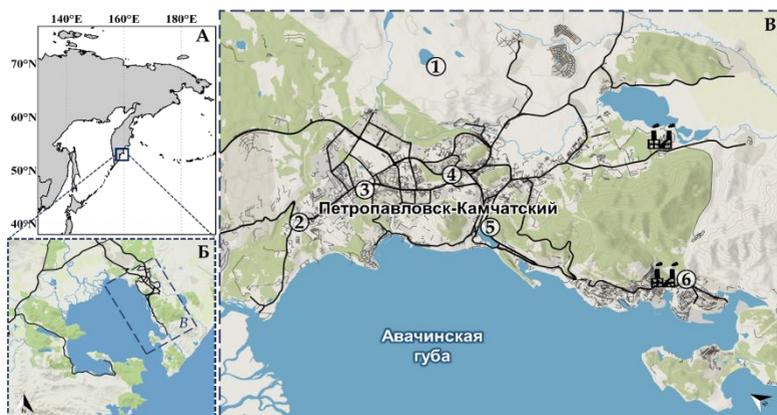


Рис. 2.1. Карта-схема мест отбора почвенных и растительных образцов.  
 А – Камчатский край; Б – городская агломерация  
 Петропавловск-Камчатский – Елизово – Вилючинск;  
 В – г. Петропавловск-Камчатский: 1 – фоновый участок,  
 2 – район «Автостанция 10-й км», 3 – район «Краевая библиотека»,  
 4 – район «Ботанический переулок», 5 – район «Стадион “Спартак”»,  
 6 – район «Госпиталь»

Район «Автостанция 10-й км» находится в зоне многочисленной жилой застройки ( $53^{\circ}04'13.1''\text{N}$ ,  $158^{\circ}35'34.5''\text{E}$ ), относится к участку с наиболее интенсивным движением личного и общественного автотранспорта. Вблизи места отбора проб располагаются основная автостанция города (место начала большинства маршрутов и отправления автобусов в другие населенные пункты Камчатского края), центральная автомагистраль города, крупные торговые центры с обширными парковками (ТЦ «Шамса», ТЦ «Славянский»), производственные территории предприятий («Камчатский пищекомбинат» и «Молокозавод Петропавловский»), станции технического обслуживания автомобилей и автомойки. Также

в данном районе было обнаружено большое количество бытовых отходов, включая металлолом, упаковки средств бытовой химии и т. д. Этот участок, как и все остальные районы города, подвержены негативному воздействию котельных.

*Район «Краевая библиотека»* (53°03'58.0"N, 158°37'18.8"E) располагается в непосредственной близости от центральной автодороги, автозаправочных станций, парковочных зон торговых центров «Шамса», «Мега» и краевой научной библиотеки им. С. П. Крашенинникова. Здесь уже более 5 лет активно ведутся строительные работы по созданию жилого комплекса на ул. Топоркова. В связи с чем территория лесопарковой зоны неуклонно сокращается. Однако данный район до сих пор остается местом отдыха населения, выгула собак и, как следствие, несанкционированного размещения отходов.

*Район «Ботанический переулок»* находится в понижении рельефа между двумя крупными микрорайонами города – «Горизонт» и «4-й км» (53°02'59.6"N, 158°39'21.2"E). Их разделяет федеральная трасса, соединяющая морской порт Петропавловска-Камчатского и международный аэропорт «Елизово». Также здесь в непосредственной близости расположены гаражно-строительные кооперативы, занимающие территорию площадью свыше 5 тыс. м<sup>2</sup>. Как и в других исследованных участках города, в этом районе довольно часто встречается различный мусор, включая ржавые части автомобилей, бытовой техники и прочее.

*Район «Стадион “Спартак”»* является местом пересечения четырех автодорог (53°01'54.1"N, 158°39'06.4"E), которое в утреннее и вечернее время часто перегружено грузовым, легковым и общественным транспортом. Кроме того, здесь расположены станции технического обслуживания автомобилей и автомойки, а также обширная парковочная зона центрального рынка. С 2018 г. в этом районе активно ведутся строительные работы по реконструкции стадиона. Между тем здесь, напротив стадиона, к участку прилегает северо-западный склон Петровской сопки с естественными насаждениями, преимущественно березы Эрмана.

*Район «Госпиталь»* расположен в непосредственной зоне влияния ТЭЦ-1 и вблизи автодороги, перегруженной в час пик

автотранспортом (52°58'29.5"N, 158°41'42.7"E). На участке находится жилой район СРВ, крупный торговый центр «Шамса» с парковочной зоной, автозаправочная станция, станции обслуживания автомобилей и автомойки. На участке отбора проб из исследуемых растений произрастали только представители ивы, березы и полыни, а в 2020 г. дополнительно был собран вейник.

## 2.2. Древесные и травянистые растения районов исследования

Объектом полевых исследований явились растения, составляющие фитоценозы города Петропавловска-Камчатского. Конкретные виды для анализа отбирались в соответствии со следующими критериями:

- 1) наличием их представителей во всех или большинстве районов города;
- 2) массовым присутствием в пределах участка сбора проб;
- 3) использования их или близких представителей этого же рода из других регионов в качестве биоиндикаторов металлургического загрязнения.

У всех растений для исследования использовали только надземные части, главным образом листовые пластины. Во время отбора проб листьев все растения находились в стадии активной вегетации.

На территориях исследованных районов был осуществлен сбор растений древесного и травянисто-кустарникового ярусов. Экологические факторы районов, влияющие на среду обитания растений, различны, что как следствие отражается на видовом разнообразии фитоценозов. Так, в 2017–2018 гг. в районах «Автостанция 10-й км», «Краевая библиотека» и «Госпиталь» отсутствовала ольха волосистая (*Alnus hirsuta*), на участках «Ботанический переулок» и «Госпиталь» не произрастал шиповник тупоушковый (*Rosa amblyotis*). В фитоценозах всех территорий исследований были собраны пробы листьев березы Эрмана (*Betula ermanii*), ивы удской (*Salix udensis*) и полыни обыкновенной (*Artemisia vulgaris*). На основании результатов исследования 2017–2018 гг. при сборе

растений в 2020 году были исключены такие виды, как *Alnus hirsute* и *Rosa amblyotis*, но также был осуществлен сбор *Calamagrostis langsdorffii*.

Среди представителей древесного яруса береза Эрмана (*B. ermanii*) является самой распространенной из древесных пород юго-восточной Камчатки. В Петропавловске-Камчатском она является эдификатором многих фитоценозов. Каменноберезовые насаждения – самые распространенные в ПКГО. Другим представителем древесного яруса, используемым в исследовании, была ольха волосистая.

Кроме указанных выше видов, во всех районах города встречалась ива. Она относится к древесным растениям, которые являются эдификаторами в сообществах. В г. Петропавловске-Камчатском род *Salix* представлен несколькими видами: *S. caprea*, *S. bebbiana*, *S. Pulchra* и *S. udensis*. Среди них наиболее распространенным на территории города является ива удская. Поскольку в районах исследования встречались разные представители этого рода, то далее в работе для некоторых районов используется обозначение *Salix* spp.

Среди представителей травянисто-кустарникового яруса г. Петропавловска-Камчатского для определения содержания тяжелых металлов использовали представителей шиповника тупоушкового и полыни обыкновенной. Первый вид является кустарником и довольно обычен для юго-восточной Камчатки. Второй представляет собой широко распространенный в условиях города травянистый многолетник. *Calamagrostis langsdorffii* является доминирующим травянистым растением, произрастающим повсеместно в Камчатском крае, в том числе и в Петропавловске-Камчатском. Сбор данного вида происходил только в 2020 г. в целях сравнения полученных данных с результатами исследований Захарихиной Л. В. и Литвиненко Ю. С. (2019б). Также в 2020 г. дополнительно отбирали растительные образцы с территорий, существенно удаленных от районов исследований, Алеутского (о. Беринга, Командорские острова) и Елизовского районов (г. Сарайная, оз. Банное, с. Бархатная, р. Карымшина, подножье вул. Авачинский).

### 2.3. Методика отбора проб растений и почвы

Отбор образцов почвенного и растительного материала производился согласно методическим рекомендациям по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами (1981) и методическим указаниям по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства (1992). Для выполнения полевых работ использовались лопата, ножницы, полиэтиленовые и крафт-пакеты.

На выбранных участках производился отбор почвенных образцов лопатой методом «конверта» (четыре точки в углах площадки и одна в центре) на глубине до 20 см (ГОСТ 17.4.4.02.2017). Также около каждой из пяти точек отбора делалось еще по четыре прикопки. Далее со всех пяти точек отбора формировалась одна объединенная проба. Собранные образцы высыпались на крафт-бумагу и тщательно перемешивались. Масса почвенной пробы для каждого участка составляла 1 кг. В ходе камеральной обработки все объединенные пробы очищали от корней и камней, затем высушивали до воздушно-сухого состояния и просеивали через сито с диаметром отверстий 2 мм. Подготовленная почва хранилась в крафт-пакетах.

Растительный материал отбирался на тех же участках, что и почвы. Каждая проба растений формировалась как объединенный образец массой 0,5–1 кг, собранный из 8–10 точечных проб. Листья растений собирались вручную, а наземная часть травяного покрова срезалась острыми ножницами. В лаборатории пробы высушивались в сушильном шкафу при температуре 60–65°C до воздушно-сухого состояния. Воздушно-сухие пробы измельчались и просеивались через сито с диаметром отверстий 2 мм. Остаток растений на сите после измельчения в ступке добавлялся к основной части и перемешивался. Подготовленные пробы помещались в стеклянную колбу с притертой пробкой для дальнейшего анализа.

## 2.4. Подготовка и химический анализ проб

Подготовку проб к анализу, минерализацию и определение металлов в образцах проводили на базе сектора коллективного использования научного оборудования ФГБОУ ВО «КамчатГТУ». Часть проб растений и почв, собранных в 2017 г., дополнительно анализировали в лаборатории ФГБУ ЦАС «Камчатский» методом атомно-абсорбционной спектрометрии.

Кислотное озоление растительного и почвенного материала выполняли в системе микроволновой подготовки проб Ethos UP (Milestone, Италия) согласно инструкции фирмы-производителя методом DRIED PLANT TISSUE. Навеску образца массой 0,2 г помещали в тефлоновые тигли с реакционной смесью, которая включала 7 мл концентрированной азотной кислоты (марка ос. ч.) и 1 мл деионизированной воды (Milli-Q Direct 8, Merck Millipore, США). Минерализацию проб проводили в течение 25 мин при температуре 200°C. После озоления полученную пробу разбавляли деионизированной водой до общего объема 15 мл и анализировали на атомно-эмиссионном спектрометре с микроволновой плазмой Agilent AES-MP 4200 (Agilent Technologies, США). Вычисление концентраций элементов (Cu, Zn, Pb и Cd) в пробах и предварительную обработку полученных данных проводили в программе MP Expert (Agilent Technologies, США). Конечное значение концентрации каждого элемента в анализируемой пробе определяли как среднее арифметическое значение концентрации пяти параллельных измерений. Контроль точности определения концентраций всех металлов проводился по анализу стандартных образцов (ЛБ-1, ЭК-1, ГСО 3484-86, Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН). Все полученные значения металлов в анализируемых пробах растений и почвенных образцах приведены в расчете на сухую массу (мг/кг).

Пределы обнаружения (LOD) и количественного определения (LOQ) каждого элемента вычисляли как утроенное и десятикратное стандартное отклонение для холостой пробы, критерий  $3\sigma$  и  $10\sigma$  соответственно (Экспериандова и др., 2010). Значения длин волн исследуемых элементов, пределы их обнаружения и количественного определения представлены

в табл. 2.1. Все полученные значения металлов в анализируемых пробах растений и почвенных образцах приведены в расчете на сухую массу (мг/кг). Построение диаграмм и статистическую обработку данных осуществляли в программах Microsoft Office Excel 2013 и GraphPad Prism version 8.4.2 (679).

Таблица 2.1

**Значения длин волн, пределы обнаружения и пределы количественного определения элементов при АЭС-МП методе анализа**

№	Элемент	Длина волны, нм	Предел обнаружения (LOD), мкг/кг	Предел количественного определения (LOQ), мкг/кг
1	Cu	324,754	2,0	6,7
2	Zn	213,857	5,1	17,1
3	Pb	405,781	2,1	7,1
4	Cd	228,802	3,0	10

## 2.5. Методы оценки степени металлического загрязнения районов исследования

Для оценки степени загрязнения тяжелыми металлами компонентов городской среды применяли специальные коэффициенты. Для оценки антропогенного вклада в загрязнение отдельными металлами растений и почвы использовали коэффициент концентрации ( $K_c$ ), аналогом которого в зарубежной практике является индекс загрязнения ( $PI$ ). Для почв исследованных районов рассчитывали коэффициент опасности ( $K_o$ ), индекс загрязнения и индекс геоаккумуляции для каждого элемента. Дополнительно полученные значения металлов в почвенных образцах сравнивали со значениями их ориентировочно-допустимой концентрации (ОДК) согласно ГН 2.1.2041-06.

*Коэффициент концентрации* ( $K_c$ ) определяли отношением фактического содержания определяемого элемента в почве исследуемого участка к его содержанию в почве фонового участка (ГН 2.1.2041-06; Kowalska et al., 2018):

$$K_c = PI = C_i / C_{\phi}, \quad (1)$$

где  $C_i$  – содержание химического элемента в точке опробования;  $C_{\phi}$  – содержание элемента на фоновом участке.  $K_c$  отра-

жает техногенный вклад в загрязнение среды. Для оценки загрязнения почвенной среды используется следующая градация:  $PI < 1$  – загрязнение почв отсутствует;  $1 < PI < 2$  – слабая степень загрязнения;  $2 < PI < 3$  – средняя степень загрязнения;  $3 < PI < 5$  – сильная степень загрязнения;  $PI > 5$  – очень сильная степень загрязнения.

*Коэффициент опасности* ( $K_0$ ) отражает кратность превышения валовой концентрации элемента в почве исследованного района по сравнению с его ОДК:

$$K_0 = C_i / \text{ОДК}_i, \quad (2)$$

где  $C_i$  – валовое содержание химического элемента в точке опробования;  $\text{ОДК}_i$  – ориентировочная допустимая концентрация элемента согласно ГН 2.1.2041-06.

Для оценки загрязнения поверхностного слоя почв конкретным ТМ рассчитывали *индекс геоаккумуляции* (Geoaccumulation Index,  $I_{geo}$ ) (Müller, 1969; Nowrouzi, Pourhabbaz, 2014):

$$I_{geo} = \log_2 \left( \frac{C_i}{1,5GB} \right), \quad (3)$$

где  $C_i$  – содержание металла в почве района исследования;  $GB$  – фоновое содержание металла. Этот показатель ранжирует состояние почв на следующие классы:  $I_{geo} < 0$  – незагрязненные;  $0 < I_{geo} < 1$  – слабая степень загрязнения;  $1 < I_{geo} < 2$  – умеренная степень загрязнения;  $2 < I_{geo} < 3$  – достаточно сильная степень загрязнения;  $3 < I_{geo} < 4$  – сильная степень загрязнения;  $4 < I_{geo} < 5$  – очень сильная степень загрязнения,  $5 < I_{geo} < 6$  – чрезвычайно сильная степень загрязнения.

Для комплексной оценки загрязнения компонентов окружающей среды ТМ использовали следующие индексы:

1. Для оценки степени комплексного загрязнения почвы ТМ использовали *индекс нагрузки загрязнения* (Pollution Load Index,  $PLI$ ) (Varol, 2011):

$$PLI = \sqrt[n]{PI_1 \times PI_2 \times \dots \times PI_n}, \quad (4)$$

при значении  $PLI < 1$  почва относится к категории незагрязненных, при  $PLI = 1$  – степень загрязнения незначительная,  $PLI > 1$  – почва загрязнена.

2. *Потенциальный экологический риск* в результате загрязнения почв ТМ оценивали с помощью следующего показателя (Potential ecological risk, *PERI*) (Hakanson, 1980):

$$PERI = \sum_{i=1}^n E_r^i, \quad (5)$$

где  $E_r^i$  – потенциальный экологический риск отдельных элементов, который определяется по формуле:

$$E_r^i = T_r^i \times PI, \quad (6)$$

где  $T_r^i$  – фактор токсической реакции отдельных элементов для живых организмов, имеющий следующие значения для исследованных металлов: Zn = 1, Cu = 5, Pb = 5 (Hakanson, 1980). Степень потенциального экологического риска зависит от показателя *PERI* и ранжируется следующим образом:  $PERI < 90$  – слабая степень риска,  $90 \leq PERI < 180$  – умеренная степень риска,  $180 \leq PERI < 360$  – сильная степень риска,  $360 \leq PERI < 720$  – очень сильная степень риска,  $PERI \geq 720$  – чрезвычайно высокая степень риска.

3. *Интегрированный индекс загрязнения Немерова (NPI)* оценивает загрязнение почвы, а также оценивает качество почвы (Gong et al., 2008):

$$NPI = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n PI\right)^2 + PI_{\max}^2}{n}}, \quad (7)$$

где  $n$  – количество исследованных металлов,  $PI_{\max}$  – максимальное значение *PI*. Согласно величине *NPI* выделяют пять классов загрязнения:

- 1-й: ( $NPI \leq 0,7$ ) – загрязнение отсутствует;
- 2-й: ( $0,7 < NPI \leq 1$ ) – незначительное загрязнение;
- 3-й: ( $1 < NPI \leq 2$ ) – слабое загрязнение;
- 4-й: ( $2 < NPI \leq 3$ ) – умеренное загрязнение;
- 5-й: ( $3 < NPI$ ) – сильное загрязнение.

4. Для комплексной оценки загрязнения почв и растений тяжелыми металлами применяли *суммарный показатель*

загрязнения ( $Z_c$ ), позволяющий определить степень негативно-го воздействия на среду одновременно несколькими загрязнителями (Саэт и др., 1990). Данный показатель представляет собой сумму коэффициентов концентрации ( $PI$ ) каждого металла:

$$Z_c = \left( \sum_{i=1}^n PI \right) - (n - 1), \quad (8)$$

где  $PI$  – коэффициенты концентраций элементов;  $n$  – число определяемых суммируемых элементов с  $PI > 1$ . В зависимости от полученного значения  $Z_c$  исследуемые почвы относят к определенной категории загрязнения:  $Z_c > 128$  – максимальный, чрезвычайно опасный уровень загрязнения;  $Z_c = 32-128$  – высокий, опасный;  $Z_c = 16-32$  – средний, умеренно опасный;  $Z_c < 16$  – низкий, допустимый уровень (МУ 2.1.7.730-99). Степень загрязнения растительности определяется согласно следующему ранжированию: слабая ( $Z_c < 3$ ); средняя ( $Z_c = 3-10$ ); сильная ( $Z_c > 10$ ) (Касатиков, 1989; Байбеков и др., 2007).

Для используемых в работе видов растений определяли коэффициент биологического поглощения (КБП). Этот показатель является количественной мерой степени поглощения химических элементов растениями и рассчитывается как соотношение содержания металла в золе растений к его содержанию в почве (Перельман, 1961; Ильин, Степанова, 1982). Значения КБП непосредственно зависят от природы элемента и вида растения. Для анализа зависимости от природы исследованных химических элементов прежде всего произведено их ранжирование по интенсивности поглощения. Были выделены следующие градации в зависимости от интенсивности поглощения:

1. Элементы биологического накопления при КБП  $> 1$ :
  - КБП  $\geq 10$  – элементы энергичного накопления;
  - КБП  $< 10$  – элементы сильного накопления.
2. Элементы биологического захвата (КБП  $< 1$ ):
  - КБП =  $0, n$  – элементы слабого накопления и среднего захвата;
  - КБП =  $0, 0n$  – элементы слабого захвата;
  - КБП =  $0, 00n$  и менее – элементы очень слабого захвата.

Для оценки способности вида растения к концентрации элементов рассчитывали *биогеохимическую активность вида* (БХА). Этот показатель представляет суммарную величину, получаемую при сумме коэффициентов биологического поглощения отдельных микроэлементов:  $BXA = \sum KBП_i$  (Айвазян, 1974). В основе его расчета лежит общий эффект накопления микроэлементов в золе растения, складывающийся из его частных «активностей» по отношению к разным химическим элементам. БХА позволяет определить основные различия в интенсивности вовлечения микроэлементов в биологический круговорот различными видами фитоценоза, а также оценить общую интенсивность биотехногенной аккумуляции в условиях конкретного ландшафта.

Описательную статистику и построение графиков выполняли в Microsoft Office Excel 2013 и GraphPad Prism version 8.4.2. Для оценки статистических различий между сравниваемыми группами применяли критерии Манна-Уитни и Тьюки (Mann-Whitney test, Tukey test). Уровень значимости для всех рассчитанных критериев составлял  $p = 0,05$ .

## **ГЛАВА 3. ЭКОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПЕТРОПАВЛОВСК-КАМЧАТСКОГО ГОРОДСКОГО ОКРУГА**

### **3.1. Характеристика почвенного и растительного покрова Петропавловск-Камчатского городского округа**

*Почвы.* Почвы Камчатки являются весьма специфическими для Евразии. Это обусловлено совокупностью факторов их образования, которые не характерны для других районов континента: холодный избыточно влажный климат в приморских районах, разнообразие рельефа местности, особенности растительного покрова, а также особые почвообразующие породы вулканического происхождения (Национальный атлас почв ..., 2011; Иваненко, 2016).

Камчатка – единственное место в России, где влияние современной вулканической деятельности на процесс формирования почв проявляется как мощный фактор почвообразования. Данное воздействие представляет собой периодическое поступление на поверхность почвы пирокластического материала и других продуктов вулканической деятельности. Это происходит с разной интенсивностью и периодичностью и, в общем виде, приводит к поступлению на поверхность почвы свежего минерального материала, погребению сформировавшегося почвенного профиля или к его существенному омоложению, формированию полигенетичных слоистых профилей, состоящих из нескольких наложенных друг на друга элементарных профилей. Масштабы проявления вулканической деятельности зависят от удаленности от действующего вулкана (Белоусова, Хохлов, 2014).

Для всех почв Камчатки характерен процесс выщелачивания, обуславливающий кислую реакцию и ненасыщенность почв основаниями; наличие иллювиально-гумусовых горизонтов при образовании почв в условиях хорошего дренажа

и присутствие глеевых горизонтов – при затрудненном дренаже. Для почвенного покрова края характерна слоистость профиля, легкий механический состав, рыхлость сложения, бедность элементов питания, слабость микробиологических процессов, бедность беспозвоночными. Биологическую активность почв сдерживает заболачивание и островная вечная мерзлота. Разложение растительных остатков идет медленно, что способствует накоплению грубого гумуса. Наибольшая концентрация питательных веществ характерна для верхнего слоя почвы. Характерна также слабая выраженность подзолообразовательного процесса (Соколов, Белоусова, 1966).

Геохимический фон почв Камчатки определяется химическим составом пеплов, на которых образованы почвы. Корневая система растений, проникающая на значительную глубину, пронизывает в том числе и кислые продукты извержений вулканов, что приводит к проявлению сложных по составу миграционных биогеохимических и гидрогеохимических процессов. В результате в приповерхностных почвенных горизонтах локальные участки с повышенными концентрациями элементов, характерных для основных пеплов, могут чередоваться с участками их выноса и переотложения элементов из более глубоких кислых горизонтов, что приводит к значительному увеличению разброса значений местного геохимического фона. Вулканические почвы Камчатки характеризуются устойчивой медной специализацией, а количество избыточных элементов в почвах зависит от состава пеплов, в которых они сформированы (Литвиненко, Захарихина, 2008).

Вхождение в состав пеплов преимущественно вулканического стекла и незначительного количества силикатных минералов определяет их низкий геохимический потенциал как источник химических элементов для почв. Общий уровень обеспеченности вулканических почв Камчатки для растений подвижными формами Mn, Co, Mo и Zn – низкий. В число элементов, встречающихся в надкларковых концентрациях в разных районах почвенных провинций Камчатки, входят Sc, V, Cr, Mn, Co, Cu, Zn, Ag и P; наиболее низкие содержания в почвах характерны для B, Y, Zr, Nb, Mo, Sn, Ba, Pb (Захарихина, 2009).

На Камчатке выделены четыре основные почвенные провинции: северная, центральная, западная и юго-восточная. Почвы Петропавловск-Камчатского городского округа относятся к юго-восточной провинции и были образованы под влиянием активной вулканической деятельности в условиях холодного гумидного климата. Эти почвы были сформированы в андезито-базальтовых пеплах вулкана Ксудач. Для них характерна наибольшая концентрация марганца и цинка по сравнению с другими почвенными провинциями Камчатки (Литвиненко, Захарихина, 2008).

Петропавловск-Камчатский характеризуется охристыми типичными почвами, реакция среды которых кислая и слабокислая. Почвы города принципиально не отличаются от почв юго-восточной Камчатки, но находятся в локальной зоне выпадения молодых пеплов действующих вулканов (Авачинский и Корякский), что способствует формированию узкоспецифичных почвенных зон (Карпачевский и др., 2009).

*Растения.* Своеобразие растительного мира Камчатки обусловлено целым рядом факторов: географическим положением территории, воздействием влажного муссонного климата, преимущественно горным рельефом, историей развития ландшафтов, воздействием вулканизма и сопутствующих ему явлений и процессов (Якубов, 2007).

Во флоре Камчатки насчитывается 1 166 видов и подвидов сосудистых растений, среди которых 183 вида (16%) являются заносными (Якубов, Чернягина, 2004). В естественной флоре преобладают представители основных семейств бореальной флористической области – сложноцветных, осоковых и злаковых. Своеобразие камчатской флоры придают современное видообразование и молодой эндемизм (18 видов сосудистых растений являются камчатскими эндемиками), которые связывают с относительно молодым геологическим возрастом территории и воздействием современного вулканизма.

В Камчатском крае выделено 12 флористических районов: Северный, Окланский, Пенжинский, Горно-Пенжинский, Паропольский, Корякский, Западный, Срединный, Центральный, Восточный, Южный и Командорский. Петропавловск-Камчатский относится к Южному флористическому району.

Он характеризуется редкостойными лесами из каменной березы, или березы Эрмана, и преобладанием крупнотравя (Белая и др., 1981). В целом береза Эрмана является наиболее распространенной лесообразующей породой на полуострове и занимает 70% территории, покрытой лесом.

Растительность ПКГО отличается широким распространением травяно-сфагново-гипновых болот на аккумулятивных равнинах и в устьях крупных рек, кустарничковых тундр (шишковников) на дренированных участках приморских равнин, также характерно развитие приморских лугов на аккумулятивных приморских террасах. На нормально дренированных местообитаниях встречаются кустарниково-разнотравные, вейниковые и папоротниковые каменноберезняки. Сообщества ольхового и кедрового стлаников распространены на склонах приморских холмов и увалов. Общая площадь лесов города составляет 13 170 га (36% территории). Леса характеризуются преобладанием каменных березняков (73% всех покрытых лесом земель), меньшая площадь занята пойменными лесами (11% земель) и стланиками (16% земель). Особенности лесов являются разреженность древостоя, слабо развитый подрост и подлесок. Развита луговая и болотная растительность. Флора города Петропавловска-Камчатского представлена 269 видами сосудистых растений, относящихся к 181 роду и 46 семействам (Девятова, 2016).

Древесные растения краевого центра представлены *Betula ermanii*, *B. platyphylla*, *Alnus hirsuta*, *Rosa amblyotis*, *Populus suaveolens*, *Sorbus sambucifolia*, *Crataegus chlorosarca*, *Salix udensis*, *Duschekia fruticosa*, *Acer negundo*, *Malus domestica*, *Rubus idaeus* и др. Травянистые растения в основном являются поликарпическими и включают семейства, которые составляют основную часть флористического спектра города Петропавловска-Камчатского – Asteraceae, Poaceae, Brassicaceae, Polygonaceae, Caryophyllaceae и др. (Девятова, 2016).

Растительный покров города не отличается богатым видовым разнообразием, фитоценозы отдельных районов могут изменяться в зависимости от антропогенной нагрузки, а также от локальных особенностей естественных условий среды (эдафические, орографические и климатические факторы).

### **3.2. Природные (естественные) и антропогенные источники загрязнения тяжелыми металлами окружающей среды**

*Естественные источники.* К естественным источникам поступления тяжелых металлов в окружающую среду в Камчатском крае прежде всего относится вулканическая деятельность. Всего на Камчатке более 300 вулканов, в их числе 29 считаются действующими. Из последних ежегодно от трех до восьми находятся в состоянии извержения или активизации. Также ежегодно происходит от 4 до 20 эруптивных событий с выбросом пеплов до 7–15 км над уровнем моря (Гирина и др., 2015). Извержения вулканов сопровождаются поступлением на поверхность рыхлых вулканических продуктов – пепла, песка, пемзы и шлака.

Пеплы некоторых извержений формируют обширные ареалы площадью сотни тысяч квадратных километров. Так, пепел извержения вулкана Ксудач прослеживается практически на всем полуострове на расстоянии до 900 км от центра извержения, пепел извержения Авачинского вулкана – на расстоянии около 400 км (Карпачевский и др., 2009). В момент извержения вулканические пеплы обладают высокой сорбционной способностью. Благодаря этому в процессе извержения и далее при движении от источника до места выпадения пеплы могут сорбировать на своей поверхности химические вещества из газовой тучи, в том числе микроэлементы.

На территории Камчатского полуострова исторически сложились условия почвообразования, связанные с деятельностью вулканических центров, поставлявших на поверхность Земли продукты извержений, контрастно отличающиеся по составу. Как следствие, химический состав растительного покрова определяется стабильным входением в состав приоритетных химических элементов для растений, вулканических пеплов и почв: Ca, Mg, Mn, P, Cu, Zn и Sr. На территории поступления молодых вулканических пеплов в ближайших окрестностях вулканов установлено относительное богатство химическими элементами растительности и бедность почв подвижными формами элементов. На удалении от вулканов в зоне выпадений

пеплов дальнего переноса отмечается, напротив, сравнительная бедность растений и богатство почв доступными химическими элементами (Захарихина, Литвиненко, 2019б).

Петропавловск-Камчатский располагается в непосредственной близости от группы вулканов, два из которых (Корякский и Авачинский) – действующие, также город относится к зоне влияния вулкана Ксудач. Состав атмосферы Петропавловска-Камчатского напрямую зависит от выбросов пепла и газа во время извержений, т. к. в воздух попадает большое количество химических элементов (Mn, Co, Mo, Cu, Zn, B) и их соединений. Характеристики почв города и их элементный состав также непосредственно зависят от вулканической активности. Пеплопады могут способствовать привнесению в почвенный покров таких элементов, как Sc, V, Cr, Mn, Co, Cu, Zn, Ag, P, B, Y, Zr, Nb, Mo, Sn, Ba и Pb.

*Антропогенные источники.* Согласно оценке суммарной антропогенной нагрузки на природные комплексы Камчатки, проведенной в середине прошлого десятилетия, территория Петропавловск-Камчатской городской агломерации относится к категориям сильного или критического воздействия (Жириченко, Чернягина, 2006). Это обусловлено главным образом тем, что в краевом центре расположено более 60% промышленных предприятий региона. Поступление тяжелых металлов в городскую среду происходит в результате выбросов предприятий теплоэнергетики и автотранспорта. Также во всех районах города наблюдается захламление территорий отходами, включая металлолом и другой металлосодержащий мусор (Авдощенко, Климова, 2020а).

Объекты теплоэнергетики являются значимым источником поступления загрязнителей в атмосферный воздух. Теплоснабжение жилищного фонда и объектов социальной сферы ПКГО обеспечивается работой 41 теплоисточника, включающих ТЭЦ-1, ТЭЦ-2 и 39 котельных (рис. 3.1). В 2010 и 2012 годах началось использование природного газа как основного топлива на ТЭЦ-2 и ТЭЦ-1. Однако на данный момент остро стоит проблема, связанная с дефицитом объемов газа на месторождении, т. к. запасы оказались ниже ожидаемых, и в настоящее

время в зимний период ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 уже переходят на резервное топливо – топочный мазут. В большинстве котельных городского округа в качестве основного топлива используется топочный мазут, при сжигании которого окислы азота и серы, окись углерода, сажа, бенз(а)пирен, тяжелые металлы и другие токсичные вещества поступают с дымовыми газами в атмосферу. Несколько котельных города работают на угле (Постановление № 2603 ..., 2020).

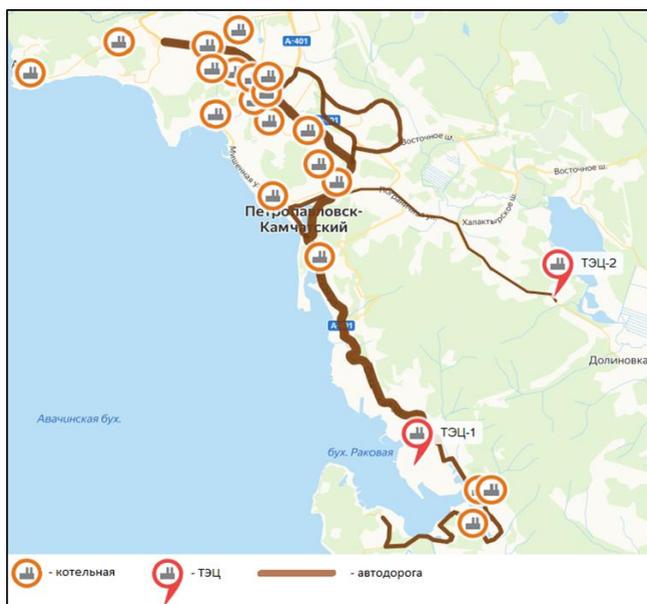


Рис. 3.1. Карта-схема мест размещения объектов теплоэнергетики (ТЭЦ, котельные) на территориях г. Петропавловска-Камчатского

По данным УМВД России по Камчатскому краю, ежегодно здесь наблюдается рост единиц транспортных средств при уменьшении численности населения: так, в 2020 г. зарегистрировано 220 403 единицы автотранспортных средств (из них 159 817 легковых машин), большая часть которых приходится на город Петропавловск-Камчатский при населении 313,0 тыс. человек, что делает край лидером по показателю количества легковых автомобилей на 1 000 человек (Фед. служба гос. статистики. Транспорт, 2021).

Особенности рельефа, отсутствие в некоторых районах дорожного покрытия являются причиной распространения автомобилей-внедорожников с мощным двигателем, выбрасывающих значительно больше выхлопных газов, чем легковые. В выхлопных газах двигателей внутреннего сгорания содержатся окись углерода, окись азота, углеводороды, альдегиды, сажа, бенз(а)пирен, тяжелые металлы и другие загрязняющие вещества (Доклад об экол. ситуации ..., 2019). Современная планировка Петропавловска-Камчатского не рассчитана на текущее количество личного автотранспорта, в связи с этим для города характерно формирование стихийных парковок, в том числе и в зеленых зонах. Количество общественного городского пассажирского транспорта на начало 2020 г. составило 185 единиц. Для личного и общественного автотранспорта края в целом характерны длительный срок эксплуатации и низкие технические характеристики (Доклад об экол. ситуации ..., 2020).

На территории Петропавловска-Камчатского повсеместно встречаются места складирования отходов разного состава, происхождения, которые могут быть опасными. В целом в крае за последние 5 лет отмечается тенденция к увеличению образовавшихся отходов (Доклад об экол. ситуации ..., 2019). Несанкционированное размещение отходов также является причиной поступления в почву, водную среду, атмосферный воздух токсичных элементов, включая тяжелые металлы. Отходы захламляют город, создают свалки, наносят вред не только окружающей среде, но и здоровью населения (Доклад об экол. ситуации ..., 2019, 2020).

По климатическим условиям полуостров Камчатка относится к зоне повышенного потенциала загрязнения атмосферы, то есть характеризуется низкой рассеивающей способностью атмосферы. Неблагоприятные условия для рассеивания вредных примесей создаются за счет приземных и приподнятых инверсий, застойных явлений, слабых скоростей ветра и туманов (Доклад об экол. ситуации ..., 2019). По данным ежегодных отчетов о состоянии и загрязнении атмосферы в городах на территории России и докладов о состоянии окружающей

среды в Камчатском крае за период 2014–2019 гг., загрязнение атмосферы Петропавловска-Камчатского тяжелыми металлами оценивается как незначительное (Доклад о состоянии ..., 2019; Ежегодник состояния и загрязнения ..., 2019; Доклад о состоянии ..., 2020). Вместе с тем в городе наблюдается тенденция к увеличению концентрации взвешенных веществ. (Ежегодник состояния и загрязнения ..., 2019).

Климатической особенностью Камчатского края и г. Петропавловска-Камчатского является затяжной зимний период, и как следствие – наличие снежного покрова большую часть года. В его составе содержатся практически все вещества, поступающие в атмосферу, которые в дальнейшем мигрируют в педо- и гидросферу. Зимой наблюдается повышение концентрации различных химических веществ в атмосфере, обусловленное ухудшением метеорологических условий рассеяния примесей, увеличением количества промышленных выбросов, замедлением химических процессов трансформации веществ при низкой температуре воздуха. По этим причинам в снежном покрове накапливается основная масса атмосферных поллютантов (Ступникова, Салихова, 2016). Исследования снежного покрова показали невысокую степень его загрязнения. (Ступникова, Салихова, 2016; Голохваст и др., 2014). Среди загрязнителей встречаются металлосодержащие частицы, в некоторых случаях с повышенным содержанием цинка. Высокая доля сажевых и металлических наночастиц содержится в снеге зон дорожных авторазвязок (Голохваст и др., 2014).

Важно отметить, что в 2020 г. во всех районах мирах наблюдалось снижение загрязнения окружающей среды в целом и отдельных ее компонентов, это связано с ограничительными мерами из-за распространения новой коронавирусной инфекции, в частности, существенное значение имело уменьшение количества передвижений на транспорте, и, как следствие – снижение выбросов (Гинзбург и др., 2020; Kerimgray et al., 2020; Wang et al., 2020; Le Quéré et al., 2020). Необходимо заметить, что ограничения, связанные с распространением коронавируса, безусловно, положительно повлияли на качество

воздуха и других компонентов урбосистем, но для комплексной оценки данных изменений и выявления их роли в общем загрязнении необходимо рассматривать и другие факторы: возможные погодные особенности этого периода, вклад отдельно каждого источника загрязнения, включая природные, локальные источники воздействия, такие как несанкционированные свалки, сжигание мусора на территориях частных владений и др. Город Петропавловск-Камчатский не являлся исключением, поэтому при проведении исследования этот фактор учитывался.

## ГЛАВА 4. ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ ПОЧВ ГОРОДА ПЕТРОПАВЛОВСКА-КАМЧАТСКОГО

### 4.1. Валовое содержание тяжелых металлов в почвенном покрове

Все основные циклы миграции тяжелых металлов в биосфере начинаются в почве, поскольку именно в ней происходит их мобилизация и образование различных миграционных форм. Почвы – это их природный накопитель и в то же время основной источник загрязнения сопредельных сред, включая биологические компоненты. Определение содержания ТМ в почвах территорий позволяет не только оценить степень ее загрязнения, но понять перераспределение токсичных элементов в экосистеме и, в первую очередь в системе «почва – растение».

В почвах исследованных территорий города Петропавловска-Камчатского (районы «Госпиталь», «Стадион “Спартак”», «Ботанический переулок», «Краевая библиотека» и «Автостанция 10-й км») и в его окрестностях (фоновый участок у озера Синичкино) было определено валовое содержание тяжелых металлов (Cu, Zn, Pb и Cd) в летние периоды 2017, 2018 и 2020 гг.

*Медь.* Все почвенные провинции Камчатки характеризуются устойчивой медной специализацией (Захарихина, Литвиненко, 2018). Как отмечалось ранее, территория Петропавловск-Камчатской городской агломерации входит в состав юго-восточного района южной провинции, для которого среднее значение валового содержания меди (геохимический фон района,  $C_{\phi}$ ) в почвах составляет 33,83 мг/кг (Захарихина, Литвиненко, 2019а).

В 2017 г. валовое содержание меди в почвах исследуемых районов города существенно не отличалось от геохимического фона для юго-восточной Камчатки (рис. 4.1). Заметно меньшее

ее значение было выявлено в фоновом участке – 22,64 мг/кг и аномально низкое в районе «Стадион “Спартак”» – 12,68 мг/кг. Наибольшее содержание меди определено в районе «Автостанция 10-й км» (37,65 мг/кг). При сравнении содержания этого элемента в почвах города с фоновым участком наблюдалось превышение меди во всех районах исследования (рис. 4.1). Исключение составило, как и в случае с геохимическим фоном меди, определенное значение для района «Стадион “Спартак”». Учитывая разницу содержания металла в исследуемых территориях к фоновому участку ( $K_c$ ), выделен следующий ряд уменьшения его накопления: «Автостанция 10-й км» (1,67)  $\geq$  «Ботанический переулок» (1,63)  $>$  «Краевая библиотека» (1,56)  $>$   $>$  «Госпиталь» (1,41)  $>$  «Стадион “Спартак”» (0,56) (табл. 4.1).

В 2018 г. диапазон содержания меди в почвах города составил 27,95–42,36 мг/кг (табл. 4.1). Районом с наибольшей ее концентрацией в этот период являлся «Ботанический переулок», здесь было отмечено превышение геохимического фона и значения фонового участка в 1,25 и 2,62 раза соответственно (рис. 4.1). Так же, как и в 2017 г., концентрация меди в почвах всех исследованных территорий города превышала таковую для фонового участка. В 2018 г. почвы города накапливали медь в следующем убывающем порядке: «Ботанический переулок» ( $K_c = 2,62$ )  $>$  «Краевая библиотека» (2,27)  $>$   $>$  «Госпиталь» (2,15)  $>$  «Автостанция 10-й км» (1,81)  $>$  «Стадион “Спартак”» (1,73) (рис. 4.1; табл. 4.1).

В 2020 г. диапазон содержания меди на исследованных участках варьировал от 12,6 мг/кг на фоновом участке до 88,47 мг/кг в районе «Краевая библиотека». В почвах всех районов наблюдалось превышение геохимического фона и показателей фонового участка. Так, в почве территории «Краевая библиотека» значение меди было больше в 7 раз значений фонового участка, а также в 2,6 раза выше геохимического фона. Убывающий ряд по степени аккумуляции меди в почве города имеет следующий вид: «Краевая библиотека» ( $K_c = 7,02$ )  $>$  «Стадион “Спартак”» (4,92)  $>$  «Госпиталь» (3,66)  $>$   $>$  «Автостанция 10-й км» (3,21)  $>$  «Ботанический переулок» (2,82) (рис. 4.1).

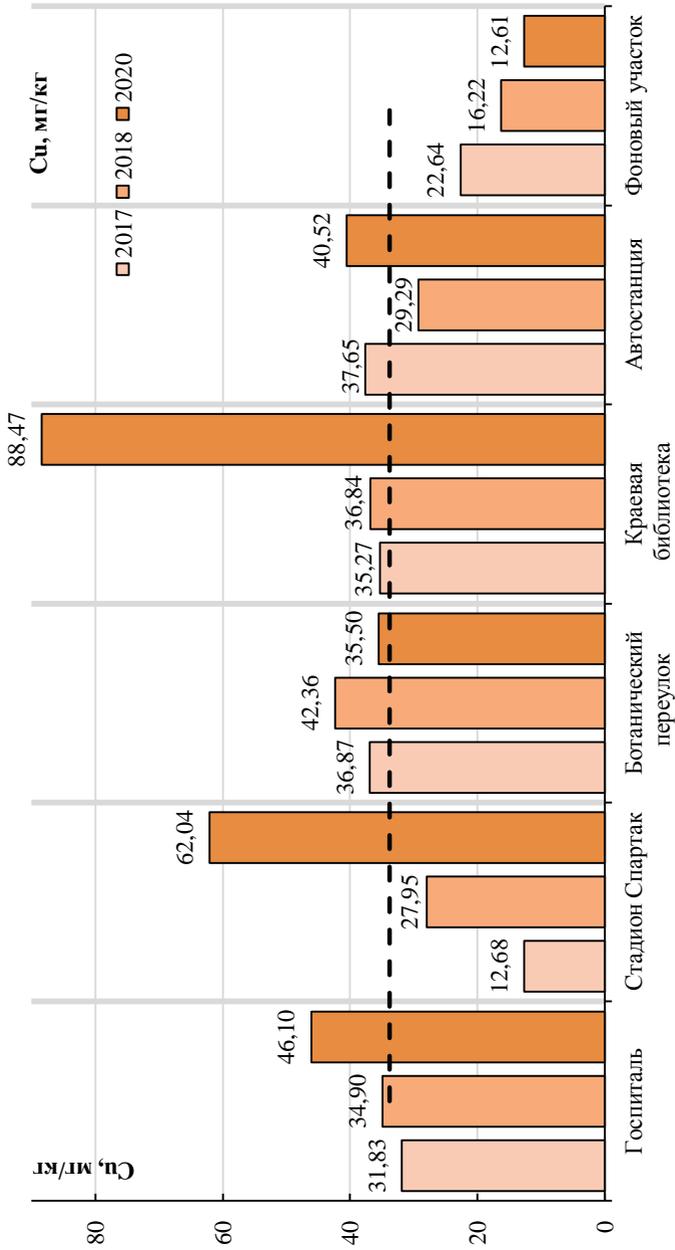


Рис. 4.1. Валовое содержание меди в почвах исследуемых районов г. Петропавловска-Камчатского в летние периоды 2017, 2018 и 2020 гг. Пунктирной линией отмечен геохимический фон меди для южной провинции (юго-восточный район) Камчатки – 33,83 мг/кг

Таблица 4.1

**Уровень содержания и ряды накопления меди в почвах  
исследованных районов г. Петропавловска-Камчатского**

Год	Уровень содержания меди, мг/кг	Ряд уменьшения содержания меди в исследуемых районах
2017	12,68–37,65	«Автостанция 10-й км» ≥ «Ботанический переулок» > «Краевая библиотека» > «Госпиталь» > «Стадион “Спартак”»
2018	27,95–42,36	«Ботанический переулок» > «Краевая библиотека» > «Госпиталь» > «Автостанция 10-й км» > «Стадион “Спартак”»
2020	35,5–88,47	«Краевая библиотека» > «Стадион “Спартак”» > «Госпиталь» > «Автостанция 10-й км» > «Ботанический переулок»

В летние периоды 2017, 2018 и 2020 гг. во всех районах города наблюдалось превышение фонового значения меди, что связано преимущественно с природными особенностями. В районе «Стадион “Спартак”» ее содержание в 2020 г. увеличилось более чем в 2 раза по сравнению с 2018 г. и в 4 раза – по сравнению с 2017 г. Вероятно, существенное повышение концентрации меди здесь может быть связано с началом строительных работ в данной части города в 2018 г., а также активным этапом стройки в 2020 г.

На всех участках, кроме фонового и «Ботанический переулок», было выявлено увеличение концентрации металла в почве в сравнении с предыдущими годами исследования. Возможно, это следствие сочетанного влияния естественных процессов (вулканическая деятельность) и антропогенного фактора (увеличение количества автотранспорта и локальных источников загрязнения). Противоположная ситуация – снижение валового содержания меди в 2018 г., выявлена для районов «Автостанция 10-й км» и фоновый участок, в 2020 г. – для фонового участка и района «Ботанический переулок». По всей вероятности, такая тенденция может быть обусловлена активной аккумуляцией этого элемента растениями, его миграцией в глубинные слои почвы, а также уменьшением локальных источников загрязнения для первого из указанных районов.

*Цинк.* Для полуострова Камчатка характерно повышенное содержание этого металла в вулканических почвах (Захарихина, Литвиненко, 2018, 2019а). Так, геохимический фон цинка для юго-восточного района Камчатки составляет 65,31 мг/кг (Захарихина, Литвиненко, 2019а) (рис. 4.2).

В летний период 2017 г. содержание цинка варьировало в диапазоне 7,03–65,75 мг/кг (табл. 4.2). Наибольшая его концентрация выявлена в районе «Краевая библиотека», наименьшая – в районе «Стадион “Спартак”». Во всех исследованных районах, исключая участок «Краевая библиотека», зарегистрирован дефицит этого металла в почвах по отношению к геохимическому фону (рис. 4.2). Однако сравнивая содержание цинка в городской среде с фоновым участком, в большинстве районов было выявлено его двукратное превышение. Аномально низкая его концентрация была определена в почвах района «Стадион “Спартак”» (рис. 4.2). Последовательность районов по уменьшению цинка в почвах города в 2017 г. образует следующий ряд: «Краевая библиотека» ( $K_c = 2,61$ ) > «Госпиталь» (2,34) > «Ботанический переулок» (2,13) > «Автостанция 10-й км» (2,02) > «Стадион “Спартак”» (0,28) (рис. 4.2; табл. 4.2).

В 2018 г. концентрация цинка в почвах города изменялась в пределах 40,21–64,54 мг/кг (табл. 4.2). Во всех исследованных участках его содержание было ниже геохимического фона (рис. 4.2). При сравнении аккумуляции цинка в почвах городской среды с фоновым участком выявлено превышение от 1,7 до 2,8 раза. В 2018 г. накопление цинка в почвах г. Петропавловска-Камчатского происходило в следующем убывающем порядке: «Госпиталь» ( $K_c = 2,84$ ) > «Стадион “Спартак”» (2,62) > «Краевая библиотека» (2,56) > «Ботанический переулок» (2,38) > «Автостанция 10-й км» (1,77) (табл. 4.2).

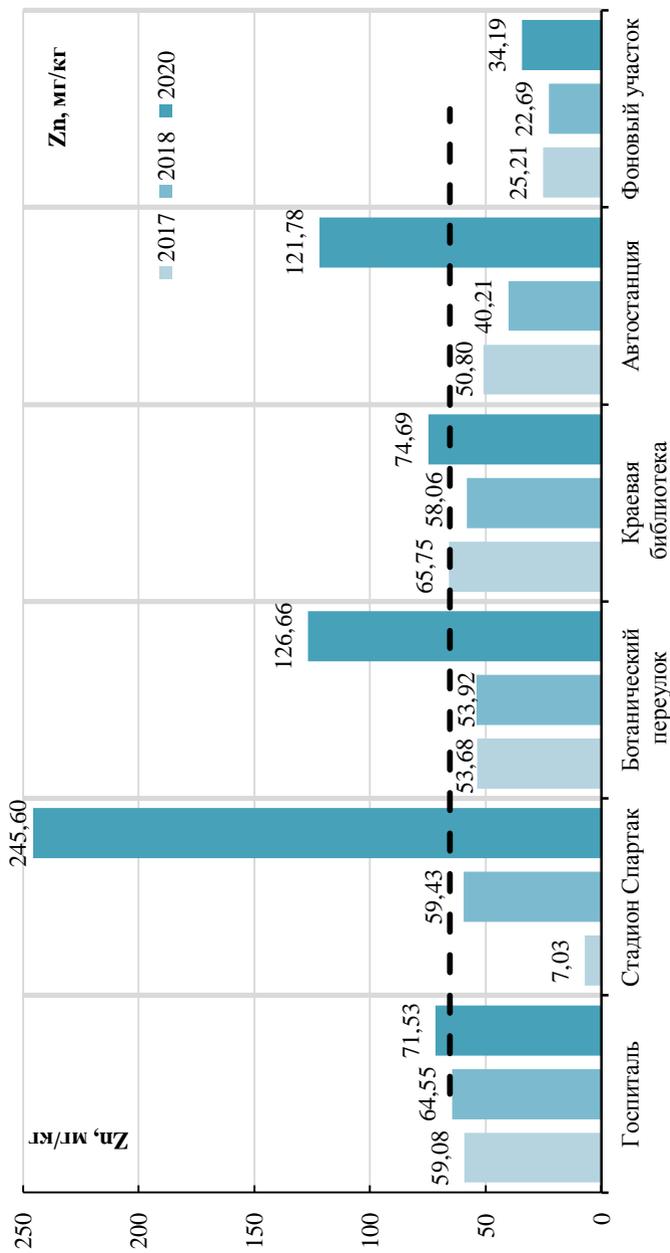


Рис. 4.2. Валовое содержание цинка в почвах исследуемых районов г. Петропавловска-Камчатского в летние периоды 2017, 2018 и 2020 гг. Пунктирной линией отмечен геохимический фон цинка для южной провинции (юго-восточный район) Камчатки – 65,31 мг/кг

Таблица 4.2

**Уровень содержания и ряды накопления цинка в почвах  
исследованных районов г. Петропавловска-Камчатского**

Год	Уровень содержания цинка, мг/кг	Ряд уменьшения содержания цинка в исследуемых районах
2017	7,03–65,75	«Краевая библиотека» > «Госпиталь» > «Ботанический переулок» > «Автостанция 10-й км» > «Стадион “Спартак”»
2018	40,21–64,54	«Госпиталь» > «Стадион “Спартак”» > «Краевая библиотека» > «Ботанический переулок» > «Автостанция 10-й км»
2020	71,53–245,6	«Стадион “Спартак”» > «Ботанический переулок» > «Автостанция 10-й км» > «Краевая библиотека» > «Госпиталь»

В 2020 г. диапазон содержания цинка в исследованных районах был от 34,19 до 245,6 мг/кг. Наибольшее значение было выявлено в районе «Стадион “Спартак”», наименьшее – на фоновом участке. В почве всех участков показатели содержания цинка превышали геохимический фон и показатели фонового участка, в районе «Стадион “Спартак”» концентрация была выше в 3,8 раза значений геохимического фона и в 7,1 – фонового участка. Последовательность районов по уменьшению цинка в почвах города в 2020 г. может быть представлена в следующем виде: «Стадион “Спартак”» ( $K_c = 7,18$ ) > «Ботанический переулок» (3,70) > «Автостанция 10-й км» (3,56) > «Краевая библиотека» (2,18) > «Госпиталь» (2,09).

В целом, изменения значений концентрации металлов в почвах исследованных территорий в 2018 г. по сравнению с 2017 г. были незначительными, однако в 2020 г. наблюдается скачок значений в почве всех участков. Так, в районе «Стадион “Спартак”» концентрация металла в 2018 г. была в 8 раз выше, чем в 2017 г., а в 2020 г. – в 35 раз. О возможных причинах значительного роста концентрации указывалось ранее. Для районов «Госпиталь» и «Ботанический переулок» характерно незначительное увеличение содержания в 2018 г., а в 2020 г. были выявлены концентрации в 1,2 и 2,4 раза выше значений 2017 г. В остальных районах в 2018 г. было обнаружено

меньшее содержание цинка, что может быть связано с более активной его аккумуляцией растениями и другими причинами, обозначенными выше при обсуждении особенностей накопления меди в почвах города.

*Свинец.* Среднее значение валового содержания (геохимический фон района) этого металла в почвах юго-восточной Камчатки составляет 7,96 мг/кг и в целом для региона не превышает 9,82 мг/кг (Захарихина, Литвиненко, 2019а). В летний период 2017 г. уровень его накопления в почвах исследованных территорий города варьировал значительно: от 8,80 до 68,70 мг/кг (рис. 4.3; табл. 4.3). Наибольшее содержание свинца определено в почвенных образцах из района «Госпиталь», наименьшее – в районе «Стадион “Спартак”». Во всех исследованных территориях отмечено превышение геохимического фона: незначительное для фонового участка и района «Стадион “Спартак”» и существенное для остальных районов города (рис. 4.3). Последовательность районов по уменьшению свинца в почвах городской среды в 2017 г. может быть представлена в следующем виде: «Госпиталь» ( $K_c = 6,87$ ) > > «Автостанция 10-й км» (5,15) > «Краевая библиотека» (3,92) > > «Ботанический переулок» (1,11) > «Стадион “Спартак”» (0,88) (рис. 4.3; табл. 4.3).

В 2018 г. содержание свинца в почвах города изменялось в широком диапазоне – от 40,37 до 309,76 мг/кг (табл. 4.3). Для всех исследуемых районов, исключая фоновый участок, отмечено значительное превышение геохимического фона этого элемента для почв юго-восточной Камчатки (рис. 4.3). Среди районов г. Петропавловска-Камчатского наименьшая концентрация свинца была выявлена в районе «Автостанция 10-й км», наибольшая – на участке «Ботанический переулок». В 2018 г. накопление свинца в почвах города происходило в следующем убывающем порядке: «Ботанический переулок» ( $K_c = 47,66$ ) > «Госпиталь» (10,60) > «Стадион “Спартак”» (9,17) > «Краевая библиотека» (6,81) > «Автостанция 10-й км» (6,21) (рис. 4.3; табл. 4.3).

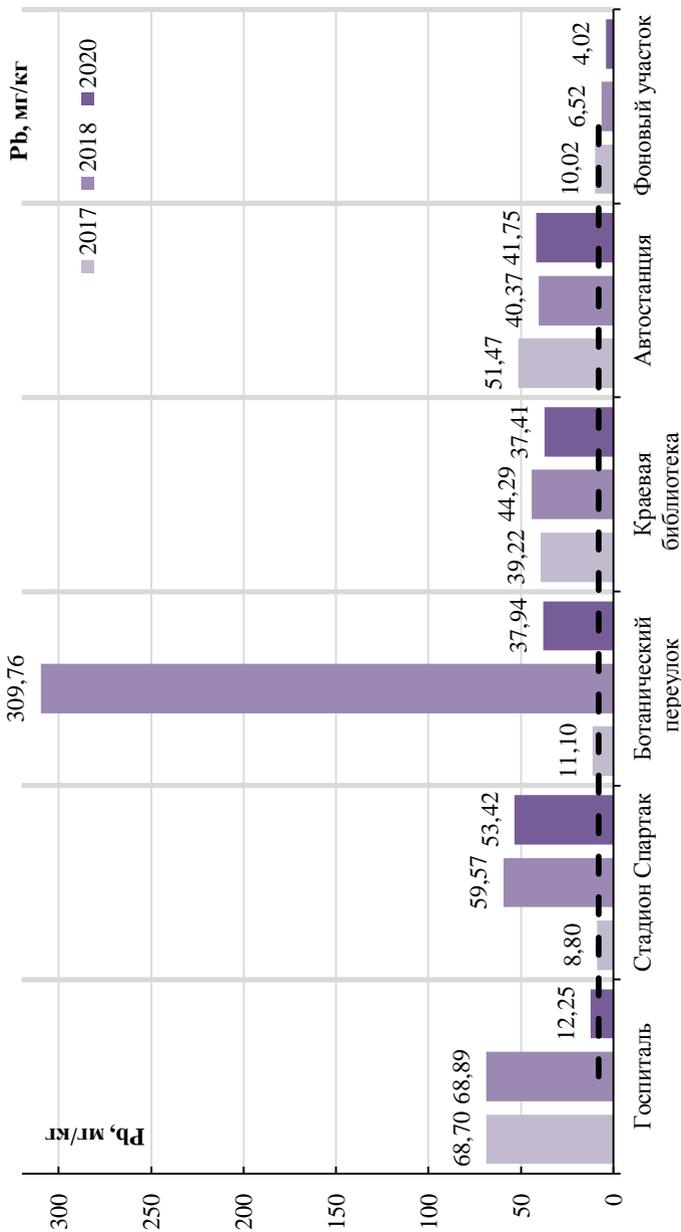


Рис. 4.3. Содержание свинца в почвах исследуемых районов г. Петропавловска-Камчатского в летние периоды 2017, 2018 и 2020 гг. Пунктирной линией отмечен геохимический фон свинца для южной провинции (юго-восточный район) Камчатки – 7,96 мг/кг

Таблица 4.3

**Уровень содержания и ряды накопления свинца в почвах  
исследованных районов г. Петропавловска-Камчатского**

Год	Уровень содержания свинца, мг/кг	Ряд уменьшения содержания свинца в исследуемых районах
2017	8,80–68,70	«Госпиталь» > «Автостанция 10-й км» > «Краевая библиотека» > «Ботанический переулок» > «Стадион “Спартак”»
2018	40,37–309,80	«Ботанический переулок» > «Госпиталь» > «Стадион “Спартак”» > «Краевая библиотека» > «Автостанция 10-й км»
2020	12,25–53,42	«Стадион “Спартак”» > «Автостанция 10-й км» > «Ботанический переулок» > «Краевая библиотека» > «Госпиталь»

В 2020 г. изменение концентрации свинца в районах исследования было выявлено в пределах от 4,02 до 53,42 мг/кг. Для всех городских районов исследования характерно превышение геохимического фона. На всех участках, кроме участка «Автостанция 10-й км», наблюдалось снижение содержания свинца в почве. Наибольшая концентрация была выявлена в почве района «Стадион “Спартак”», которая превышает геохимический фон и концентрацию в почве фонового участка в 6,7 и в 13,3 раза соответственно. Последовательность районов по уменьшению свинца в почвах городской среды в 2020 г. может быть представлена в следующем виде: «Стадион “Спартак”» ( $K_c = 13,29$ ) > «Автостанция 10-й км» (10,38) > «Ботанический переулок» (9,44) > «Краевая библиотека» (9,30) > «Госпиталь» (3,05) (рис. 4.3; табл. 4.3).

Динамика изменения концентрации свинца в почве города за период 2017–2018 гг. была выражена незначительно, исключением являлся район «Стадион “Спартак”». Резкое увеличение концентрации свинца (в 6,8 раза) в почве данного района в 2018 г. было выявлено и в случаях с другими проанализированными металлами (Cu и Zn), возможная причина указывалась ранее. Для района «Краевая библиотека» отмечено увеличение содержания этого металла в 2018 г., для района «Автостанция 10-й км» и фонового участка выявлено снижение,

аналогичная обстановка отмечалась для меди. В 2020 г. наблюдалось снижение показателей содержания свинца во всех районах исследования, кроме участка «Автостанция 10-й км», где было выявлено незначительное увеличение концентрации металла по сравнению с другими годами исследования. Возможно, это связано с сокращением передвижений на автотранспорте из-за ограничений, связанных с распространением коронавирусной инфекции.

*Кадмий.* Валовое содержание металла в почвах Камчатки варьирует от 0,17 до 0,26 мг/кг, его геохимический фон для юго-восточного района полуострова оценивается в 0,2 мг/кг (Захарихина, Литвиненко, 2019а). Во всех исследованных районах содержание кадмия было выявлено в значениях менее предела количественного определения методом АЭС-МП (менее 0,01 мг/кг). По этой причине при оценке металлического загрязнения почв г. Петропавловска-Камчатского его значения не учитывались.

Согласно МУ 2.1.7.730-99 и СанПиН 2.1.7.1287-03, превышение в исследуемых почвах содержания токсичных металлов в 2 и более раз относительно фоновых значений характеризует их как загрязненные. Среднее содержание рассмотренных тяжелых металлов в почвах районов города в летние периоды 2017, 2018 и 2020 гг. существенно превосходило фоновые значения, полученные для расположенного у озера Синичкино участка (табл. 4.4).

Таблица 4.4

**Усредненные значения коэффициентов концентрации  
тяжелых металлов в почвах г. Петропавловска-Камчатского  
за период 2017, 2018 и 2020 гг.**

Район	Тяжелые металлы		
	Cu	Zn	Pb
«Госпиталь»	2,2	2,4	7,3
«Стадион “Спартак”»	2	3,8	5,9
«Ботанический переулок»	2,2	2,9	17,4
«Краевая библиотека»	3,1	2,4	5,9
«Автостанция 10-й км»	2,1	2,6	6,5

Для меди в районе «Краевая библиотека» среднее содержание ТМ составило 3,1 Ф, для цинка в районе «Стадион

«Спартак»» – 3,8 Ф. Для свинца во всех исследованных почвах города среднее значение коэффициента концентрации ТМ было выше 5,0 Ф, максимальное превышение отмечено в районе «Ботанический переулок» (17,4 Ф).

В общем, стабильно низкое суммарное содержание меди, цинка и свинца выявлено в почвенных образцах фонового участка, его значение за период исследований не превышало 60 мг/кг (рис. 4.4). Наибольший вклад в металлическое загрязнение почв города, судя из представленных выше данных, вносит свинец. Аккумуляция металлов почвой г. Петропавловска-Камчатского уменьшается в следующей последовательности:  $Pb > Zn > Cu$ . Важно отметить, что для ненарушенных почв юго-восточной Камчатки убывающий ряд концентраций этих металлов имеет другую последовательность:  $Cu > Zn > Pb$  (Захарихина, Литвиненко, 2019а).

В 2017 г. в почвах района «Стадион «Спартак»» была выявлена аномально низкая для городской среды суммарная концентрация всех исследуемых тяжелых металлов – менее 30 мг/кг (рис. 4.4). Это значительно ниже суммы значений геохимического фона для этих элементов в почвах юго-восточной Камчатки. И, вероятно, связано с рельефом места отбора проб, поскольку часть почвенных образцов отбиралась на склоне сопки Петровская. Однако в 2018 и 2020 гг. здесь наблюдался резкий скачок содержания всех металлов в почве. Возможная причина таких изменений – начало реконструкции стадиона, а также увеличение количества автотранспорта в городе.

Суммарное содержание металлов в почвах остальных районов города существенно превышало таковое для фонового участка за аналогичный период (рис. 4.4). В 2017 г. наиболее загрязнены свинцом и медью были районы «Автостанция 10-й км» и «Госпиталь», цинком – «Краевая библиотека». В 2018 и 2020 гг. ситуация поменялась – наибольшее загрязнение было отмечено на территориях районов «Ботанический переулок» и «Стадион «Спартак»» соответственно. Рельеф участка «Ботанический переулок» способствует поступлению загрязнителей со стоком с жилых районов и прилегающих дорог.

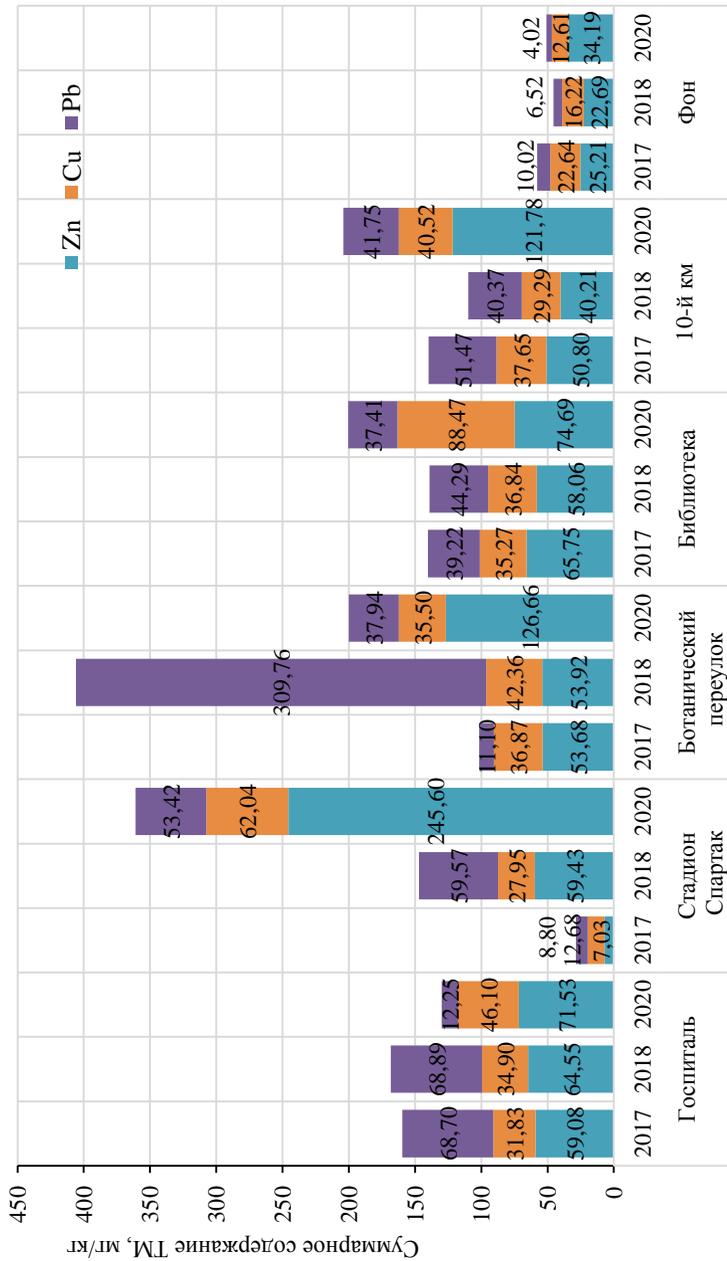


Рис. 4.4. Суммарное содержание тяжелых металлов в почвенном покрове г. Петрозаводска-Камчатского и фонового участка в 2017, 2018 и 2020 гг.

Содержание тяжелых металлов в почве сильно зависит от всех факторов природной среды, учет которых в полной степени невозможен. Так, изменение свойств почвы по различным причинам (кислотность, гранулометрический состав, содержание и состав гумуса) может оказывать влияние на концентрацию металлов и на доступность их для растений. Поэтому концентрация тяжелых металлов фонового участка может быть выше, чем в районах урбанизированной среды. Но немаловажно и то, что в условиях городской среды сложно в полной мере учесть влияние антропогенного фактора, которое визуально незаметно, но может привносить загрязнители, включая тяжелые металлы, на выбранный фоновый участок.

#### **4.2. Оценка степени металлического загрязнения почв г. Петропавловска-Камчатского**

Для оценки степени загрязнения почв тяжелыми металлами при санитарно-гигиеническом нормировании используют предельно допустимые и ориентировочно допустимые концентрации, ПДК и ОДК соответственно (ГН 2.1.7.2041-06, ГН 2.1.7.2511-09). Дополнительно для отнесения почв к той или иной категории загрязнения применяют максимальные допустимые уровни содержания химических веществ по показателю вредности ( $K_{\max}$ ). Также обязательно учитывается класс опасности загрязнителя. Нормативные значения всех указанных выше показателей для металлов, рассмотренных в пункте 4.1, представлены в табл. 4.5. Среди проанализированных в почвах г. Петропавловска-Камчатского ТМ медь относится ко II классу опасности, цинк и свинец являются одними из наиболее опасных неорганических загрязнителей почв и включены в I группу токсичности. Оценка загрязнения почвы каждым из тяжелых металлов проводили отдельно с учетом превышения их содержания ПДК/ОДК и  $K_{\max}$  (табл. 4.6). Также дополнительно оценивали индивидуальные индексы геохимического состояния исследованных почв города ( $I_{geo}$ ,  $PI$ ).

Часто определение загрязнения ТМ в почвах городов и других территорий, вовлеченных в хозяйственную деятельность человека, проводят сравнительным методом, т. е.

полученные данные по содержанию загрязнителя в среде сравнивают с фоновыми участками, не подвергающимися техногенному воздействию или испытывающими его в минимальной степени (МУ 2.1.7.730-99). В тех случаях, когда выделение таких участков невозможно, используют средние массовые доли элементов в почвах мира (кларк, мг/кг) (Виноградов, 1957).

Таблица 4.5

**Значения нормативных показателей, используемых для оценки степени загрязнения почв тяжелыми металлами (ГН 2.1.7.2041-06; ГН 2.1.7.2511-09; Виноградов, 1957)**

Металл	Класс опасности	$K_{\max}$ , мг/кг	ПДК, мг/кг	ОДК, мг/кг	Кларк, мг/кг
Cu	II	72*	–	66	20
Zn	I	200*	–	110	50
Pb	I	260	32	–	10

*Примечание.* \* – значения для подвижных форм. В остальных случаях значения приведены для валового содержания металла в почве.

Таблица 4.6

**Оценка степени загрязнения почв тяжелыми металлами (МУ 2.1.7.730-99; СанПин 2.1.7.1287-03)**

Категория загрязнения	Оценка по отдельному элементу		Полиэлементная оценка
	Класс опасности I	Класс опасности II	Суммарный показатель загрязнения ( $Z_c$ )
Допустимая	От 2 фоновых значений до ПДК	От 2 фоновых значений до ПДК	< 16
Умеренно опасная	–	–	16–32
Опасная	От ПДК до $K_{\max}$	От ПДК до $K_{\max}$	32–128
Чрезвычайно опасная	> $K_{\max}$	> $K_{\max}$	> 128

Для комплексной оценки загрязнения почв тяжелыми металлами применяют суммарный показатель загрязнения ( $Z_c$ ). Этот показатель позволяет определить степень негативного воздействия на среду одновременно несколькими загрязнителями.  $Z_c$  представляет собой сумму коэффициентов концентрации ( $K_c$ )

каждого металла и является безразмерной величиной. В зависимости от его значения исследуемые почвы относят к определенной категории загрязнения (табл. 4.6).

В почвах г. Петропавловска-Камчатского содержание  $Cu$  за весь период исследования не превышало установленных в России значений ПДК/ОДК, исключением являлся участок «Краевая библиотека» в 2020 г. (табл. 4.5; 4.6; рис. 4.1). Максимальная концентрация  $Cu$  в почве города в 2017 г. составила 37,65 мг/кг; в 2018 г. – 42,36; значение ОДК этого металла соответствует 66 мг/кг (табл. 4.5; рис. 4.1). В случае с цинком превышение установленных в России значений ПДК/ОДК было выявлено только в 2020 г. на участках «Стадион “Спартак”», «Ботанический переулок» и «Автостанция 10-й км». Максимальное содержание цинка в исследованных почвах за период 2017–2018 гг. не превышало 65,75 мг/кг, что значительно ниже ОДК (110 мг/кг) (табл. 4.5; рис. 4.2). Практически во всех районах исследования в летние периоды 2017, 2018 и 2020 гг. содержание свинца было выше показателя ПДК, кроме участков «Стадион “Спартак”» (2017 г.), «Ботанический переулок» (2017 г.), «Госпиталь» (2020 г.) и фонового (табл. 4.5; рис. 4.3).

В 2017 г. загрязнение почв  $Cu$  можно охарактеризовать как минимальное, аналогичная ситуация была выявлена в 2018 г. на участках «Автостанция 10-й км», «Стадион “Спартак”». К почвам с допустимым уровнем загрязнения  $Cu$  в 2018 г. относились районы «Госпиталь», «Ботанический переулок» и «Краевая библиотека», а в 2020 г. – все районы, кроме участка «Краевая библиотека» (табл. 4.6; рис. 4.1).

Городские почвы с допустимым уровнем загрязнения цинком были выявлены во всех районах г. Петропавловска-Камчатского, за исключением участков «Стадион “Спартак”» (2017 г.) и «Автостанция 10-й км» (2018 г.). Содержание загрязнителя здесь было минимальным относительно фоновых значений (табл. 4.6; рис. 4.2).

За период 2017–2018 гг. практически все исследованные почвы города по валовому содержанию  $Pb$  были отнесены к опасной категории загрязнения. Двукратное превышение

значений ПДК зарегистрировано в районе «Госпиталь». В 2018 г. концентрация свинца в районе «Ботанический переулок» достигла критических значений, соответственно загрязнение почвы здесь можно охарактеризовать как чрезвычайно опасное. Минимальная степень воздействия (содержание Pb соответствовало геохимическому фону для почв юго-восточной Камчатки) зарегистрирована в 2017 г. в районах «Стадион “Спартак”» и «Ботанический переулок» (табл. 4.5; рис. 4.3).

Концентрация свинца в 2020 г. уменьшилась во всех районах, за исключением участка «Автостанция 10-й км», однако в большинстве исследованных почвенных образцов города («Стадион “Спартак”», «Ботанический переулок», «Краевая библиотека», «Автостанция 10-й км») содержание металла соответствовало опасной категории загрязнения.

Анализ индексов геоаккумуляции выявил слабую степень загрязнения поверхностного слоя городских почв Cu и Zn за период 2017–2018 гг. (рис. 4.5, А). Вероятно, это обусловлено в целом повышенным геохимическим фоном этих металлов в почвах юго-восточной Камчатки. В 2020 г. в некоторых районах города степень загрязнения, основанная на значениях  $I_{geo}$  для Cu и Zn, достигала умеренного и достаточно сильного уровня. В отношении индекса геоаккумуляции Pb почвы города в среднем характеризовались умеренной (2017 г.) и достаточно сильной (2018 и 2020 гг.) степенью загрязнения (рис. 4.5, А). Однако были выявлены отдельные участки с сильной – «Стадион “Спартак”» ( $I_{geo} = 3,15$ ) и очень сильной степенью загрязнения почвы – «Ботанический переулок» ( $I_{geo} = 4,98$ ).

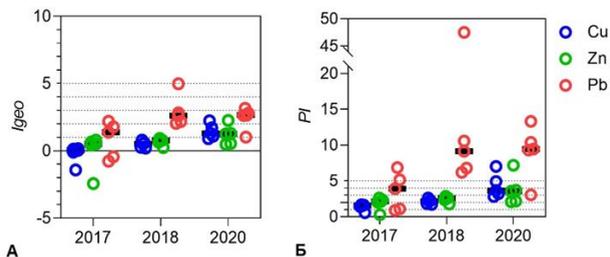


Рис. 4.5. Показатели загрязнения почв г. Петропавловска-Камчатского отдельно медью, цинком и свинцом:  $I_{geo}$  – индекс геоаккумуляции (А),  $PI$  – индекс загрязнения (Б)

Полученные значения индекса загрязнения  $PI (= K_c)$  для почв г. Петропавловска-Камчатского во многом повторяли выявленные для  $I_{geo}$  закономерности (рис. 4.5; 4.6). В отношении Cu и Zn характерно ежегодное увеличение значений  $PI$ . В 2020 г. они достигли максимума в районах «Краевая библиотека» –  $PI(Cu) = 7,02$  и «Стадион “Спартак”» –  $PI(Zn) = 7,18$  (рис. 4.5, Б) и соответствовали сильной степени загрязнения. В целом по накоплению меди и цинка для большинства исследованных почв города установлены слабая и средняя степени загрязненности. Для свинца выявлен наиболее широкий диапазон изменений значений индекса загрязнения среди исследуемых металлов: от 0,9 до 47,5 (рис. 4.5, Б). В почвах отдельных районов его значения снижались в сравнении с предыдущим годом. Однако практически во всех урбанизированных территориях индекс  $PI$ , рассчитанный на основе содержания свинца в почвах, соответствовал очень сильной степени загрязнения (рис. 4.5, Б).

Оценку уровня полиметаллического загрязнения почв города проводили с учетом коэффициентов концентрации металлов ( $K_c$ ) и суммарных показателей загрязнения ( $Z_c$ ) за период 2017, 2018 и 2020 гг. (рис. 4.6). Коэффициенты концентрации элементов позволяют оценить антропогенный вклад в загрязнение конкретным металлом исследованных районов. Накопление свинца в исследованных почвах несомненно обусловлено воздействием антропогенного фактора городской среды, как было показано выше, диапазон вариативности  $K_c (Pb)$  составлял 0,88–47,66 (рис. 4.5; 4.6). Аккумуляция Zn и Cu в почвах города детерминирована в большей степени природными факторами, их коэффициенты концентрации изменялись в пределах 0,28–7,18 и 0,56–7,02 соответственно (рис. 4.5; 4.6).

Рассчитанный на основе коэффициентов концентрации суммарный показатель загрязнения ( $Z_c$ ) продемонстрировал, что в почвах всех исследованных районов за период 2017–2018 гг. был выявлен допустимый уровень загрязнения ТМ (рис. 4.6). Единственное исключение отмечено в 2018 г. для участка «Ботанический переулок», здесь  $Z_c$  был равен 50,6, что соответствует

опасной категории загрязнения. В 2020 г. к категории умеренно опасного загрязнения относились районы «Стадион “Спартак”» и «Краевая библиотека» (рис. 4.6).

Поскольку фоновые значения ТМ, полученные для расположенного за пределами города района, отличались от геохимического фона для юго-восточной Камчатки, то дополнительно провели расчет  $Z_c$  с учетом кларков (табл. 4.5; рис. 4.7). В этом случае суммировали отношения фактического содержания металла в почве участка к его кларку. Таким образом,  $Z_c$  выступает как более унифицированный показатель загрязнения среды без учета локальных геохимических аномалий.

Учитывая полученные значения показателя суммарного загрязнения (рис. 4.6; 4.8, Г), можно выделить следующий ряд уменьшения комплексного воздействия ТМ на исследуемые участки в 2017 г.: «Госпиталь» ( $Z_c = 8,62$ ) > «Автостанция 10-й км» (6,83) > «Краевая библиотека» (6,09) > «Ботанический переулок» (2,87)  $\geq$  «Стадион “Спартак”» (2,72). Для 2018 г. последовательность убывания загрязнения иная: «Ботанический переулок» ( $Z_c = 50,65$ ) > «Госпиталь» (13,60) > «Стадион “Спартак”» (11,51) > «Краевая библиотека» (9,65) > «Автостанция 10-й км» (7,79). В целом, в 2018 г. прослеживается возрастание суммарного загрязнения почв г. Петропавловска-Камчатского медью, цинком и свинцом. В 2020 г. ряд уменьшения комплексного воздействия ТМ на исследуемые участки имеет следующий вид: «Стадион “Спартак”» (23,4) > > «Краевая библиотека» (16,5) > «Автостанция 10-й км» (15,2) > > «Ботанический переулок» (14,0) > «Госпиталь» (6,8). Результаты оценки состояния загрязнения почв города с использованием кларков ТМ при расчете значений суммарного показателя были аналогичны указанным выше относительно фонового участка (рис. 4.6; 4.7).

Ниже для дополнительной характеристики металлического загрязнения почв районов исследования также рассчитывали индекс нагрузки загрязнения (*PLI*), показатель потенциального экологического риска (*PERI*) и интегрированный индекс загрязнения Немерова (*NPI*). Результаты расчетов в сравнении с полученными выше значениями суммарного показателя загрязнения  $Z_c$  представлены на рис. 4.8.

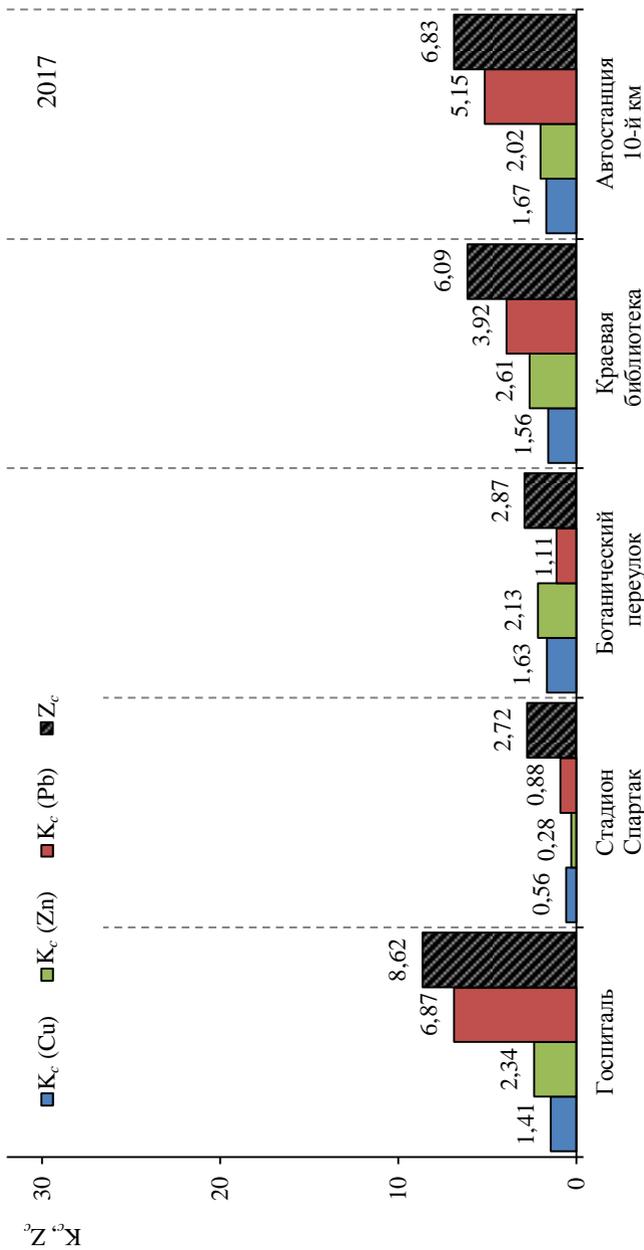


Рис. 4.6. Коэффициенты концентрации ( $K_c$ ) цинка, меди, свинца и значения суммарного показателя загрязнения ( $Z_c$ ) в почвах исследуемых районов г. Петропавловска-Камчатского в летние периоды 2017, 2018 и 2020 гг. Вычисления показателей выполнены относительно содержания металлов на фоновом участке (см. также с. 66, 67)

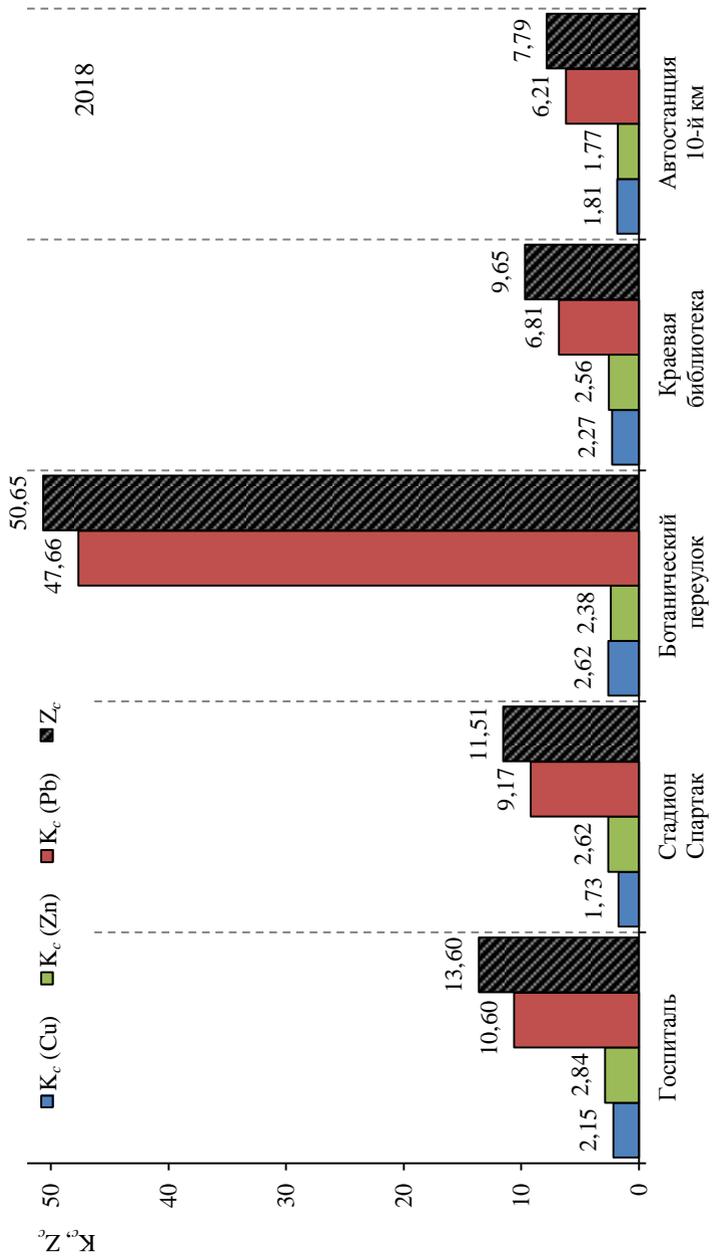


Рис. 4.6. Продолжение

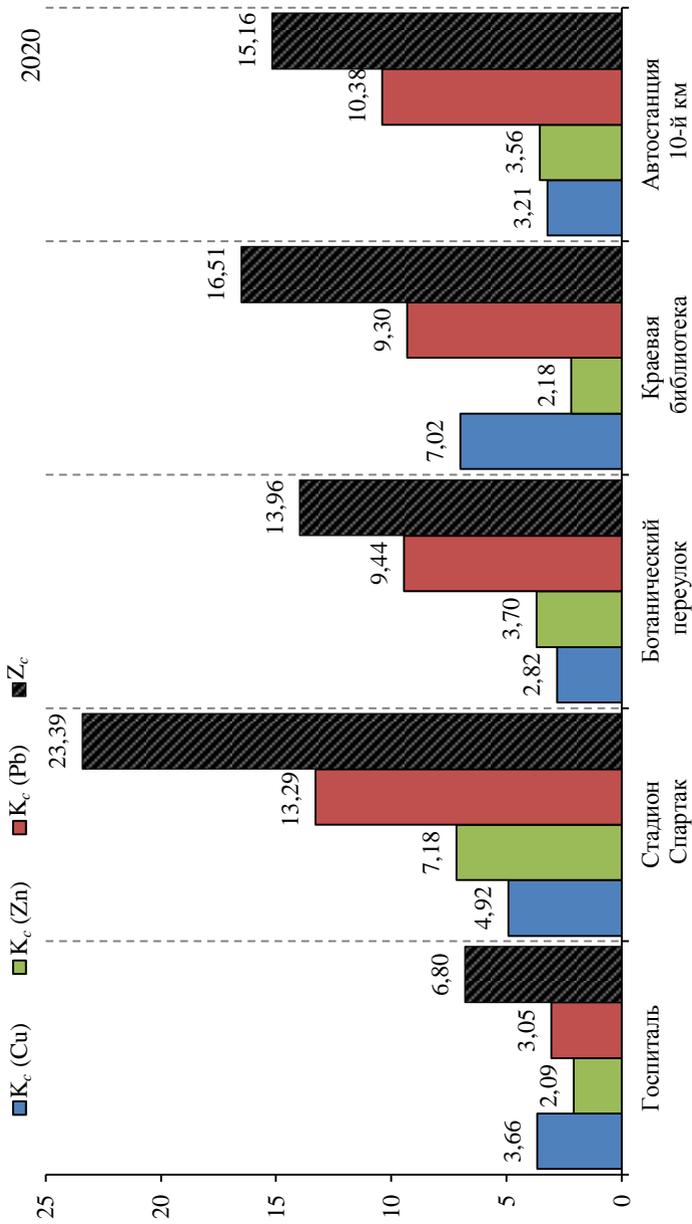


Рис. 4.6. Окончание

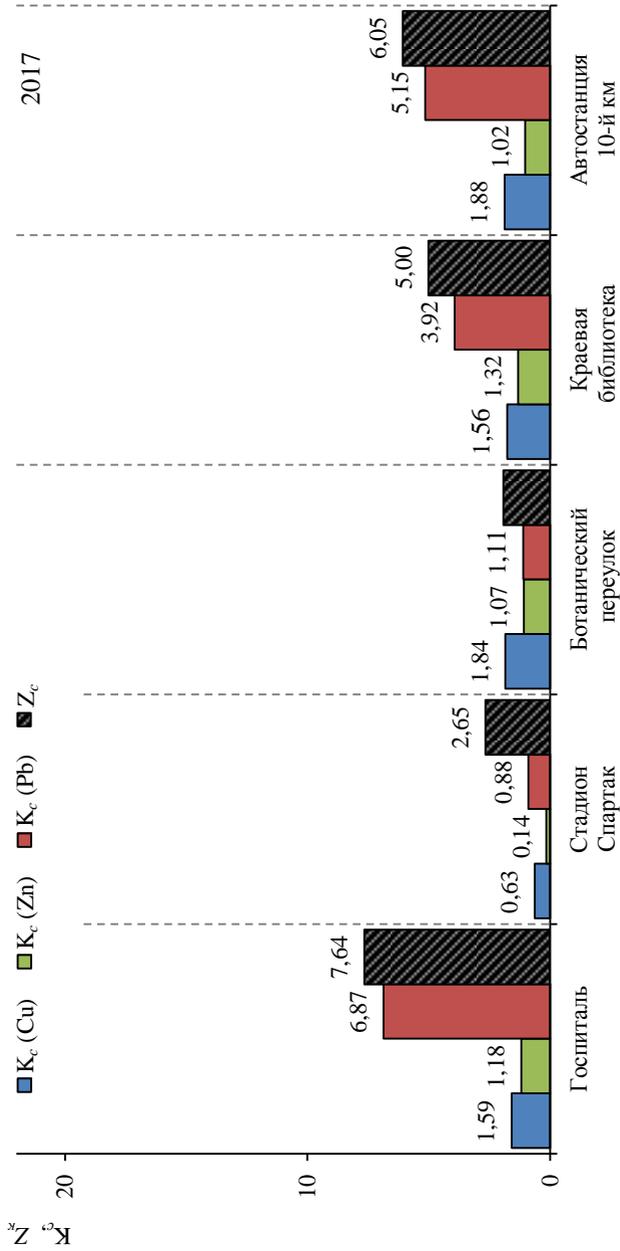


Рис. 4.7. Коэффициенты концентрации ( $K_c$ ) цинка, меди, свинца и значения суммарного показателя загрязненности ( $Z_c$ ) в почвах исследуемых районов г. Петропавловска-Камчатского в летние периоды 2017, 2018 и 2020 гг.  
Вычисления показателей выполнены с учетом кларков (см. также с. 69, 70)

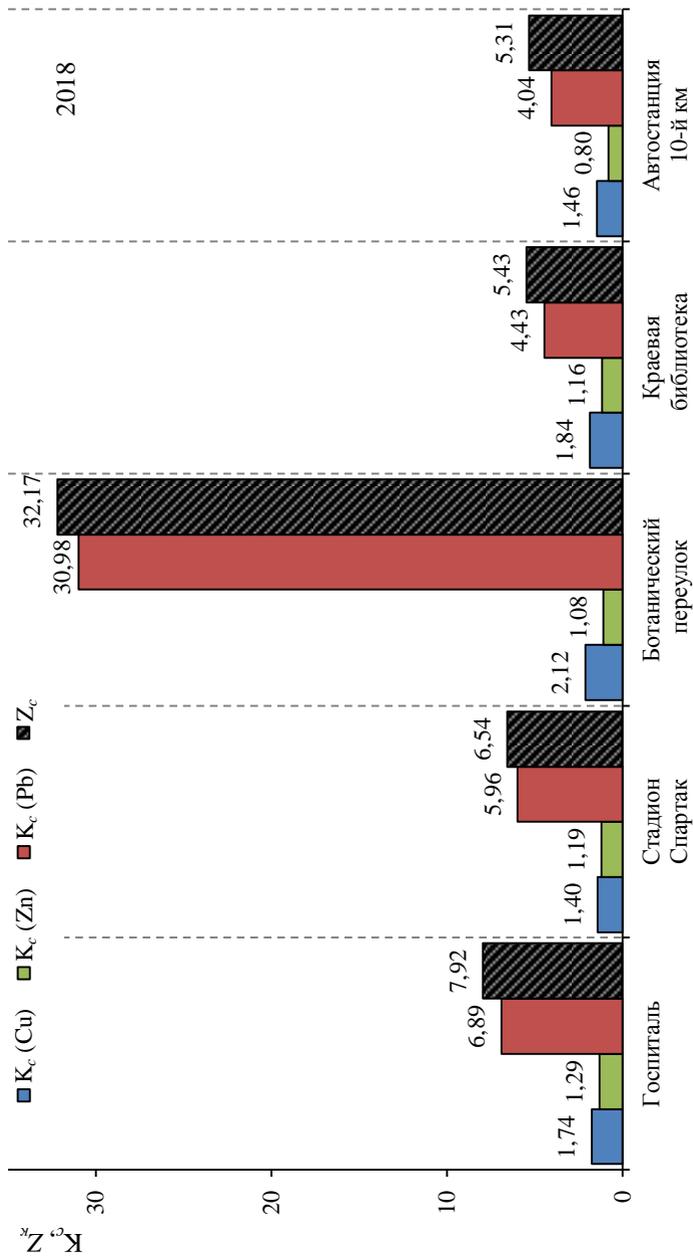


Рис. 4.7. Продолжение

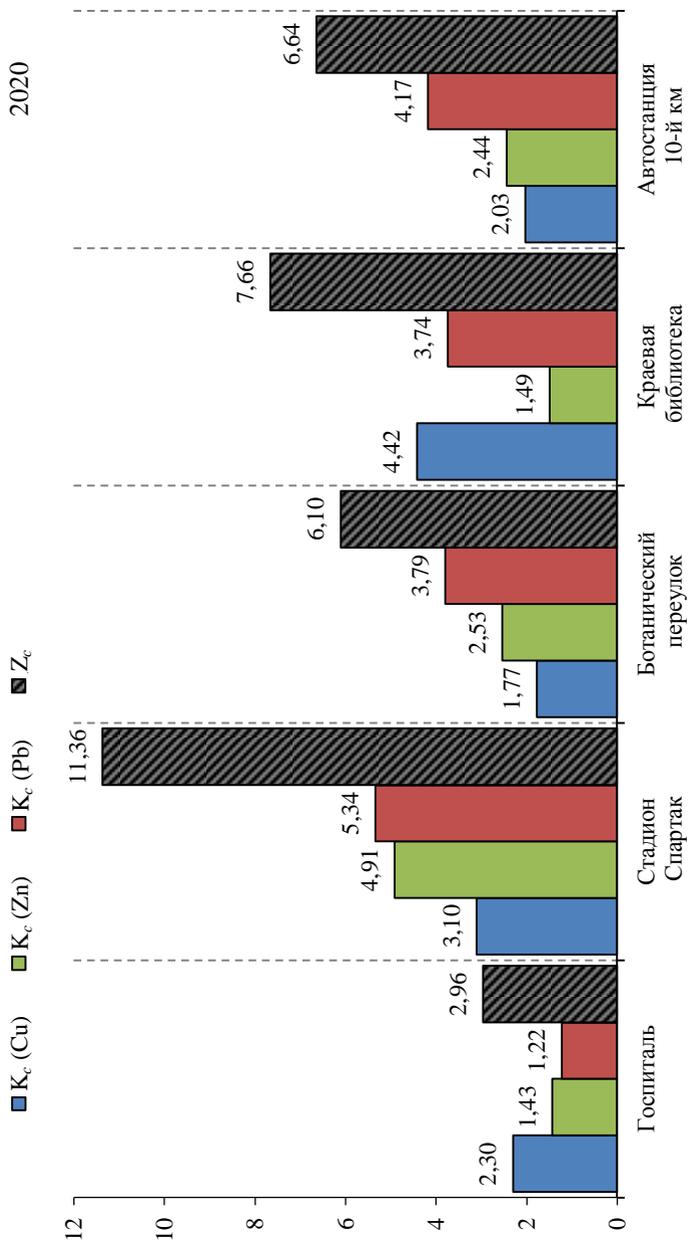


Рис. 4.7. Окончание

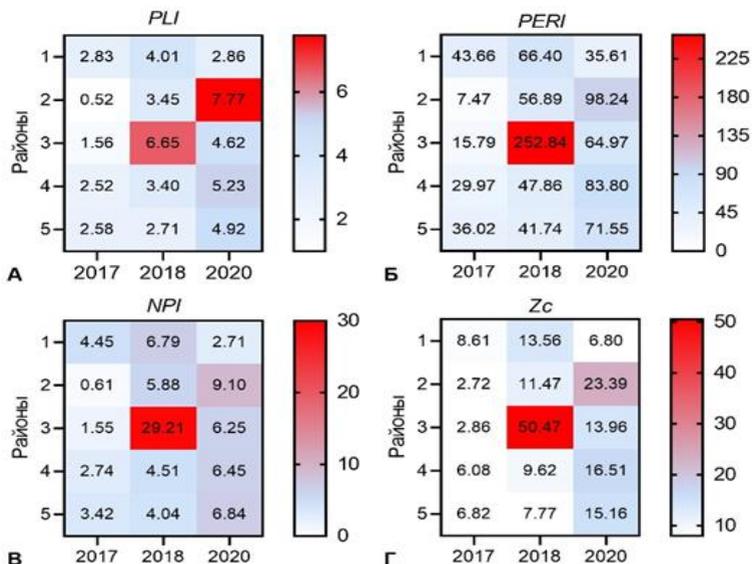


Рис. 4.8. Показатели комплексного загрязнения тяжёлыми металлами почв исследуемых районов г. Петропавловска-Камчатского (*PLI*, *PERI*, *NPI*, *Zc*): 1 – «Госпиталь»; 2 – «Стадион “Спартак”»; 3 – «Ботанический переулок»; 4 – «Краевая библиотека»; 5 – «Автостанция 10-й км»

В районе «Стадион “Спартак”» индекс нагрузки загрязнения в 2020 г. имел наибольшее значение, а в 2017 г. – наименьшее. Ряд уменьшения нагрузки на участки по величине *PLI* в 2017 г. имел следующий вид: «Госпиталь» > «Автостанция 10-й км» > «Краевая библиотека» > «Ботанический переулок» > «Стадион “Спартак”». Аналогичный ряд в 2018 г. представлен последовательностью: «Ботанический переулок» > «Госпиталь» > «Стадион “Спартак”» > «Краевая библиотека» > «Автостанция 10-й км». В 2020 г. последовательность районов по уменьшению индекса нагрузки загрязнения представлена следующим образом: «Стадион “Спартак”» > «Краевая библиотека» > «Автостанция 10-й км» > «Ботанический переулок» > «Госпиталь». Почвы всех районов исследования загрязнены, исключением является участок «Стадион “Спартак”» в 2017 г. На участках «Автостанция 10-й км», «Краевая библиотека» и «Стадион “Спартак”» отмечена положительная динамика изменения показателя *PLI* с 2017 по 2020 гг. (рис. 4.8).

Показатель потенциального экологического риска *PERI* представлен диапазоном 7,5–43,7 в 2017 г.; 41,7–252,8 – в 2018 г. и 35,6–98,2 – в 2020 г. (рис. 4.8, Б). Наименьшее значение выявлено в районе «Стадион “Спартак”» (2017 г.), наибольшее – в районе «Ботанический переулок» (2018 г.). Ряды уменьшения участков по величине *PERI* за весь период исследования аналогичны последовательностям по значениям *PLI* (рис. 4.8). В целом для почв всех районов характерна слабая степень потенциального экологического риска в результате загрязнения ТМ, кроме участков «Ботанический переулок» (2018 г.) и «Стадион “Спартак”» (2020 г.) с сильной и умеренной степенью соответственно (рис. 4.8, Б).

*Интегрированный индекс загрязнения Немерова NPI* за период исследований варьировал от 0,6 в 2017 г. (район «Стадион “Спартак”») до 29,2 в 2018 г. (район «Ботанический переулок»). Участки по уменьшению значений *NPI* в 2017–2018 гг. распределяются таким же образом, как в случае с *PERI* и *PLI* (рис. 4.8). В 2020 г. ряд уменьшения значений *NPI* в исследованных районах имел следующий вид: «Стадион “Спартак”» > > «Автостанция 10-й км» > «Краевая библиотека» > «Ботанический переулок» > «Госпиталь». Согласно данному показателю, исследованные почвы в большинстве случаев относятся к пятому классу загрязнения и соответствуют сильнозагрязненным. Исключением являются почвы в 2017 г. районов «Стадион “Спартак”» (незагрязненные), «Ботанический переулок» (слабозагрязненные) и «Краевая библиотека» (умеренное загрязнение) (рис. 4.8).

При оценке экологического состояния почв г. Петропавловска-Камчатского с учетом ПДК/ОДК и суммарного показателя  $Z_c$  выявлена разная степень загрязнения ТМ одних и тех же районов (табл. 4.7). Принимая во внимание, что допустимые концентрации являются основным критерием гигиенической оценки загрязнения почв, обнаруженное превышение ПДК свинца в исследованных районах является приоритетным при экологической оценке почв города. Этот металл практически во всех районах содержался в опасных концентрациях. Остальные металлы выявлены в допустимых пределах.

Таблица 4.7

**Оценка степени загрязнения почв г. Петропавловска-Камчатского  
тяжелыми металлами**

Район города	Год исследования	Оценка по ПДК/ОДК			Полиэлементная оценка по суммарному показателю загрязнения ( $Z_c$ )
		Cu	Zn	Pb	
«Госпиталь»	2017	Допустимая	Допустимая	<b>Опасная</b>	Допустимая
	2018	Допустимая	Допустимая	<b>Опасная</b>	Допустимая
	2020	Допустимая	Допустимая	Допустимая	Допустимая
«Стадион “Спартак”»	2017	Допустимая	Допустимая	Допустимая	Допустимая
	2018	Допустимая	Допустимая	<b>Опасная</b>	Допустимая
	2020	Допустимая	<b>Чрезвычайно опасная</b>	<b>Опасная</b>	<b>Умеренно опасная</b>
«Ботанический переулок»	2017	Допустимая	Допустимая	Незначительная	Допустимая
	2018	Допустимая	Допустимая	<b>Чрезвычайно опасная</b>	<b>Опасная</b>
	2020	Допустимая	<b>Опасная</b>	<b>Опасная</b>	Допустимая
«Краевая библиотека»	2017	Допустимая	Допустимая	<b>Опасная</b>	Допустимая
	2018	Допустимая	Допустимая	<b>Опасная</b>	Допустимая
	2020	<b>Опасная</b>	Допустимая	<b>Опасная</b>	<b>Умеренно опасная</b>
«Автостанция 10-й км»	2017	Допустимая	Допустимая	<b>Опасная</b>	Допустимая
	2018	Допустимая	Допустимая	<b>Опасная</b>	Допустимая
	2020	Допустимая	<b>Опасная</b>	<b>Опасная</b>	Допустимая

Для оценки изменения загрязнения была рассчитана межгодовая динамика полиэлементного загрязнения городских почв на основе индексов комплексного загрязнения (рис. 4.9). В период 2017–2018 гг. наблюдалось существенное увеличение значений всех показателей, однако к 2020 г. произошло их заметное снижение.

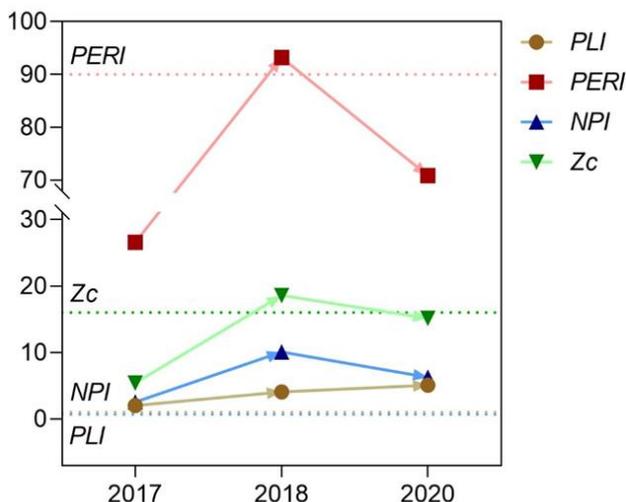


Рис. 4.9. Межгодовая динамика полиэлементного загрязнения почвенного покрова г. Петропавловска-Камчатского на основе индексов  $PLI$ ,  $PERI$ ,  $NPI$ ,  $Z_c$ . Пунктирными линиями отмечены уровни слабого загрязнения для каждого индекса

Таким образом, по показателю суммарного загрязнения наиболее загрязнены в 2017 г. районы «Госпиталь», «Автостанция 10-й км», в 2018 г. – «Ботанический переулок», «Госпиталь», в 2020 г. – «Стадион “Спартак”». Свинец содержится в опасной концентрации в почвах всех районов в летний период 2017, 2018 и 2020 гг., кроме участков «Стадион “Спартак”» (2017 г.), «Ботанический переулок» (2017 г.), «Госпиталь» (2020 г.).

Ряд уменьшения участков по величине  $PLI$  и  $NPI$  в 2017 г. имел следующий вид: «Госпиталь» > «Автостанция 10-й км» > «Краевая библиотека» > «Ботанический переулок» > «Стадион

«Спартак»». Аналогичный ряд в 2018 г. представлен последовательностью: «Ботанический переулок» > «Госпиталь» > > «Стадион “Спартак”» > «Краевая библиотека» > «Автостанция 10-й км». В 2020 г. ряд уменьшения показателя  $PLI$ ,  $Z_c$  представлен следующим образом: «Стадион “Спартак”» > > «Краевая библиотека» > «Автостанция 10-й км» > «Ботанический переулок» > «Госпиталь». Аналогичный ряд для показателя  $NPI$  в 2020 г.: «Стадион “Спартак”» > «Автостанция 10-й км» > «Краевая библиотека» > «Ботанический переулок» > > «Госпиталь».

В целом для почв всех районов характерна слабая степень потенциального экологического риска в результате загрязнения тяжелыми металлами, кроме участков «Ботанический переулок» в 2018 г. и «Стадион “Спартак”» в 2020 г. с сильной и умеренной степенью соответственно.

Расчет межгодовой динамики полиэлементного загрязнения почвы на основе индексов  $PLI$ ,  $PERI$ ,  $NPI$ ,  $Z_c$  показал, что в 2017–2018 гг. происходило увеличение загрязнения, а в период 2018–2020 гг. – уменьшение, что вероятно связано с уменьшением передвижений на автотранспорте в весенне-летний период 2020 г.

Содержание Zn и Cu изменялось в незначительном диапазоне, в отличие от свинца. Колебания показателей концентрации металлов могут быть вызваны природными (климат, вулканическая деятельность) и антропогенными факторами (увеличение количества автотранспорта, строительные работы, отходы, выбросы предприятий теплоэнергетики).

## ГЛАВА 5. СОДЕРЖАНИЕ Cu, Zn, Pb, Cd В РАСТЕНИЯХ ТЕРРИТОРИЙ Г. ПЕТРОПАВЛОВСКА-КАМЧАТСКОГО

### 5.1. Тяжелые металлы в растениях территорий г. Петропавловска-Камчатского

Сбор растений производился в летний период 2017, 2018 и 2020 гг. на следующих участках города: «Госпиталь», «Стадион “Спартак”», «Ботанический переулок», «Краевая библиотека», «Автостанция 10-й км» и в районе озера Синичкино (фоновый). На аналогичных участках выполнялся отбор почвенного материала. Среди представителей древесного яруса для фитоиндикации металлического загрязнения использовали в летний период 2017, 2018 гг. ольху волосистую (*Alnus hirsuta*), березу Эрмана (*Betula ermanii*) и иву удскую (*Salix udensis*); из представителей травянисто-кустарникового яруса – полынь обыкновенную (*Artemisia vulgaris*) и шиповник тупоушковый (*Rosa amblyotis*). Исследование содержания тяжелых металлов в растениях в 2020 г. основывалось на результатах исследований 2017–2018 гг. В июле – августе 2020 г. на участках исследования были отобраны образцы растений-биоиндикаторов *Betula ermanii*, *Salix udensis*, *Artemisia vulgaris*, а также дополнительно – надземные части *Calamagrostis langsdorffii*. В собранных и предварительно подготовленных пробах растений было определено содержание Cu, Zn, Pb и Cd.

*Медь.* Металл является один из важнейших незаменимых биоэлементов, играет роль в физиологических процессах растения: фотосинтез, дыхание, фиксация азота и т. д. Природный избыток меди в растениях практически невозможен. В зонах антропогенного влияния может происходить накопление растениями меди в избыточных концентрациях (Ильин, Сысо, 2001). По степени опасности металл отнесен к 2-й группе. Фитотоксичность меди выше, чем цинка и никеля. Установлено

существование двух видов реакций растений на избыток меди: 1) латентное отравление (отсутствие оптимальных приростов); 2) острое отравление (выражены повреждения) (Кулагин, Шагиева, 2005). По абсолютному содержанию в растениях медь относится к группе средней концентрации (Ильин, 1991), а по показателям биоаккумуляции – к элементу средней степени поглощения (Панин, 1999). Оптимальное содержание меди для растений – от 1 до 10 мг/кг, концентрация выше 20 мг/кг – токсичная (Алексеев, 1987).

В летний период 2017 г. в растениях исследуемых районов содержание меди варьировало в диапазоне от 5,48 до 22,50 мг/кг. Наибольшее содержание металла выявлено в листьях *A. vulgaris* фонового участка, наименьшее – в пробах *R. amblyotis*, являющихся также фоновыми (рис. 5.1).

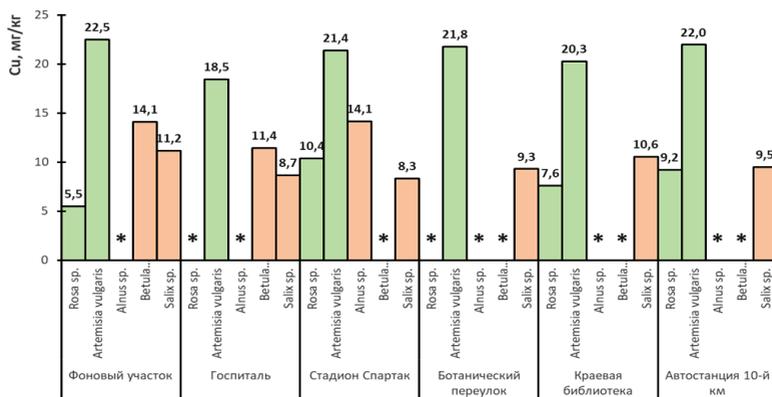


Рис. 5.1. Содержание меди в листьях растений, собранных в исследуемых районах г. Петропавловска-Камчатского в летний период 2017 г. Травянисто-кустарниковый ярус выделен зеленой заливкой ячейки, древесный – оранжевой заливкой.

\* – растения данного вида не произрастали в исследуемом районе

Примечательно, что все исследуемые растения, кроме *Rosa*, с наибольшей концентрацией меди произрастали на фоновом участке, в шиповнике выявлена наименьшая концентрация этого металла там же. Концентрация его в полыни пышной больше, чем в других растениях. Во всех образцах полыни, кроме произрастающей в районе «Госпиталь», содержание меди было токсичным (рис. 5.1; табл. 5.1).

Таблица 5.1

**Уровень содержания меди в листьях растений исследованных районов  
г. Петропавловска-Камчатского**

Вид	Уровень содержания меди, мг/кг		Ряд уменьшения содержания меди в исследуемых районах
	Год	Уровень	
<i>Artemisia vulgaris</i>	2017	18,45–21,96	«Автостанция 10-й км» > «Ботанический переулок» > «Стадион “Спартак”» > «Краевая библиотека» > «Госпиталь»
	2018	15,55–36,61	«Госпиталь» > «Автостанция 10-й км» > «Стадион “Спартак”» > «Ботанический переулок» > «Краевая библиотека»
	2020	16,6–27,8	«Краевая библиотека» > «Автостанция 10-й км» > «Госпиталь» > «Ботанический переулок» > «Стадион “Спартак”»
<i>Rosa amblyotis</i>	2017	7,60–10,37	«Стадион “Спартак”» > «Автостанция 10-й км» > «Краевая библиотека»
	2018	7,74–10,00	«Автостанция 10-й км» > «Стадион “Спартак”» > «Краевая библиотека»
<i>Salix udensis</i>	2017	8,31–10,57	«Краевая библиотека» > «Автостанция 10-й км» > «Ботанический переулок» > «Госпиталь» > «Стадион “Спартак”»
	2018	8,49–10,02	«Краевая библиотека» > «Стадион “Спартак”» > «Госпиталь» > «Автостанция 10-й км» > «Ботанический переулок»
	2020	8,3–12,5	«Госпиталь» > «Краевая библиотека» > «Автостанция 10-й км» > «Ботанический переулок» > «Стадион “Спартак”»
<i>Alnus hirsuta</i>	2017	14,1	«Стадион “Спартак”»
	2018	10,3–12,1	«Стадион “Спартак”» > «Ботанический переулок»
<i>Betula ermani</i>	2017	11,42	«Госпиталь»
	2018	9,26–13,61	«Стадион “Спартак”» > «Краевая библиотека» > «Ботанический переулок» > «Автостанция 10-й км» > «Госпиталь»
	2020	7,9–9,2	«Стадион “Спартак”» > «Автостанция 10-й км» > «Ботанический переулок» > «Госпиталь» > «Краевая библиотека»
<i>Calamagrostis langsdorffii</i>	2020	3,1–6,1	«Автостанция 10-й км» > «Стадион “Спартак”» > «Ботанический переулок» > «Госпиталь» > «Краевая библиотека»

Летом 2018 г. содержание меди у исследуемых растений в городской среде было выявлено в диапазоне от 7,74 мг/кг до 36,61 мг/кг (рис. 5.2). В большинстве случаев показатели содержания этого металла в шиповнике были наименьшими. Концентрация меди, обнаруженная в полыни на все участках, кроме района «Ботанический переулок», была более 20 мг/кг, что соответствует токсичной, а также превышает содержание в других исследованных растениях. На фоновом участке ее концентрация в исследуемых растениях достаточно высокая в сравнении с другими районами, аналогичная ситуация наблюдалась в 2017 г. (рис. 5.2; табл. 5.1).

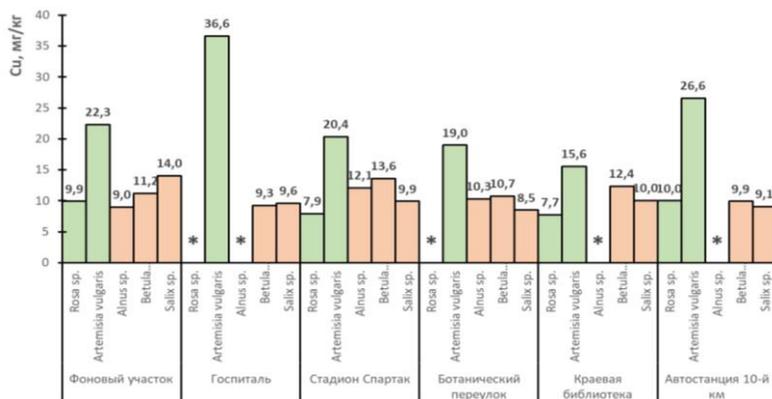


Рис. 5.2. Содержание меди в листьях растений, собранных в исследованных районах г. Петропавловска-Камчатского в летний период 2018 г. Травянисто-кустарниковый ярус выделен зеленой заливкой ячейки, древесный – оранжевой заливкой.

\* – растения данного вида не произрастали в исследуемом районе

В районах исследования диапазон содержания меди в листьях растений в 2020 г. изменялся от 3,1 до 27,8 мг/кг (рис. 5.3). Наибольшее содержание было выявлено у *Artemisia vulgaris* в районе «Краевая библиотека», аналогичная ситуация была и в других районах исследования. Наименьшая концентрация – в *Calamagrostis langsdorffii* участка «Краевая библиотека», также в других районах в вейнике было определено меньшее содержание меди в сравнении с другими растениями. Суммарное содержание этого металла в растениях городской среды составило 220,7 мг/кг (рис. 5.3; табл. 5.1).

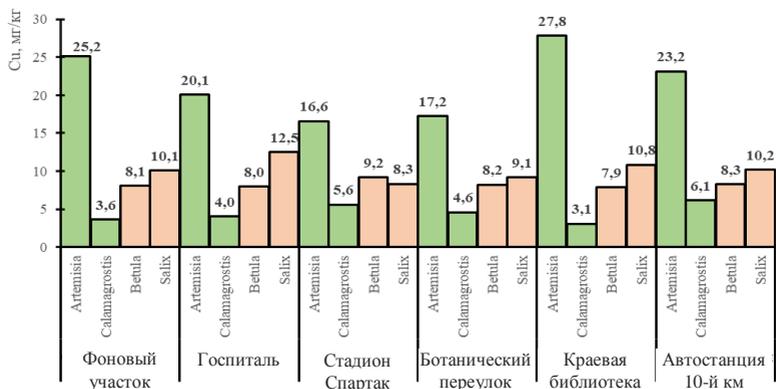


Рис. 5.3. Содержание меди в листьях растений, собранных в исследованных районах г. Петропавловска-Камчатского в летний период 2020 г.

Стоит отметить, что для Камчатского края характерна высокая концентрация меди в почве, это отмечалось в работах других авторов (Захарихина, Литвиненко, 2019а, 2019б), что, вероятно, влияет на концентрацию этого элемента в растениях фоновой зоны, в других же урбанизированных районах исследования возможна ситуация с созданием барьеров другими загрязнителями-антагонистами, что затрудняет его поступление в растительный покров. В целом медь в почве содержалась в больших концентрациях, чем в растениях тех же участков.

**Цинк.** Данный металл является необходимым микроэлементом растений, участвует в протекании таких биологических процессов, как метаболизм и размножение (Войтюк, 2011). Между цинком и другими микроэлементами существует антагонизм, при его избытке тормозится поступление в растение меди, железа, фосфора. Природный избыток цинка в растениях встречается редко (Ильин, Сысо, 2001). В результате возрастающей антропогенной нагрузки на почвы этот металл в больших концентрациях может выступать в роли загрязнителя высокой токсичности, как следствие, попадая в растение, накапливаться и оказывать негативное воздействие на его функционирование. В условиях цинкового загрязнения отрицательное влияние этого металла на физиологические процессы в растениях прежде всего связано с отсутствием физиологических барьеров к его избыточному поглощению.

Цинк при высокой концентрации относится к тяжелым металлам повышенной токсичности 1-го класса опасности, а также обладает показателем высокой технофильности, возрастающей с годами (Перельман, 1975; Большаков и др., 1999). Кроме того, цинк относится к элементам повышенной концентрации в растениях (Ильин, 1991) и к элементу средней степени поглощения (Панин, 1999). Оптимальная для жизнедеятельности концентрация цинка в растениях составляет 20–150 мг/кг, токсическая – 150–400 мг/кг (Серегина, 2018).

Летом 2017 г. наибольшее содержание цинка в листьях исследованных растений было выявлено в районе «Автостанция 10-й км», наименьшее – на участке «Стадион “Спартак”» (рис. 5.4). Концентрация этого металла во всех видах фоновое участка, кроме *Salix*, была ниже, чем в аналогичных пробах растений других районов исследования. Представители *Salix* sp. характеризуются наибольшей степенью аккумуляции цинка, концентрация которого в пробах всех районов, кроме участка «Краевая библиотека», соответствовала токсической для растений. Содержание цинка в листьях других видов из всех районов исследования соответствовало нормальному уровню. Концентрация цинка у представителей *Salix*, собранных в городской среде, уменьшается в следующей последовательности: «Автостанция 10-й км» > «Стадион “Спартак”» > «Ботанический переулок» > «Госпиталь» > «Краевая библиотека» (рис. 5.4; табл. 5.2).

В летний период 2018 г. все растительные пробы фоновое участка отличались меньшим содержанием цинка по сравнению с аналогичными пробами из других районов. Наибольшее содержание металла в листьях исследованных видов выявлено в районе «Автостанция 10-й км», что аналогично результатам исследования 2017 г. На данной территории его значение у представителей древесного яруса – *Salix* и *Betula*, составляло 246,14 и 203,65 мг/кг, что, соответственно, является токсической концентрацией для растений. Однако в том же районе исследования содержание цинка в полыни составляло 111,2 мг/кг, а шиповника – 31,5 мг/кг, что соответствует его оптимальной концентрации в растениях (рис. 5.5; табл. 5.2).

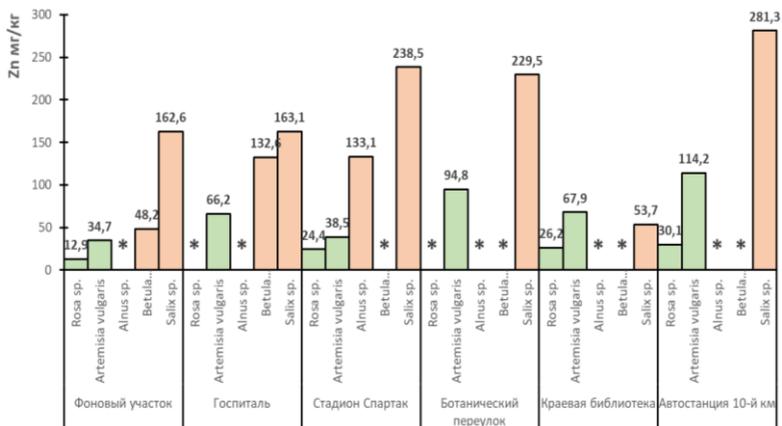


Рис. 5.4. Содержание цинка в листьях растений, собранных в исследованных районах г. Петропавловска-Камчатского в летний период 2017 г. Травянисто-кустарниковый ярус выделен зеленой заливкой ячейки, древесный – оранжевой заливкой.

\* – растения данного вида не произрастали в исследуемом районе

Таблица 5.2

**Уровень содержания цинка в листьях растений исследованных районов г. Петропавловска-Камчатского**

Вид	Уровень содержания цинка, мг/кг		Ряд уменьшения содержания цинка в исследуемых районах
1	2		3
<i>Artemisia vulgaris</i>	2017	38,54–114,24	«Автостанция 10-й км» > «Ботанический переулок» > «Краевая библиотека» > «Госпиталь» > «Стадион “Спартак”»
	2018	55,5–111	«Автостанция 10-й км» > «Госпиталь» > «Стадион “Спартак”» > «Краевая библиотека» > «Ботанический переулок»
	2020	32,3–175,8	«Стадион “Спартак”» > «Краевая библиотека» > «Ботанический переулок» > «Госпиталь» > «Автостанция 10-й км»
<i>Rosa amblyotis</i>	2017	24,42–30,05	«Автостанция 10-й км» > «Краевая библиотека» > «Стадион “Спартак”»
	2018	24,51–31,52	«Автостанция 10-й км» > «Стадион “Спартак”» > «Краевая библиотека»
<i>Salix udensis</i>	2017	53,67–281,31	«Автостанция 10-й км» > «Стадион Спартак» > «Ботанический переулок» > «Госпиталь» > «Краевая библиотека»

1	2	3
<i>Salix udensis</i>	2018	118,66–246,14
	2020	100,6–416,7
<i>Alnus hirsuta</i>	2017	133,15
	2018	90–116,57
<i>Betula ermani</i>	2017	132,57
	2018	48–203,65
	2020	43,1–259,0
<i>Calamagrostis langsdorffii</i>	2020	25,0–64,1

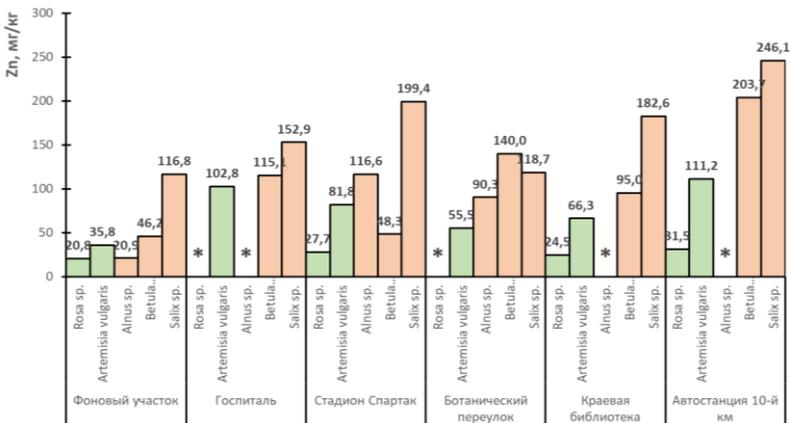


Рис. 5.5. Содержание цинка в листьях растений, собранных в исследованных районах г. Петропавловска-Камчатского в летний период 2018 г. Травянисто-кустарниковый ярус выделен зеленой заливкой ячейки, древесный – оранжевой заливкой.

\* – растения данного вида не произрастали в исследуемом районе

В 2020 г. в исследуемых районах, включая фоновый участок, диапазон содержания цинка в растительных образцах варьировал от 29,3 до 416,7 мг/кг (рис. 5.6). Наибольшее его содержание было выявлено в листьях *Salix udensis* района «Автостанция 10-й км», наименьшее – в *Calamagrostis langsdorffii* участка «Краевая библиотека». Также в сравнении с другими растениями всех исследованных территорий вейник содержал наименьшую концентрацию, противоположная ситуация была выявлена для ивы, которая имела наиболее высокие показатели содержания цинка во всех районах (табл. 5.2; рис. 5.6).

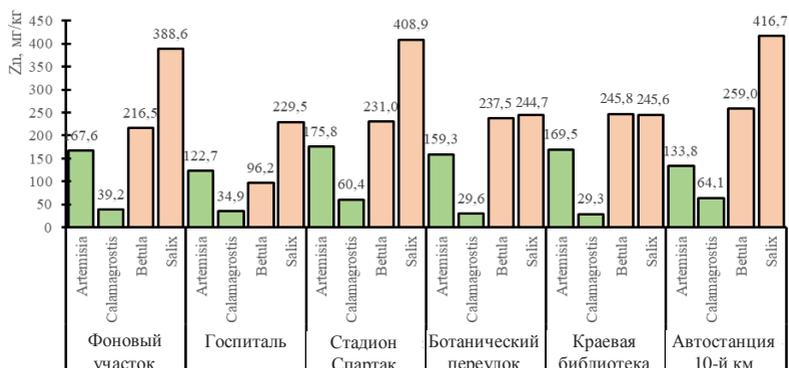


Рис. 5.6. Содержание цинка в листьях растений, собранных в исследованных районах г. Петропавловска-Камчатского в летний период 2020 г.

Содержание цинка у представителей ивы, ольхи и березы выше, чем у растений травянисто-кустарникового яруса во всех исследованных районах. Наиболее высокой степенью его биоаккумуляции отличаются представители *Salix* sp. Во всех районах города концентрация цинка в иве соответствовала токсической. Максимальный показатель этого металла выявлен для растений, собранных в районе «Автостанция 10-й км», наименьший – для района «Ботанический переулок». Во всех пробах листьев ивы, собранных в городской среде, содержание цинка было выше, чем в почвах мест их произрастания. Его концентрация у представителей *Salix* уменьшается в следующей последовательности: «Автостанция 10-й км» > «Стадион “Спартак”» > «Краевая библиотека» > «Госпиталь» > «Ботанический переулок» > фоновый участок» (рис. 5.6; табл. 5.2).

Необходимо отметить, что последовательность районов по степени накопления цинка в листьях растений не совпадает с таковой для почв. Вероятно, это связано с преобладанием в районе «Автостанция 10-й км» аэрального пути его поступления в растения. В целом показатели двух сезонов исследования схожи, практически во всех случаях в районе «Автостанция 10-й км» наблюдалась наибольшая концентрация цинка в исследуемых растениях. Ива может выступать биоиндикатором цинкового загрязнения, т. к. активно его накапливает в токсических концентрациях (рис. 5.4–5.6; табл. 5.2).

*Свинец.* Свинец не является жизненно необходимым элементом для растений. Он токсичен и относится к 1-му классу опасности. Избыток свинца в растениях, связанный с его высокой концентрацией в почве, ингибирует процессы дыхания и фотосинтеза. Этот металл способен приводить к увеличению содержания в организме кадмия и снижению поступления цинка, кальция, фосфора и серы. По содержанию в растениях относится к группе средней концентрации (Ильин, 1991) и является элементом средней степени поглощения (Панин, 1999). Оптимальная для растений концентрация свинца составляет 1,5–10,0 мг/кг, фитотоксический уровень – от 60 и более мг/кг (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989).

В 2017 г. диапазон содержания свинца в растительных образцах составлял от 0,89 до 3,00 мг/кг (рис. 5.7). Разница между его концентрациями у разных видов невелика, однако наибольшая была выявлена у полыни, наименьшая – у ивы. Ранее для последнего из упомянутых выше видов была установлена биоаккумуляционная способность в отношении меди. В двух растительных пробах в районе «Госпиталь» выявлено наибольшее его содержание в *A. vulgaris* и *B. ermanii*, но для *R. amblyotis*, *S. udensis* – это районы «Автостанция 10-й км» и «Краевая библиотека» соответственно. Стоит отметить, что показатели свинца для растений всех участков отличаются незначительно (рис. 5.7; табл. 5.3).

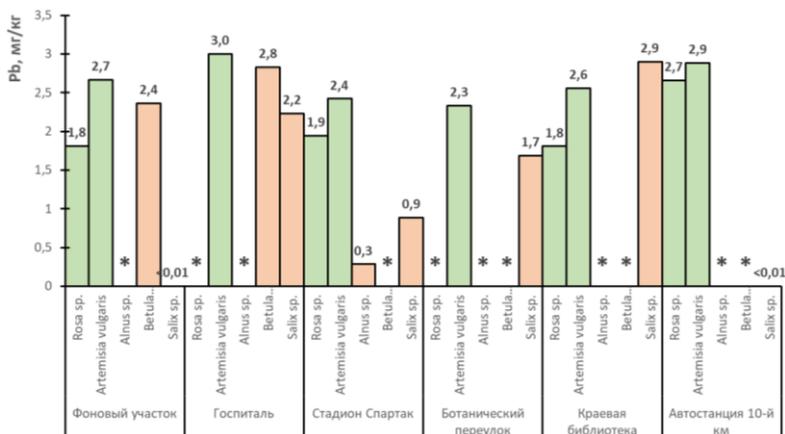


Рис. 5.7. Содержание свинца в листьях растений, собранных в исследованных районах г. Петропавловска-Камчатского в летний период 2017 г. Травянисто-кустарниковый ярус выделен зеленой заливкой ячейки, древесный – оранжевой заливкой.

\* – растения данного вида не произрастали в исследуемом районе

Таблица 5.3

### Уровень содержания свинца в листьях растений исследованных районов г. Петропавловска-Камчатского

Вид	Уровень содержания свинца, мг/кг		Ряд уменьшения содержания свинца в исследуемых районах
1	2		3
<i>Artemisia vulgaris</i>	2017	2,33–3,00	«Госпиталь» > «Автостанция 10-й км» > «Краевая библиотека» > «Стадион «Спартак»» > «Ботанический переулок»
	2018	2,36–3,74	«Автостанция 10-й км» > «Ботанический переулок» > «Краевая библиотека» > «Стадион «Спартак»» > «Госпиталь»
	2020	0,8–1,6	«Автостанция 10-й км» > «Краевая библиотека» > «Ботанический переулок» > «Госпиталь» > «Стадион «Спартак»»
<i>Rosa amblyotis</i>	2017	1,81–2,66	«Автостанция 10-й км» > «Стадион «Спартак»» > «Краевая библиотека»
	2018	1,18–2,90	«Автостанция 10-й км» > «Краевая библиотека» > «Стадион «Спартак»»
<i>Salix udensis</i>	2017	0,89–2,90	«Краевая библиотека» > «Госпиталь» > «Ботанический переулок» > «Стадион «Спартак»»

1	2		3
<i>Salix udensis</i>	2018	1,16–3,78	«Стадион “Спартак”» > «Госпиталь» > «Краевая библиотека» > «Ботанический переулок»
	2020	0,7–1,0	«Автостанция 10-й км» > «Ботанический переулок» > «Стадион “Спартак”» > «Госпиталь» > «Краевая библиотека»
<i>Alnus hirsuta</i>	2017	0,3	«Стадион “Спартак”»
	2018	0,01–1,30	« Ботанический переулок» > «Стадион “Спартак”»
<i>Betula ermani</i>	2017	2,827	«Госпиталь»
	2018	1,59–3,4	«Стадион “Спартак”» > «Автостанция 10-й км» > «Краевая библиотека»
	2020	0,3–1,0	«Ботанический переулок» > «Краевая библиотека» > «Автостанция 10-й км» > «Госпиталь» > «Стадион “Спартак”»
<i>Calamagrostis langsdorffii</i>	2020	0,8–1,7	«Автостанция 10-й км » > «Стадион “Спартак”» > «Госпиталь» > «Ботанический переулок» > «Краевая библиотека»

В 2018 г. содержание свинца в растительных пробах варьировало в пределах от 1,16 до 3,78 мг/кг (рис. 5.8; табл. 5.3). Наименьшая и наибольшая концентрация характерна для ивы, но собранной в разных районах: «Автостанция 10-й км» и «Стадион “Спартак”». *R. amblyotis* и *A. vulgaris* с наибольшей концентрацией свинца произрастали на участке «Автостанция 10-й км». Как и в 2017 году, концентрация металла не изменялась в широких пределах. В целом показатели для двух сезонов исследования изменяются незначительно, концентрация всех образцов не является токсичной (рис. 5.8; табл. 5.3).

Почва в аналогичных районах исследования содержала свинца больше, чем выявлено в растениях. Следует отметить, что большая часть видов относится к растениям-исключителям, т. е. содержание свинца в побеге может быть намного ниже, чем в почве и атмосферном воздухе, в этом случае накопление его происходит в корне (Шихова, 2012).

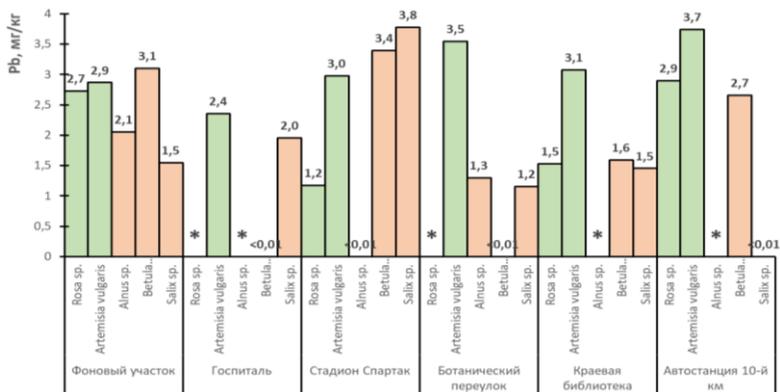


Рис. 5.8. Содержание свинца в листьях растений, собранных в исследованных районах г. Петропавловска-Камчатского в летний период 2018 г. Травянисто-кустарниковый ярус выделен зеленой заливкой ячейки, древесный – оранжевой заливкой.

\* – растения данного вида не произрастали в исследуемом районе

Содержание свинца в листьях растений в 2020 г. изменялось от 0,1 до 1,7 мг/кг. Наибольшее содержание было выявлено в *Calamagrostis langsdorffii* района «Автостанция 10-й км», наименьшее – в листьях березы фонового участка. Суммарное содержание этого металла в растениях городской среды – 19,2 мг/кг. Примечательно, что вейник накапливает в некоторых случаях свинец в более высоких концентрациях, чем другие растения, однако в отношении других металлов аналогичная ситуация не наблюдалась (рис. 5.9; табл. 5.3).

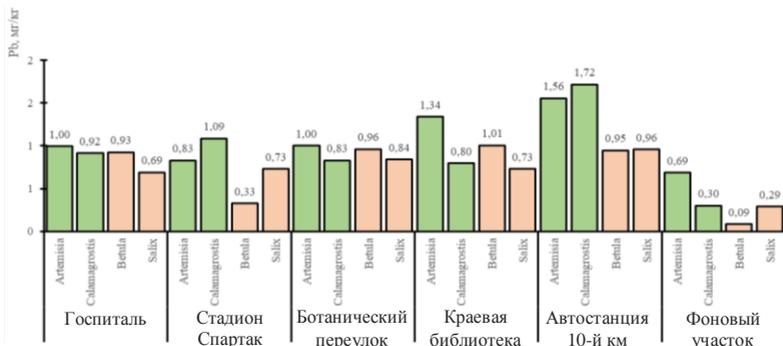


Рис. 5.9. Содержание свинца в листьях растений, собранных в исследованных районах г. Петропавловска-Камчатского в летний период 2020 г.

Почва в аналогичных районах исследования содержала свинца больше, чем выявлено в растениях. Следует отметить, что большая часть видов относится к растениям-исключителям, т. е. содержание свинца в побеге может быть намного ниже, чем в почве и атмосферном воздухе, в этом случае накопление его происходит в корне (Шихова, 2012).

*Кадмий.* Металл представляет собой один из наиболее опасных токсикантов окружающей среды, относится к 1-му классу опасности. После прекращения действия факторов, увеличивающих содержание этого тяжелого металла, его концентрация в почве долгое время остается высокой вследствие длительного срока вывода. Кадмий может легко поступать в растения из почвы через корневую систему и аэральным путем. Его избыток в растениях тормозит фотосинтез, нарушает транспирацию и газообмен.

Фитотоксичность кадмия выражается в создании барьера для поступления в растения таких важных элементов питания как Zn, Mn, Cu, Ca, Mg, P и Ni (Ильин, Сысо, 2001). Его роль как микроэлемента не установлена. Кадмий является элементом низкой концентрации (Ильин, 1991), относится к группе интенсивного поглощения растениями (Панин, 1999). Верхний предел нормальной концентрации кадмия в растениях, не оказывающий влияния на функционирование, составляет 0,35 мг/кг (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989). Предельно допустимая концентрация кадмия в зависимости от вида растительного сырья определяется как 0,05–0,1 мг/кг для растений северных территорий (Лукина, Никонов, 1993), 0,3 мг/кг – для растительных кормов в животноводстве (Методические указания ..., 1992) и 1,0 мг/кг – для биологически активных добавок и чаев (СанПиН 2.3.2.1078-01).

В летний период 2017 г. в растительных пробах исследованных растений содержание кадмия изменялось в диапазоне от 0,19 до 2,72 мг/кг (рис. 5.10), при этом наименьшая концентрация была характерна для *Rosa* района «Стадион “Спартак”», а наибольшая – для *Salix* участка

«Госпиталь». Разброс показателей содержания металла в листьях – незначительный. Примечательно, что растительные пробы фонового участка не отличались самыми низкими значениями его содержания. Район с наибольшим содержанием этого металла в растениях выделить сложно. Так, наибольшая концентрация кадмия в листьях *A. vulgaris* выявлена в районе «Ботанический переулок», в листьях *Rosa* – на участке «Краевая библиотека» и в листьях *Salix* – на участке «Госпиталь». Возможно, это связано с физиологическими особенностями исследованных растений, не являющихся накопителями этого металла, а также с местными особенностями районов исследования.

Стоит отметить, что концентрации металла больше 1 мг/кг в городе Петропавловске-Камчатском была обнаружена в полыни на участках «Госпиталь», «Ботанический переулок», «Автостанция 10-й км», также в иве на всех участках, кроме участка «Краевая библиотека» (рис. 5.10; табл. 5.4).

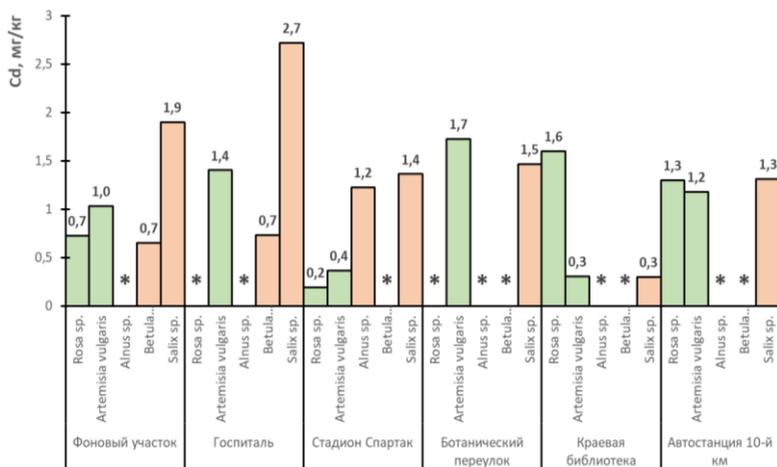


Рис. 5.10. Содержание кадмия в листьях растений, собранных в исследованных районах г. Петропавловска-Камчатского в летний период 2017 г. Травянисто-кустарниковый ярус выделен зеленой заливкой ячейки, древесный – оранжевой заливкой.

\* – растения данного вида не произрастали в исследуемом районе

Таблица 5.4

**Уровень содержания кадмия в листьях растений исследованных районов  
г. Петропавловска-Камчатского**

Вид	Уровень содержания кадмия, мг/кг		Ряд уменьшения содержания кадмия в исследуемых районах
	Год	Уровень содержания кадмия, мг/кг	
<i>Artemisia vulgaris</i>	2017	0,31–1,73	«Ботанический переулок» > «Госпиталь» > > «Автостанция 10-й км» > «Стадион “Спартак”» > «Краевая библиотека»
	2018	0,49–2,06	«Краевая библиотека» > «Госпиталь» > > «Стадион “Спартак”» > «Ботанический переулок» > «Автостанция 10-й км»
	2020	0,2–0,9	«Госпиталь» > «Краевая библиотека» > > «Автостанция 10-й км» > «Стадион “Спартак”» > «Ботанический переулок»
<i>Rosa amblyotis</i>	2017	0,19–1,60	«Краевая библиотека» > «Автостанция 10-й км» > «Стадион “Спартак”»
	2018	0,64–1,39	«Автостанция 10-й км» > «Стадион “Спартак”» > «Краевая библиотека»
<i>Salix udensis</i>	2017	0,30–2,72	«Госпиталь» > «Ботанический переулок» > > «Стадион “Спартак”» > «Автостанция 10-й км» > «Краевая библиотека»
	2018	0,99–3,61	«Ботанический переулок» > «Стадион “Спартак”» > «Госпиталь» > «Автостанция 10-й км» > «Краевая библиотека»
	2020	0,5–1,1	«Краевая библиотека» > «Автостанция 10-й км» > «Стадион “Спартак”» > «Госпиталь» > «Ботанический переулок»
<i>Alnus hirsuta</i>	2017	1,2	«Стадион “Спартак”»
	2018	0,49–2,00	«Ботанический переулок» > «Стадион “Спартак”»
<i>Betula ermani</i>	2017	0,73	«Госпиталь»
	2018	0,06–3,17	«Автостанция 10-й км» > «Краевая библиотека» > «Госпиталь» > «Стадион “Спартак”» > «Ботанический переулок»
	2020	0–0,5	«Краевая библиотека» > «Стадион “Спартак”» > «Автостанция 10-й км» > «Ботанический переулок» > «Госпиталь»
<i>Calamagrostis langsdorffii</i>	2020	0–0,3	«Стадион “Спартак”» > «Краевая библиотека» > «Автостанция 10-й км» > «Ботанический переулок» > «Госпиталь»

Летом 2018 г. в листьях растений концентрация кадмия варьировала в диапазоне от 0,06 до 3,61 мг/кг (рис. 5.11), при этом наименьшая концентрация была характерна для *B. ermanii* района «Автостанция 10-й км», наибольшая – для *S. udensis* участка «Ботанический переулок». Для ивы характерна максимальная концентрация этого металла среди всех других исследованных растений. Участок города, для которого была бы характерна наибольшая концентрация кадмия в образцах растений, выделить сложно, т. к. для *A. vulgaris* таковым является «Краевая библиотека», для *R. amblyotis* и *B. ermanii* – «Автостанция 10-й км», для *A. hirsuta* и *S. udensis* – «Ботанический переулок». Концентрация выше ПДК (1 мг/кг) выявлена во всех исследованных растениях в районе «Госпиталь». На участке «Стадион “Спартак”» превышение ПДК отмечено в образцах *A. vulgaris* и *S. udensis*, в районе «Ботанический переулок» – у *A. hirsuta* и *S. udensis*, в районе «Краевая библиотека» – у *A. vulgaris* и *B. ermanii*, на территории района «Автостанция 10-й км» превышение ПДК выявлено у *R. amblyotis*, *B. ermanii* и *S. udensis* (табл. 5.4; рис. 5.11).

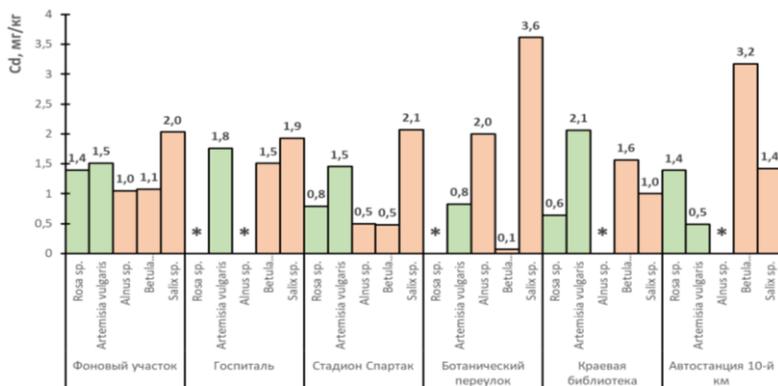


Рис. 5.11. Содержание кадмия в листьях растений, собранных в исследованных районах г. Петропавловска-Камчатского в летний период 2018 г. Травянисто-кустарниковый ярус выделен зеленой заливкой ячейки, древесный – оранжевой заливкой.  
\* – растения данного вида не произрастали в исследуемом районе

В исследованных пробах растений диапазон содержания кадмия в 2020 г. варьировал от 0 до 1,1 мг/кг (рис. 5.12). Наибольшее содержание было выявлено в *Salix udensis* района «Краевая библиотека», наименьшее – в *Calamagrostis langsdorffii* и *Betula ermanii* на участках «Госпиталь» и фоновом. Суммарное содержание этого металла в растениях городской среды составляет 8,4 мг/кг (рис. 5.12; табл. 5.4).

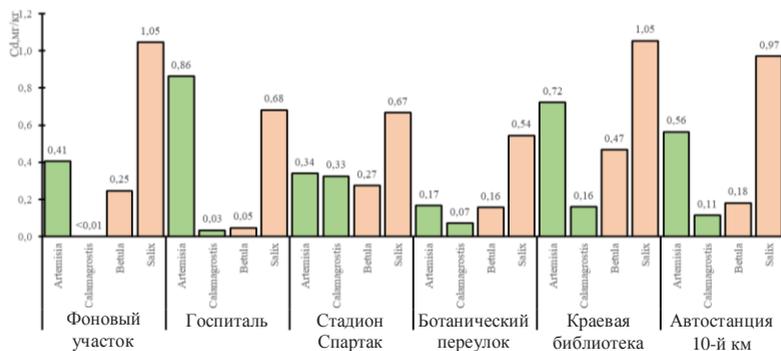


Рис. 5.12. Содержание кадмия в листьях растений, собранных в исследованных районах г. Петропавловска-Камчатского в летний период 2020 г. Травянисто-кустарниковый ярус выделен зеленой заливкой ячейки, древесный – оранжевой заливкой.  
\* – растения данного вида не произрастали в исследуемом районе

Содержание кадмия в растениях одного и того же вида за весь период исследования не соотносится между собой (табл. 5.4). Исследование почвенного покрова г. Петропавловска-Камчатского показало, что они не загрязнены кадмием, в то время как его концентрация в растениях выше. Вероятно, это связано с аэральным поступлением металла в растительный покров и активным его накоплением некоторыми видами растений.

## 5.2. Оценка степени накопления металлов растениями и их загрязнение

*Коэффициент биологического поглощения.* Количественной мерой степени поглощения химических элементов растениями является коэффициент биологического поглощения (КБП). Для исследованных растений было рассчитано среднее значение поглощения (отношение суммы показателей КБП

всех участков к количеству районов). Часто коэффициенты одного растения на разных участках были одинаковыми, что может свидетельствовать о видовых особенностях поглощения конкретного металла вне зависимости от места произрастания. Так, для шиповника характерен наименьший коэффициент в отношении всех исследуемых металлов, для ивы – наибольший.

Согласно разработанной градации (Авессаломова, 1987), медь и свинец могут быть отнесены к элементам слабого накопления и среднего захвата (КБП < 1) всеми исследуемыми растениями, а цинк является элементом сильного накопления всеми видами (табл. 5.5). Исключение составил шиповник, для него этот металл – элемент слабого накопления и среднего захвата.

Необходимо отметить, что в отдельных районах свинец имел показатели элемента слабого захвата всеми растениями («Стадион “Спартак”», «Автостанция 10-й км»), в то же время цинк на участке «Автостанция 10-й км» в отношении ольхи и ивы относился к элементам энергичного накопления (табл. 5.5). Таким образом, ряд уменьшения металлов по показателю КБП имеет следующий вид: Zn > Cu > Pb.

*Биогеохимическая активность вида (БХА).* Данный показатель количественно отражает способность вида к концентрации элементов, позволяет оценить роль компонента фитоценоза различных районов города в вовлечении элементов (Pb, Cu, Cd) в биологический круговорот.

Таблица 5.5

#### Коэффициент биологического поглощения

Растения	Год	Металл		
		Zn	Cu	Pb
<i>Artemisia vulgaris</i>	2017	2,17	0,83	0,14
	2018	1,58	0,82	0,29
<i>Rosa amblyotis</i>	2017	1,25	0,31	0,10
	2018	0,65	0,29	0,11
<i>Salix udensis</i>	2017	8,97	0,37	0,15
	2018	3,73	0,81	0,15
<i>Alnus hirsuta</i>	2018	1,52	0,41	0,16
<i>Betula ermanii</i>	2017	2,08	0,62	0,30
	2018	1,48	0,40	0,18

*S. udensis* среди исследованных растений имеет наибольшую биогеохимическую активность, особенно в районе «Стадион “Спартак”» (табл. 5.6). *Calamagrostis langsdorffii* имеет наименьшее значение БХА. Низкая биогеохимическая активность растений, включая иву, характерна для районов «Краевая библиотека», «Ботанический переулок» и «Госпиталь». О причинах этого указывалось ранее (местные особенности, создание «барьеров» другими элементами, накопление металлов корнями растений).

Таблица 5.6

**Биогеохимическая активность исследованных видов растений**

Растение	Год	Районы исследования					
		«Госпиталь»	«Стадион “Спартак”»	«Ботанический переулок»	«Краевая библиотека»	«Автостанция 10-й км»	Фоновый участок
<i>Artemisia vulgaris</i>	2017	1,74	7,45	2,36	1,67	2,89	2,64
	2018	3,69	2,16	1,49	1,63	3,77	3,39
	2020	1,8	1	1,8	2,6	1,7	7
<i>Rosa amblyotis</i>	2017	–	4,51	–	0,66	0,89	0,94
	2018	–	0,77	–	0,67	1,20	1,95
<i>Salix udensis</i>	2017	3,30	34,70	4,53	1,19	5,79	6,95
	2018	2,92	3,77	2,40	6,32	6,43	6,25
	2020	3,6	1,8	2,2	3,4	3,7	12,2
<i>Alnus hirsuta</i>	2017	–	20,10	–	–	–	–
	2018	–	2,39	1,92	–	–	1,79
<i>Betula ermanii</i>	2017	3,23	–	–	–	–	2,77
	2018	2,31	1,36	2,85	2,01	5,47	3,20
	2020	1,6	1	2,1	3,4	2,4	7
<i>Calamagrostis langsdorffii</i>	2020	0,7	0,4	0,4	0,5	0,7	1,5

Данный показатель отражает только закономерность в системе «почва – растение», не учитывая аэральный путь поступления элементов (табл. 5.6). Ряд уменьшения биогеохимической активности растений представляется следующим образом: *Salix udensis* > *Artemisia vulgaris* > *Alnus hirsute* > > *Betula ermanii* > *Rosa amblyotis* > *Calamagrostis langsdorffii*.

Как и указывалось ранее, тяжелые металлы в разной степени аккумулируются растениями. По результатам исследования

для древесного и травянисто-кустарникового яруса можно выделить растения-индикаторы в наибольшей степени среди других исследованных растений, накапливающих конкретный металл (табл. 5.7). Так, было выявлено, что *Salix* и *Artemisia* могут выступать биоиндикатором цинкового загрязнения окружающей среды. В наибольшей степени накапливают кадмий – *S. udensis* и *A. vulgaris*, в других растениях концентрация изменяется незначительно. Медь и свинец в наиболее высоких концентрациях среди других растений содержались в *B. ermanii*, *S. udensis* и *A. vulgaris* (табл. 5.7).

Таблица 5.7

**Растения-индикаторы тяжелых металлов  
в Петропавловске-Камчатском**

Тяжелый металл	Растение-индикатор	
	Древесный ярус	Травянисто-кустарниковый ярус
Zn	<i>Salix udensis</i>	<i>Artemisia vulgaris</i>
Cd	<i>Salix udensis</i>	<i>Artemisia vulgaris</i>
Cu	<i>Betula ermanii</i> / <i>Salix udensis</i>	<i>Artemisia vulgaris</i>
Pb	<i>Betula ermanii</i> / <i>Salix udensis</i>	<i>Artemisia vulgaris</i>

Среди исследованных районов города сложно выделить наиболее загрязненные тяжелыми металлами по растениям-индикаторам, т. к. в разные года были получены разные данные. Но примечательно то, что растения фонового участка часто отличались наибольшей концентрацией конкретного металла среди всех исследованных районов. Это можно связать с фоновыми особенностями ПКГО, с возможным антагонизмом металлов в городской среде, препятствующим поступлению в растения некоторых металлов, а также с наличием источников загрязнения в фоновом районе, визуально не обнаруженных, например, закопанные отходы.

*Суммарное содержание тяжелых металлов в растениях.* Для сравнения среднего суммарного содержания металлов в листьях исследуемых растений были использованы данные о валовом содержании ТМ в вейнике Лангсдорфа (*Calamagrostis langsdorffii*), произраставшем вне городской среды (Захарихина, Литвиненко, 2019б) (рис. 5.13). Средние суммарные показатели

содержания тяжелых металлов в растениях фонового участка и всех территорий урбанизированной территории представлены на рис. 5.13.

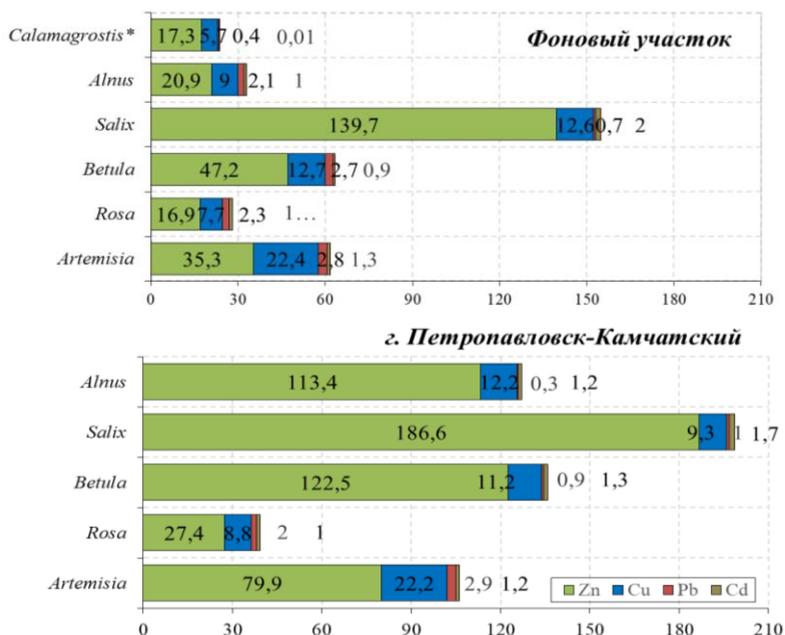


Рис. 5.13. Среднее суммарное содержание тяжелых металлов в растениях г. Петропавловска-Камчатского и фонового участка в 2017–2018 гг.

\* – усредненное содержание элементов в надземной части вейника Лангсдорфа для юго-восточной Камчатки (Захарихина, Литвиненко, 2019б)

Отдельно данный показатель был рассчитан для растительных образцов 2020 г. (рис. 5.14). У представителей травянисто-кустарникового яруса общее содержание металлов (Zn, Cu, Pb и Cd) ниже, чем у видов древесных пород. Наибольшее значение суммарного содержания ТМ было выявлено в иве как в фоновой, так и в городской зоне. Все виды растения в большей степени аккумулируют цинк, в меньшей – свинец и кадмий. У многих растений показатели содержания металлов фонового участка превышают значения городской среды, что отражает геохимическую специализацию фонового участка и, вероятно, – наличие антагонизма в поглощении металлов

на загрязненных участках. Ряд уменьшения среднего суммарного содержания тяжелых металлов в растениях фонового участка имеет следующий вид: *Salix* > *Betula* > *Alnus* > *Artemisia* > *Rosa* > *Calamagrostis*. Аналогичный ряд для городской среды: *Salix* > *Betula* > *Artemisia* > *Alnus* > *Rosa* (рис. 5.14).

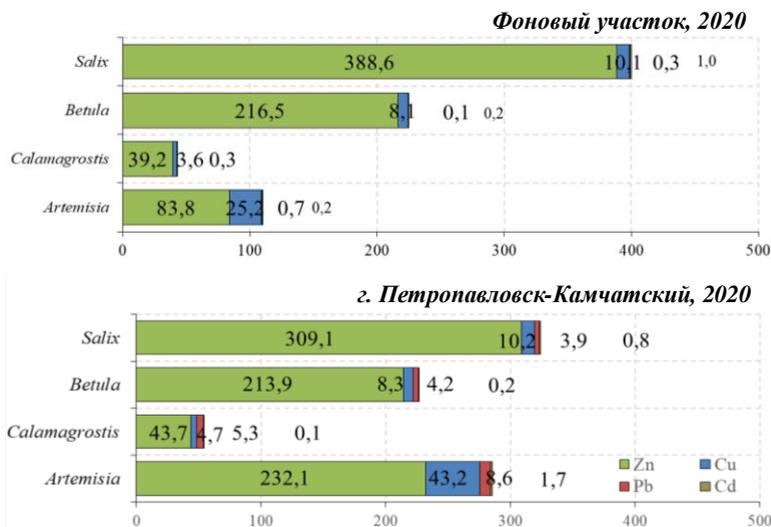


Рис. 5.14. Среднее суммарное содержание тяжелых металлов в растениях г. Петропавловска-Камчатского и фонового участка в 2020 г. (по Авдощенко, Климова, 2020б)

Наибольшее значение среднего суммарного содержания ТМ в 2020 г. было выявлено в иве как в фоновой, так и в городской зоне, наименьшее значение – у вейника. Ряд уменьшения среднего суммарного содержания тяжелых металлов в растениях фонового участка имеет следующий вид: *Salix* > *Betula* > *Artemisia* > *Calamagrostis*. Аналогичный ряд для городской среды: *Salix* > *Betula* > *Artemisia* > *Calamagrostis* (рис. 5.14).

*Суммарный показатель загрязнения растительного покрова.* Для дифференцирования городской среды по степени металлического загрязнения были рассчитаны коэффициенты концентрации значения суммарного показателя загрязнения ( $Z_c$ ) для видов-индикаторов (*A. vulgaris* и *S. udensis*) на исследованных территориях (рис. 5.15; рис 5.16). Согласно разработанной шкале оценки суммарной загрязненности тяжелыми

металлами растений, незначительная степень загрязнения соответствует значениям  $Z_c < 1$ , слабая – значениям  $Z_c$  в диапазоне 1–3, средняя – от 3 до 10 и сильная – более 10 (Касатиков, 1989; Байбеков и др., 2007).

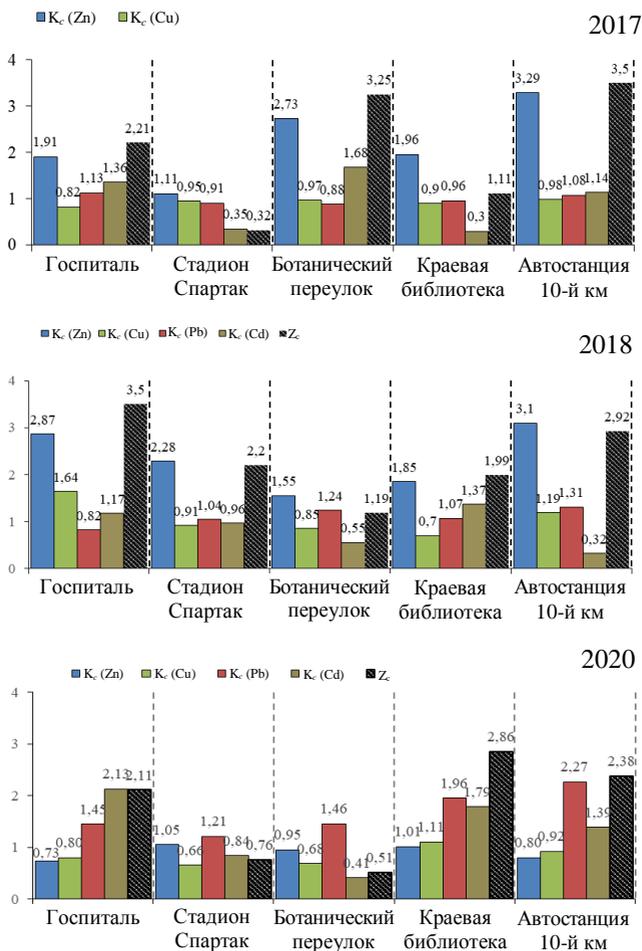


Рис. 5.15. Коэффициенты концентрации ( $K_c$ ) тяжелых металлов (цинка, меди, свинца и кадмия) и значения суммарного показателя загрязнения ( $Z_c$ ) в листьях *Artemisia* из исследуемых районов г. Петропавловска-Камчатского в летние периоды 2017, 2018 и 2020 гг. Вычисления показателей выполнены относительно содержания металлов в растительных пробах, собранных с фонового участка

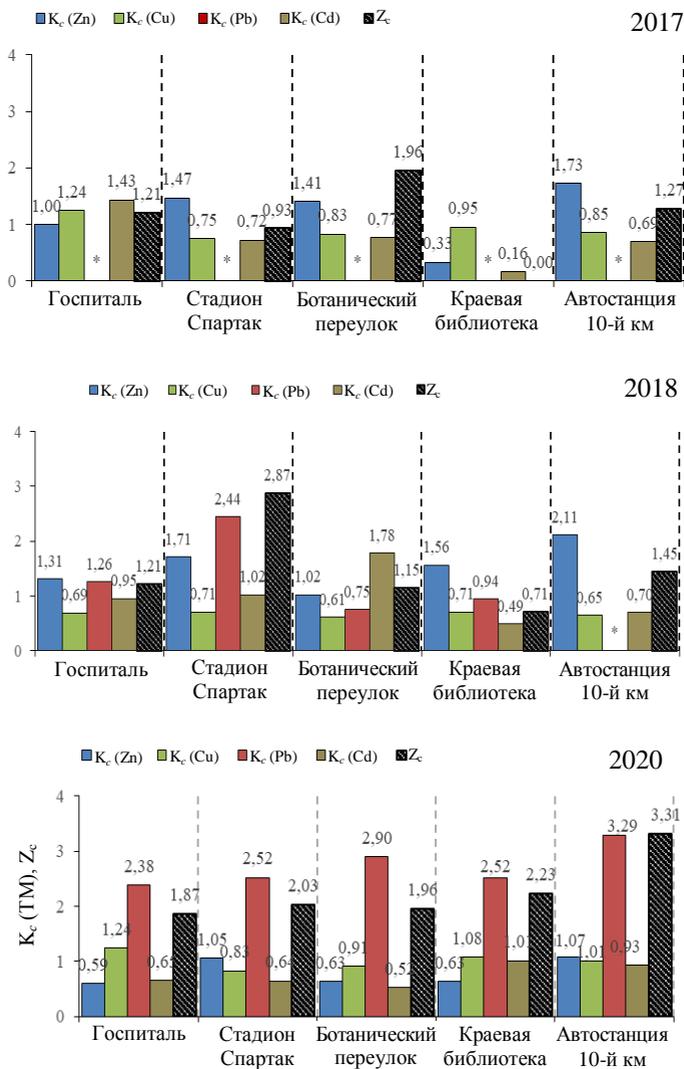


Рис. 5.16. Коэффициенты концентрации ( $K_c$ ) тяжелых металлов (цинка, меди, свинца и кадмия) и значения суммарного показателя загрязнения ( $Z_c$ ) в листьях *Salix* из исследуемых районов г. Петропавловска-Камчатского в летние периоды 2017, 2018 и 2020 гг. Вычисления показателей выполнены относительно содержания металлов в растительных пробах, собранных с фонового участка

В 2017 г. суммарное загрязнение тяжелыми металлами растений травянисто-кустарникового яруса для районов «Автостанция 10-й км» и «Ботанический переулок» соответствовало средней степени, для остальных районов оно характеризовалось как слабое (рис. 5.15). В 2018 г. средняя степень металлического загрязнения растительного покрова выявлена только для территории «Госпиталь», в остальных районах оно соответствовало слабому уровню. В 2020 г. незначительная степень загрязнения была выявлена в районах «Стадион “Спартак”», «Ботанический переулок», а слабая степень характерна для всех других районов исследования. Ряд уменьшения содержания металлов в полыни на участках исследования в 2017 г. имел следующий вид: «Автостанция 10-й км» > > «Ботанический переулок» > «Госпиталь» > «Краевая библиотека» > «Стадион “Спартак”». Аналогичный ряд в 2018 г. представлен следующим образом: «Госпиталь» > «Автостанция 10-й км» > «Стадион “Спартак”» > «Краевая библиотека» > > «Ботанический переулок». В 2020 г. ряд уменьшения выглядит таким образом: «Краевая библиотека» > «Автостанция 10-й км» > «Госпиталь» > «Стадион “Спартак”» > «Ботанический переулок» (рис. 5.15).

Суммарное загрязнение тяжелыми металлами растений древесного яруса за весь период исследования можно оценить как слабое. В 2017 г. ряд уменьшения содержания ТМ в образцах ивы из разных районов города имеет следующий вид: «Автостанция 10-й км» > «Госпиталь» > «Ботанический переулок» > «Стадион “Спартак”». Аналогичный ряд в 2018 г. представлен следующим образом: «Стадион “Спартак”» > «Автостанция 10-й км» > «Госпиталь» > «Ботанический переулок» > > «Краевая библиотека». В 2020 г. ряд уменьшения имеет вид: «Автостанция 10-й км» > «Краевая библиотека» > «Стадион “Спартак”» > «Ботанический переулок» > «Госпиталь» (рис. 5.16).

Поглощение и накопление металлов зависит от экологических факторов среды произрастания, а также от вида растения (Ильин, 1991; Панин, 1999; Шихова, 2012). Поглощение необходимых микроэлементов (Zn и Cu) происходит интенсивнее. Особенностью урбанизированных территорий как среды обитания является наличие множества загрязнителей

различной природы, которые могут препятствовать поступлению других элементов. Антропогенный фактор влияет на все компоненты городской среды, что затрудняет поиск фонового участка. Кроме того, часто загрязнение территории визуально невозможно установить. В связи с этим, вероятно, показатели фонового участка данного исследования не являются свободными от влияния тяжелых металлов техногенной природы, но также вероятны причины природного характера.

### 5.3. Оценка загрязнения территорий Камчатского края

Петропавловск-Камчатский – территория с наибольшей антропогенной нагрузкой в крае. Для достоверной оценки степени загрязнения и дифференциации города по его уровню были рассмотрены дополнительные районы Камчатского края. Оценка их степени загрязнения тяжелыми металлами проводилась на основе их содержания в исследуемых растениях. Для этого использовались средние значения содержания металлов в растительных образцах за июль, август и сентябрь 2020 г. Дополнительно на некоторых участках были отобраны пробы *Leymus mollis*.

Участки отбора проб подразделяются на 4 группы:

- 1) район ООПТ, о. Беринга;
- 2) Восточная Камчатка;
- 3) ПКГО, фоновый участок;
- 4) ПКГО, городская среда.

В районе «ПКГО, городская среда» участки отбора проб отличались от участков 2017 и 2018 гг., дополнительно был осуществлен сбор на территориях, прилегающих к оз. Култучное. Район «Восточная Камчатка» включал следующие участки отбора проб: г. Сарайная, оз. Банное, соп. Бархатная, р. Карымшина, подножье вул. Авачинский. В районе «ООПТ, о. Беринга» сбор растений проводился в прибрежной зоне бухты Старая Гавань, мысов Буян и Гаупта, в селе Никольское.

Для каждой группы было рассчитано среднее содержание цинка, кадмия, меди, свинца, а также их суммарное значение в растительных образцах (рис. 5.17).

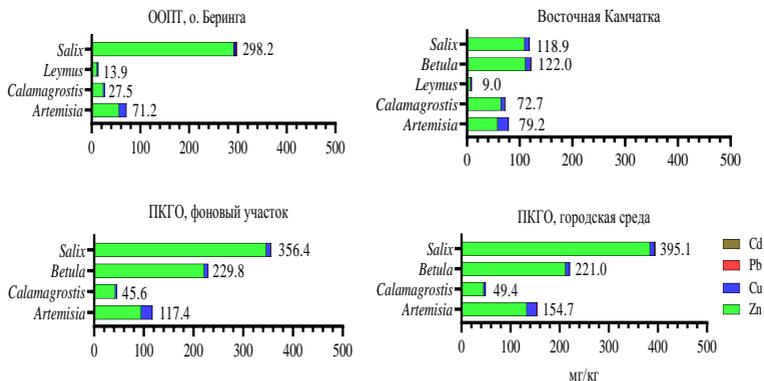


Рис. 5.17. Суммарное содержание металлов (Zn, Cu, Pb, Cd, мг/кг) в исследованных растениях, собранных в районах «Восточная Камчатка», «ООПТ, о. Беринга», «ПКГО, городская среда», «ПКГО, фоновый участок» в летний период 2020 г.

В большей степени всеми растениями накапливались эссенциальные элементы (цинк), в меньшей токсичные – кадмий и свинец.

Растения *Salix* накапливали ТМ в более высоких концентрациях, чем другие виды. Исключение было выявлено в районе «Восточная Камчатка», где в березе содержание металлов было незначительно выше (рис. 5.17). Общий ряд уменьшения содержания тяжелых металлов в исследованных растениях для районов «ПКГО, городская среда», «ПКГО, фоновый участок» имеет следующий вид: *Salix* > *Betula* > *Artemisia* > *Calamagrostis*. Аналогичный ряд для района «Восточная Камчатка» может быть представлен следующим образом: *Betula* > *Salix* > *Artemisia* > *Calamagrostis* > *Leymus*. Ряд уменьшения для «ООПТ, о. Беринга»: *Salix* > *Artemisia* > *Calamagrostis* > *Leymus* (рис. 5.17).

*Salix* накапливает тяжелые металлы в более высоких концентрациях, чем другие виды, исключением является район «Восточная Камчатка», где содержание металлов было выше в березе. Общий ряд уменьшения содержания тяжелых металлов в исследованных растениях для районов «ПКГО, городская среда», «ПКГО, фоновый участок» имеет следующий вид: *Salix* > *Betula* > *Artemisia* > *Calamagrostis*. Аналогичный

ряд для района «Восточная Камчатка» может быть представлен следующим образом: *Betula* > *Salix* > *Artemisia* > *Calamagrostis* > *Leymus*. Ряд уменьшения для «ООПТ, о. Беринга»: *Salix* > *Artemisia* > *Calamagrostis* > *Leymus* (рис. 5.17).

Наибольшая концентрация тяжелых металлов была выявлена в районе «ПКГО, городская среда», наименьшая – в районе «Восточная Камчатка».

Исходя из полученных данных, ива и полынь могут быть использованы как индикаторы металлического загрязнения среды. Полученные для дополнительных районов Камчатского края результаты позволяют использовать эти виды не только для биомониторинга загрязнения ТМ урбанизированных территорий края, но и других участков, испытывающих техногенное воздействие. Например, для анализа экологической ситуации в районах разработки рудных месторождений и углеводородного сырья.

Для *Salix* и *Artemisia* были рассчитаны коэффициенты концентрации как отношение между показателями содержания металлов в городской зоне (ПКГО, городская среда) и в зоне «Восточная Камчатка», также был рассчитан суммарный показатель загрязнения  $Z_c$  (рис. 5.18).

По содержанию тяжелых металлов в листьях полыни все исследованные районы города можно отнести к категории среднего загрязнения. В случае с листьями ивы ситуация почти аналогичная, кроме участков «Ботанический переулок» и «Госпиталь», которые относятся к группе слабого загрязнения. Стоит отметить, что при расчете аналогичных показателей с использованием значений ПКГО, фоновый участок, степень загрязнения территорий города по содержанию тяжелых металлов в листьях относилась только к незначительной и слабой. Ряд уменьшения суммарного показателя содержания тяжелых металлов в полыни на участках исследования имеет следующий вид: «Краевая библиотека» > «Автостанция 10-й км» > «Госпиталь» > «Стадион “Спартак”» > «Ботанический переулок». Аналогичный ряд для ивы: «Автостанция 10-й км» > «Стадион “Спартак”» > «Краевая библиотека» > «Госпиталь» > «Ботанический переулок» (рис. 5.18). При

расчете суммарного загрязнения металлами травянистого яруса с использованием показателей фонового участка ПКГО ряд уменьшения значений  $Z_c$  для полыни был идентичным.

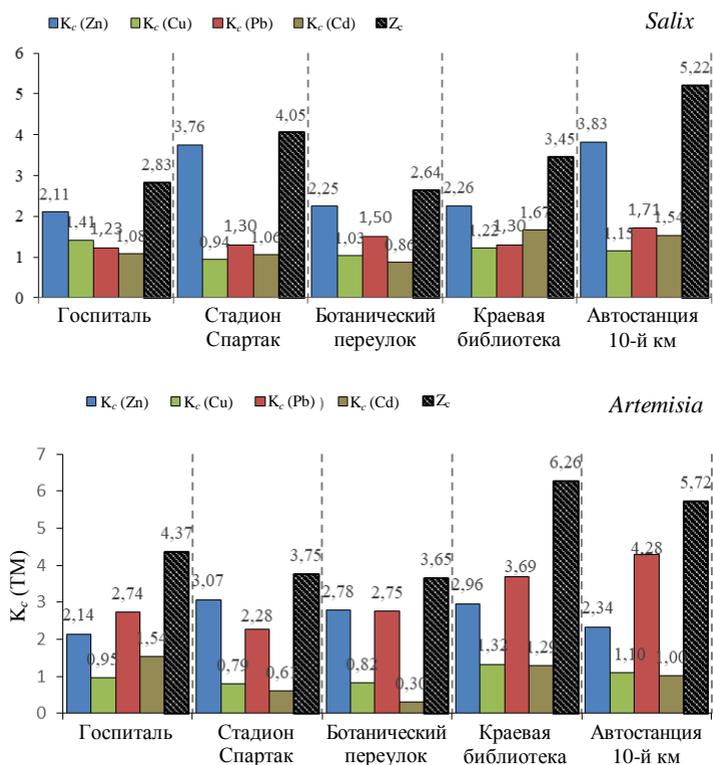


Рис. 5.18. Коэффициенты концентрации ( $K_c$ ) тяжелых металлов (цинка, меди, свинца и кадмия) и значения суммарного показателя загрязнения ( $Z_c$ ) в листьях *Salix* и *Artemisia* из исследуемых районов г. Петропавловска-Камчатского в 2020 г.

Вычисления показателей выполнены относительно содержания металлов в растительных пробах, собранных в районе «Восточная Камчатка»

Растительность урбанизированной среды отличается высокими показателями содержания тяжелых металлов относительно фоновых участков с меньшим влиянием человеческой деятельности. Данный факт свидетельствует о том, что в привнесении этих загрязнителей в окружающую среду

в Камчатском крае большую роль играет антропогенный фактор. Фитоценозы территорий Петропавловска-Камчатского, накапливая металлы, могут являться индикаторами металлического загрязнения. В результате проведенных исследований было установлено, что для данной цели подходят полынь и ива. По содержанию в этих растениях тяжелых металлов удалось установить, что наиболее загрязненным из исследованных участков является «Краевая библиотека» (индикатор *Artemisia*) и «Автостанция 10-й км» (индикатор *Salix*), наименее загрязненным – район «Ботанический переулок».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Распределение тяжелых металлов в почве на территориях города Петропавловска-Камчатского неравномерно и определяется действием антропогенного фактора и вулканической активностью. Содержание Zn и Cu обусловлено природными особенностями города, их концентрация изменялась в незначительном диапазоне на различных участках, в отличие от свинца, присутствие которого определяется воздействием антропогенного фактора. Практически во всех случаях содержание свинца в почвах соответствовало очень сильной или сильной степени загрязнения. Почвы по концентрации меди и цинка в основном могут быть отнесены к слабо- и среднезагрязненным, однако отдельные участки в 2020 г. подходили к категории «сильная степень загрязнения».

Последовательность участков по убыванию величин *PLI* и *NPI* в 2017 г. располагалась следующим образом: «Госпиталь» > «Автостанция 10-й км» > «Краевая библиотека» > > «Ботанический переулок» > «Стадион “Спартак”». Аналогичный ряд в 2018 г. представлен последовательностью: «Ботанический переулок» > «Госпиталь» > «Стадион “Спартак”» > > «Краевая библиотека» > «Автостанция 10-й км». В 2020 г. ряд уменьшения показателя *PLI*,  $Z_c$  представлен следующим образом: «Стадион “Спартак”» > «Краевая библиотека» > > «Автостанция 10-й км» > «Ботанический переулок» > «Госпиталь». Аналогичный ряд для показателя *NPI* в 2020 г.: «Стадион “Спартак”» > «Автостанция 10-й км» > «Краевая библиотека» > «Ботанический переулок» > «Госпиталь».

В целом для почв всех районов характерна слабая степень потенциального экологического риска в результате загрязнения тяжелыми металлами, кроме участков «Ботанический переулок» в 2018 г. и «Стадион “Спартак”» в 2020 г. с сильной и умеренной степенью соответственно.

Расчет межгодовой динамики полиэлементного загрязнения почвы на основе индексов *PLI*, *PERI*, *NPI*,  $Z_c$  показал, что в 2017–2018 гг. происходило увеличение загрязнения, а в период 2018–2020 гг. – уменьшение, что, вероятно, связано с уменьшением передвижений на автотранспорте в весенне-летний период 2020 г.

Распределение тяжелых металлов (Zn, Cu, Pb, Cd) в травянистых и древесных растениях Петропавловск-Камчатского городского округа зависит от экологических факторов мест их произрастания. Среди представителей древесного яруса ива может выступать индикатором содержания цинка и кадмия в окружающей среде, береза – меди и свинца, среди травянистых видов индикатором содержания всех исследованных металлов является *Artemisia vulgaris kamtschatica*.

Динамика изменения концентрации тяжелых металлов связана с усилением антропогенной нагрузки на территории, и как следствие, – увеличением их концентрации в растениях и почве; в случае уменьшения концентрации в растениях можно предположить антагонизм металлов при поглощении и накоплении их растениями.

Было установлено, что *S. udensis*, *B. ermanii*, *A. vulgaris* можно отнести к видам-аккумуляторам; *Alnus hirsuta*, *Rosa amblyotis*, *Calamagrostis canadensis* var. *langsдорffii* – к исключателям. Поглощение растениями необходимых микроэлементов (Zn, Cu) происходит интенсивнее. Среди исследуемых растений наименьший показатель поглощения характерен для *R. amblyotis*, наибольший – для *S. udensis*. При уменьшении антропогенной нагрузки уровень содержания элементов Zn и Cu увеличивается, при этом наблюдается снижение концентрации токсичных элементов (Pb и Cd).

Ряд уменьшения содержания металлов в *A. vulgaris* на участках исследования в 2017 г. имеет следующий вид: «Автостанция 10-й км» > «Ботанический переулок» > «Госпиталь» > «Краевая библиотека» > «Стадион “Спартак”». Аналогичный ряд в 2018 г. представлен следующим образом: «Госпиталь» > «Автостанция 10-й км» > «Стадион “Спартак”» > «Краевая библиотека» > «Ботанический переулок». В 2020 г. ряд

уменьшения выглядит таким образом: «Краевая библиотека» > > «Автостанция 10-й км» > «Госпиталь» > «Стадион “Спартак”» > «Ботанический переулок».

В 2017 г. степень металлического загрязнения растительности районов «Автостанция 10-й км» и «Ботанический переулок» по суммарному содержанию Cu, Zn, Pb и Cd в видах-индикаторах характеризовалась как умеренно опасная. В 2018 г. такая же степень загрязнения растительного покрова была выявлена только в районе «Госпиталь». Незначительное загрязнение растительности как травянисто-кустарникового, так и древесного яруса отмечено для района «Стадион “Спартак”». В остальных районах степень суммарного загрязнения металлами исследованных растений характеризовалась как допустимая. В 2020 г. незначительная степень загрязнения была выявлена в районах «Стадион “Спартак”», «Ботанический переулок», а слабая степень характерна для всех других районов исследования.

Растительность урбанизированной среды отличается высокими показателями содержания тяжелых металлов относительно фоновых участков с меньшим влиянием человеческой деятельности.

Межгодовая динамика полиэлементного загрязнения почвы и растительного покрова г. Петропавловска-Камчатского имеет схожую тенденцию – увеличение воздействия ТМ на исследованные урбандшафты в 2017–2018 гг. и последующее снижение в 2018–2020 гг.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Авдощенко, В. Г.* К вопросу об источниках поступления тяжелых металлов в почву города Петропавловск-Камчатский / В. Г. Авдощенко // Наука и инновации в XXI веке: актуальные вопросы, открытия и достижения : сборник статей VII Междунар. науч.-практич. конф. Ч. 1. – Пенза : Наука и Просвещение. – 2017. – С. 241–243.
2. *Авдощенко, В. Г.* Содержание тяжелых металлов в почвах Петропавловска-Камчатского (Камчатский край) в 2017–2018 гг. / В. Г. Авдощенко, А. В. Климова // Вестник КамчатГТУ. – 2020а. – № 52. – С. 50–63.
3. *Авдощенко, В. Г.* Содержание тяжелых металлов в растениях города Петропавловска-Камчатского (Камчатский край) в 2017–2018 гг. / В. Г. Авдощенко, А. В. Климова // Вестник КамчатГТУ. – 2020б. – № 54. – С. 48–64.
4. *Авессаломова, И. А.* Геохимические показатели при изучении ландшафтов : учеб.-метод. пособ. / И. А. Авессаломова. – М. : Изд-во МГУ. – 1987. – 108 с.
5. *Айвазян, А. Д.* Геохимические особенности флоры ландшафтов юго-западного Алтая / А. Д. Айвазян. – Москва : Изд-во МГУ. – 1974. – 155 с.
6. *Алексеев, Ю. В.* Тяжелые металлы в почвах и растениях / Ю. В. Алексеев. – Ленинград : Агропромиздат. – 1987. – 142 с.
7. *Алексеев, В. А.* Основные факторы накопления химических элементов организмами / В. А. Алексеев // Соросовский образовательный журнал. – 2001. – Т. 7, № 8. – С. 20–24.
8. *Аугустайтис, А. А.* Закономерности роста сосновых древостоев при различном уровне загрязнения природной среды : автореф. дис. ... канд. биол. наук : спец. 03.00.16 «Экология» / А. А. Аугустайтис. – Москва, 1992. – 22 с.
9. *Афанасьева, Л. В.* Влияние атмосферного промышленного загрязнения на сосновые леса бассейна реки Селенги :

автореф. дис. ... канд. биол. наук : спец. 03.00.16 «Экология» / Л. В. Афанасьева ; Бурят. гос. ун-т. – Улан-Удэ, 2005. – 19 с.

10. *Байбеков, Р. Ф.* Методы исследования городских почв : учеб. пособ. / Р. Ф. Байбеков, В. И. Савич, М. М. Овчаренко, И. М. Габбасова, Р. Ш. Афзалов. – М. : ФГОУ ВО РГАУ – МСХА им. К. А. Тимирязева. – 2007. – 202 с.

11. *Байсеитова, Н. М.* Фитотоксичное действие тяжелых металлов при техногенном загрязнении окружающей среды / Н. М. Байсеитова, Х. М. Сартаева // Молодой ученый. – 2014. – № 2 (61) – С. 382–384.

12. *Барышев, А. А.* Особенности биоиндикации загрязнения поверхностных вод тяжелыми металлами / А. А. Барышев, Т. А. Лобанова, А. М. Болдаков // Вестник КГУ. – 2006. – Т. 12, № 8. – С. 12–15.

13. *Белая, Г. А.* Определитель сосудистых растений Камчатской области / Г. А. Белая, Д. П. Воробьев, Н. Н. Гурзенков. – М. : Наука. – 1981. – 412 с.

14. *Белоусова, Н. И.* О государственной почвенной карте масштаба 1 : 1 000 000 на территорию Камчатки / Н. И. Белоусова, С. Ф. Хохлов // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. – 2014. – Вып. 75. – С. 62–82.

15. *Большаков, В. А.* Методические рекомендации по оценке загрязненности городских почв и снежного покрова тяжелыми металлами / В. А. Большаков, Ю. Н. Водяницкий, Т. И. Борисочкина, З. Н. Кахнович, В. В. Мясников. – М. : Почв. ин-т им. В. В. Докучаева. – 1999. – 31 с.

16. *Бородина, Н. А.* Аккумуляция тяжелых металлов хвоей сосны в урбоэкосистеме города Благовещенска / Н. А. Бородина // Известия Самарского научного центра РАН. – 2012. – Т. 14, № 1–8. – С. 1958–1962.

17. *Валева, Г. Р.* Роль отдельных факторов в формировании элементного состава растений : автореф. дис. ... канд. хим. наук : спец. 03.00.16 «Экология» / Г. Р. Валева ; Казанский гос. ун-т им. В. И. Ульянова-Ленина. – Казань, 2004. – 23 с.

18. *Вальков, В. Ф.* Плодородие почв и сельскохозяйственные растения: экологические аспекты / В. Ф. Вальков, Т. В. Денисова, К. Ш. Казеев, С. И. Колесников, Р. В. Кузнецов. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ. – 2008. – 416 с.

19. *Васин, А. Е.* Токсичность некоторых тяжелых металлов для инфузорий рода *Paramecium* / А. Е. Васин // Вестник СамГУ. – 2007. – № 8. – С. 286–293.

20. *Ветрова, О. А.* Особенности поступления тяжелых металлов в растения земляники садовой в условиях техногенного загрязнения : дис. ... канд. сельск.-хоз. наук : спец. 06.01.08 «Плодоводство, виноградарство» / О. А. Ветрова ; ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт селекции плодовых культур». – Мичуринск, 2015. – 128 с.

21. *Виноградов, А. Л.* Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах / А. Л. Виноградов. – Москва : Изд-во Акад. наук СССР. – 1957. – 279 с.

22. *Водяницкий, Ю. Н.* Тяжелые металлы и металлоиды в почвах / Ю. Н. Водяницкий. – Москва : Почвенный институт им. В. В. Докучаева. – 2008. – 85 с.

23. *Войтюк, Е. А.* Аккумуляция тяжелых металлов в почве и растениях в условиях городской среды (на примере г. Чита) : дис. ... канд. биол. наук : спец. 03.02.08 «Экология» (по отраслям) / Е. А. Войтюк. – Бурят. гос. ун-т. – Чита, 2011. – 140 с.

24. *Воскресенская, О. Л.* Накопление тяжелых металлов почвой и растениями в местах сбора и временного хранения твердых бытовых отходов / О. Л. Воскресенская, В. С. Воскресенский, Е. А. Алябышева // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2. – С. 43–47.

25. *Воскресенский, В. С.* Изменение активности окислительно-восстановительных ферментов у древесных растений в условиях городской среды / В. С. Воскресенский, О. Л. Воскресенская // Вестник ПГТУ. – Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2011. – № 1. – С. 75–82.

26. *Гинзбург, А. С.* Влияние ограничений, обусловленных COVID-19, на качество воздуха в Москве / А. С. Гинзбург, В. А. Семенов, Е. Г. Семутникова, М. А. Алешина, П. В. Захарова, Е. А. Лезина // Доклады РАН. Науки о Земле. – 2020. – Т. 495, № 1. – С. 74–79.

27. *Гирина, О. А.* Изучение продуктов извержений вулканов Камчатки с помощью информационной системы VolSatView / О. А. Гирина, Е. А. Лупян, Е. И. Гордеев,

А. А. Сорокин, В. Ю. Ефремов, А. В. Кашницкий, И. А. Уваров, Л. С. Крамарева, Д. В. Мельников, А. Г. Маневич // Материалы Пятой науч.-технич. конф. «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России» 27 сентября – 3 октября 2015 г. – г. Петропавловск-Камчатский – Обнинск : ЕГС РАН. – 2015. – С. 207–211.

28. *ГН 2.1.7.2041-06* Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве: гигиенические нормативы. – Москва : Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. – 2006. – 15 с.

29. *ГН 2.1.7.2511-09* Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве. – Москва : Роспотребнадзор. – 2009 – 11 с.

30. *Голохваст, К. С.* Атмосферные взвеси Петропавловска-Камчатского по данным загрязнения снежного покрова: экологический анализ / К. С. Голохваст, В. В. Жаков, П. А. Никифоров, В. В. Чайка, Т. Ю. Романова, А. А. Карабцов // Бюллетень физиологии и патологии дыхания. – 2014. – № 53. – С. 89–94.

31. ГОСТ 17.4.4.02.2017 Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. – М. : Стандартинформ, 2018. – 21 с.

32. *Григорьева, И. Я.* Изучение биоиндикационных свойств древесных растений на тяжёлые металлы / И. Я. Григорьева // Инновационная наука. – 2015. – Т. 3, № 4. – С. 26–29.

33. *Гусев, Н. Ф.* Содержание тяжёлых металлов в сырье тысячелистника обыкновенного в зоне влияния Гайского горно-обогадательного комбината / Н. Ф. Гусев, А. В. Филиппова, В. В. Трубников, О. Н. Немершина // Известия ОГАУ. – 2015. – № 6 (56). – С. 218–220.

34. *Девятова, Е. А.* Синантропная флора и растительность г. Петропавловска-Камчатского: дис. ... канд. биол. наук: спец. 03.02.01 «Ботаника» / Е. А. Девятова ; ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет». – Уфа, 2016. – 237 с.

35. *Делигодина, Ю. Н.* Особенности депонирования тяжёлых металлов в почвенном покрове территорий воздействия предприятий теплоэнергетики / Ю. Н. Делигодина,

О. Л. Захарова, И. Н. Савельева, Е. В. Шанина // Успехи современного естествознания. – 2017. – № 7. – С. 71–75.

36. *Доклад* об экологической ситуации в Камчатском крае в 2018 г. / Министерство природных ресурсов и экологии Камчатского края. – Петропавловск-Камчатский, 2019. – 395 с.

37. *Доклад* об экологической ситуации в Камчатском крае в 2019 г. / Министерство природных ресурсов и экологии Камчатского края. – Петропавловск-Камчатский, 2020. – 401 с.

38. *Дрогайцева, А. А.* Накопление тяжёлых металлов в экосистеме «почва – растения» *Melampyrum L. argense* степной зоны Оренбургского Предуралья / А. А. Дрогайцева, Г. В. Петрова // Известия ОГАУ. – 2014. – № 6. – С. 50.

39. *Ежегодник* состояния и загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2018 г. – Санкт-Петербург : ФГБУ «ГГО» Росгидромета. – 2019. – 250 с.

40. *Жидков А. Н.* Накопление химических веществ эпифитными и эпигейными лишайниками сосновых насаждений в условиях техногенного загрязнения среды / А. Н. Жидков // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2008. – № 1. – С. 151–156.

41. *Заболотских, В. В.* Концептуальные и технологические подходы к восстановлению устойчивости и плодородия почв / В. В. Заболотских // Известия Самарского научного центра РАН. – 2014. – № 1–7.

42. *Захарихина, Л. В.* Провинции почв Камчатки, различающиеся составом и возрастом вулканических пеплов, на которых они образованы / Л. В. Захарихина // Вестник Томского государственного университета. – Биология. – 2009. – № 2 (6). – С. 95–110.

43. *Захарихина, Л. В.* Вулканизм и геохимия экосистем Камчатки / Л. В. Захарихина, Ю. С. Литвиненко // Вулканизм и связанные с ним процессы: материалы XXI региональной науч. конф., посвященной Дню вулканолога. – Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. – Петропавловск-Камчатский, 2018. – С. 52–55.

44. *Захарихина, Л. В.* Вулканизм и геохимия почвенно-растительного покрова Камчатки. Специфика формирования элементного состава вулканических почв в холодных гумидных

условиях / Л. В. Захарихина, Ю. С. Литвиненко // Вулканология и сейсмология. – 2019а. – № 3. – С. 25–33.

45. *Захарихина, Л. В.* Вулканизм и геохимия почвенно-растительного покрова Камчатки. Элементный состав растительности вулканических экосистем / Л. В. Захарихина, Ю. С. Литвиненко // Вулканология и сейсмология. – 2019б. – № 4. – С. 40–51.

46. *Зокиров, Р. С.* Оценка аккумулирующей способности древесных растений в отношении тяжелых металлов в примарных зонах г. Худжанда / Р. С. Зокиров, О. А. Неверова // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 5. – 293 с.

47. *Зубкова, В. М.* Особенности накопления и распределения тяжелых металлов в сельскохозяйственных культурах и влияние удобрений на их поведение в системе почва – растение : дис. ... д-ра биолог. наук : спец. 06.01.04 «Агрохимия» / В. М. Зубкова. – Московская сельскохозяйственная академия имени К. А. Тимирязева. – Москва, 2003. – 518 с.

48. *Иваненко, Н. В.* Анализ почвенно-земельных ресурсов Камчатского края – перспективы использования / Н. В. Иваненко // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 12 (часть 1). – С. 85–89.

49. *Иванова, Ю. С.* Загрязнение почв тяжелыми металлами под влиянием несанкционированных свалок (медико-экологический аспект) / Ю. С. Иванова, В. Н. Горбачев // Ульяновский медико-биологический журнал. – 2012. – № 1. – С. 119–124.

50. *Иванова, Ю. С.* Эколого-геохимическая опасность локальных несанкционированных свалок на территории г. Ульяновска / Ю. С. Иванова // Ульяновский медико-биологический журнал. – 2011. – № 1. – С. 136–141.

51. *Ильин, В. Б.* Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области / В. Б. Ильин, А. И. Сысо. – Новосибирск : Издательство СО РАН. – 2001. – 229 с.

52. *Ильин, В. Б.* Тяжелые металлы в системе почва-растение / В. Б. Ильин. – Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1991. – 151 с.

53. *Ильин, В. Б.* Химические элементы в системе почва – растение / В. Б. Ильин, М. Д. Степанова. – Новосибирск : Наука. – 1982. – С. 73–92.

54. *Кабата-Пендиас, А.* Микроэлементы в почвах и растениях / А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас ; пер. с англ. Д. В. Гричук и Е. П. Якина. – Москва : Мир. – 1989. – 439 с.

55. *Касатиков, В. А.* Агроэкологические основы применения осадков городских сточных вод в качестве удобрения : автореф. дис. ... д-ра сельскохозяйств. наук. : спец. 06.01.04 «Агрохимия» / В. А. Касатиков. – Московская ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия имени К. А. Тимирязева. – Москва, 1989. – 35 с.

56. *Карпачевский, Л. О.* Почвы Камчатки / Л. О. Карпачевский, И. О. Алябина, Л. В. Захарихина, А. О. Макеев, М. С. Маречек, А. Ю. Радюкин, С. А. Шоба, В. О. Таргульян. – М. : Геос. – 2009. – 250 с.

57. *Кириченко, В. Е.* Интегральная карта антропогенного воздействия на природные комплексы Камчатки / В. Е. Кириченко, О. А. Чернягина // Дальневосточная региональная конференция, посвященная памяти А. П. Васьковского (95-летие). – Магадан. – 28–29 ноября 2006 г. – URL : <http://www.terrakamchatka.ru/archive/maprus.htm>.

58. *Козаренко, О. М.* Поступление тяжелых металлов на поверхность листьев растений в течение вегетационного периода в лиственных лесах Калужской области / О. М. Козаренко, А. Е. Козаренко // Тяжелые металлы в окружающей среде. – Пущино, 1996. – С. 85–87.

59. *Коновалова, О. Н.* Формы нахождения тяжелых металлов в почвенно-растительном покрове г. Архангельска : дис. ... канд. хим. наук : спец. 03.02.08 «Экология» (по отраслям) / О. Н. Коновалова. – ФГАОУ ВО «Северный (арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова», высшая школа естественных наук и технологий. – Архангельск, 2019. – 202 с.

60. *Корельская, Т. А.* Тяжелые металлы в почвенно-растительном покрове селитебного ландшафта города Архангельска / Т. А. Корельская, Л. Ф. Попова // Арктика и Север. – 2012. – № 7. – 136–152.

61. *Корчагина, К. В.* Оценка загрязнения городских почв тяжелыми металлами с учетом профильного распределения их объемных концентраций : автореф. дис. ... канд. биол. наук : спец. 03.02.13 «Почвоведение» / К. В. Корчагина. – Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. – Москва. – 2014. – 25 с.

62. *Кравченко, А. Л.* Факторы, влияющие на поведение тяжелых металлов в почве / А. Л. Кравченко // Материалы VIII Междунар. студенч. научн. конф. «Студенческий научный форум» – URL: <http://scienceforum.ru/2016/article/2016028399>"<http://scienceforum.ru/2016/article/2016028399> (дата обращения: 03.06.2020 ).

63. *Кулагин А. А., Шагиева Ю. А.* Древесные растения и биологическая консервация промышленных загрязнителей / А. А. Кулагин, Ю. А. Шагиева. – М. : Наука, 2005. – 190 с.

64. *Кудряшова, В. И.* Аккумуляция тяжелых металлов дикорастущими растениями : автореф. дис. ... канд. биол. наук : спец. 03.00.16 «Экология» / В. И. Кудряшова – Морд. гос. ун-т им. Н. П. Огарева. – Саранск, 2003. – 19 с.

65. *Ларионов, М. В.* Накопление древесными растениями тяжелых металлов в зависимости от автотранспортной нагрузки / М. В. Ларионов // Вестник ННГУ. – 2014. – № 4–1. – С. 228–232.

66. *Лебедовский, И. А.* К вопросу агроэкологической оценки почв на содержание тяжелых металлов / И. А. Лебедовский // Научный журнал КубГАУ (Scientific Journal of KubSAU). – 2007. – № 32. – С. 124–136.

67. *Литвиненко, Ю. С.* Почвенные провинции Камчатки и их геохимическая характеристика / Ю. С. Литвиненко, Л. В. Захарихина // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2008. – № 1, вып. 11. – С. 98–112.

68. *Лобанов, Е. М.* Транспортные проблемы современных больших городов / Е. М. Лобанов // Транспорт Российской Федерации. – 2005. – № 1 (1). – С. 29–31.

69. *Лукина, Н. В.* Поглощение аэротехногенных загрязнителей растениями сосняков на северо-западе Кольского полуострова / Н. В. Лукина, В. В. Никонов // Лесоведение. – 1993. – № 6. – С. 34–41.

70. *Масленников, П. В.* Аккумуляция металлов в растениях урбоэкосистем / П. В. Масленников, В. П. Дедков, М. В. Куркина, А. С. Ващейкин, И. О. Журавлев, Н. В. Бавтрук // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки. – 2015. – № 7. – С. 57–69.

71. *Масленников, П. В.* Аккумуляция железа в растениях урбоэкосистем г. Калининграда / П. В. Масленников, Л. Н. Скрыпник, М. В. Куркина, П. В. Федурьев, А. В. Тюрганова, Е. В. Бабайцева, К. Ю. Устинова // Современные проблемы науки и образования. – 2016. – № 3. – 392 с.

72. *Медведев, И. Ф.* Тяжелые металлы в экосистемах / И. Ф. Медведев, С. С. Деревягин. – Саратов : Ракурс. – 2017. – 178 с.

73. *Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства.* – М. : ЦИНАО. – 1992. – 57 с.

74. *Методические указания 2.1.7.730-99* Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест : метод. указания. – М. : НИИ экологии человека и гигиены окружающей среды. – 1999. – 20 с.

75. *Миронов, А. А.* Автомобильные дороги и охрана окружающей среды / А. А. Миронов, И. Е. Евгеньев. – Томск : Изд-во Том. ун-та. – 1986. – 284 с.

76. *Морачевский, А. Г.* Отработанные свинцовые аккумуляторы – важнейший источник вторичного свинца / А. Г. Морачевский // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2014. – № 4 (207). – С. 127–137.

77. *Мучник, Е. Э.* Лишайники как индикаторы состояния лесных экосистем центра европейской России / Е. Э. Мучник // Лесотехнический журнал. – 2015. – № 3 (19). – С. 65–76.

78. *Национальный атлас почв Российской Федерации* / С. А. Шоба, Г. В. Добровольский, И. О. Алябина [и др.] – Москва : Астрель, 2011. – 632 с.

79. *Неведров, Н. П.* Содержание тяжелых металлов в поверхностных горизонтах почв функциональных зон Курской городской агломерации / Н. П. Неведров, Е. Н. Дюканова,

Н. Ю. Неведрова // Научные ведомости Белгородского гос. ун-та. Серия: Естественные науки. – 2016. № 11 (232). – С. 139–145.

80. *Неверова, О. А.* Опыт использования биоиндикаторов в оценке загрязнения окружающей среды = Experience of using bioindicators to estimate the pollution of environment : анализ. обзор / О. А. Неверова, Н. И. Еремеева. – Гос. публич. науч.-техн. б-ка Сиб. отд-ния Рос. акад. наук. – Ин-т экологии человека. – Новосибирск, 2006. – 88 с.

81. *Неверова, О. А.* Применение фитоиндикации в оценке загрязнения окружающей среды / О. А. Неверова // Биосфера. – 2009. – № 1. – С. 82–92.

82. *Неверова, О. А.* Фитоиндикация загрязнения городской среды тяжелыми металлами (на примере г. Кемерово) / О. А. Неверова, В. М. Позняковский // Известия ВУЗов. Лесной журнал. – 2005. – № 4. – С. 92–96.

83. *Неверова, О. А.* Экологическая оценка состояния древесных растений и загрязнения окружающей среды промышленного города (на примере г. Кемерово) : дис. ... д-ра биол. наук : спец. 03.00.16 – Экология / О. А. Неверова. – Московский государственный университет леса – Москва, 2004. – 358 с.

84. *Опекунова, М. Г.* Использование лишайников в качестве биоиндикаторов загрязнения окружающей среды / М. Г. Опекунова, М. Ю. Гизетдинова // Вестник СПбГУ. – 2014. – № 1. – С. 79–94.

85. *Панин, М. С.* Аккумуляция тяжелых металлов растениями Семипалатинского Прииртышья / М. С. Панин. – Семипалатинск : Гос. ун-т. – 1999. – 308 с.

86. *Парфенова, Е. А.* Оценка загрязнения почв тяжелыми металлами в результате влияния выбросов автотранспорта / Е. А. Парфенова // Известия ПГПУ им. В. Г. Белинского. – 2011. – № 25. – С. 590–592.

87. *Парфенова, С. Р.* Содержание тяжелых металлов и фитотоксичность почв урбанизированных территорий / С. Р. Парфенова // StudNet. – 2020. – № 12. – С. 1041–1046.

88. *Перельман, А. И.* Геохимия ландшафта / А. И. Перельман. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высш. школа. – 1975. – 341 с.

89. *Перельман, А. И.* Геохимия ландшафта / А. И. Перельман. – Москва : Географгиз. – 1961. – 392 с.

90. *Попова, Л. Ф.* Экологическое нормирование содержания тяжелых металлов в почвах Архангельской промышленной агломерации / Л. Ф. Попова // Arctic Environmental Research. – 2012. – № 3. – С. 42–47.

91. *Попова, Л. Ф.* Нормирование качества городских почв и организация почвенно-химического мониторинга : учеб. пособие / Л. Ф. Попова, Е. Н. Наквасина. – Архангельск : Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова. – 2014. – 101 с.

92. *Постановление № 2603* «Об утверждении актуализированной схемы теплоснабжения Петропавловск-Камчатского городского округа до 2030 года на 2020 год».

93. *Прохорова, Н. В.* Тяжелые металлы в почвах и растениях в условиях техногенеза / Н. В. Прохорова, Н. М. Матвеев // Вестник СамГУ. – 1996. – С. 125–148.

94. *Реймерс, Н. Ф.* Экология (теория, законы, правила, принципы и гипотезы) / Н. Ф. Реймерс. – Москва : Россия молодая. – 1994. – 367 с.

95. *Романькова, А. А.* Содержание кадмия и свинца в высших растениях на территории Красненского района Белгородской области / А. А. Романькова, И. В. Батлуцкая // Научные ведомости БелГУ. Серия: Естественные науки. – 2011. – № 3 – С. 98.

96. *Русанов, А. М., Турлибекова, Д. М.* Тяжёлые металлы в плодах шиповника парков города Орска / А. М. Русанов, Д. М. Турлибекова // Вестник ОГУ. – 2011. – № 12. – С. 299–300.

97. *Сает, Ю. Е.* Геохимия окружающей среды / Ю. Е. Сает, Б. А. Ревич, Е. П. Янин, Р. С. Смирнова и др. – М. : Недра. – 1990. – 335 с.

98. *СанПин 2.1.7.1287-03.* Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы – Москва : Министерство здравоохранения Российской Федерации, 2007. – 16 с.

99. *СанПин 2.1.3684-21* Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому

водоснабжению населения, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий. – Москва : Роспотребнадзор, 2021 – 66 с.

100. *СанПин 2.3.2.1078-01* Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов, 2001. – 34 с.

101. *Седельникова, Л. Л.* Изменчивость коэффициента биологического поглощения тяжелых металлов вегетативными органами *Nemegocallis hybrida* / Л. Л. Седельникова, О. В. Чанкина // Ученые записки ЗабГУ. Серия: Биологические науки. – 2017. – Т. 12, № 1. – С.45–51.

102. *Серегина, И. И.* Цинк, селен и регуляторы роста в агроценозе : монография / И. И. Серегина. – Москва : ООО «Прспект». – 2018. – 208 с.

103. *Сибиркина, А. Р.* Биогеохимическая оценка содержания тяжелых металлов в сосновых борах Семипалатинского Прииртышья : автореф. дис. ... д-ра биол. наук : спец. 03.02.08 «Экология» / А. Р. Сибиркина ; Омский гос. пед. ун-т. – Омск, 2014. – 37 с.

104. *Симонова, Г. В.* Мхи и лишайники как индикаторы загрязнения атмосферы / Г. В. Симонова, Д. А. Калашникова // Актуальные вопросы современной науки : сборник статей по материалам X междунар. науч.-практич. конф.: в 4 частях. – Томск, 12 марта 2018 года. – Томск : Общество с ограниченной ответственностью «Дендра». – 2018. – С. 176–181.

105. *Слепнев, М. А.* Воздействие загрязнения городской воздушной среды автотранспортом на жизнедеятельность населения / М. А. Слепнев, А. С. Маршалкович // Вестник МГСУ. – 2010. – № 4–5. С. 141–146.

106. *Снакин, В. В.* Экология и охрана природы : словарь-справочник / В. В. Снакин; под ред. А. Л. Яншина. – Москва : Academia. – 2000. – 384 с.

107. *Соболева, Е. В.* Экологическое состояние селитебных территорий по степени загрязнения почв тяжелыми металлами / Е. В. Соболева, М. А. Шишлова // Проблемы региональной экологии. – 2018. – № 2. – С. 12–16.

108. *Соколов, И. А., Белоусова, Н. И.* Особенности водно-физических свойств водно-теплового режима лесных вулканических почв Камчатки / И. А. Соколов, Н. И. Белоусова // Почвоведение. – 1966. – № 5. – С. 67–78.

109. *Сомов, В. В.* Миграция и аккумуляция тяжелых металлов в природных и антропогенно преобразованных ландшафтах башкирского Зауралья : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : спец. 25.00.36 «Геоэкология» (по отраслям) / В. В. Сомов. – Рос. гос. гидрометеорол. ун-т. – Санкт-Петербург, 2018. – 27 с.

110. *Ступникова, Н. А.* Экологическое состояние снежного покрова в г. Петропавловске-Камчатском / Н. А. Ступникова, Т. В. Салихова // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование : материалы VII Всероссийской науч.-практич. конф. с междунар. участием: в 2 частях. – Петропавловск-Камчатский, 22–24 марта 2016 года. – Петропавловск-Камчатский : Камчатский государственный технический университет. – 2016. – С. 54–58.

111. *Тарханов, С. Н.* Влияние аэротехногенного загрязнения на покрытие стволов деревьев эпифитными лишайниками в лесных насаждениях Северо-Двинского бассейна и Беломорско-Кулойского плато / С. Н. Тарханов // Известия ВУЗов. Лесной журнал. – 2016. – № 1 (349). – С. 37–47.

112. *Ташекова, А. Ж.* Использование листьев растений как биогеохимических индикаторов состояния городской среды / А. Ж. Ташекова, А. С. Торопов // Известия ТПУ. – 2017. – № 5. – С. 114–124.

113. *Теплая, Г. А.* Тяжелые металлы как фактор загрязнения окружающей среды (обзор литературы) / Г. А. Теплая // Астраханский вестник экологического образования. – 2013. – № 1 (23). – С. 182–192.

114. *Титов, А. Ф.* Физиологические основы устойчивости растений к тяжелым металлам : учеб. пособ. / А. Ф. Титов, В. В. Таланова, Н. М. Казнина ; Институт биологии Карельского НЦ РАН. – Петрозаводск : Карельский научный центр РАН. – 2011. – 77 с.

115. *Титов, А. Ф.* Тяжелые металлы и растения : монография / А. Ф. Титов, Н. М. Казнина, В. В. Таланова. – Петрозаводск : Институт биологии Карельского научного центра, 2014. – 194 с.
116. *Узаков, З. З.* Тяжелые металлы и их влияние на растения / З. З. Узаков // Символ науки. – 2018. – № 1–2. – С. 52–53.
117. *Уфимцева, М. Д.* Закономерности накопления химических элементов высшими растениями и их реакции в аномальных биогеохимических провинциях / М. Д. Уфимцева // Геохимия. – 2015. – № 5. – С. 450–465.
118. *Черненкова, Т. В.* Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение. / Т. В. Черненкова // Москва : Наука. – 2002. – 189 с. – ISBN 5-02-006430-0.
119. *Чикенёва, И. В., Абузярова, Ю. В.* Содержание тяжёлых металлов в побочной продукции полевых культур в условиях техногенного воздействия / И. В. Чикенёва, Ю. В. Абузярова // Известия ОГАУ. – 2011. – № 4 (32) – С. 280–282.
120. *Чикенёва, И. В.* Исследование опасностей антропогенного влияния Орско-Новотроицкого промышленного узла / И. В. Чикенёва // Известия ОГАУ. – 2012. – № 3 (35). – С. 236–239.
121. Федеральная служба государственной статистики. Транспорт – URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/23455> (дата обращения: 16.05.2021).
122. *Хеттипатирана, Т.* Определение содержания тяжелых и токсичных металлов в почвах с использованием атомно-эмиссионного спектрометра с микроволновой плазмой / Т. Хеттипатирана, М. И. Мельник // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. – 2014. – Вып. 6. – С. 728–733.
123. *Шихова, Н. С.* Некоторые закономерности в накоплении свинца растениями в условиях урбанизации (на примере г. Владивостока) / Н. С. Шихова // Сибирский экологический журнал. – 2012. – Т. 19, № 2. – С. 285–294.
124. *Эвембе, Д.* Изучение транслокации тяжелых металлов и приемов их детоксикации в черноземной и дерново-подзолистой почвах : дис. ... канд. сельск.-хоз. наук : спец. 06.01.04 «Агрохимия» / Д. Эвембе. – Рос. ун-т дружбы народов (РУДН). – Москва, 2002. – 103 с.

125. *Экспериандова, Л. П.* Еще раз о пределах обнаружения и определения / Л. П. Экспериандова, К. Н. Беликов, С. В. Химченко, Т. А. Бланк // Журнал аналитической химии. – 2010. – Т. 65, № 3. – С. 229–234.

126. *Эргашева, Х. Б.* Содержание тяжёлых металлов в зерне пшеницы / Х. Б. Эргашева // Наука и образование сегодня. – 2019. – № 2 (37) – С. 20–22.

127. *Ягафарова, Г. А.* Содержание свинца в почве и в тысячелистнике азиатском в условиях Южного Урала / Г. А. Ягафарова // Вестник Башкирского университета. Раздел: Биология и медицина. – 2006. – Т. 11, № 3. – С. 68–69.

128. *Яковлева, С. Н.* Содержание тяжелых металлов в системе почва-медоносное растение на территории техногенных ландшафтов / С. Н. Яковлева, Р. Р. Фаткуллин // Известия ОГАУ. – 2019. – № 1. – С. 20–21.

129. *Якубов, В. В.* Растения Камчатки : полевой атлас / В. В. Якубов. – М. : Путь, Истина и Жизнь, 2007. – 260 с.

130. *Якубов, В. В.* Каталог флоры Камчатки (сосудистые растения) / В. В. Якубов, О. А. Черныгина. – Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2004. – 165 с.

131. *Якушевская, Е. Б.* Растения – индикаторы состояния городской среды / Е. Б. Якушевская, Е. П. Якимова // Ученые записки ЗабГУ. Серия: Биологические науки. – 2013. – № 1 (48). – С. 16–121.

132. *Янтурин, И. Ш.* Особенности содержания тяжелых металлов в органах *Inula helenium* L. в геохимических условиях Южного Урала / И. Ш. Янтурин, А. А. Аминева // Вестник ВУиТ. – 2013. – Т. 1, № 4 (14). – С. 64–73.

133. *Andre, O.* Foliage response to heavy metal contamination in Sycamore Maple (*Acer pseudoplatanus* L) / O. Andre, P. Vollenweider, M. Gunthardt-Goerg // Forest Snow Landscape Research. – 2006. – № 80 (3). – P. 275–288.

134. *Baker, A. J. M.* Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements-a review of their distribution, ecology and phytochemistry / A. J. M. Baker, R. R. Brooks // Biorecovery. – 1989. – Vol. 1 – P. 81–126.

135. *Bidar G.* Behavior of *Trifolium repens* and *Lolium perenne* growing in a heavy metal contaminated field: plant metal

concentration and phytotoxicity / G. Bidar, G. Garçon, C. Pruvot, D. Dewaele, F. Cazier, F. Douay, P. Shirali. – Environmental Pollution 2007. – 147 (3). 546–553.

136. *Brown, G. E.* Mineral surface and bioavailability of heavy metals: a molecular-scale perspective / G. E. Brown, A. L. Foster, J. D. Ostergren // Proc. Natl. Acad. Sci. – USA, 1999. – Vol. 96. – P. 3388–3395.

137. *Chibuike, G. U.* Heavy Metal Polluted Soils: Effect on Plants and Bioremediation Methods / G. U. Chibuike, S. C. Obiora // Hindawi Publishing Corporation Applied and Environmental Soil Science. – Vol. 2014. – Article ID 752708 – P. 12.

138. *Davydova, S.* Heavy metals as toxicants in big cities / S. Davydova // Microchemical Journal. – 2005. – Vol. 79, № 1–2. – P. 133–136. – DOI: 10.1016/j.microc.2004.06.010.

139. *Duruibe, J. O.* Heavy metal pollution and human biotoxic effects / J. O. Duruibe, M. O. C. Ogwuegbu, J. N. Egwurugwu // International Journal of Physical Sciences. – 2007. – Vol. 2. – P. 112–118.

140. *Franiel, I.* The Growth and Reproductive Effort of *Betula pendula* Roth in a Heavy-Metals Polluted Area / I. Franiel, A. Babczynska // Polish Journal of Environmental Studies. – 2011. – Vol. 20. – P. 1097–1101.

141. *Godbold, D. L.* Use of root elongation studies to determine aluminum and lead toxicity in *Picea abies* seedlings / D. L. Godbold, C. Knetter // J. Plant Physiol. – 1991. – Vol. 138, № 2. – P. 231–235.

142. *Gong, Q.* Calculating pollution indices by heavy metals in ecological geochemistry assessment and a case study in parks of Beijing / Q. Gong, J. Deng, Y. Xiang, Q. Wang, L. Yang // Journal of China University of Geosciences – 2008. – Vol. 19. – P. 230–241.

143. *Hailu, R.* Levels of heavy metals in soil and vegetables and associated health risks in Mojo area, Ethiopia / R. Hailu, L. D. B. Gebeyehu // Published : January 30. – 2020. – URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227883>, <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0227883>.

144. *Håkanson, L.* An ecological risk index for aquatic. Pollution control: a sedimentological approach // Water Research. – 1980. – Vol. 14. – P. 975–1001.

145. *Hazrat, A.* Environmental Chemistry and Ecotoxicology of Hazardous Heavy Metals: Environmental Persistence, Toxicity, and Bioaccumulation, Hindawi / A. Hazrat, K. Ezzat, I. Ikram // Journal of Chemistry. – 2019. – Vol. 2019. – P. 1–14. – Article ID 6730305.

146. *Jing, Y.* Heavy metal accumulation characteristics of Nepalese alder (*Alnus nepalensis*) growing in a lead-zinc spoil heap, Yunnan, Southwestern China / Y. Jing, H. Cui, T. Li, Z. Zhao // IForest. – 2014. – Vol. 7. – P. 204–208.

147. *Kerimray, A.* Assessing Air Quality Changes in Large Cities during COVID-19 Lockdowns: The Impacts of Traffic-free Urban Conditions in Almaty, Kazakhstan / A. Kerimray, N. Baimatova, O. P. Ibragimova, et al // Science of the Total Environment. – 2020. – Vol. 730. – P. 139–179.

148. *Kowalska, J. B.* Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination—A review. Environ Geochem Health / J. B. Kowalska, R. Mazurek, M. Gąsiorek, T. Zaleski. – 2018. – Vol. 40. – P. 2395–2420.

149. *Le Quere, C.* Temporary Reduction in Daily Global CO<sub>2</sub> Emissions during the COVID-19 Forced Confinement / C. Le Quere, R. Jackson, M. Jones, A. Smith, S. Abernethy, R. Andrew, A. De-Gol, Y. Shan, J. Canadell, P. Friedlingstein, F. Creutzig, G. Peters. // Nat. Clim. Chang. – 2020. – Vol. 10. – P. 647–653. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0797-x>.

150. *Mertens, J.* Metal uptake by young trees from dredged brackish sediment: Limitations and possibilities for phytoextraction and phytostabilisation / J. Mertens, P. Vervaeke, A. De Schrijver, S. Luyssaert // Science of the total environment. – Vol. 326. – 2004. – P. 326–209.

151. *Müller, G.* Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River / G. Müller // Geo Journal. – 1969. – Vol. 2. – P. 108–118.

152. *Nowrouzi, M.* Application of geoaccumulation index and enrichment factor for assessing metal contamination in the sediments of Hara Biosphere Reserve / M. Nowrouzi, A. Pourkhabbaz. Iran // Chemical Speciation & Bioavailability. – 2014. – Vol. 26. – P. 99–105.

153. *Salgare, S. A.* Effect of industrial pollution on growth and content of certain weeds / S. A. Salgare, C. Acharekar // Journal for Nature Conservation. – 1992. – Vol. 4. – P. 1–6.

154. *Sarapulova, G. I.* Environmental geochemical assessment of technogenic soils / G. I. Sarapulova // Записки Горного института. – 2018. – Vol. 234. – P. 658–662.

155. *Shahid, M. Khan* Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake / M. Shahid, C. Dumat S. Khalid, and E. Schreck, and T. Xiong, and N. K. Niazi // Journal of Hazardous Materials. – 2016. – Vol. 325. – P. 36–58.

156. *Sharma, R. K.* Biological effects of heavy metals: An overview / R. K Sharma, M. Agrawal // J. Environ. Biol. – 2005. – Vol. 26, № 3/4. – P. 1–13.

157. *Varol, M.* Assessment of heavy metal contamination in sediments of the Tigris River (Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques / M. Varol // Journal of Hazardous Materials. – 2011. – Vol. 195. – P. 355–364.

158. *Wang, P.* Severe Air Pollution Events Not Avoided by Reduced Anthropogenic Activities during COVID-19 Outbreak / P. Wang, K. Chen, S. Zhu, P. Wang, H. Zhang // Resources, Conservation and Recycling. – 2020. – V. 158. – P. 1–9.

**Монография**

**Авдошенко Виктория Геннадьевна  
Климова Анна Валерьевна**

**ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В ПОЧВЕ И РАСТЕНИЯХ  
ГОРОДА ПЕТРОПАВЛОВСКА-КАМЧАТСКОГО  
(КАМЧАТСКИЙ КРАЙ)**

Редактор Е. Г. Стреляева  
Набор текста В. Г. Авдошенко, А. В. Климова  
Верстка, оригинал-макет Е. Е. Бабух

Подписано в печать 14.12.2021 г.  
Формат 60\*84/16. Печать цифровая. Гарнитура Times New Roman  
Авт. л. 6,6. Уч.-изд. л. 6,97. Усл. печ. л. 7,79  
Тираж 500 экз. Заказ № 15

Издательство  
Камчатского государственного технического университета

Отпечатано участком оперативной полиграфии издательства КамчатГТУ  
683003, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Ключевская, 35

