

ЭКОЛОГО-ХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЧАСТИ ВОДОСБОРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ОЗЕР КУЛТУЧНОЕ И БАННОЕ (КАМЧАТСКИЙ КРАЙ)

Ильюшенко Н.А., Климова А.В.,

Камчатский государственный технический университет, г. Петропавловск-Камчатский

Аннотация. В работе приведены данные по содержанию тяжелых металлов (Cu, Ni, Pb, Cd и Zn) в почвенно-растительном покрове части водосборных территорий озера Култучное, находящегося в центре г. Петропавловска-Камчатского, и озера Банное, расположенного за его пределами. Сравнительный анализ выявил общие закономерности в латеральном и радиальном распределении металлов в компонентах исследованных ландшафтов. Особенностью радиального распределения элементов в почвах является наличие биогеохимического барьера. Латеральная миграция металлов происходит по нижне-аккумулятивному типу.

Ключевые слова: водосбор озер, малые водные объекты, почвенно-растительный покров, тяжелые металлы, урбанизированные территории, Камчатский край

ECOLOGICAL-CHEMICAL STUDIES OF PART OF THE CATCHMENT AREAS OF LAKES KULTUCHNOE AND BANNOYE (KAMCHATSK TERRITORY)

Ilyushenko N.A., Klimova A.V.

Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky

Annotation. The paper presents data on the content of heavy metals (Cu, Ni, Pb, Cd and Zn) in the soil and vegetation cover of part of the catchments of Lake Kultuchnoe, located in the center of Petropavlovsk-Kamchatsky, and Lake Bannoe, located beyond its borders. A comparative analysis revealed general patterns in the lateral and radial distribution of metals in the components of the studied landscapes. A feature of the radial distribution of elements in soils is the presence of a biogeochemical barrier. Lateral migration of metals occurs according to the lower accumulative type.

Keywords: lake catchment area, small waterbodies, soil and vegetation cover, heavy metals, urbanized areas, Kamchatka territory

Введение. Городская среда является наиболее востребованной для жизни большей части населения Земли. Обладая очевидными технологическими преимуществами, современная урбогеосистема характеризуется высокой степенью трансформации и загрязнением всех компонентов естественного ландшафта, превращая город в неустойчивую и крайне агрессивную, в том числе и для человека, среду [7, 10]. В естественном ландшафте часто города возникали рядом с водными объектами: реками, озерами, лагунами и т.д., уровень загрязнения которых связан не только со степенью антропогенного воздействия на них, но и с природными эколого-химическими особенностями исходной территории. Известно, что депонирование поллютантов, включая тяжелые металлы (ТМ), водными объектами в условиях воздействия диффузных источников происходит по денудационному принципу [14]. Безусловно, мониторинг состояния городской среды требует учета ландшафтного подхода и определяет необходимость исследования водосборных территорий в целом.

Исторический и современный центр г. Петропавловск-Камчатского (Камчатский край) приурочен к озеру Култучному и склонам его водосбора. Высокая функциональная нагрузка и рост антропогенного давления на сопредельные районы озера [2, 9] определяет

актуальность изучения загрязнения почв и растительного покрова некоторыми тяжелыми металлами на основе ландшафтно-геохимических катен [8]. Поэтому целью настоящего исследования являлась оценка уровня загрязнения почвенно-растительного покрова части водосборных территорий урболандшафта озера Култучного.

Материалы и методы. Территория исследования расположена в границах г. Петропавловска-Камчатского, а также за его пределами – в районе оз. Банное, выступающим в качестве фонового участка со схожими физико-географическими характеристиками (рис. 1). Первый участок исследования находится в центральной части г. Петропавловска-Камчатского и включает юго-восточный склон соп. Мишенная с прилегающей береговой частью оз. Култучное (рис. 1 А, Б). Здесь расположены ключевые объекты транспортной инфраструктуры, деловой, промышленной и селитебной застройки. Второй участок приурочен к южному склону соп. Острой и части берега оз. Банного (рис. 1 В, Г). В настоящее время данная территория практически не испытывает антропогенного давления, однако ранее до 90-х гг. XIX в. здесь находился поселок Большая Океанская, сейчас же остались лишь следы былой инфраструктуры. Оба участка характеризуются расчлененным рельефом, образованным чередованием сопков вулканического происхождения и понижений с наличием в них водных объектов. Климат умеренный, морской с коротким вегетативным периодом.

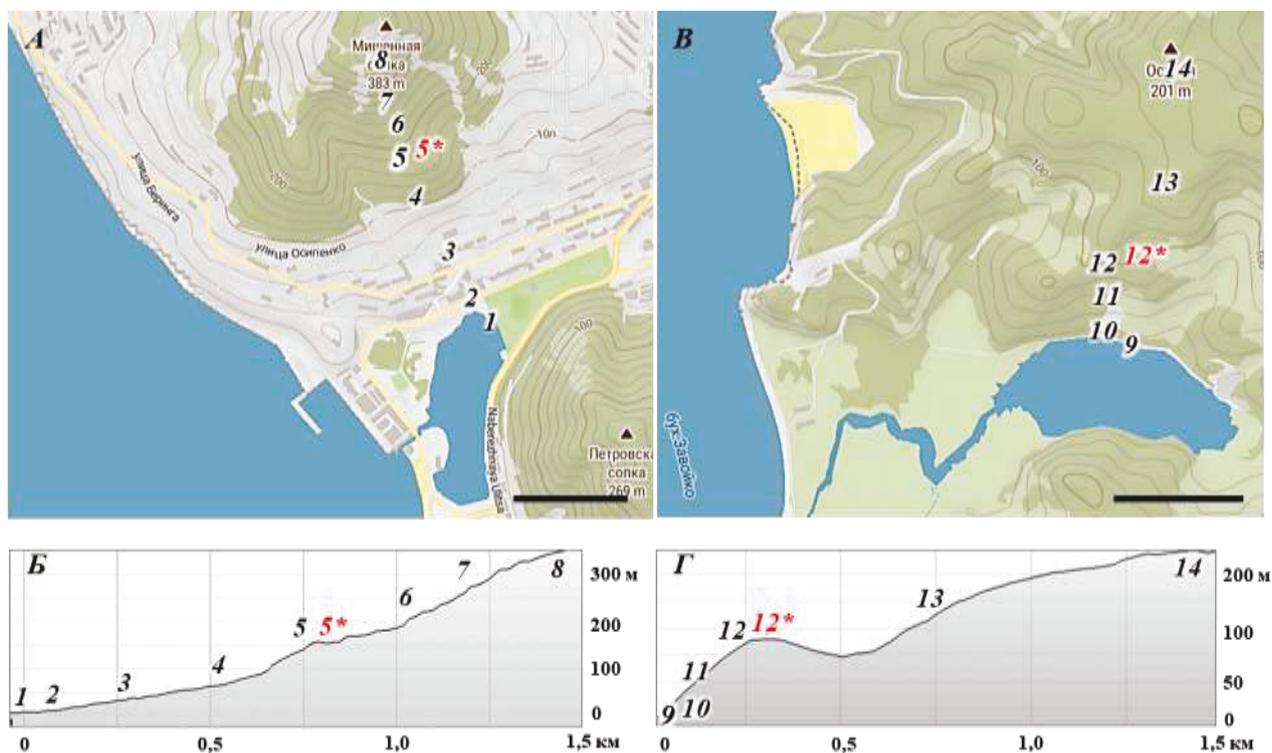


Рис. 1. Карта-схема района исследований у восточного побережья Авачинской губы (Юго-восточная Камчатка): А – урбанизированный ландшафт озера Култучное, Б – профиль высот в точках отбора проб № 1-8, В – природный ландшафт озера Банного, Г – профиль высот в точках отбора проб № 9-14.

Сбор материала проводился в летне-осенний период 2023 г. Точки отбора проб выстраивали по вертикали методом трансект-катен. Одновременно были отобраны образцы грунтов, почв поверхностного горизонта (глубина 0–20 см) [5] и образцы полыни камчатской *Artemisia vulgaris*. Последняя используется в качестве вида-индикатора металлического загрязнения экосистем Камчатки [1]. В средних частях ландшафтных катен как первого, так и второго участка были заложены и описаны почвенные профили, в каждом горизонте

которых также отбирали образцы почв. Для химического анализа образцов *A. vulgaris* использовали только листья растений.

Содержание металлов (Cu, Ni, Pb, Cd и Zn) в образцах определяли с помощью атомно-эмиссионного спектрометра с микроволновой плазмой Agilent AES-MP 4200 (Agilent Technologies, США). Подготовку к микроэлементному анализу предварительно высушенных при 60°C проб грунтов, почвы и полыни камчатской *A. vulgaris* проводили с помощью системы кислотного разложения проб Ethos UP (Milestone, Италия). Для контроля точности определений использовали стандартные образцы с аттестованным значением содержания металлов (ЛБ-1, ЭК-1, «ИГХ СО РАН»).

Для интерпретации полученных данных при анализе проб почвы рассчитывали индексы и показатели, широко применяемые в области экологического мониторинга. Для оценки загрязнения поверхностного слоя почв конкретным ТМ рассчитывали индекс геоаккумуляции (Igeo) [13]. Для выделения ТМ, представляющего наибольшую угрозу для почвенного покрова, вычисляли индекс загрязнения PI [12]. Для комплексной оценки загрязнения почв ТМ применяли суммарный показатель загрязнения (Zc), позволяющий определить степень негативного воздействия на среду одновременно несколькими загрязнителями [4] и интегрированный индекс загрязнения Немерова (NPI), который оценивает уровень загрязнения и качество почвы [11].

Для оценки степени загрязнения природных компонентов городской среды в том числе для растений был применен коэффициент техногенной концентрации элемента (Kc) и суммарный показатель загрязнения (Zc) [4].

Результаты и их обсуждение. Распределение ТМ в почвенных разрезах в пределах исследованных ландшафтных катен водосборных территорий озер Култучное и Банное имели схожий характер (рис. 2). В целом содержание Cd, Pb, Zn и Cu в почвах увеличивалось с глубиной, при этом в пределах 15-40 см слоя выявлен резкий переход с аккумуляцией элементов на биогеохимическом барьере. Это, во-первых, связано со сложным строением и генезисом почв в районах исследования, определяющих плотность и, соответственно, проницаемость горизонтов. Так, в почвах урбанизированного ландшафта на этих глубинах расположен субэлювиальный горизонт (рис. 2 А), в почвах природного ландшафта – гумусово-элювиальный горизонт (рис. 2 Б). Во-вторых, к зоне резкого радиального перехода в содержании металлов в почвах приурочена граница проникновения корневой системы большинства травянистых растений, активность которых влияет на миграционные свойства проанализированных элементов.

Общей особенностью распределения металлов в толще почвенного профиля исследованных районов является смена преобладающего по количеству Zn в дерновом горизонте на Cu в подстилающем горизонте. Также следует отметить, что в верхнем горизонте почвы, до 20 см, урбанизированного ландшафта отмечено в двое большее содержание Pb и Cu, чем в почвах района оз. Банное (рис. 2). Для последних характерно заметно большее обогащение слоев Zn и Cu глубже 60 см.

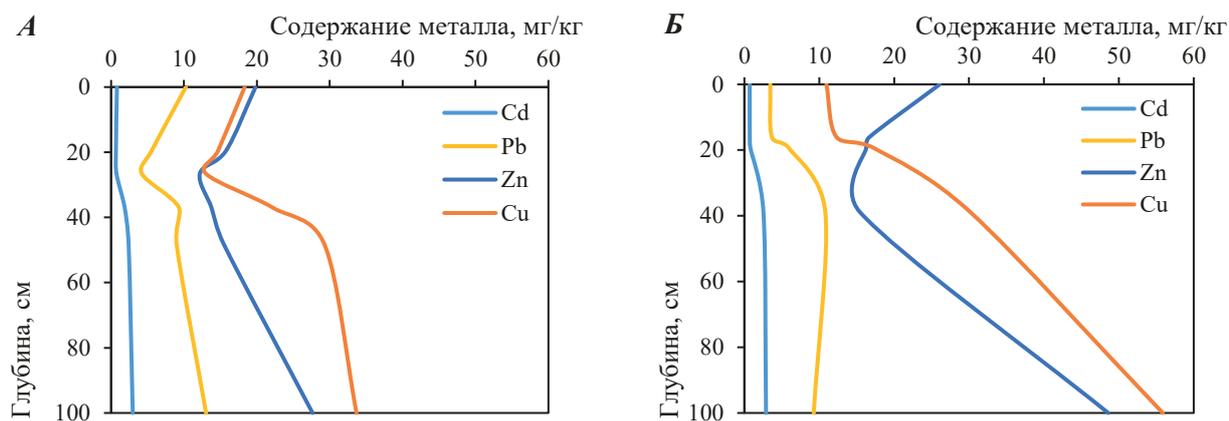


Рис. 2. Профиль содержания металлов в почвенном разрезе водосборной территории оз. Култучное (точка 5*, А) и оз. Банное (точка 12*, Б)

Распределение концентраций металлов в почвах ландшафтных катен водосборов озер Култучное и Банное имеют общий тренд к обогащению Cu и Zn в их нижней части (рис. 3 А, В). Подобный характер накопления этих элементов в супераквальных фациях ландшафта соответствует нижне-аккумулятивному типу латерально-миграционной дифференциации ТМ. Латеральное распределение Cd и Ni в почвах близко к равномерному для урбанизированной территории и аналогично в отношении Pb, Cd и Ni для природных ландшафтов.

В ландшафтной катене водосбора оз. Култучное выявлено значительное превышение Zn и Pb в почвенных образцах точек № 2-4 относительно фонового участка (рис. 3 А, В, табл. 1), приуроченных к антропогенно сформированным ландшафтам. Так, обозначенные точки отбора проб почв расположены в непосредственной близости к магистральным улицам (точка № 2) и селитебной зоне города с развитым частным сектором (точки № 3 и 4) (рис. 1 А). Ранее при эколого-химическом мониторинге почв г. Петропавловска-Камчатского район близ оз. Култучное также характеризовался сильной степенью загрязнения ТМ [3]. Для указанного района города характерно наличие загруженных автомобильных развязок, предприятий теплоэнергетики и ведение с 2016 г. непрерывных строительных работы, что в купе с латеральной геохимической миграцией ТМ создают предпосылки для депонирования здесь загрязнителей и ухудшения экологической обстановки.

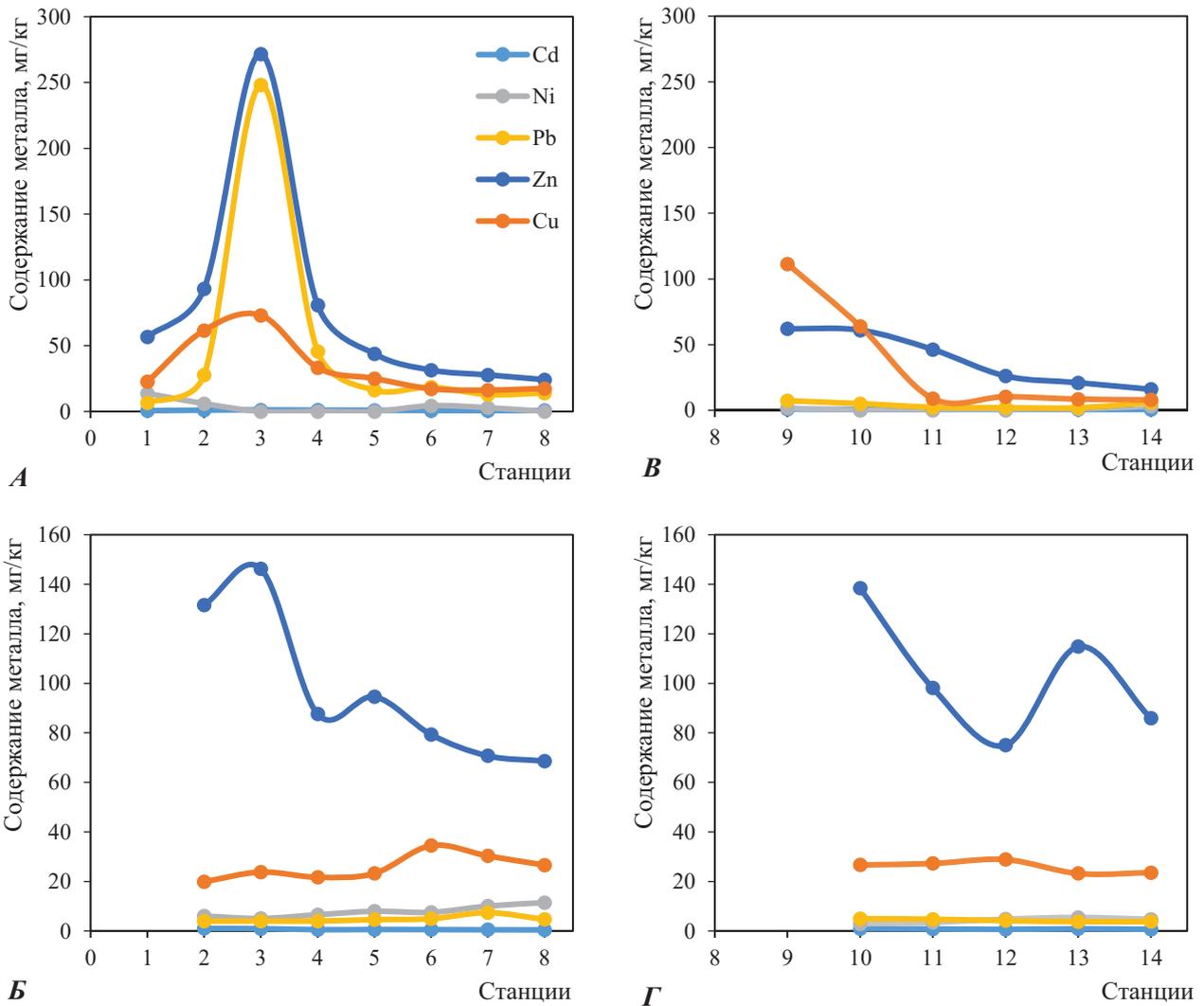


Рис. 3. Содержание металлов в компонентах ландшафтных катен водосборов оз. Култучное (А – почвы, Б – растения) и оз. Банное (В – почвы, Г – растения)

Распределение ТМ в растительном покрове исследованных участков урбанизированного и природного ландшафтов, как правило, имело схожие черты (рис. 3 Б, Г). Содержание Zn и Cd в растениях городской среды проявляло положительную зависимость с концентрацией этих элементов в почвах и отрицательную для накопления Cu и Pb. В природной среде, за исключением Zn, подобной связи в аккумуляции металлов между почвами и растениями не выявлено. Суммарные диапазоны содержания проанализированных элементов в растениях города и фонового участка были сопоставимы (табл. 1).

Учитывая полученные ранее данные по содержанию Cd, Pb, Zn и Cu в листьях *A. vulgaris* фоновых районов юго-восточной Камчатки [2], в большинстве проб растений определено аномальное содержание Pb, Zn и Cu ($K_c > 1$, табл. 1). Причины повышенного накопления этих элементов в данном случае связаны, во-первых, с текущим антропогенным воздействием и его остаточным проявлением в случае с ландшафтом оз. Банное, где долгое время функционировал поселок Большая Океанская. Во-вторых, с общей геохимической спецификой региона в условиях активного вулканизма [6].

Таблица 1

Суммарное значение содержания металлов и интегральные показатели загрязнения компонентов ландшафтных катен водосборных территорий озер Култучное и Банное

Район	Станции	Почвы, грунты				<i>Artemisia vulgaris</i>		
		<i>Igeo</i> ¹	ΣMe_5 ²	<i>Zc</i>	<i>NPI</i>	<i>Kc</i> ³	ΣMe_5	<i>Zc</i>
оз. Култучное	1	-	100,3	4,5	0,8	-	-	-
	2	Pb	189,5	6,3	1,7	Zn, Pb	162,5	5,8
	3	Pb, Zn	594,2	35,6	16,3	Zn, Pb, Cu	179,9	5,3
	4	Pb	160,8	7,9	3,1	Zn, Pb	120,3	4,3
	5	-	86,3	4,4	1,2	Zn, Pb, Cu	130,9	3,8
	6	-	72,4	4,5	1,1	Zn, Pb, Cu	126,8	4,0
	7	-	60,4	3,5	0,8	Zn, Pb, Cu	118,9	4,4
	8	-	56,5	3,4	1,0	Zn, Pb, Cu	111,7	3,1
	Показатели ⁴		57-594 / 165	3,4-36 / 8,8	0,8-16,3 / 3,2		112-180 / 136	3,1-5,8 / 4,4
оз. Банное	9	Cu	183,4	6,2	1,6		-	-
	10	-	130,8	4,1	1,1	Zn, Pb, Cu	173,7	5,6
	11	-	58,1	2,9	0,4	Zn, Pb	134,3	4,3
	12	-	39,2	2,6	0,4	Zn, Pb, Cu	113,4	3,4
	13	-	33,2	2,5	0,3	Zn, Pb, Cu	148,1	4,3
	14	-	33,8	3,2	0,4	Zn, Pb, Cu	118,6	3,3
	Показатели ²		33-183 / 80	2,5-6,2 / 3,6	0,3-1,6 / 0,7		113-174 / 138	3,3-5,6 / 4,2

Примечание. 1 – отражены элементы со значением $Igeo > 1$. 2 – сумма абсолютных значений содержания Cu, Ni, Pb, Cd и Zn. 3 – отражены элементы со значением $Kc > 1$. 4 – статистические показатели: в числителе указан диапазон значений, в знаменателе – среднее арифметическое.

Оценка полиметаллического загрязнения почв выявила сильный уровень воздействия для точек № 3 и 4 урбанизированного ландшафта ($NPI > 3$, $Zc > 32$), для всех остальных точек – слабый или незначительный уровень (табл. 1). Все проанализированные образцы полыни характеризовали загрязнение растительного покрова как среднее ($Zc > 3$, табл. 1).

Выводы. Проведенное исследование выявило общие закономерности в латеральном и радиальном распределении ТМ в почвах ландшафтных катен водосборов озер Култучное и Банное. При этом в урбанизированной среде характер аккумуляции Pb и Zn в почвах детерминирован в большей мере хозяйственной деятельностью человека. Анализ особенностей миграции и депонирования ТМ в почвенно-растительном покрове водосборных территорий исследованных озер также позволил выявить участки городской среды, находящиеся в критическом экологическом состоянии в силу не только антропогенной нагрузки, но и ряда естественных причин, обуславливающих функционирование ландшафта в целом.

Литература

1. Авдощенко В.Г., Климова А.В. Накопление тяжелых металлов вегетативными органами полыни (*Artemisia vulgaris kamchatika*) в условиях городской среды Петропавловск-

Камчатского // Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей: материалы XXI международной научной конференции. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс. 2020. С. 157–160.

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

3. Авдощенко В.Г., Климова А.В. Оценка загрязнения почв города Петропавловска-Камчатского, Камчатский край // Вестник КамчатГТУ. 2022. № 61. С. 65–81.

4. Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П., Смирнова Р.С. Геохимия окружающей среды. – М.: Недра, 1990. 335 с.

5. ГОСТ 17.4.4.02-2017. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа: Межгосударственный стандарт Российской Федерации: дата введения 2019-01-01/Федеральное агентство по техническому регулированию. – М.: Стандартинформ, 2018. 124 с.

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

7. Ионкин К.В. Динамика городских ландшафтов (на примере г. Хабаровска) // Региональные проблемы. 2022. №3. С. 25–27.

8. Селезнев А.А., Окунева Т.Г., Ярмошенко И.В., Малиновский Г.П., Киселева Д.В. Распределение и накопление тяжелых металлов в ландшафтной катене водосбора и донных отложений водоема на урбанизированной территории // Известия УГГУ. 2023. №1 (69). С.96–107.

9. Экологическое состояние озера Култучное, меры по его улучшению и возможности хозяйственного использования: сборник докладов научно-практической конференции / Сост. и научн. ред. Е. Г. Лобков, В. И. Карпенко. Петропавловск-Камчатский: изд-во «Камчатпресс», 2017. 125 с.

10. Nazzal Y., Bărbulescu A., Howari F., Al-Taani A.A., Iqbal J., Xavier C.M., Sharma M., Dumitriu C.Ş. Assessment of metals concentrations in soils of Abu Dhabi Emirate using pollution indices and multivariate statistics // Toxics. 2021. Vol. 9 (5). P. 95

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

12. Kowalska J.B., Mazurek R., Gasiorek M., Zaleski T. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination. A review // Environmental Geochemistry and Health. 2018. Vol. 40. P. 2395–2420.

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

14. Pouresmaeli M., Ataei M., Forouzandeh P., Azizollahi P., Mahmoudifard M. Recent progress on sustainable phytoremediation of heavy metals from soil // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2022. Vol. 10 (5). P. 82.