

СОДЕРЖАНИЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ZN В РАСТЕНИЯХ-МАКРОФИТАХ РАЗЛИЧНЫХ СЕМЕЙСТВ НА ТЕРРИТОРИИ УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ РЕКИ ДОН

В.А. Чаплыгин, Ю.А. Литвинов, Д.Г. Невидомская, Н.П. Черникова, Т.М. Минкина

Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Введение. Многочисленные промышленные предприятия Ростовской области являются постоянными источниками техногенной нагрузки на обширные территории городских, сельскохозяйственных и рекреационных зон (Minkina et al., 2017). Поступающие в атмосферу выбросы предприятий, содержащие в числе прочих поллютантов преимущественно тяжелые металлы, не только создают локальные очаги техногенного загрязнения, но также в целом ухудшают общую экологическую ситуацию в регионе (Minkina et al., 2019).

Аквальные ландшафты, в которых преобладают надводные макрофиты, относятся к числу наиболее продуктивных экосистем (Mitsch, Gosselink, 2015; Owers et al., 2018). Как следствие, растения-макрофиты используются при оценке качества воды и экологическом мониторинге (Vymazal, Březinová, 2016). Сбор зарождающихся макрофитов, таких как *Phragmites australis* (тростник обыкновенный) был предложен в качестве инструмента улучшения и поддержания качества воды в озерах (Eid et al., 2020). *P. australis* – это космополитический эмерджентный макрофит, представленный в широком диапазоне водных сред обитания и широко исследовался в качестве биоаккумулятора Zn, действующего как биофильтр для уменьшения загрязнения воды (Bonanno et al., 2017).

Из всего многообразия присутствующих в выбросах предприятий загрязняющих веществ Zn следует уделить особое внимание. Соединения этого элемента являются одними из самых широко распространенных поллютантов. В почвах повышенное содержание Zn является результатом воздействия выбросов промышленных предприятий и автотранспорта на природные объекты (Kabata-Pendias, 2011; Анисимов и др., 2018). Цинк – необходимый растениям микроэлемент, присутствующий в составе более 200 энзимов, участвующих в метаболизме углеводов и протеинов, также входит в состав хлорофилла (Башкин, Касимов, 2004; Медведев, 2004; Sharma et al., 1990). Поэтому исследования содержания Zn в растениях являются важным аспектом при проведении экологического мониторинга.

Целью текущей работы было изучение аккумуляции и распределения Zn между надземной частью и корнями распространенных на территории устьевой области реки Дон растений-макрофитов.

Материалы и методы. Площадки мониторинга были заложены на побережье Таганрогского залива в 5–6 км от г. Азов (№ 3, № 4 и № 5), а также поселков Павло-Очаково (№ 2) и Чумбур-Коса (№ 1), удаленных от города на 22 и 40 км соответственно (Рис. 1). Все точки располагаются в непосредственной близости от кромки воды на участках.

Почвы площадок мониторинга представлены аллювиально-луговой почвой (площадки № 2, 3, 4, 5) и солончаком соровым (№ 1) (Табл. 1). Образцы почв для анализов отбирались с глубины 0–20 см на площадках мониторинга методом конверта и высушивались до воздушно-сухого состояния. Общее содержание Zn в почвах определяли рентген-флуоресцентным методом с использованием спектрометра Спектроскан МАКС-GV «НПО «Спектрон» (Россия).

В ходе исследований с 5 площадок мониторинга были отобраны образцы почв, а также наиболее распространенных на южном побережье Таганрогского залива видов растений, таких как тростник южный (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.), пороз узколистный (*Typha angustifolia* L.), клубнекамыш приморский (*Bolboschoenus maritimus* L.).

Отбор проб для химического анализа производился в период второй декады июня – первой декады августа, на который приходится фаза цветения различных видов травянистых растений в соответствии с ГОСТ 27262–87. Высушивание растений проводилось до воздушно-сухого состояния с последующим измельчением и минерализацией по методу сухого озоления согласно ГОСТ 26929–94. В растительных образцах определялась концентрация Zn. Для экстракции металла из золы применялся 20 %-ный раствор HCl. Определение содержания элемента осуществлялось методом атомно-адсорбционной спектрофотометрии на атомно-абсорбционном спектрометре «Квант-2».



Рисунок 1. Карта-схема расположения площадок мониторинга устьевой области реки Дон

Таблица 1. Свойства аллювиально-луговых почв и солончака сорового площадок мониторинга устья реки Дон

Площадка	pH водной суспензии	CaCO ₃ , % по Шейблеру	Гумус %	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	SiO ₂ (%)	<0,001 мм	<0,01 мм
1	7,90	10,7	1,4	8,9	35,9	45,30	20,2	36,1
2	7,80	1,3	0,8	13,6	3,7	52,81	7,6	13,9
3	7,60	3,40	2,90	31,30	4,20	54,75	6,70	14,00
4	7,9	4,1	2,4	28,0	7,6	55,11	7,6	16,4
5	8,1	1,8	3,2	26,5	6,4	56,25	8,1	18,1

Подвижные соединения Zn определены экстракцией 1 н. аммонийно-ацетатного буфера (NH₄ Ac) pH 4.8 с соотношением почва: раствор 1 : 5, при продолжительности экстракции 18 ч (Минкина и др., 2011).

Оценка уровня загрязнения растений осуществлялась путем сравнения содержания ТМ с максимально допустимым уровнем (МДУ) содержания металлов в кормах сельскохозяйственных животных (Временные максимально допустимые..., 1991).

Результаты. Анализ валового содержания ТМ в почвах изучаемой территории устьевой области реки Дон выявил наличие превышения ОДК по Zn (110 мг/кг) в 3,0–4,4 раза и на площадках № 3, № 4 и № 5 (Рис. 2). Содержание обменных форм металла также превышает ПДК по Zn (23 мг/кг) в 2,9–5,3 раза на площадках № 3, № 4 и № 5. Площадка № 4 характеризуется максимальным содержанием как валовых, так и обменных форм изучаемого элемента. Сравнив наиболее удаленные от Азова площадки мониторинга с различными почвами, можно отметить, что солончак соровый, при отсутствии значимых источников загрязнения характеризуется более высоким содержанием Zn по сравнению с аллювиально-луговой почвой (Рис. 2).

Установлено загрязнение Zn растений рогоза узколистного (до 3,4 МДУ) на площадках мониторинга № 4 и № 5 (Табл. 2). Среди рассматриваемых видов растений рогоз накапливает наибольшее количество Zn в надземной части и корнях с максимумом на площадке № 5. Минимальное содержание Zn в надземной части отмечается в растениях тростника, в корнях – клубнекамышы (Табл. 2).

Дискуссия. Полученные результаты показали, что наблюдаются видовые различия аккумуляции Zn в растениях, в то время как авторами (Pérez-Sirvent et al., 2017) в схожих условиях видовая специфика накопления элемента корнями растений не прослеживалась. Накопление металла в растениях одного вида различается по площадкам мониторинга коррелируя с уровнем содержания Zn в почве (Marchand et al., 2014).



Рисунок 2. Общее содержание и обменные формы Zn в солончаке соровом и аллювиально-луговых почвах территории устья реки Дон

Таблица 2. Среднее содержание элементов в различных дикорастущих травянистых растениях устья реки Дон, мг/кг

№ площадки/ почва	Растение	Часть	Zn
1	Клубнекамыш	стебли	32±3,0
		корни	47±5,3
2	Тростник	стебли	26±2,5
		корни	54±6,0
3	Рогоз	стебли	34±3,0
		корни	58±6,4
4	Рогоз	стебли	158±16,7
		корни	231±20,2
5	Рогоз	стебли	168±15,3
		корни	195±18,4
МДУ, мг/кг (1991)			50

Анализ распределения изучаемых элементов по растениям установил, что Zn аккумулируется преимущественно в корнях всех рассматриваемых видов растений-макрофитов. Однако если для тростника южного (сем. Мятликовые (*Poaceae*)) разница между содержанием элемента в надземной части и корнях достигает 2 раз, то у клубнекамыша приморского (сем. Осоковые (*Cyperaceae*)) она составляет 1,5 раза, а у рогоза узколистного (сем. Рогозовые (*Typhaceae*)) колеблется от 1,1 до 1,7 раз (Табл. 2). Это связано с видовой спецификой поглощения элементов растениями, принадлежащими к различным семействам (Whalley et al., 2005; Hinsinger et al., 2009). Значительная разница в распределении Zn между корнями и надземной частью тростника может быть вызвана способностью растения выделять избыточные ионы металлов путем транспирации, тем самым снижая их содержание в надземной части (Burke et al., 2000). Значительная аккумуляция элементов, в том числе Zn в тростнике южном отмечена и в ряде других исследований (Aksoy et al., 2005; Peltier et al., 2003; Rzymiski et al., 2014).

Заключение. Семейство Мятликовые отличается одним из самых низких содержаний Zn в надземной части, что указывает на устойчивость растений данного семейства к загрязнению этими ТМ. Семейство Осоковые обладает высокой устойчивостью к загрязнению Zn, а Рогозовые характеризуются низкой устойчивостью к данному поллютанту. Таким образом, принадлежность растений-макрофитов к определенному семейству обуславливает общую тенденцию распределения в них ТМ. Содержание ТМ в почве прибрежных территорий, превышающее ПДК, является определяющим фактором накопления элементов в растениях.

Работа поддержана грантом РНФ 20–14–00317.

Литература

- Анисимов В.С., Анисимова Л.Н., Фригидова Л.М., Дикарев Д.В., Фригидов Р.А., Корнеев Ю.Н., Санжаров А.И., Арышева С.П. Оценка миграционной способности Zn в системе почва-растение // Почвоведение. 2018. № 4. С. 427–438.
- Башкин В.Н., Касимов Н.С. Биогеохимия. М.: Научный мир, 2004. 648 с.
- Временные максимально допустимые уровни (МДУ) некоторых химических элементов госсипола в кормах сельскохозяйственных животных. Утвержден Главным Управлением Ветеринарии министерства сельского хозяйства РФ, 1991.
- Медведев С.С. Физиология растений. СПб.: Изд-во СПб. ун-та, 2004. 336 с.
- Минкина Т.М., Назаренко О.Г., Мотузова Г.В., Манджиева С.С., Бурачевская М.В. Групповой состав соединений тяжелых металлов в почвах агроценозов, загрязненных аэрозольными выбросами Новочеркасской ГРЭС // Агрохимия. 2011. № 6. С. 68–77.
- Aksoy A., Demirezen D., Duman F. Bioaccumulation, detection and analysis of heavy metal pollution in Sultan Marsh and its environment. Water Air Soil Pollut. 2005. Vol. 164. P. 241–255.
- Bonanno G., Vymazal J., Cirelli G.L. Translocation, accumulation and bioindication of trace elements in wetland plants // Sci Total Environ. 2018. Vol. 631–632. P. 252–261.
- Bonanno G., Vymazal J. Compartmentalization of potentially hazardous elements in macrophytes: Insights into capacity and efficiency of accumulation // Journal of Geochemical Exploration, 181. 2017. DOI:10.1016/j.gexplo.2017.06.018.

- Bonanno A., Russo C., Menapace L. Market power and bargaining in agrifood markets: A review of emerging topics and tools // *Agribusiness*. 2017. Vol. 34 (2). DOI:10.1002/agr.21542.
- Burke D.J., Weis J.S., Weis P. Release of metals by the leaves of the salt marsh grasses *Spartina alterniflora* and *Phragmites australis*. *Estuar Coast. Shelf Sci.* 2000. Vol. 51. P. 153–159.
- Eid E.M., Galal T.M., Sewelam N.A., Talha N.I., Abdallah S.M. Phytoremediation of heavy metals by four aquatic macrophytes and their potential use as contamination indicators: a comparative assessment // *Environ Sci Pollut Res.* 2020. Vol. 27. P. 12138–12151.
- Hinsinger P., Bengough G.A., Vetterlein D., Young I.M. Rhizosphere: biophysics, biogeochemistry and ecological relevance // *Plant Soil*. 2009. Vol. 321. P. 117–152.
- Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. London: CRC Press, 2011. 505 p.
- Marchand L., Nsanganwimana F., Cook B.J., Vystavnac Y., Huneau F., Le Coustumer P., Lamy J.B., Oustrière N., Mench M. Trace element transfer from soil to leaves of macrophytes along the Jalle d'Eysines River, France and their potential use as contamination biomarkers // *Ecological Indicators* 46. 2014. P. 425–437.
- Minkina, T.M., Fedorenko, G.M., Nevidomskaya, D.G., Pol'shina, T.N., Fedorenko, A.G., Chaplygin, V.A. Bioindication of soil pollution in the delta of the Don River and the coast of the Taganrog Bay with heavy metals based on anatomical, morphological and biogeochemical studies of macrophyte (*Typha australis* Schum. & Thonn) // *Environmental Geochemistry and Health*. 2019. P. 1–19. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00379-3>.
- Minkina, T.M., Nevidomskaya, D.G., Pol'shina, T.N., Fedorov, Y.A., Mandzhieva, S.S., Chaplygin, V.A. Heavy metals in the soil–plant system of the Don River estuarine region and the Taganrog Bay coast // *Journal of Soils and Sediments*. 2017. Vol. 17 (5). P. 1474–1491. <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1381-x>.
- Mitsch W.J., Gosselink J.G., Nagajyoti P.C., Lee K.D., Sreekanth T.V.M. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environ Chem Lett.* 2015. Vol. 8. P. 199–216.
- Owers C.J., Rogers K., Woodrofe C.D. Terrestrial laser scanning to quantify aboveground biomass of structurally complex coastal wetland vegetation // *Estuar Coast Shelf Sci.* 2018. Vol. 204. P. 164–176.
- Peltier E.E., Webb S.M., Gaillard J. Zinc and lead sequestration in an impacted wetland system // *Adv. Environ. Res.* 2003. Vol. 8. P. 103–112.
- Pérez-Sirvent C., Hernández-Pérez C., Martínez-Sánchez M.J., García-Lorenzo M.L., Bech J. Metal uptake by wetland plants: implications for phytoremediation and restoration // *J Soils Sediments*. 2017. Vol. 17. P. 1384–1393. DOI 10.1007/s11368-016-1520-4.
- Rzymiski P., Niedziński P., Klimaszyk P., Poniedziałek B. Bioaccumulation of selected metals in bivalves (Unionidae) and *Phragmites australis* inhabiting a municipal water reservoir // *Environ. Monit Assess.* 2014. Vol. 186. P. 3199–3212.
- Sharma P.N., Chatterjee C., Agarwala S.C., Sharma C.P. Zinc deficiency and pollen fertility in maize (*Zea mays*) // *Plant and Soil*. 1990. Vol. 124. P. 221–225. DOI: 10.1007/BF00009263.
- Vymazal J., Březinová T. Accumulation of heavy metals in aboveground biomass of *Phragmites australis* in horizontal flow constructed wetlands for wastewater treatment: a review // *Chem Eng J.* 2016. Vol. 290. P. 232–242.
- Whalley W.R., Riseley B., Leeds-Harrison P.B., Adderley P.W. Structural differences between bulk and rhizosphere soil // *Eur J Soil Sci.* 2005. Vol. 56 (3). P. 353–360.