

## **Адаптационный потенциал гидрофильных видов растительности к химическому загрязнению почв Таганрогского залива**

Наталья Петровна Черникова<sup>1</sup>, Татьяна Михайловна Минкина<sup>1</sup>, Татьяна Николаевна Польшина<sup>2</sup>, Дина Георгиевна Невидомская<sup>1</sup>, Алексей Григорьевич Федоренко<sup>1</sup>, Очир Романович Моглиев<sup>3</sup>, Артем Витальевич Иванцов<sup>1</sup>, Владислав Романович Попов<sup>1</sup>, Эльвира Вагифовна Ларина<sup>1</sup>, Анастасия Александровна Немцева<sup>1</sup>, Григорий Мефодьевич Федоренко<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

e-mail: [nat.tchernikova2013@yandex.ru](mailto:nat.tchernikova2013@yandex.ru)

e-mail: [tminkina@mail.ru](mailto:tminkina@mail.ru)

e-mail: [otshelnic87.ru@mail.ru](mailto:otshelnic87.ru@mail.ru)

e-mail: [dnevidomskaya@mail.ru](mailto:dnevidomskaya@mail.ru)

e-mail: [afedorenko@mail.ru](mailto:afedorenko@mail.ru)

e-mail: [vezon2k20@yandex.ru](mailto:vezon2k20@yandex.ru)

e-mail: [vladikus1010101@gmail.com](mailto:vladikus1010101@gmail.com)

e-mail: [richo262@mail.ru](mailto:richo262@mail.ru)

e-mail: [annemceva@sfedu.ru](mailto:annemceva@sfedu.ru)

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, Россия

e-mail: [tanja0701@mail.ru](mailto:tanja0701@mail.ru)

e-mail: [gfedorenko@mail.ru](mailto:gfedorenko@mail.ru)

<sup>3</sup>Администрация главы республики Калмыкия

e-mail: [richo262@mail.ru](mailto:richo262@mail.ru)

**DOI: 10.18522/2308-9709-2023-44-9**

**Аннотация.** Территория устьевой области реки Дон и побережья Таганрогского залива характеризуется исключительно благоприятными природными условиями и является уникальной по своей продуктивности. Кроме того, побережье Таганрогского залива Азовского моря – это важный рекреационный ресурс Ростовской области, роль которого с каждым годом возрастает. Однако, в настоящее время данная территория подвержена активному техногенному прессингу. Одними из основных загрязняющих веществ рассматриваемой территории являются тяжелые металлы и полициклические ароматические углеводороды. Проведены исследования по выявлению устойчивости естественных популяций гидрофильных видов растительности рода *Typha* L. к химическим поллютантам в прибрежной зоне дельты реки Дон. Обнаружены структурные изменения на морфолого-анатомическом уровне в генеративных и надземных вегетационных органах. При сравнении адаптационных потенциалов двух видов рогозов к химическому загрязнению почв отмечена большая устойчивость рогоза Лаксмана (*Typha laxmannii* Lerech).

**Ключевые слова:** тяжелые металлы, полициклические ароматические углеводороды, макрофиты, анатомические изменения

## **ADAPTATION POTENTIAL OF HYDROPHILIC VEGETATION SPECIES TO CHEMICAL POLLUTION OF SOILS OF THE TAGANROG BAY**

Natalya Petrovna Chernikova<sup>1</sup>, Tatiana Mikhailovna Minkina<sup>1</sup>, Tatiana Nikolaevna Polshina<sup>2</sup>, Dina Georgievna Nevidomskaya<sup>1</sup>, Alexei Grigorievich Fedorenko<sup>1</sup>, Ochir Romanovich Mogliev<sup>3</sup>, Artem Vitalievich Ivantsov<sup>1</sup>, Vladislav Romanovich Popov<sup>1</sup>, Elmira Vagifovna Larina<sup>1</sup>, Anastasia Alexandrovna Nemtseva<sup>1</sup>, Grigorii Mefodievich Fedorenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

e-mail: nat.tchernikova2013@yandex.ru

e-mail: tminkina@mail.ru

e-mail: otshelnic87.ru@mail.ru

e-mail: dnevidomskaya@mail.ru

e-mail: afedorenko@mail.ru

e-mail: vezon2k20@yandex.ru

e-mail: vladikus1010101@gmail.com

e-mail: richo262@mail.ru

e-mail: annemceva@sfedu.ru

<sup>2</sup>Federal Research Center Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russia

e-mail: tanja0701@mail.ru

e-mail: gfedorenko@mail.ru

<sup>3</sup>Administration of the Head of the Republic of Kalmykia

e-mail: [richo262@mail.ru](mailto:richo262@mail.ru)

**DOI: 10.18522/2308-9709-2023-44-9**

**Abstract.** The territory of the estuary area of the Don River and the coast of the Taganrog Bay is characterized by extremely favorable natural conditions and is unique in its productivity. In addition, the coast of the Taganrog Bay of the Azov Sea is an important recreational resource of the Rostov Region, the role of which is increasing every year. However, at present, this territory is subject to active technogenic pressure. One of the main pollutants of the territory under consideration are heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons. Studies have been carried out to identify the resistance of natural populations of hydrophilic species of

vegetation of the genus *Typha* L. to chemical pollutants in the coastal zone of the Don River Delta. Structural changes were found at the morphological and anatomical level in the generative and aboveground vegetation organs. When comparing the adaptive potentials of two species of cattails to chemical soil pollution, a greater resistance of Laxmann's cattail (*Typha laxmannii* Lepech) was noted.

**Keywords:** heavy metals, polycyclic aromatic hydrocarbons, macrophytes, anatomical changes

**Введение.** Почвы в поймах рек и прибрежных зонах имеют важное значение для устойчивого функционирования экосистем и сохранения биоразнообразия (Grizzetti et al, 2019). Ранее было показано, что почвы побережья Таганрогского залива Азовского моря и морского края дельты реки Дон значительно загрязнены тяжелыми металлами и полициклическими ароматическими углеводородами (ПАУ) (Dudnikova et al, 2022, Konstantinova et al, 2021). Целью исследования являлось изучение адаптационного потенциала естественных преобладающих популяций гидрофильных видов растительности рода *Typha* L. к химическому загрязнению почв.

**Материалы и методы.** Изучение морфо-анатомических и ультраструктурных характеристик высших сосудистых растений-макрофитов рогоза Лаксмана (*Typha laxmannii* Lepech) и рогоза южного (*Typha australis* Schum. & Thonn) проводилось на четырех участках мониторинга, почвенный покров которых представлен аллювиальными луговыми насыщенными почвами. Фоновые площадки (№1–2) заложены в пределах особо охраняемой природной территории «Донской природный парк», а загрязненные площадки (№3–4) в прибрежной зоне дельты реки Дон в окрестностях пос. Кагальник. Содержание тяжелых металлов и ПАУ в почвах фоновых участков (№1–2) не превышало ПДК, ОДК и кларки литосферы, за исключением Cr, что является

региональной особенностью. В почвах загрязненных участков (№3–4) отмечалось полиэлементное загрязнение с превышениями ПДК по Zn до 7 раз, по Cr до 4 раз, по Cu и Pb до 2,5 раз, по Mn, Cd и Ni до 1,5 раза. Общее количество ПАУ превышало их среднее содержание в почвах умеренного пояса более чем в 2–4 раза (Wilcke, 2000).

Оценку видимых изменений морфометрических характеристик макрофитов на каждой площадке мониторинга проводили методом измерения высоты стеблей, длины и ширины початков *T. australis* и *T. laxmannii*. Замеры растений проводили на участках площадью 1 м<sup>2</sup>.

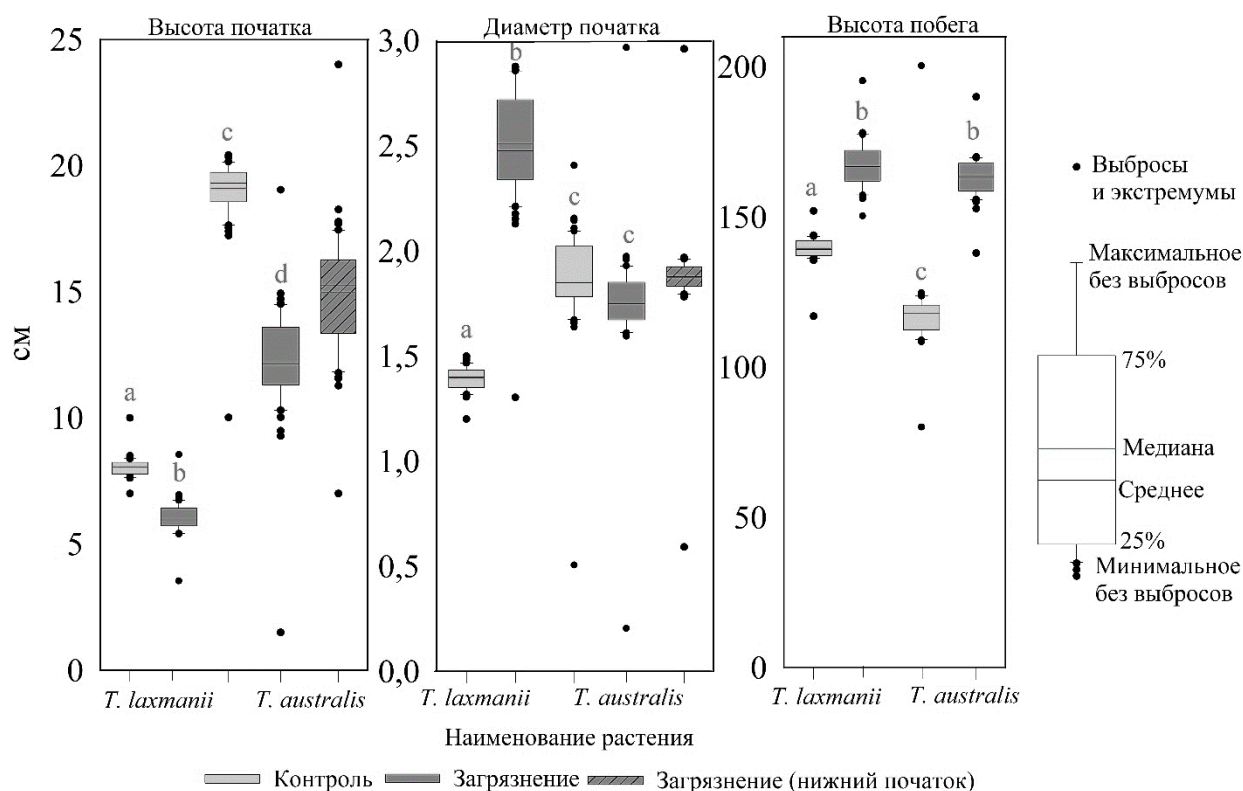
Для электронно-микроскопического анализа листьев рогозов, отобранных с фоновых и загрязненных участков, производили высечки размером не более 1–2 мм<sup>3</sup> с последующей двойной фиксацией в альдегиде и осмиевой кислоте. Анализ клеток палисадной паренхимы среднего участка листьев проводили с помощью светооптического микроскопа МикМед-6 (Санкт-Петербург, Россия) и трансмиссионного электронного микроскопа FEI Tecnaï G2 BioTwin (Нидерланды). Использовались общепринятые методические приёмы пробоподготовки для электронной микроскопии (Grizzetti et al, 2021), адаптированные в ЦКП ЮФУ «Современная микроскопия» для исследования растений-макрофитов.

Статистический анализ полученных результатов выполнен в программе STATISTICA 7. Достоверность различий между морфометрическими показателями растений определена с использованием однофакторного дисперсионного анализа с апостериоральным критерием Тьюки.

**Результаты.** Анализ морфометрических данных выявил, что у вида *T. australis* при загрязнении наблюдались мутационные аномалии в виде образования второго початка (многоплодие соцветий). Для вида *T. laxmannii* не было отмечено признаков появления второго початка, при этом наблюдались деформации соцветий, початки были узкие или короткие.

Результаты апостериорных тестов Тьюки по множественным сравнениям выявили, что высота и диаметр початка на фоновых (незагрязненных) участках для вида *T. laxmannii* меньше, чем у *T. australis*. Однако загрязнение приводит к статистически значимому увеличению длины побегов и уменьшению высоты початков у обоих видов рогозов (рис.1). С использованием дисперсионного анализа выявлены значительные различия между длиной ( $F=405$ ) и шириной початков ( $F=32$ ), а также высотой побега (191) рогозов различных видов при  $p$ -уровне  $<0,0001$ .

Морфологическое сравнение двух видов рогоза показало, что *T. laxmannii* более устойчив к загрязнению. Изменение морфометрических параметров генеративных органов является адаптационным механизмом, позволяющим растению формировать в условиях стресса минимальное количество генеративных органов, которые могут быть обеспечены необходимыми питательными веществами для созревания (Усманов и др., 2016).



*Рисунок 1. Морфометрические параметры *T. australis* и *T. Laxmannii*, произрастающих на фоновых и загрязненных площадках мониторинга. Разные буквы обозначают значительные различия ( $p < 0,05$ ) между вариантами, полученные в результате апостериорного теста Тьюки*

Строение тканей и клеточных органелл листьев рогозов на фоновых площадках типично для макрофитов (Minkina et al, 2019). Доля площади паренхимы от общей площади поперечного среза у контрольных растений составила 34–38% (рис. 2а,с; 3а,с). Загрязнение почвы тяжелыми металлами и ПАУ, привело к нарушению упорядоченного расположения клеток эпидермиса и сокращению числа клеток мезофилла, а также доли площади паренхимы у *T. australis* до 25% и *T. laxmannii* до 43% (рис. 2b,d).

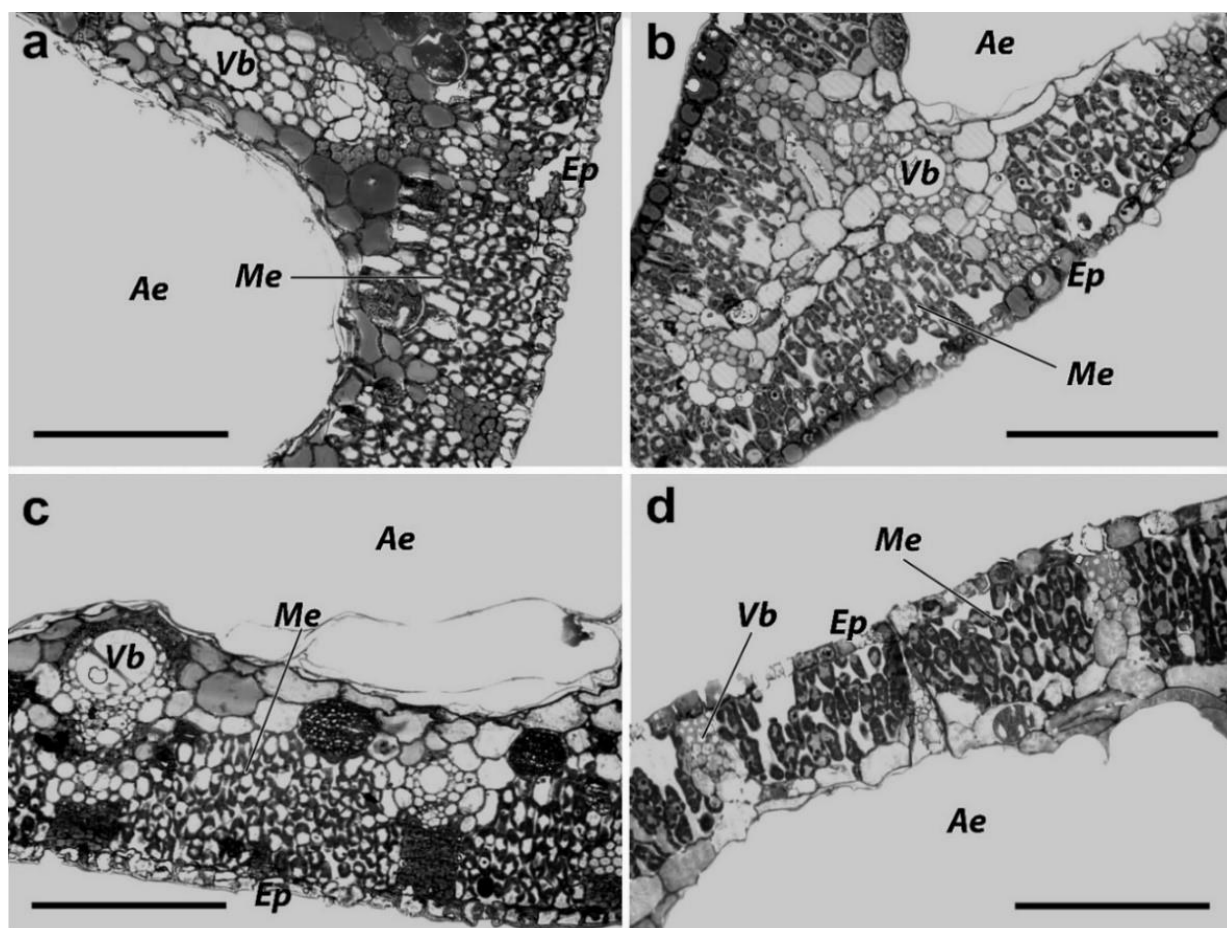


Рисунок 2. Поперечное сечение листьев: *T. australis*: а) фоновая площадка, б) загрязненная площадка; *T. Laxmannii*: (с) фоновая площадка, (d) загрязненная площадка. Me – мезофилл, Ae – аэренхима, Vb – сосудистый пучок. Шкала составляет 100 μм.

На ультраструктурном уровне у *T. australis* в пластидах отмечено снижение электронной плотности. В пластидах нарушен процесс гранообразования, межтилакоидное пространство расширено. Значительно снизилась степень концентрации рибосом в цитоплазме. Форма большинства митохондрий округлая, матрикс просветлённый, а сами органеллы выглядят набухшими. В центральной части митохондрий с малой степенью набухания отмечены вакуоли и округлые мембранные образования (рис. 3а,б).



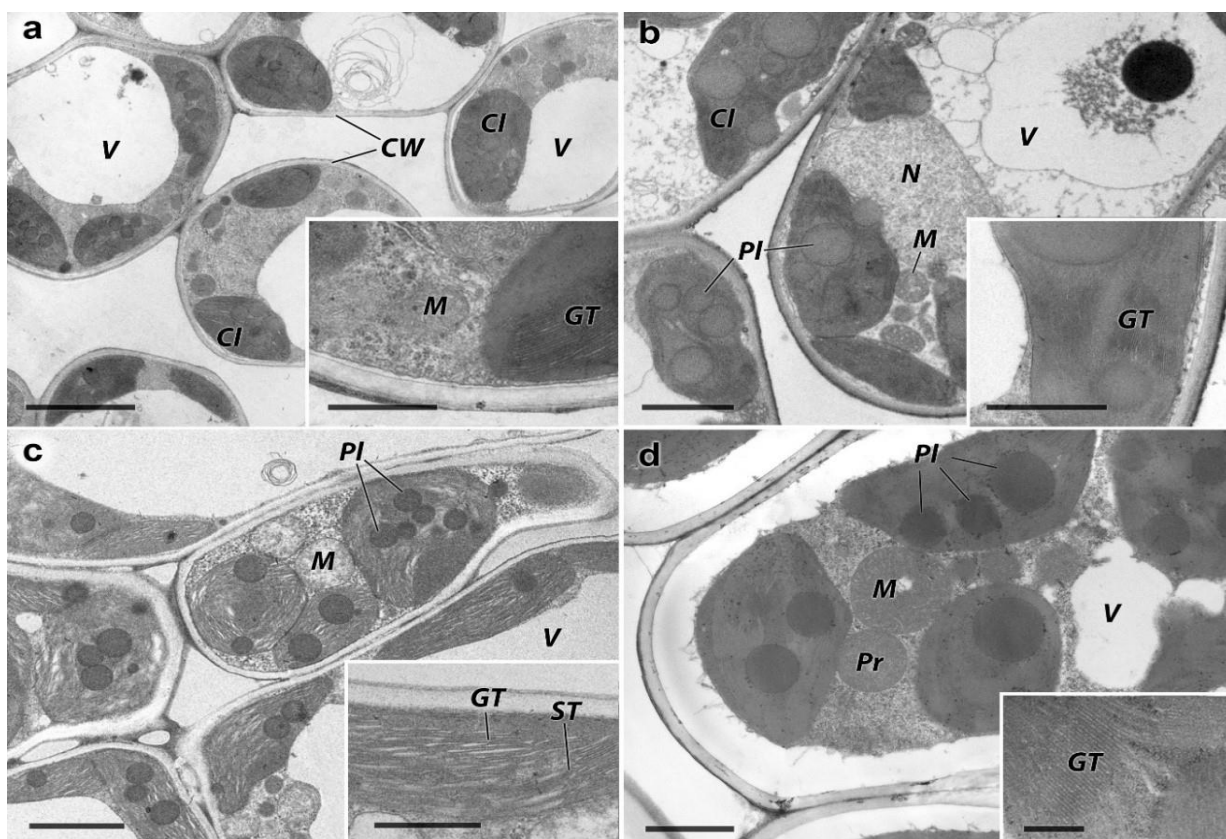


Рисунок 3. Микроснимки ультратонких поперечных сечений листьев: *T. australis*: *T. australis*: а) фоновая площадка, б) загрязненная площадка; *T. laxmannii*: (с) фоновая площадка, (d) загрязненная площадка. CW – клеточная стенка, CI – хлоропласт, P – пластоглобула, GT – тилакоиды гран, ST – тилакоиды стром, N – ядро, M – митохондрии, Pr – пероксисома, V – вакуоль. Шкала (μм): (а) – 3, вставка – 0,4; (б) – 2, вставка – 1; (с) – 2, вставка – 1; (d) – 4, вставка – 0,25.

Структура и функции внутриклеточных органелл *T. laxmannii* имеют меньшие изменения, чем у *T. australis* (рис. 3b,d). В клетках хлоренхимы *T. laxmannii*, отмечено значительное отслоение цитоплазмы с находящимися в ней органеллами от клеточной стенки. Цитоплазма вакуолизирована, а центральная вакуоль слабо выражена. На фоне тёмного матрикса тиллакоиды слабо выражены и локализованы преимущественно в гранах, с числом ламелл

до 30 ед. Форма большинства митохондрий (0,8 мкм) округлая, центральный участок матрикса просветлённый (рис. 3с,d).

**Заключение.** Выявленные изменения анатомии и морфологии органов рогозов направлены на создание защитных механизмов, а также выполняют компенсаторную функцию в ответ на загрязнение почвы тяжелыми металлами и ПАУ. Определено, что при одинаковом уровне загрязнения почвы степень и характер ультраструктурных изменений растений-макрофитов различны.

*Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № проекта 122020100332-8.*

### **Литература**

1. Усманов И. Ю., Юмагулова Э.Р., Иванов В.Б., Коркина Е.А., Щербаков А.В., Иванов Н.А., & Рябуха А.В. Адаптация экосистем Среднего Приобья в зоне нефтедобычи: иерархия и длительность процессов //Вестник Нижневартовского государственного университета. 2016. №. 2. С. 87–94.
2. Dudnikova T., Minkina T., Sushkova S., Barbashev A., Antonenko E., Bakoeva G., ... & Deryabkina I. Features of the polycyclic aromatic hydrocarbon's spatial distribution in the soils of the Don River delta //Environmental Geochemistry and Health. 2022. – P. 1–14.
3. Fedorenko G.M., Fedorenko A. G., Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Rajput V. D., Usatov A. V., & Sushkova S. N. Method for hydrophytic plant sample preparation for light and electron microscopy (studies on *Phragmites australis* Cav.) //MethodsX. 2018. Vol. 5. P. 1213–1220.
4. Grizzetti B., Liqueste C., Pistocchi A., Vigiak O., Zulian G., Bouraoui F., ... & Cardoso A. C. Relationship between ecological condition and ecosystem services in European rivers, lakes and coastal waters //Science of the Total Environment. 2019. Vol. 671. – P. 452–465.

5. Konstantinova E., Minkina T., Nevidomskaya D., Mandzhieva S., Bauer T., Zamulina I., ... & Sushkova S. Exchangeable form of potentially toxic elements in floodplain soils along the river-marine systems of Southern Russia //Eurasian Journal of Soil Science. 2021. Vol. 10. No. 2. – P. 132–141.
6. Minkina T., Fedorenko G., Nevidomskaya D., Fedorenko A., Chaplygin V., & Mandzhieva S. Morphological and anatomical changes of *Phragmites australis* Cav. due to the uptake and accumulation of heavy metals from polluted soils //Science of the total environment. 2018. Vol. 636. – P. 392–401.
7. Wilcke W. Synopsis polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil—a review //Journal of plant nutrition and soil science. 2000. Vol. 163. No. 3. – P. 229–248.

### References

1. Usmanov I. YU., Yumagulova E.R., Ivanov V.B., Korkina Ye.A., Shcherbakov A.V., Ivanov N.A., & Ryabukha A.V. Adaptatsiya ekosistemy Srednego Priob'ya v nablyudeniyyakh za neftedobychey: iyerarkhiya i dlitel'nost' protsessov //Vestnik Nizhnevartovskogo gosudarstvennogo universiteta. 2016. №. 2. – S. 87–94.
2. Dudnikova T., Minkina T., Sushkova S., Barbashev A., Antonenko E., Bakoeva G., ... & Deryabkina I. Features of the polycyclic aromatic hydrocarbon's spatial distribution in the soils of the Don River delta //Environmental Geochemistry and Health. 2022. – P. 1–14.
3. Fedorenko G.M., Fedorenko A. G., Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Rajput V. D., Usatov A. V., & Sushkova S. N. Method for hydrophytic plant sample preparation for light and electron microscopy (studies on *Phragmites australis* Cav.) //MethodsX. 2018. Vol. 5. – P. 1213–1220.
4. Grizzetti B., Liqueste C., Pistocchi A., Vigiak O., Zulian G., Bouraoui F., ... & Cardoso A. C. Relationship between ecological condition and ecosystem

- services in European rivers, lakes and coastal waters //Science of the Total Environment. 2019. Vol. 671. – P. 452–465.
5. Konstantinova E., Minkina T., Nevidomskaya D., Mandzhieva S., Bauer T., Zamulina I., ... & Sushkova S. Exchangeable form of potentially toxic elements in floodplain soils along the river-marine systems of Southern Russia //Eurasian Journal of Soil Science. 2021. Vol. 10. No. 2. – P. 132–141.
  6. Minkina T., Fedorenko G., Nevidomskaya D., Fedorenko A., Chaplygin V., & Mandzhieva S. Morphological and anatomical changes of *Phragmites australis* Cav. due to the uptake and accumulation of heavy metals from polluted soils //Science of the total environment. 2018. Vol. 636. – P. 392–401.
  7. Usmanov I. Yu., Jumagulova E. R., Ivanov V. B., Korkina E. A., Shcherbakov A. V., Ivanov N. A., & A. V. Ryabukha the Adaptation of ecosystems of the Middle Ob region in the area of oil production: the hierarchy and the duration of the process //Bulletin of Nizhnevartovsk state University. 2016. No. 2. – P. 87–94.
  8. Wilcke W. Synopsis polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil. A review //Journal of plant nutrition and soil science. 2000. Vol. 163. No. 3. – P. 229–248.