

Влияние абиотических факторов на продуктивность тростника *Phragmites australis* в озёрах юга Западной Сибири

© 2024. Е. Ю. Зарубина, к. б. н., с. н. с.,

Институт водных и экологических проблем СО РАН,
656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1,
e-mail: zeur11@mail.ru

В статье представлены результаты исследования фитомассы, высоты стеблей и плотности зарослей (травостоя) тростника обыкновенного *Phragmites australis* на юге Западной Сибири. Этот регион отличается редким сочетанием на сравнительно небольшом пространстве хлористых, сульфатных и содовых озёр. Будучи эврибиотом, тростник обладает высокой устойчивостью к засолению воды и грунтов, однако высокий уровень засоления негативно сказывается на его росте и развитии. Целью работы была оценка степени влияния абиотических факторов (рН, минерализация) на количественные характеристики тростника, растущего в водоёмах с различной степенью минерализации воды: от 0,005 до 387,6 г/л. Всего исследовано 59 пресных, солоноватоводных (олиго-, мезо- и полигалинных) и гипергалинных солёных водоёма, расположенных в различных природных зонах юга Западной Сибири: южной таёжной, лесной, лесостепной, степной и сухостепной. В результате проведённых исследований показано, что оптимальной для роста и развития тростника является минерализация воды от 0,5 до 5,0 г/л, при которой наблюдаются наибольшие значения фитомассы и высоты растений. Отмечено, что с увеличением минерализации воды (выше 9 г/л при концентрации хлоридов выше 4000 мг/л) наблюдается значительное снижение фитомассы и высоты побегов при увеличении плотности травостоя. Для оценки зависимости фитомассы, высоты побегов и плотности травостоя от абиотических факторов построена модель на основе анализа избыточности (RDA) и проведён корреляционный анализ с учётом рН, солёности, ионов Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , HCO_3^- , Cl^- и SO_4^{2-} . Установлено, что в пресных озёрах лимитирующими факторами для плотности травостоя и образования фитомассы являются рН и жёсткость воды, определяемая Ca^{2+} . В солоноватоводных мезо- и полигалинных и солёных гипергалинных водоёмах на фитомассу тростника влияет весь комплекс факторов, в то время как на высоту побегов – рН, хлориды и жёсткость воды, а на плотность травостоя – хлориды и сульфаты.

Ключевые слова: тростник, фитомасса, высота побега, плотность травостоя, солёность, рН.

Abiotic factors affect the *Phragmites australis* productivity in lakes in the south of Western Siberia

© 2024. E. Yu. Zarubina ORCID: 0000-0002-0006-3103*

Institute for Water and Environmental Problems
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
1, Molodezhnaya St., Barnaul, Russia, 656038,
e-mail: zeur11@mail.ru

The article presents the results of studying phytomass, stem height and density of thickets (herbage) of *Phragmites australis*, one of the most common aerial-aquatic plant in the south of Western Siberia. This region is distinguished by a rare combination of chloride, sulfate and soda lakes in a relatively small space. As an eurybiont, reed is highly resistant to water and soil salinity, but high salinity adversely affects its growth and development. The aim of the work was to assess the degree of abiotic factors (pH, mineralization) effect on the quantitative characteristics of reed growing in water bodies with different water mineralization: from 0.005 to 387.6 g/L. In total, we studied 59 freshwater, brackish-water (oligo-, meso- and polyhaline) and hypersaline water bodies, located in various natural zones (southern taiga, forest, forest-steppe, steppe and dry-steppe) in the south of Western Siberia. The studies were carried out in late July – early August from 2012 to 2020 during the period of maximum vegetation of plants. As a result of the studies, it is shown that the optimal for reed growth and development is water mineralization from 0.5 to 5.0 g/L, when the highest values of biomass and plant height are observed. A model based on redundancy analysis (RDA) was built and a correlation analysis was carried out to assess the dependence of phytomass, shoot height and herbage density on abiotic factors. We took into account pH, salinity, and Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , HCO_3^- , Cl^- and SO_4^{2-} content. We found that pH and determined

by Ca^{2+} water hardness are the limiting factors in freshwater lakes. In brackish-water meso- and polyhaline, as well as in saline hyperhaline water bodies reed phytomass is affected by a whole range of factors, while shoot height is affected by pH, chlorides, and water hardness, and grass stand density is affected by chlorides and sulfates.

Keywords: *Phragmites australis*, phytomass, shoot height, density, salinity, pH.

Воздушно-водные растения, развивающиеся в литорали водоёмов, являются одними из наиболее активных продуцентов органического вещества в биосфере. В качестве основного продуцента они служат источником пищи консументам: беспозвоночным, рыбам и травоядным птицам. Одним из наиболее распространённых воздушно-водных растений на Земле является тростник обыкновенный (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. Ex Steud.). Он встречается в самых разнообразных экотопах: на почвах с близким стоянием грунтовых вод, по берегам водоёмов или в воде, на глубине от 0,5 до 2,5 м; в травянистых топях; заболоченных лугах; на болотах; солонцах. Тростник – эврибионт, и может произрастать как в пресных, так и в солоноватых и солёных водоёмах, часто образуя обширные заросли [1]. Заросли тростника являются средообразующим фактором в литоральной зоне водоёмов, где создаётся свой, отличный от основной акватории, гидрофизический, гидротермический и гидрохимический режим. Стебли тростника служат субстратом для развития фито- и зооперифитона, убежищем для зоопланктона и мальков рыб [2]. Будучи почти космополитом, тростник нашёл широкое применение в различных сферах жизни человека. Он используется в качестве растительной основы при производстве корма для растительноядных рыб [3], как основа при создании экологически чистых строительных материалов [4], топливных брикетов и гранул [5].

Находясь на границе между водосборным бассейном и водоёмом, тростник задерживает загрязняющие вещества, поступающие с водосбора, и поэтому широко используется для фиторемедиации сильнозагрязнённых прудов-отстойников и шламонакопителей, очистки систем сточных вод и даже для фиторемедиации солёных шахтных вод [6–9].

На юге Западной Сибири тростник встречается практически во всех пресных, солоноватых и солёных озёрах. Сообщества тростника образуют бордюры разной мощности, окаймляющие водоём; иногда формируют сплавины, которые могут отрываться от основных зарослей и дрейфовать по акватории. Заросли тростника могут образовывать острова на акватории или почти полностью занимать акваторию

в озёрах-займищах. На рост и продуктивность тростника оказывает влияние большое количество факторов: физико-географические условия, колебания уровня воды, содержание доступных питательных веществ в воде и донных отложениях, величина минерализации воды, pH.

Большинство исследований влияния минерализации воды на макрофиты связаны с экспериментальным изучением приспособительных реакций растений к высокой солёности воды [10–13]. Работ, касающихся изучения продукционных характеристик макрофитов в различных по солёности водоёмах, немного [14]. В работе [15] показано, что растения из засоленных мест обитания обладают физиологическими и морфологическими адаптациями к экстремальным условиям солёности и pH.

Цель исследования – оценить степень влияния абиотических факторов (pH, минерализация) на высоту, биомассу и плотность зарослей тростника в разнотипных озёрах юга Западной Сибири.

Объекты и методы исследования

В рамках данного исследования были изучены фитомасса, плотность зарослей (травостоя) и высота стеблей тростника обыкновенного *Phragmites australis*, растущего в водоёмах с различной минерализацией воды от 0,005 до 387,6 г/л. Всего было исследовано 18 пресных, 34 солоноватоводных (олиго-, мезо- и полигалинных) и 7 гипергалинных солёных водоёма, расположенных в южной таёжной, лесной, лесостепной и степной зонах юга Западной Сибири. Такое разнообразие объектов исследования позволило охватить широкий спектр солёности природных вод и оценить степень её влияния на количественные характеристики тростниковых сообществ. Исследования проводили в конце июля – начале августа с 2012 по 2020 гг. в период максимальной вегетации растений. Фитомассу тростника отбирали классическим методом укоса на укосных площадках размером 0,25 м² в 3–5 повторностях [16]. Каждый укос разбирали по видам, подсчитывали число побегов, измеряли высоту и сырую массу с точностью

до 5 г. В камеральных условиях укосы досушивали при $t=85^{\circ}\text{C}$ до абсолютно сухого веса.

Во время полевых исследований параллельно с отбором проб тростника измеряли температуру, минерализацию и pH воды с помощью портативного кондуктометра АНИОН-4120 (Инфраспек-Аналит НПП, Россия) *in situ*. Прибор перед началом измерений калибровали. Одновременно отбирали пробы воды для проведения химического анализа, который был выполнен в Институте водных и экологических проблем СО РАН [17–19] и Институте геологии и минералогии СО РАН по стандартным методикам [20, 21].

Статистическая обработка материала проведена в пакете программ MS Excel-2016, Statistica 6.0, PAST (PALeontological Statistics) Version 4.06. Для оценки влияния факторов среды на количественные характеристики тростника применяли анализ избыточности (RDA, redundancy analysis). Этот метод канонической ординации позволяет выполнить совместную обработку наборов данных и проверить статистические гипотезы о значимости внутренних взаимодействий и о влиянии внешних факторов [22]. Поскольку разброс данных по биомассе, минерализации и отдельным ионам отличается на несколько порядков, для получения корректных результатов все данные были подвергнуты преобразованию Хеллингера: логарифмированию ($\lg(x+1)$) [23, 24].

Результаты и обсуждение

Меридиональная протяжённость и пологий рельеф юга Западно-Сибирской равнины с севера на юг детерминируют последовательную смену климатических условий с гумидного типа (южная тайга, зона смешанных и широколиственных лесов), через умеренный (северная и центральная лесостепь) на аридный (южная лесостепь, степь и подзона ленточных боров). Расположенные на этой территории озёра имеют существенную вариативность гидрохимических параметров даже в пределах небольшой территории [21]. Однако, в целом, по мере продвижения с севера на юг из гумидной зоны в аридную, наблюдается увеличение солёности воды. Основным источником поступления солей служат грунты, засоленность которых держится в пределах 0,1–1,5% [25].

Все исследованные озёра по степени минерализации воды, согласно Венецианской системе классификации природных вод [26],

были отнесены к пяти классам: пресные (с солёностью менее 0,5 г/л); солоноватоводные олигогалинные (0,5–5,0 г/л), мезогалинные (5,0–18,0 г/л) и полигалинные (18–30 г/л); солёные гипергалинные (более 40 г/л).

В южно-таёжной и лесной зонах преобладают пресные озёра гидрокарбонатно-натриевой группы, величина pH соответствует слабо кислым или нейтральным водам (табл. 1). Озёра северной и центральной лесостепи, как правило, солоноватоводные олигогалинные (солёность 0,5–2,6 г/л) гидрокарбонатно-натриевой группы, в период исследований вода в этих озёрах имела слабощелочной характер (pH 8,2–9,6). Озёра южной лесостепи преимущественно солоноватоводные мезогалинные (5,4–18,0 г/л), по ионному составу – гидрокарбонатно-натриевые и хлоридно-натриевые, активная реакция среды слабощелочная (pH 8,8–9,7). Озёра степной зоны существуют в условиях недостаточного увлажнения и избыточной теплообеспеченности. Больше 50% из них солоноватоводные полигалинные (19,4–29,1 г/л) или солёные гипергалинные (58,2–387,6 г/л) с преобладанием сульфатного и сульфатно-хлоридного типов накопления. Кислотность среды соответствует нейтральным или слабощелочным водам (pH 7,4–9,6).

Количественные показатели тростника в озёрах с разной степенью солёности значительно различались (табл. 2). В пресных озёрах фитомасса тростника была относительно высокой, однако разброс её колебаний был значительный. Минимальная фитомасса (164 г/м²) отмечена в оз. Лайское (зона южной тайги) с очень низкой минерализацией воды (0,005 г/л), максимальная (1160 г/м²) – в оз. Минзелинское (зона смешанных и широколиственных лесов) с минерализацией воды 0,23 г/л. В солоноватоводных олигогалинных озёрах фитомасса тростника была максимальной среди всех исследованных групп озёр и достигала довольно высоких значений в оз. Жилое (2016 г/м²) и оз. Нижнее (3304 г/м²) при минерализации воды 0,84 и 0,54 г/л соответственно.

При увеличении минерализации воды фитомасса тростника значительно снижается (рис. 1). Так, если в мезогалинном оз. Горькое (минерализация 7,2 г/л) фитомасса тростника достигала 1424 г/м², то в оз. Заливное (минерализация 9,2 г/л) она составляла всего 120 г/м². Кроме минерализации воды в этом озере на состояние тростника оказывали влияние, вероятно, и другие факторы. Однако,

Таблица 1 / Table 1

Гидрохимические характеристики исследованных групп озёр
Hydrochemical characteristics of the studied groups of lakes

Класс солёности Salinity class	pH	Солёность, г/л Salinity, g/L	НСО ₃ ⁻ , мг/л mg/L	Сl ⁻ , мг/л mg/L	SO ₄ ²⁻ , мг/л mg/L
Пресные Freshwater	5,0–9,9	0,005–0,440	136,0–429,2	1,2–71,6	2,3–37,5
Солоноватоводные / Saltish water					
Олигогалинные Oligohaline	8,2–9,7	0,5–5,0	119,5–6185,4	3,3–2256,0	11,4–1760,0
Мезо- и полигалинные Meso- and Polyhaline	8,2–10,1	5,4–29,2	190–11730	1241–11536	480–7304
Солёные / Saline waters					
Гипергалинные Hypersaline	7,4–9,9	58,2–387,6	268–41669	2998–237936	2833–60130

Таблица 2 / Table 2

Количественные показатели тростника в озёрах различных классов солёности
Reed quantitative indicators in lakes of different salinity classes

Показатель / Indicator	FW	OH	MH+PH	HS
Фитомасса, г/м ² Phytomass, g/m ²	624±298	1170±550	434±163	394±157
Плотность травостоя, стебл./м ² Density, stem/m ²	115±69	216±106	97±70	197±94
Высота, см / Height, cm	136±35	165±41	105±44	81±23

Примечание: FW – пресные, OH – олигогалинные, MH+PH – мезо- и полигалинные, HS – гипергалинные.
Note: FW – Freshwater, OH – Oligohaline, MH+PH – Meso- and Polyhaline, HS – Hypersaline.

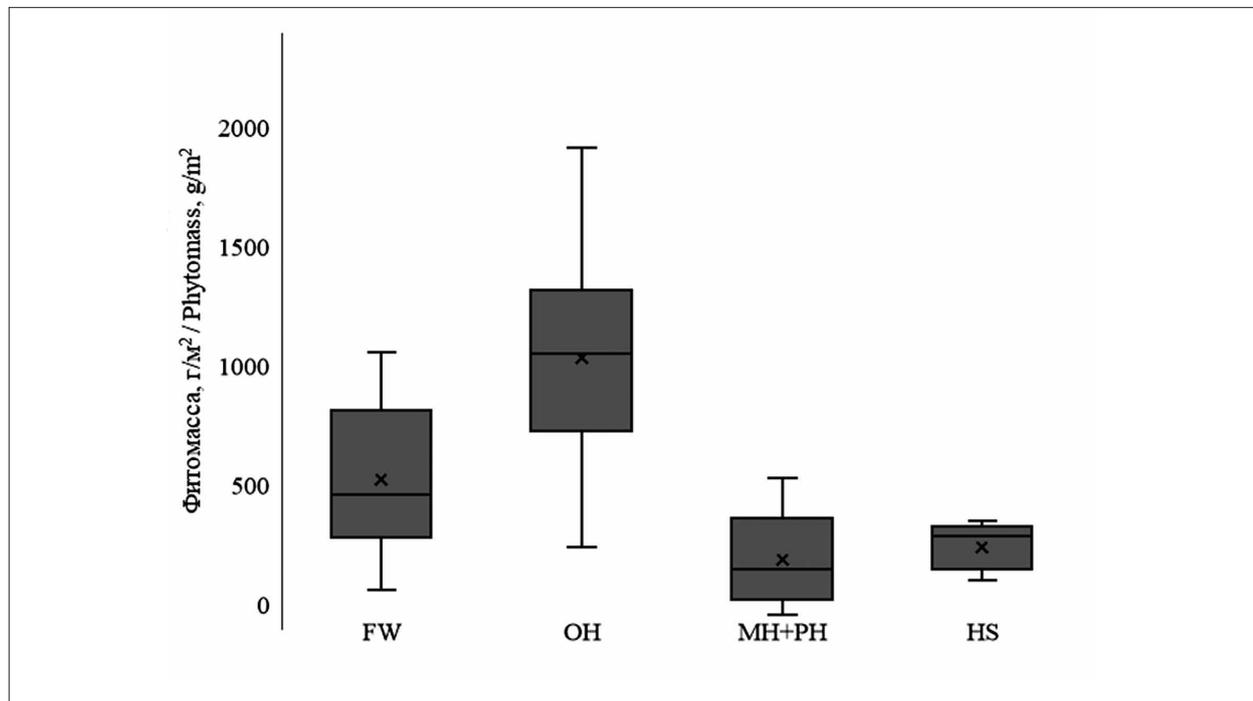


Рис. 1. Фитомасса тростника (г/м²) в озёрах различных классов солёности.
Обозначения FW, OH, MH, PH и HS см. в таблице 2
Fig. 1. Phytomass (g/m²) of *Phragmites australis* in lakes of different salinity classes.
See Table 2 for designations of FW, OH, MH, PH, and HS

Фитомасса тростника в других гипергалинных озёрах также была низкой, максимальное значение (430 г/м^2) отмечено в озере без названия (Михайловский р-н, Алтайский край) и оз. Красновишнёвое (400 г/м^2) с солёностью воды $83,2$ и $297,7 \text{ г/л}$ соответственно. Тростник в оз. Красновишнёвое рос как по берегам, образуя бордюр шириной $2-7 \text{ м}$, так и в воде на глубине до 20 см . В период исследований среди стеблей тростника, растущего на берегу, было много отложений соли, образованной в результате испарения воды при понижении уровня озера, которая осаждалась на стеблях и грунте. Как правило, в полигалинных и, особенно, гипергалинных озёрах тростник встречался преимущественно на влажных берегах и очень редко заходил в воду. Однако в период высокого уровня воды в солёных озёрах тростник был отмечен на глубине до $0,5 \text{ м}$.

Концентрация в воде минеральных солей оказывает значительное влияние не только на фитомассу, но и на высоту тростника и плотность тростниковых зарослей. В пресных и олигогалинных озёрах высота стеблей тростника была значительно больше, чем в солоноватоводных мезо- и полигалинных и солёных гипергалинных. Так, если в пресных водоёмах высота тростника колебалась в пределах $75,7-191,3 \text{ см}$, то в олигогалинных это значение составляло уже $107,5-291,7 \text{ см}$. Максимальная высота тростника (около 292 см) была отмечена в оз. Чича при солёности воды $0,8 \text{ г/л}$. С ростом минерализации воды высота тростника, как и фитомасса, значительно уменьшалась, при этом, как и для фитомассы, критическим был уровень минерализации выше 9 г/л . В мезо- и полигалинных озёрах минимальная высота стеблей тростника (60 см), как и биомасса, отмечена в оз. Заливное ($9,2 \text{ г/л}$). В гипергалинных озёрах высота тростника колебалась в пределах $54-113,6 \text{ см}$ и была минимальной в оз. Балансор (минерализации $387,6 \text{ г/л}$).

Таким образом, при сравнении фитомассы, высоты стеблей и плотности зарослей тростника отмечено, что с увеличением минерализации воды наблюдается значительное снижение фитомассы и высоты тростника и увеличение плотности травостоя. Так, в гипергалинных озёрах при наименьшей высоте тростника плотность зарослей колебалась в пределах $78-322 \text{ экз./м}^2$, что было близко к значениям для олигогалинных озёр ($68-516 \text{ экз./м}^2$) и выше, чем в пресных водоёмах ($34-272 \text{ экз./м}^2$). В мезо-, поли- и гипергалинных озёрах тростник растёт преимущественно по берегам

в местах близкого расположения грунтовых вод, что позволяет ему выдерживать высокий уровень засоленности воды и грунтов. На таких озёрах встречаются как прямостоящие, так и стелющиеся побеги тростника, имеющие ксероморфное строение с короткими (длиной $5-12 \text{ см}$) и утолщёнными листьями с острым шипом на конце и диаметром побегов $2-5 \text{ мм}$.

Для оценки зависимости фитомассы, высоты тростника и плотности травостоя от абиотических факторов была построена модель на основе анализа избыточности (RDA) с учётом следующих показателей: pH, солёность (как сумма ионов), ионов Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , HCO_3^- , Cl^- и SO_4^{2-} , которые определяют солёность и жёсткость воды. Статистический анализ вспомогательных моделей, которые были построены для каждого отдельного фактора, показал, что в озёрах с разной степенью солёности на рост и развитие тростника оказывают влияние разные факторы.

В пресных озёрах значимое влияние ($p < 0,05$) на фитомассу и плотность травостоя оказывали кислотность среды (pH) и концентрация ионов Ca^{2+} , Na^+ и K^+ . Полная модель RDA объясняла $70,9\%$ от общей дисперсии. При этом если кислотность среды была положительно связана с фитомассой и отрицательно с плотностью травостоя, то жёсткость воды, определяемая ионами Ca^{2+} , как и концентрация ионов Na^+ и K^+ , оказывали отрицательное влияние на количественные показатели тростника (рис. 2). Значительное влияние на плотность травостоя в пресных озёрах оказывали хлориды и сульфаты, имеющие здесь невысокую концентрацию. При этом на высоту тростника все эти абиотические факторы значительного влияния не оказывали. Эти данные были подтверждены и результатами корреляционного анализа.

Значимая положительная корреляционная связь ($p < 0,05$) была отмечена между фитомассой и pH среды (коэффициент корреляции (КК) равен $0,69$), а также между плотностью травостоя и pH (КК= $0,49$). Значимая отрицательная корреляционная связь наблюдалась между фитомассой и жёсткостью воды, определяемой ионами Ca^{2+} (КК= $-0,56$), K^+ (КК= $-0,64$) и Na^+ (КК= $-0,59$). Плотность травостоя тоже имела значимую отрицательную корреляционную связь с Ca^{2+} (КК= $-0,57$), K^+ (КК= $-0,57$) и Na^+ (КК= $-0,59$).

В олигогалинных озёрах значимого влияния рассматриваемых абиотических факторов на количественные характеристики тростника не выявлено.

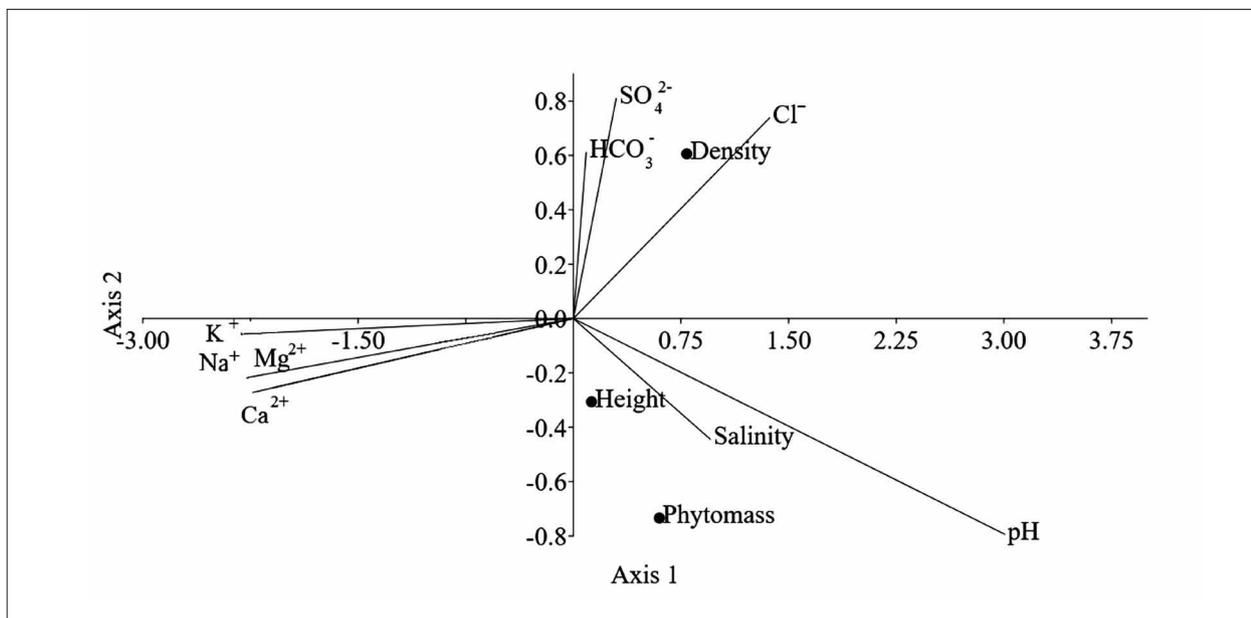


Рис. 2. Ординационная диаграмма, построенная по результатам анализа избыточности для количественных показателей тростника в пресных озёрах
Fig. 2. Ordination chart based on the results of redundancy analysis for *Phragmites australis* quantitative indicators in freshwater lakes

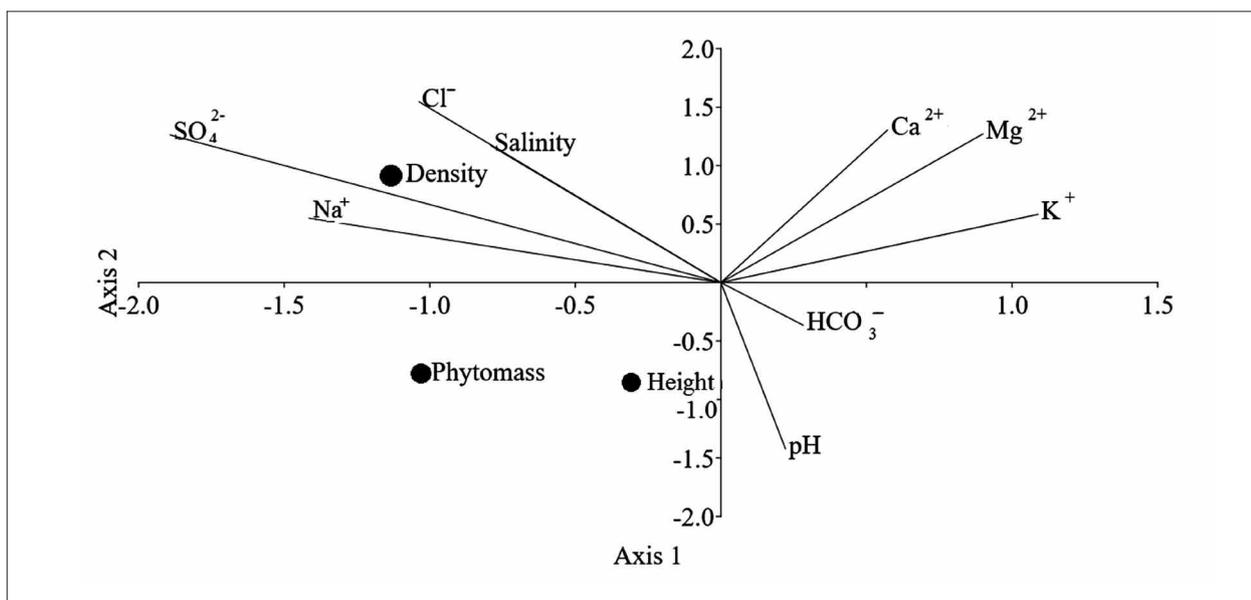


Рис. 3. Ординационная диаграмма, построенная по результатам анализа избыточности для количественных показателей тростника в мезо-, поли- и гипергалинных озёрах
Fig. 3. Ordination chart based on the results of redundancy analysis for *Phragmites australis* quantitative indicators in meso- and polyhaline, and hypersaline lakes

Статистический анализ вспомогательных моделей, которые были построены для каждого отдельного фактора в озёрах с высокой солёностью (мезо-, поли- и гипергалинных), показал, что значимым влиянием ($p < 0,05$) обладали все рассматриваемые факторы, кроме гидрокарбонатов HCO_3^- (рис. 3). Полная модель RDA объясняла 67,24% от общей дисперсии количественных показателей тростника. Статистически значимыми в модели были первые

три оси. Вектор, характеризующий плотность травостоя, расположился на второй оси среди коррелирующих между собой векторов SO_4^{2-} и Cl^- и показателем Salinity (солёность), что указывает на сильную прямую зависимость от этих факторов. Вектор фитомассы был связан с тремя осями и находился в обратной зависимости от всех рассматриваемых факторов. Вектор, характеризующий высоту тростника, расположился по третьей оси вдоль вектора pH.

Для фитомассы тростника в этих озёрах имели значение все рассматриваемые факторы, увеличение концентраций которых приводило к снижению фитомассы. На высоту тростника наибольшее положительное влияние оказывал рН воды, влияние других факторов было менее значимым. Для плотности травостоя наиболее значимыми абиотическими факторами были концентрация в воде ионов SO_4^{2-} , Cl^- , K^+ и солёность воды в целом.

Полученные данные подтверждаются результатами корреляционного анализа. Значимая положительная корреляционная связь ($p < 0,05$) отмечена между высотой тростника и рН ($KK=0,70$), отрицательная – между высотой тростника и содержанием в воде хлора ($KK=-0,55$), кальция ($KK=-0,85$) и магния ($KK=-0,79$). Прямая корреляционная связь наблюдалась между плотностью травостоя и содержанием в воде хлоридов ($KK=0,60$) и сульфатов ($KK=0,77$).

Таким образом, наиболее оптимальные условия для роста и продуктивности тростника были отмечены в солонатоводных олигогалинных гидрокарбонатно-натриевых озёрах северной и центральной лесостепи с минерализацией воды от 0,5 до 5,0 г/л и нейтральной реакцией среды. Высота стеблей, плотность травостоя и фитомасса тростника в этих озёрах были максимальными. В озёрах других рассматриваемых групп на рост и продуктивность тростника оказывали влияние разные абиотические факторы. Однако в целом лимитирующее влияние рассмотренных абиотических факторов проявлялось в тех случаях, когда они достигали минимальных или, наоборот, максимальных значений.

В пресных озёрах южной тайги лимитирующее влияние на фитомассу тростника и плотность травостоя оказывали кислотность среды и жёсткость воды, определяемая ионами кальция. Если повышение кислотности воды оказывало благоприятное влияние на тростник (как правило, в этих озёрах слабокислые воды), то с ионами кальция, калия и натрия была отмечена отрицательная связь.

В солонатоводных мезо- и полигалинных, а также в солёных гипергалинных озёрах на градиенте увеличения солёности воды и концентрации хлоридов и сульфатов высота и фитомасса тростника значительно снижались, а количество побегов на 1 м^2 , напротив, увеличивалось. Таким образом, снижение биомассы и высоты тростника компенсировалось более плотным расположением растений. Подобное явление было также отмечено в [27] для

засолённых местообитаний нижнего Днепра. По данным [27], критическим для тростника в этих водоёмах была концентрация хлоридов 5000–6000 мг/л, при максимальной – 20 000 мг/л. В исследованных нами озёрах критическим значением была солёность воды выше 9 г/л и концентрация хлоридов выше 4000 мг/л, при которой наблюдалось резкое снижение высоты стеблей и фитомассы тростника. Однако тростник в озёрах юга Западной Сибири встречался и в озёрах с солёностью воды до 387,6 г/л и концентрацией хлоридов до 238 тыс. мг/л. По сырым берегам гипергалинных озёр Малиновое, Балансор, Кулундинское, Красновишнёвое развивались карликовые растения высотой 50–60 см с утолщёнными листьями при сильной редукции длины и площади листовых пластинок. Фитомасса тростника в этих озёрах не превышала 200–250 г/м². Уменьшение высоты стеблей, длины листовой пластинки и биомассы тростника в условиях засоления были отмечены и другими авторами [28, 29]. Прогрессирующее снижение массы и общей листовой поверхности растений при нарастании солевого стресса некоторые авторы связывают с торможением ростовых процессов [30] и физиологическим старением растений [31]. Способность тростника обитать в условиях высоких концентраций солей связана с выработкой различных физиологических и биохимических защитных механизмов, таких как управление осмотическим процессом, изменение морфологической и анатомической структур [31], что выражается в увеличении толщины листа и числа крупных проводящих пучков на единице его поверхности, возрастании водозапасающих тканей, уменьшении объёма и диаметра водопроводящих пучков, снижении плотности устьичных щелей и транспирации [29, 30, 32, 33].

Заключение

Тростник – воздушно-водное растение, широко распространённое на юге Западной Сибири. Будучи гелофитом и эврибионтом, тростник обладает высокой устойчивостью к засолению воды и грунтов. Несмотря на это, высокий уровень засоления воды и грунтов негативно сказывается на росте и развитии тростника. Редкое сочетание на сравнительно небольшом пространстве юга Западной Сибири хлористых, сульфатных и содовых озёр позволило оценить степень влияния абиотических факторов (рН, минерализация) на высоту, биомассу и плотность зарослей тростника.

Оптимальными для роста и развития тростника является минерализация воды от 0,5 до 5,0 г/л, при которой наблюдаются наибольшие значения биомассы и высоты растений. Лимитирующими факторами в пресных озёрах были низкие значения рН при относительно высоком содержании Ca^{2+} , определяющего жёсткость воды. В солоноватоводных мезо- и полигалинных и солёных гипергалинных водоёмах на фитомассу тростника влиял весь комплекс факторов, в то время как на высоту растений оказывали значимое влияние рН, хлориды и жёсткость воды, а на плотность травостоя – хлориды и сульфаты.

Потепление климата, о котором пишут в последнее время многие учёные, может привести к усилению аридизации на юге Западной Сибири и, как следствие, к повышению солёности природных вод. Знание того, какие элементы биотического сообщества будут сохраняться, когда озёра станут более минерализованными, имеет значение для сохранения и использования их ресурсов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН.

Литература

1. Цвелев Н.Н. Злаки СССР. Л.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1976. 788 с.
2. Zhigulsky V.A., Shuisky V.F., Chebykina E.Yu., Zhigulskaya D.V. Macrophyte thicket ecosystems in the Neva Bay: a response to hydraulic construction impact // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 3. С. 88–93. doi: 10.25750/1995-4301-2023-3-088-093
3. Магзанова Д.К., Каниева Н.А., Журавлева Г.Ф. Применение тростника южного «*Phragmites australis*» в качестве сырья при производстве корма для рыб // Рациональное питание, пищевые добавки и биостимуляторы. 2016. № 2. С. 63–66 [Электронный ресурс] <https://journal-nutrition.ru/ru/article/view?id=35740> (Дата обращения: 08.07.2023).
4. Honoré M., Lecompte T., Pimbert S. Properties of *Phragmites australis* for insulating concrete application // Construction Technologies and Architecture. 2022. V. 1. P. 332–338. doi: 10.4028/www.scientific.net/CTA.1.332
5. Панов В.В., Кукушкина Е.Е., Женихов Ю.Н., Шахматов К.Л. Выращивание и использование биомассы тростника на обводняемых выработанных торфяных болотах. Материалы научно-экспериментальной работы. Тверь: Триада, 2016. 160 с.
6. Bonanno G. Comparative performance of trace element bioaccumulation and bio-monitoring in the plant species *Typha domingensis*, *Phragmites australis* and *Arundo donax* // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2013. V. 97. P. 124–130. doi: 10.1016/j.ecoenv.2013.07.017
7. Kumari M., Tripathi B.D. Efficiency of *Phragmites australis* and *Typha latifolia* for heavy metal removal from wastewater // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2015. V. 112. P. 80–86. doi: 10.1016/j.ecoenv.2014.10.034
8. Samecka-Cymerman A., Kempers A.J. Concentrations of heavy metals and plant nutrients in water, sediments and aquatic macrophytes of anthropogenic lakes (former open cut brown coal mines) differing in stage of acidification // Sci. Total Environ. 2001. V. 281. No. 1–3. P. 87–98. doi: 10.1016/S0048-9697(01)00838-5
9. Zhao Y., Yang Z., Xia X., Wang F. A shallow lake remediation regime with *Phragmites australis*: incorporating nutrient removal and water evapotranspiration // Water Res. 2012. V. 46. No. 17. P. 5635–5644. doi: 10.1016/j.watres.2012.07.053
10. Rout N.P., Shaw B.P. Salt tolerance in aquatic macrophytes: possible involvement of the antioxidative enzymes // Plant Sci. 2001. V. 160. No. 3. P. 415–423. doi: 10.1016/S0168-9452(00)00406-4
11. Li F., Xie Y., Chen X., Pan Y., Deng Z., Li X. Plant distribution can be reflected by physiological responses to salinity of three submerged macrophytes from the Modern Yellow River Delta // Fundam. Appl. Limnol. 2011. V. 179. No. 3. P. 159–167. doi: 10.1127/1863-9135/2011/0179-0159
12. Jampeetong A., Brix H. Effects of NaCl salinity on growth, morphology, photosynthesis and proline accumulation of *Salvinia natans* // Aquat. Bot. 2009. V. 91. No. 3. P. 181–186. doi: 10.1016/j.aquabot.2009.05.003
13. Mufarrege M.M., Di Luca G.A., Hadad H.R., Maine M.A. Adaptability of *Typha domingensis* to high pH and salinity // Ecotoxicology. 2011. V. 20. No. 2. P. 457–465. doi: 10.1007/s10646-011-0598-0
14. Touchette B.W. Salt tolerance in a *Juncus roemerianus* brackish marsh: Spatial variations in plant water relations // J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 2006. V. 337. No. 1. P. 1–12. doi: 10.1016/j.jembe.2006.05.011
15. Hadad H.R., Mufarrege M.M., Di Luca G.A., Maine M.A. Salinity and pH effects on floating and emergent macrophytes in a constructed wetland // Water Sci. Technol. 2018. V. 2017. No. 1. P. 270–275. doi: 10.2166/wst.2018.110
16. Папченков В.Г. Продукция макрофитов вод и методы ее изучения // Гидробиотаника: методология и методы: Материалы Школы по гидробиотанике. Рыбинск: Рыбинский Дом печати, 2003. С. 137–145.
17. Ермолаева Н.И., Зарубина Е.Ю., Кириллов В.В., Безматерных Д.М., Митрофанова Е.Ю., Вдовина О.Н., Винокурова Г.В., Долматова Л.А., Соколова М.И. Факторные характеристики гидробиоценозов озёр сухостепной подзоны Обь-Иртышского междуречья // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. 2019. № 8. С. 46–55. doi: 10.25221/levanidov.08.06
18. Зарубина Е.Ю., Соколова М.И. Связь видового разнообразия макрофитов с морфометрией и гидрохими-

ческими характеристиками озёр (на примере разнотипных водоёмов Бурлинской озёрно-речной системы, юг Обь-Иртышского междуречья) // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии: сб. науч. ст. по материалам XVII междунар. науч.-практ. конф. Барнаул : Изд-во АлтГУ, 2018. С. 66–70.

19. Зарубина Е.Ю., Дурникин Д.А. Флора солёных озёр Кулундинской равнины (юг Западной Сибири) // Сибирский экологический журнал. 2005. Т. 12. № 2. С. 341–351.

20. Страховенко В.Д., Росляков Н.А., Сысо А.И., Ермолаева Н.И., Зарубина Е.Ю., Таран О.П., Пузанов А.В. Геохимическая характеристика сапропелей Новосибирской области // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. № 3. С. 336–344. doi: 10.7868/S0321059616030160

21. Страховенко В.Д., Овдина Е.А., Малов Г.И., Ермолаева Н.И., Зарубина Е.Ю., Таран О.П., Болтенков В.В. Генезис органоминеральных отложений озёр центральной части Барабинской низменности (юг Западной Сибири) // Геология и геофизика. 2019. Т. 60. № 9. С. 1231–1243. doi: 10.15372/GiG2019093

22. Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.

23. Ramette A. Multivariate analyses in microbial ecology // FEMS Microbiol. Ecol. 2007. V. 62. No. 2. P. 142–160. doi: 10.1111/j.1574-6941.2007.00375.x

24. Zuur A.F., Ieno E.N., Elphick C.S. A protocol for data exploration to avoid common statistical problems // Methods Ecol. Evol. 2010. No. 1. P. 3–14. doi: 10.1111/j.2041-210X.2009.00001.x

25. Поползин А.Г. **Озёра юга Обь-Иртышского бассейна**. Новосибирск: Зап.-Сиб. кн. изд-во, 1967. 350 с.

26. The Venice system for the classification of marine waters according to salinity // Limnol. Oceanogr. 1958. V. 3. No. 3. P. 346–347. doi: 10.4319/lo.1958.3.3.0346

27. Кроткевич П.Г. К вопросу использования водоохранно-очистных свойств тростника обыкновенного // Водные ресурсы. 1976. № 5. С. 191–197.

28. Hong M.G., Nam B.E., Kim J.G. Effects of different day length and wind conditions to the seedling growth performance of *Phragmites australis* // J. Ecol. Environ. 2021. V. 45. Article No. 9. doi: 10.1186/s41610-021-00184-z

29. Naidoo G. Salt tolerance of the African haplotype of *Phragmites australis* (Poaceae) // Afr. J. Ecol. 2021. V. 59. No. 3. P. 724–734. doi: 10.1111/aje.12876

30. Пьянков В.И. Влияние засоления на мезоструктуру фотосинтетического аппарата тростника (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) в условиях аридной зоны // Экология. 1991. № 4. С. 81–83.

31. Sodani R., Mundiyyara R. Salinity stress: Its impact on plant growth and development // Agric. Food (E-Newsletter). 2021. V. 3. No. 6. P. 535–537. doi: 10.13140/RG.2.2.24198.09283

32. Li H., Lin W.F., Shen Z.L., Peng H., Zhou J.J., Zhu X.Y. Physiological and proteomic analyses of differ-

ent ecotypes of reed (*Phragmites communis*) in adaptation to natural drought and salinity // Front. Plant Sci. 2021. V. 12. Article No. 720593. doi: 10.3389/fpls.2021.720593

33. Лукина Л.Ф., Смирнова Н.Н. **Физиология высших водных растений**. Киев: Наукова думка, 1988. 188 с.

References

1. Tsvelev N.N. Poaceae USSR. Leningrad: Nauka, Leningradskoe otdelenie, 1976. 788 p. (in Russian).

2. Zhigulsky V.A., Shuisky V.F., Chebykina E.Yu., Zhigulskaya D.V. Macrophyte thicket ecosystems in the Neva Bay: a response to hydraulic construction impact // Theoretical and Applied Ecology. 2023. No. 3. P. 88–93. doi: 10.25750/1995-4301-2023-3-088-093

3. Magzanova D.K., Kanieva N.A., Zhuravleva G.F. Application cane southern “*Phragmites australis*” as a raw material in the production of fish feed // Ratsionalnoe pitanie, pishchevye dobavki i biostimulyatory. 2016. No. 2. P. 63–66 (in Russian) [Internet resource] <https://journal-nutrition.ru/ru/article/view?id=35740> (Accessed: 08.07.2023).

4. Honoré M., Lecompte T., Pimbert S. Properties of *Phragmites australis* for insulating concrete application // Construction Technologies and Architecture. 2022. V. 1. P. 332–338. doi: 10.4028/www.scientific.net/CTA.1.332

5. Panov V.V., Kukushkina E.E., Zhenikhov Yu.N., Shakhmatov K.L. Cultivation and use of reed biomass in flooded depleted peat bogs. Materials of the scientific and experimental work. Tver: Triada, 2016. 160 p. (in Russian).

6. Bonanno G. Comparative performance of trace element bioaccumulation and bio-monitoring in the plant species *Typha domingensis*, *Phragmites australis* and *Arundo donax* // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2013. V. 97. P. 124–130. doi: 10.1016/j.ecoenv.2013.07.017

7. Kumari M., Tripathi B.D. Efficiency of *Phragmites australis* and *Typha latifolia* for heavy metal removal from wastewater // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2015. V. 112. P. 80–86. doi: 10.1016/j.ecoenv.2014.10.034

8. Samecka-Cymerman A., Kempers A.J. Concentrations of heavy metals and plant nutrients in water, sediments and aquatic macrophytes of anthropogenic lakes (former open cut brown coal mines) differing in stage of acidification // Sci. Total Environ. 2001. V. 281. No. 1–3. P. 87–98. doi: 10.1016/S0048-9697(01)00838-5

9. Zhao Y., Yang Z., Xia X., Wang F. A shallow lake remediation regime with *Phragmites australis*: incorporating nutrient removal and water evapotranspiration // Water Res. 2012. V. 46. No. 17. P. 5635–5644. doi: 10.1016/j.watres.2012.07.053

10. Rout N.P., Shaw B.P. Salt tolerance in aquatic macrophytes: possible involvement of the antioxidative enzymes // Plant Science. 2001. V. 160. No. 3. P. 415–423. doi: 10.1016/S0168-9452(00)00406-4

11. Li F., Xie Y., Chen X., Pan Y., Deng Z., Li X. Plant distribution can be reflected by physiological responses to salinity of three submerged macrophytes from the Modern Yellow River Delta // *Fundam. Appl. Limnol.* 2011. V. 179. No. 3. P. 159–167. doi: 10.1127/1863-9135/2011/0179-0159
12. Jampeetong A., Brix H. Effects of NaCl salinity on growth, morphology, photosynthesis and proline accumulation of *Salvinia natans* // *Aquat. Bot.* 2009. V. 91. No. 3. P. 181–186. doi: 10.1016/j.aquabot.2009.05.003
13. Mufarrege M.M., Di Luca G.A., Hadad H.R., Maine M.A. Adaptability of *Typha domingensis* to high pH and salinity // *Ecotoxicology.* 2011. V. 20. No. 2. P. 457–465. doi: 10.1007/s10646-011-0598-0
14. Touchette B.W. Salt tolerance in a *Juncus roemerianus* brackish marsh: Spatial variations in plant water relations // *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 2006. V. 337. No. 1. P. 1–12. doi: 10.1016/j.jembe.2006.05.011
15. Hadad H.R., Mufarrege M.M., Di Luca G.A., Maine M.A. Salinity and pH effects on floating and emergent macrophytes in a constructed wetland // *Water Sci. Technol.* 2018. V. 2017. No. 1. P. 270–275. doi: 10.2166/wst.2018.110
16. Papchenkov V.G. Production of water macrophytes and methods of its study // *Hydrobotany: methodology and methods: Proceedings of the School of Hydrobotany.* Rybinsk: Rybinsk Press House, 2003. P. 137–145 (in Russian).
17. Yermolaeva N.I., Zarubina E.Yu., Kirillov V.V., Bezmaternykh D.M., Mitrofanova E.Yu., Vdovina O.N., Vinokurova G.V., Dolmatova L.A., Sokolova M.I. Factor characteristics of hydrobiocenoses of the small lakes in dry-steppe subband of the Ob-Irtysh interfluvium // *Vladimir Ya. Levanidov's Biennial Memorial Meetings.* 2019. No. 8. P. 46–55 (in Russian). doi: 10.25221/levanidov.08.06
18. Zarubina E.Yu., Sokolova M.I. Communication of a specific variety of macrophyte with a morphometry and hydrochemical characteristics of lakes (on example of polytypic river lakes of Burlinsky system, the south of the Ob-Irtysh interfluvium) // *Problems of Botany of Southern Siberia and Mongolia: sbornik nauchnykh statey po materialam XVII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii.* 2018. Barnaul: Izdatel'stvo AltGU. P. 66–70 (in Russian).
19. Zarubina E.Yu., Durnikin D.A. Flora of the salted lakes of the Kulunda Plain (South of West Siberia) // *Siberian Journal of Ecology.* 2005. V. 12. No. 2. P. 341–351 (in Russian).
20. Strakhovenko V.D., Roslyakov N.A., Syso A.I., Ermolaeva N.I., Zarubina E.Y., Puzanov A.V., Taran O.P. Hydrochemical characteristic of sapropels in Novosibirsk oblast // *Water Resources.* 2016. V. 43. No. 3. P. 336–344 (in Russian). doi: 10.7868/S0321059616030160
21. Strakhovenko V.D., Ovdina E.A., Malov G.I., Yermolaeva N.I., Zarubina E.Y., Taran O.P., Boltenev V.V. Genesis of organomineral sediments of lakes of the Central Part of the Baraba Lowland (south of West Siberia) // *Russian Geology and Geophysics.* 2019. V. 60. No. 9. P. 1231–1243 (in Russian). doi: 10.15372/GiG2019093
22. Shitikov V.K., Rozenberg G.S., Zinchenko T.D. Quantitative hydroecology: system identification techniques. Togliatti: IEVB RAN, 2003. 463 p. (in Russian).
23. Ramette A. Multivariate analyses in microbial ecology // *FEMS Microbiol. Ecol.* 2007. V. 62. No. 2. P. 142–160. doi: 10.1111/j.1574-6941.2007.00375.x
24. Zuur A.F., Ieno E.N., Elphick C.S. A protocol for data exploration to avoid common statistical problems // *Methods Ecol. Evol.* 2010. No. 1. P. 3–14. doi: 10.1111/j.2041-210X.2009.00001.x
25. Popolzin A.G. Lakes of the south of the Ob-Irtysh basin. Novosibirsk: Zapadno-Sibirskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1967. 350 p. (in Russian).
26. The Venice system for the classification of marine waters according to salinity // *Limnol. Oceanogr.* 1958. V. 3. No. 3. P. 346–347. doi: 10.4319/lo.1958.3.3.0346
27. Krotkevich P.G. On the issue of using the water-protective and purification properties of *Phragmites australis* // *Water resources.* 1976. No. 5. P. 191–197 (in Russian).
28. Hong M.G., Nam B.E., Kim J.G. Effects of different day length and wind conditions to the seedling growth performance of *Phragmites australis* // *J. Ecol. Environ.* 2021. V. 45. Article No. 9. doi: 10.1186/s41610-021-00184-z
29. Naidoo G. Salt tolerance of the African haplotype of *Phragmites australis* (Poaceae) // *Afr. J. Ecol.* 2021. V. 59. No. 3. P. 724–734. doi: 10.1111/aje.12876
30. Pyankov V.I. Influence of salinity on the mesostructure of the photosynthetic apparatus of reed (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) in the arid zone // *Ecology.* 1991. No. 4. P. 81–83 (in Russian).
31. Sodani R., Mundiyyara R. Salinity Stress: Its impact on plant growth and development // *Agric. Food (E-Newsletter).* 2021. V. 3. No. 6. P. 535–537. doi: 10.13140/RG.2.2.24198.09283
32. Li H., Lin W., Shen Z., Peng H., Zhou J., Zhu X. Physiological and proteomic analyses of different ecotypes of reed (*Phragmites communis*) in adaptation to natural drought and salinity // *Front. Plant Sci.* 2021. V. 12. Article No. 720593. doi: 10.3389/fpls.2021.720593
33. Lukina L.F., Smirnova N.N. Physiology of higher aquatic plants. Kyiv: Naukova Dumka, 1988. 188 p. (in Russian).