Научная статья

УДК 581.526.42:628.356

СЕЗОННАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ И АККУМУЛЯЦИЯ АЗОТА И ФОСФОРА ВЫСШИМИ ВОДНЫМИ РАСТЕНИЯМИ НА БИОПЛАТО ПРИ ДООЧИСТКЕ СТОЧНЫХ ВОД

Кайбелева Эльмира Исмаиловна, кандидат биологических наук, Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Россия, Саратов, blueharbor67@mail.ru

Аннотация. Эффективность фитоинженерных систем доочистки сточных вод напрямую зависит от физиологических и морфологических особенностей высших водных растений. В исследовании оценены сезонная продуктивность и механизмы аккумуляции азота и фосфора четырьмя видами макрофитов, культивируемыми на модельных биоплато в условиях умеренного климата. Для разделения прямого фитогенного изъятия элементов от процессов седиментации и микробной трансформации в эксперимент включен неозелененный контроль. Установлено, что определяющим фактором общего выноса биогенов из водной среды выступает не абсолютная концентрация веществ в тканях, а видоспецифическая способность формировать высокую надземную фитомассу. Выявлена выраженная сезонная динамика распределения ассимилятов: пик аккумуляции азота и фосфора в побегах приходится на период формирования максимальной биомассы, после чего начинается осенняя транслокация ассимилятов в запасающие корневища. Доказано, что несвоевременное удаление отмирающей фитомассы приводит к вторичному поступлению значительной части накопленных нутриентов обратно в водную толщу. На основе анализа фенологических фаз и относительной скорости роста обоснованы оптимальные сроки скашивания надземных частей растений. Результаты работы подтверждают необходимость перехода от сугубо гидрохимического мониторинга к управлению жизненным циклом макрофитов с учетом их

ботанических характеристик при проектировании искусственных водно-болотных комплексов.

Ключевые слова: высшие водные растения; биоплато; сезонная продуктивность; аккумуляция азота; аккумуляция фосфора; доочистка сточных вод.

Original article

SEASONAL PRODUCTIVITY AND ACCUMULATION OF NITROGEN AND PHOSPHORUS BY HIGHER AQUATIC PLANTS ON A BIOPLATEAU DURING WASTEWATER TREATMENT

Kaibeleva Elmira Ismailovna, Candidate of Biological Sciences, Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky, Saratov, Russia, blueharbor67@mail.ru

Abstract. The effectiveness of phytoengineered wastewater post-treatment systems directly depends on the physiological and morphological characteristics of higher aquatic plants. This study, conducted within a botanical approach, assessed the seasonal productivity and mechanisms of nitrogen and phosphorus accumulation in four macrophyte species cultivated on model bioplateaus in a temperate climate. To distinguish direct phytogenic nutrient removal from sedimentation and microbial transformation processes, a non-greened control was included in the experiment. It was established that the determining factor in the overall nutrient removal from the aquatic environment is not the absolute concentration of substances in tissues, but the species-specific ability to form a high aboveground phytomass. A pronounced seasonal dynamics in the allocation of plastic substances was revealed: the peak accumulation of nitrogen and phosphorus in shoots occurs during the period of maximum biomass formation, after which the process of autumn translocation of assimilates to storage rhizomes begins. It has been proven that untimely removal of dead phytomass leads to the secondary release of a significant portion of accumulated nutrients back into the

water column. Based on an analysis of phenological phases and relative growth rates, optimal mowing times for above-ground plant parts were determined. The results of the study confirm the need to shift from purely hydrochemical monitoring to botanical management of the macrophyte life cycle when designing artificial wetland complexes.

Keywords: aquatic macrophytes; constructed wetlands; seasonal productivity; nitrogen accumulation; phosphorus accumulation; wastewater polishing.

Введение. Традиционные пруды-отстойники, повсеместно применяемые для очистки муниципальных стоков, зачастую не способны обеспечить нормативные показатели по биогенным элементам на этапе финального сброса. Интеграция искусственных плавучих водно-болотных угодий, или биоплато, в существующие технологические схемы выступает действенным фитоинженерным решением. Данные конструкции, удерживаемые на водной поверхности посредством модульных каркасов, формируют специфическую среду, где корневые системы макрофитов напрямую контактируют с загрязненной водой [1]. Подобный подход не только стимулирует прямое поглощение поллютантов, но и создает обширную площадь для колонизации микробными биоценозами, что в совокупности интенсифицирует процессы минерализации органических веществ и трансформации соединений азота и фосфора.

Фундаментальным фактором, лимитирующим очистную способность таких комплексов, выступает видоспецифичная стратегия роста и физиологические особенности высших водных растений. Исследования в полевых условиях показывают значительные межвидовые различия в накоплении фитомассы: от относительно низких показателей у Chrysopogon zizaninides до высокой продуктивности Baumea articulata и Glyceria grandis, способных формировать плотные заросли даже в суровых климатических условиях [2], [3]. Распределение ассимилятов между надземными и подземными органами зависит от условий среды. При высоком трофическом статусе,

характерном для доочищаемых сточных вод, растения преимущественно направляют ресурсы на развитие побегов, что многократно увеличивает вынос биогенных элементов с надземной фитомассой, тогда как на бедных субстратах преобладает рост корневой системы [4], [5].

Концентрация азота и фосфора в тканях макрофитов изменяется в течение вегетационного периода и тесно связана с гидробиологическим режимом водоема. При этом накопление загрязняющих веществ в ризосфере, характерное для многих видов, в том числе Scirpus microcarpus и Carex aquatilis, обеспечивает фитостабилизацию; однако для безвозвратного изъятия биогенных элементов из водной толщи необходимо регулярно удалять надземную фитомассу. Несмотря на практическую значимость проблемы, данных о сезонной динамике продуктивности и темпах поглощения биогенных элементов отечественными и интродуцированными видами в условиях действующих очистных сооружений недостаточно. Большинство существующих работ ограничиваются лабораторными микрокосмами или короткими пилотными испытаниями, что не позволяет достоверно экстраполировать полученные результаты на реальные гидротехнические объекты [6], [7].

Для устранения указанного пробела в данных необходим переход от контролируемых экспериментов к мониторингу в реальных условиях эксплуатации очистных станций. Выбор конкретных таксонов должен основываться не только на их устойчивости к токсикантам, но и на способности формировать значительную биомассу с оптимальным соотношением побегов и корней, поскольку это непосредственно влияет на экономическую эффективность процесса доочистки [8]. В связи с этим настоящая работа посвящена оценке сезонной продуктивности и закономерностей аккумуляции азота и фосфора высшими водными растениями, культивируемыми на биоплато в системах доочистки муниципальных сточных вод, с целью обоснования агротехнических приемов управления их фитомассой.

Обзор литературы. Функционирование фитоинженерных систем, в

частности искусственных биоплато, базируется на способности высших водных и прибрежно-водных растений адаптироваться к условиям избыточного трофного статуса среды. В современной научной литературе преобладает инженерно-гидробиологический подход, при котором эффективность очистных сооружений оценивают преимущественно по степени снижения концентрации загрязняющих веществ в воде [9-11]. Такой подход зачастую не учитывает видоспецифические особенности макрофитов, их физиологию роста, фенологическое состояние и распределение ассимилятов. Между тем, именно биологические характеристики растений, такие как относительная скорость роста, плотность стеблестоя и распределение биомассы между надземными и подземными органами, определяют реальный потенциал фитоэкстракции биогенных элементов [12].

Анализ существующих исследований показывает, что прямое поглощение азота и фосфора тканями растений не является единственным путем их удаления из водной среды. Значительная часть поллютантов редуцируется за счет седиментации взвешенных веществ, адсорбции на субстрате и микробной трансформации в ризосфере [13-15]. В связи с этим, оценка вклада растительного компонента требует обязательного включения в экспериментальную схему неозелененного контроля. Без разделения абиогенных, микробиологических и фитогенных процессов невозможно объективно определить роль макрофитов в стабилизации субстрата и изъятии биогенов [16].

Научная новизна настоящей работы заключается в сравнительной оценке видоспецифических сезонных стратегий роста и аккумуляции азота и фосфора у модельных видов высших водных растений, а также в определении оптимальных сроков удаления надземной фитомассы для предотвращения вторичного загрязнения.

Организация и методология исследования. В работе рассматривается сезонное накопление азота и фосфора в надземной биомассе высших водных растений, используемых в системах доочистки сточных вод. Объектами

сравнительного анализа выступают Phragmites australis, Typha latifolia, Iris pseudacorus и Sparganium erectum. Для каждого вида учитываются содержание азота и фосфора в сухом растительном материале и продуктивность надземной биомассы на единицу площади. Потенциальный вынос биогенных элементов с укосом рассчитывается как произведение сухой биомассы на массовую долю соответствующего элемента. Например, для Phragmites australis значение 2,85 кг/м² при содержании азота 1,42 % соответствует 40,47 г N/м²; при содержании фосфора 0,21 % — приблизительно 5,99 г P/м².

Посадка растений осуществлялась в модульные плавучие конструкции с гравийным субстратом. Плотность посадки составляла 15 особей на квадратный метр. Для разделения прямого фитогенного изъятия элементов от процессов осаждения и микробной денитрификации был организован участок неозелененного контроля, представляющий собой идентичные плавучие модули без растительности. Гидрохимический мониторинг включал определение БПК5, взвешенных веществ, аммонийного и нитратного азота, а также фосфатов.

Ботанические показатели регистрировались еженедельно в период вегетации. Фиксировались высота побегов, плотность стеблестоя (количество побегов на м²) и фенологические фазы. Для определения фактической продуктивности проводили деструктивный отбор проб (метод модельных снопов) с последующим разделением материала на надземную и подземную биомассу. Материал высушивался до абсолютно сухого состояния и взвешивался. Содержание общего азота определялось по Кьельдалю, фосфора — спектрофотометрическим методом после сухого озоления проб. Относительная скорость роста (ОСР) рассчитывалась как приращение сухой массы за единицу времени на единицу исходной массы. Статистическая обработка данных проводилась с использованием дисперсионного анализа.

Результаты исследования и их обсуждение. Анализ приживаемости и начальных темпов роста выявил существенные межвидовые различия в адаптации к условиям доочищенного стока. Наибольшую скорость укоренения и

наиболее раннее начало вегетации продемонстрировал Phragmites australis, что согласуется с его способностью быстро осваивать пространство. Касатик желтый и ежеголовник прямой характеризовались более длительным периодом адаптации, однако к середине лета сформировали устойчивый покров. Плотность стеблестоя у тростника достигала 450–500 побегов/м², тогда как у касатика, формирующего розеточную структуру, этот показатель не превышал 120–140 побегов/м², что компенсировалось высокой индивидуальной массой каждого растения.

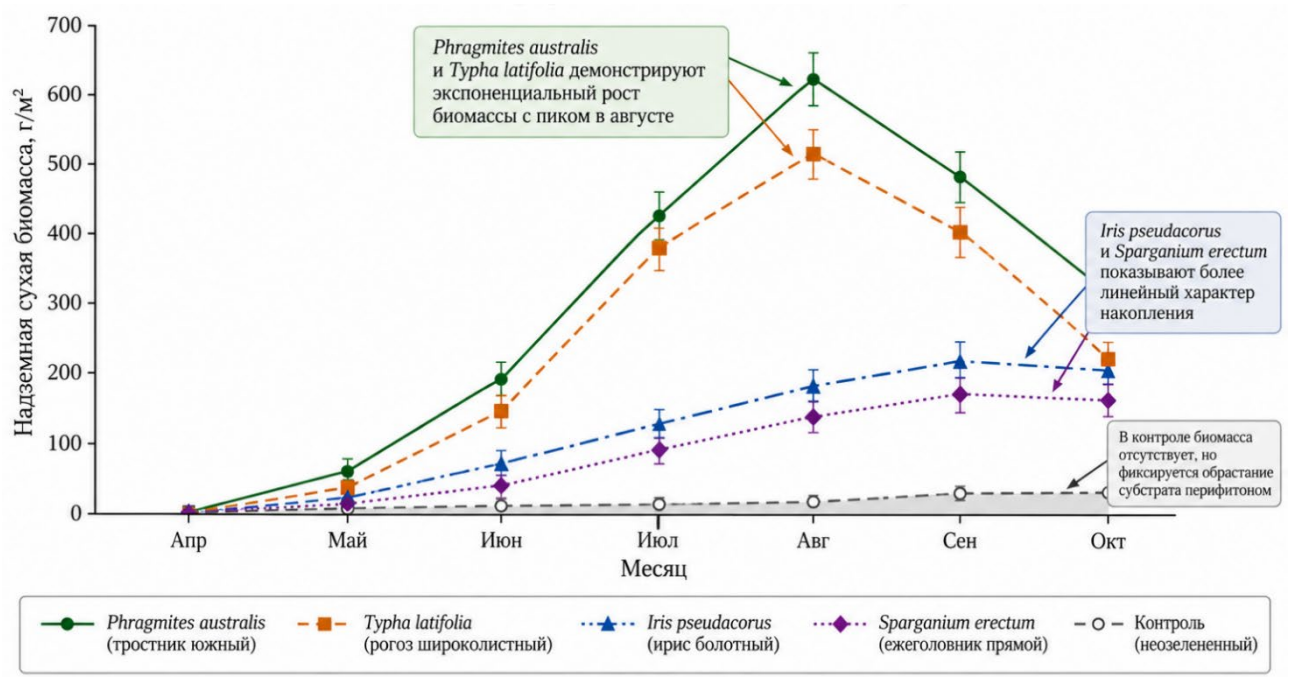


Рисунок 1 - Сезонная динамика накопления надземной сухой биомассы модельных видов макрофитов и в неозелененном контроле (г/м²) (источник: разработано автором)

Важным ботаническим аспектом является распределение ассимилятов между надземными и подземными органами. В начальные фазы вегетации (май–июнь) растения направляли до 60% ассимилятов на развитие корневой системы и корневищ, что обеспечивало надежное закрепление растений и подготовку к зимовке. По мере перехода к генеративному периоду доля надземной фитомассы возрастала, достигая 75–80% от общей биомассы у тростника и рогоза. У ежеголовника прямая зависимость между высотой побега и ее массой была менее выражена из-за наличия плавающих листьев, выполняющих фотосинтетическую

функцию.

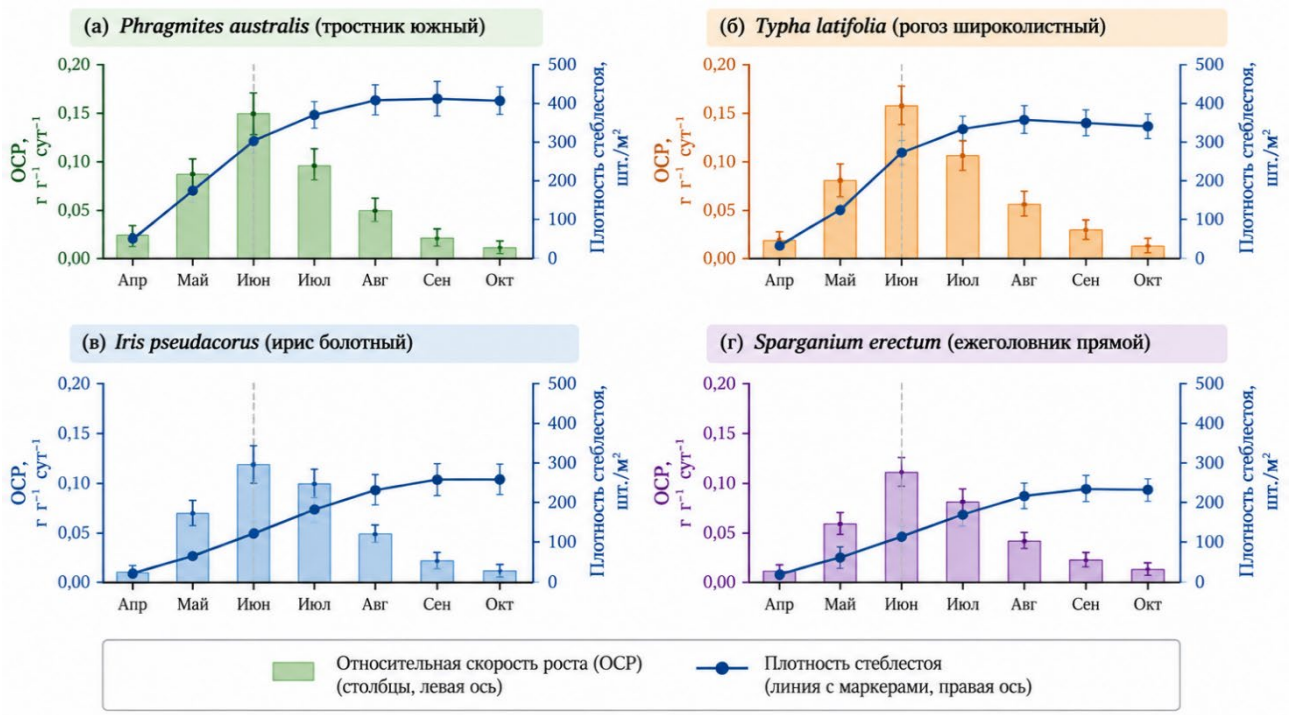


Рисунок 2 - Относительная скорость роста (ОСР) и динамика плотности стеблестоя у исследуемых видов в период активной вегетации (источник: разработано автором)

Концентрация азота и фосфора в тканях растений носила волнообразный характер. Максимальные значения содержания элементов (до 3,8% N и 0,6% P в пересчете на абсолютное сухое вещество) регистрировались в фазах интенсивного линейного роста побегов. По мере старения тканей и перехода к репродуктивному развитию концентрация биогенов в листьях неуклонно снижалась. Однако оценка очистного потенциала исключительно по концентрации элементов в тканях методологически некорректна. Реальное изъятие азота и фосфора из водной среды определяется произведением концентрации элемента на величину накопленной биомассы.

Таблица 1 - Сезонная динамика содержания и общего выноса азота и фосфора надземной фитомассой (на пике биомассы, август)

Вид растения	Концентрация N, %	Концентрация P, %	Надземная биомасса, кг/м²	Вынос N, г/м²	Вынос P, г/м²
Phragmites australis	1,42 ± 0,11	0,21 ± 0,02	2,85 ± 0,24	40,47	5,98
Typha latifolia	1,55 ± 0,14	0,24 ± 0,03	2,10 ± 0,18	32,55	5,04
Iris pseudacorus	1,80 ± 0,16	0,28 ± 0,02	1,15 ± 0,12	20,70	3,22
Sparganium erectum	1,65 ± 0,12	0,22 ± 0,02	0,85 ± 0,09	14,02	1,87
Контроль (без растений)	-	-	0,15 (перифитон)	1,80	0,45

Источник: разработано автором.

Данные таблицы 1 свидетельствуют, что, несмотря на более высокую концентрацию азота в тканях касатика, абсолютный вынос элемента на единицу площади у тростника оказался вдвое выше за счет колоссальной разницы в продуктивности. Сравнение с неозелененным контролем показало, что в модулях без растений снижение концентрации азота и фосфора в воде составило лишь 12–15% от исходного уровня, что обусловлено седиментацией и деятельностью биофильма на гравии. Результаты анализа надземной биомассы демонстрируют различия потенциального выноса азота и фосфора при сезонном удалении растительного материала. Среди рассмотренных видов наибольшие расчётные значения получены для Phragmites australis: 40,47 г N/м² и 5,98 г P/м². Для Typha latifolia соответствующие показатели составляют 32,55 и 5,04 г/м², для Iris pseudacorus — 20,70 и 3,22 г/м², для Sparganium erectum — 14,02 и 1,87 г/м². Эти величины характеризуют потенциальное удаление элементов при отчуждении надземной биомассы.

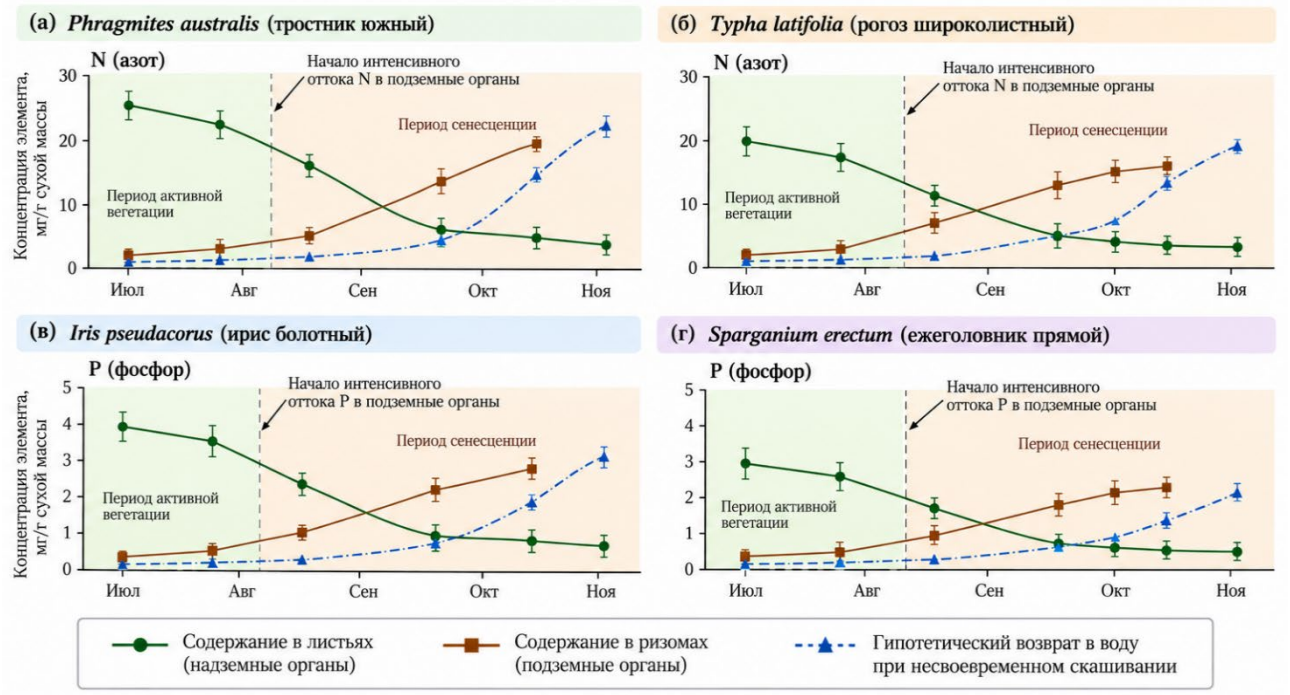


Рисунок 3 - Динамика оттока азота и фосфора из надземных органов в подземные в период осенней сенесценции (отмирания) (источник: разработано автором)

Оптимальным сроком удаления надземной биомассы является период, предшествующий началу активного оттока пластических веществ в подземные органы. Для исследуемых видов в условиях умеренного климата этот интервал приходится на последнюю декаду августа – первую неделю сентября. Скашивание в эти сроки позволяет изъять максимальное количество азота и фосфора, законсервированных в растительных тканях, и предотвратить их возврат в экосистему. При этом подземные органы успевают накопить достаточный запас питательных веществ для успешной перезимовки и старта вегетации в следующем сезоне.

Попытки увеличения видового разнообразия на биоплато за счет введения дополнительных таксонов не всегда приводят к синергетическому эффекту. Выявлено, что в условиях высокой трофической нагрузки доминирующие виды (тростник, рогоз) обладают высокой конкурентной способностью и способны подавлять развитие менее конкурентоспособных видов (ежеголовник), снижая общую плотность и выравненность покрова. Продуктивность растительных

сообществ на биоплато может зависеть от видового состава, распределения жизненного пространства, особенностей питания и гидрологического режима. При совместном выращивании нескольких видов возможно возникновение межвидовой конкуренции, связанной с неодинаковой эффективностью использования ресурсов.

Продуктивность высших водных растений на биоплато является определяющим фактором изъятия биогенных элементов из доочищенных сточных вод. Ботанические характеристики, такие как относительная скорость роста и способность формировать высокую надземную биомассу, оказывают более существенное влияние на общий вынос азота и фосфора, чем максимальная концентрация этих элементов в тканях. Сезонные наблюдения показывают, что пик общего накопления биогенных элементов растениями смещен относительно пика их концентрации в молодых тканях и приходится на фазу максимальной биомассы. Своевременное скашивание надземной фитомассы в конце периода активной вегетации является обязательным агротехническим приемом, предотвращающим вторичное загрязнение водной среды в результате осеннего отмирания и разложения растений. Полученные данные подтверждают необходимость ботанического подхода к проектированию и эксплуатации фитоинженерных систем, где видоспецифический подбор макрофитов и управление их жизненным циклом выступают основой технологической эффективности.

Выводы. По результатам полевых наблюдений можно заключить, что традиционный подход к оценке фитоочистки, основанный исключительно на анализе концентрации биогенных элементов в тканях макрофитов, методологически неполон. Ключевым показателем, определяющим вынос азота и фосфора из водной толщи, является способность вида формировать значительную надземную и подземную фитомассу в конкретных гидрохимических условиях. Именно видоспецифические особенности распределения ассимилятов определяют итоговую эффективность изъятия

загрязняющих веществ. В среде с высоким трофическим статусом растения направляют значительную долю ассимилятов на развитие побегов, что многократно увеличивает суммарный вынос биогенных элементов при регулярном удалении надземной фитомассы.

Ключевым аспектом эксплуатации фитоинженерных сооружений становится строгий ботанический контроль фенологического состояния насаждений. Сезонная динамика онтогенеза высших водных растений напрямую влияет на миграцию питательных веществ внутри экосистемы. В период активной вегетации преобладает поступление элементов из водной среды в побеги, тогда как на этапе осенней сенесценции начинается транслокация ассимилятов в запасающие органы для обеспечения зимостойкости. Следовательно, сроки удаления фитомассы должны быть согласованы с фазами развития конкретного таксона. Своевременное скашивание надземных частей до начала массового отмирания листьев предотвращает вторичное загрязнение водоема и обеспечивает безвозвратное изъятие биогенных элементов из системы доочистки, что особенно важно в регионах с выраженными сезонными колебаниями температуры.

При проектировании и модернизации биоплато первостепенное значение имеет подбор видов с учетом их морфологических особенностей, адаптации к местным климатическим условиям и специфике загрязнений. Формирование растительного покрова должно основываться на комплексной оценке продуктивности, конкурентной способности и устойчивости к подтоплению, а не только на сведениях о таксонах, приведенных в справочной литературе по фиторемедиации. Виды с преобладающим ростом надземных органов, такие как рогоз или тростник, выступают эффективным инструментом фитоэкстракции, поскольку их фитомасса подлежит наиболее простому и экономически целесообразному изъятию. В то же время растения, формирующие плотные и глубоко проникающие корневые системы, обеспечивают надежную фитостабилизацию тяжелых металлов и взвешенных частиц, выполняя роль

динамичного биофильтра и создавая обширную площадь для колонизации микробными биоценозами.

Резюмируя вышесказанное, следует отметить, что устойчивое функционирование искусственных водно-болотных комплексов требует перехода от сугубо гидрохимического мониторинга к управлению растительным компонентом на основе ботанических показателей. Надежность доочистки сточных вод определяется не столько гидравлическими параметрами сооружения, сколько физиологическим состоянием и продуктивностью растений. Внедрение критериев ботанического контроля, включающих регулярную оценку прироста биомассы, анализ соотношения корневой и надземной частей, а также мониторинг фенологических фаз, позволяет существенно повысить предсказуемость работы всей фитоинженерной системы. Такой комплексный подход обеспечивает не только стабильное снижение антропогенной нагрузки на водные объекты, но и гарантирует долгосрочную экологическую безопасность эксплуатируемых территорий.

Список литературы

1. Okada K., Vymazal J. The Effect of Aboveground Biomass Harvesting on Nutrients Removal in a Constructed Wetland Treating Municipal Sewage // Ecological Engineering. 2023. Vol. 190. Art. 106918. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2023.106918. —

2. Липпо И. Е. Оценка возможности использования высших водных растений для фиторемедиации воды от органических веществ и различных соединений // Вестник КрасГАУ. 2024. № 9. С. 3–10. DOI: 10.36718/1819-4036-2024-9-3-10.

3. Wilkinson S. R., Naeth M. A., Dhar A. Potential of Macrophytes for Wastewater Remediation with Constructed Floating Wetlands in Cold Climates // Water. 2023. Vol. 15. No. 13. Art. 2479. DOI: 10.3390/w15132479.

4. Маркин В. В. Особенности реконструкции канализационных очистных сооружений малых населенных пунктов с биологическими прудами // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2023. Вып. 5 (163). С. 50–57.

5. Allen C. R., Burr M. D., Camper A. K., Moss J. J., Stein O. R. Seasonality, C:N Ratio and Plant Species Influence on Denitrification and Plant Nitrogen Uptake in Treatment Wetlands // Ecological Engineering. 2023. Vol. 191. Art. 106946. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2023.106946.

6. Zhang Y., Han Y., Xie E., Wang X., Yang Y., Jia F. Phytoremediation Performance of Mixed Planting Patterns and the Associated Rhizosphere Microbial Community in Pilot-Scale Constructed Wetlands // Chemosphere. 2024. Vol. 361. Art. 142482. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.142482.

7. Хуррамова Д. М., Хуррамов М. Г. Исследование полуводных высших водных растений в доочистке недостаточно очищенных стоков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. 2023. № 2. С. 66–71.

8. Lv S., Zhang S., Zhang M., Liu F., Cheng L. Effects of Multi-Plant Harvesting on Nitrogen Removal and Recovery in Constructed Wetlands // Chemosphere. 2024. Vol. 353. Art. 141550. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.141550.

9. Dykes C., Pearson J. M., Bending G. D., Abolfathi S. Impact of Seasonal Climate Variability on Constructed Wetland Treatment Efficiency // Journal of Water Process Engineering. 2025. Vol. 72. Art. 107350. DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.107350.

10. Nunn A. Utilizing a Two-Stage Constructed Wetland With Floating Plant Mats for Removing Phosphorus From Agricultural Drainage in Michigan // JAWRA Journal of the American Water Resources Association. 2025. Vol. 61. No. 6. Art. e70048. DOI: 10.1111/1752-1688.70048.

11. Иванова Л. А., Красавцева Е. А., Горбачева Т. Т. Плавающие биоплато Constructed Floating Wetlands — фитотехнология для очистки сточных вод: опыт применения и перспективы использования // Записки Горного института. 2026. Т. 277. С. 167–180.

12. Di Giorgi H. D., Mariñelarena A., Cochero J. Sustained Nutrient Removal in Constructed Wetlands Using Equisetum giganteum // Science of the Total Environment. 2025. Vol. 994. Art. 180046. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.180046.

13. Huang M., Zhao L., Wang Z., Sun X., Shang Q., Li Y., Li M., Geng H., Hu S.,

Yang Y. Effect of Plant Species on Wastewater Treatment Performance of a Subsurface Vertical-Flow Constructed Wetland with Step-Feeding at Low Temperature // Journal of Environmental Management. 2024. Vol. 370. Art. 122546. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.122546.

14. Cheng L., Zhang S., Liu F., Lv S., Zhang M., Du X. Does High-Frequency Plant Harvesting Improve Phosphorus Removal Efficiency in Constructed Wetlands? // Ecological Engineering. 2025. Vol. 221. Art. 107770. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2025.107770.

15. Vymazal J., Láska J., Hnátková T. The Retention of Nitrogen and Phosphorus in Aboveground Biomass of Plants Growing in Constructed Wetlands Treating Agricultural Drainage // Ecological Engineering. 2023. Vol. 194. Art. 107044. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2023.107044.

16. He Y., Zhang X., Chen Y., Gao D., Huang Z., Huang J., Li H., Niu Y., Wu Z. Rhizosphere Microbiome-Driven Nitrogen and Phosphorus Removal in Constructed Wetlands Planted with Different Macrophyte Species // Environmental Technology & Innovation. 2026. Vol. 43. Art. 105051. DOI: 10.1016/j.eti.2026.105051.

References

1. Okada K., Vymazal J. The Effect of Aboveground Biomass Harvesting on Nutrients Removal in a Constructed Wetland Treating Municipal Sewage // Ecological Engineering. 2023. Vol. 190. Art. 106918. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2023.106918. —

2. Lippo I. E. Ocenka vozmozhnosti ispol`zovaniya vy`sshix vodny`x rastenij dlya fitoremediacii vody` ot organicheskix veshhestv i razlichny`x soedinenij // Vestnik KrasGAU. 2024. № 9. S. 3–10. DOI: 10.36718/1819-4036-2024-9-3-10.

3. Wilkinson S. R., Naeth M. A., Dhar A. Potential of Macrophytes for Wastewater Remediation with Constructed Floating Wetlands in Cold Climates // Water. 2023. Vol. 15. No. 13. Art. 2479. DOI: 10.3390/w15132479.

4. Markin V. V. Osobennosti rekonstrukcii kanalizacionny`x ochistny`x sooruzhenij maly`x naselenny`x punktov s biologicheskimi prudami // Vestnik Donbasskoj nacional`noj akademii stroitel`stva i arxitektury`. 2023. Vy`p. 5 (163). S. 50–57.

5. Allen C. R., Burr M. D., Camper A. K., Moss J. J., Stein O. R. Seasonality, C:N Ratio and Plant Species Influence on Denitrification and Plant Nitrogen Uptake in Treatment Wetlands // Ecological Engineering. 2023. Vol. 191. Art. 106946. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2023.106946.

6. Zhang Y., Han Y., Xie E., Wang X., Yang Y., Jia F. Phytoremediation Performance of Mixed Planting Patterns and the Associated Rhizosphere Microbial Community in Pilot-Scale Constructed Wetlands // Chemosphere. 2024. Vol. 361. Art. 142482. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.142482.

7. Xurramova D. M., Xurramov M. G. Issledovanie poluvodny`x vy`sshix vodny`x rastenij v doochistke nedostatochno ochishhenny`x stokov // Vestnik Doneczkogo nacional`nogo universiteta. Seriya G: Texnicheskie nauki. 2023. № 2. S. 66–71.

8. Lv S., Zhang S., Zhang M., Liu F., Cheng L. Effects of Multi-Plant Harvesting on Nitrogen Removal and Recovery in Constructed Wetlands // Chemosphere. 2024. Vol. 353. Art. 141550. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.141550.

9. Dykes C., Pearson J. M., Bending G. D., Abolfathi S. Impact of Seasonal Climate Variability on Constructed Wetland Treatment Efficiency // Journal of Water Process Engineering. 2025. Vol. 72. Art. 107350. DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.107350.

10. Nunn A. Utilizing a Two-Stage Constructed Wetland With Floating Plant Mats for Removing Phosphorus From Agricultural Drainage in Michigan // JAWRA Journal of the American Water Resources Association. 2025. Vol. 61. No. 6. Art. e70048. DOI: 10.1111/1752-1688.70048.

11. Ivanova L. A., Krasavceva E. A., Gorbacheva T. T. Plavayushhie bioplato Constructed Floating Wetlands — fitotexnologiya dlya ochistki stochny`x vod: opy`t primeneniya i perspektivy` ispol`zovaniya // Zapiski Gornogo instituta. 2026. T. 277. S. 167–180.

12. Di Giorgi H. D., Mariñelarena A., Cochero J. Sustained Nutrient Removal in Constructed Wetlands Using Equisetum giganteum // Science of the Total Environment. 2025. Vol. 994. Art. 180046. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.180046.

13. Huang M., Zhao L., Wang Z., Sun X., Shang Q., Li Y., Li M., Geng H., Hu S.,

Yang Y. Effect of Plant Species on Wastewater Treatment Performance of a Subsurface Vertical-Flow Constructed Wetland with Step-Feeding at Low Temperature // Journal of Environmental Management. 2024. Vol. 370. Art. 122546. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.122546.

14. Cheng L., Zhang S., Liu F., Lv S., Zhang M., Du X. Does High-Frequency Plant Harvesting Improve Phosphorus Removal Efficiency in Constructed Wetlands? // Ecological Engineering. 2025. Vol. 221. Art. 107770. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2025.107770.

15. Vymazal J., Láska J., Hnátková T. The Retention of Nitrogen and Phosphorus in Aboveground Biomass of Plants Growing in Constructed Wetlands Treating Agricultural Drainage // Ecological Engineering. 2023. Vol. 194. Art. 107044. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2023.107044.

16. He Y., Zhang X., Chen Y., Gao D., Huang Z., Huang J., Li H., Niu Y., Wu Z. Rhizosphere Microbiome-Driven Nitrogen and Phosphorus Removal in Constructed Wetlands Planted with Different Macrophyte Species // Environmental Technology & Innovation. 2026. Vol. 43. Art. 105051. DOI: 10.1016/j.eti.2026.105051.

Статья поступила в редакцию 07.07.2026; одобрена после рецензирования 18.08.2026; принята к публикации 16.10.2026.

The article was submitted 07.07.2026; approved after peer review 18.08.2026; accepted for publication 16.10.2026.