

На правах рукописи

КАЗМИРУК Василий Данилович

**ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И РЕКОНСТРУКЦИЯ
ЗАРАСТАЮЩИХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Специальность 1.6.21 – Геоэкология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора географических наук

Москва - 2022

Работа выполнена в ФГБУН Институте водных проблем Российской академии наук, г. Москва

Научный консультант:

Данилов-Данильян Виктор Иванович

член-корреспондент РАН, доктор экономических наук, профессор, научный руководитель ФГБУН Института водных проблем Российской академии наук, г. Москва

Официальные оппоненты:

Гармаев Ендон Жамьянович

член-корреспондент РАН, доктор географических наук, профессор, директор ФГБУН Байкальского института природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, г. Улан-Уде

Беляев Сергей Дагобертович

доктор географических наук, заведующий отделом научно-методического обеспечения водохозяйственных расчетов ФГБУ Российского научно-исследовательского института комплексного использования и охраны водных ресурсов, г. Екатеринбург

Чалов Сергей Романович

доктор географических наук, доцент кафедры гидрологии суши географического факультета ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», г. Москва

Ведущая организация:

Институт водных проблем Севера - обособленное подразделение ФГБУН Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук», г. Петрозаводск

Защита состоится «27» октября 2022 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета 24.1.040.01 при ФГБУН Институте водных проблем Российской академии наук по адресу: 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3. Тел.: 8(499)135-54-15; e-mail: sokolovskiy@iwr.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института водных проблем РАН и на сайте: <http://www.iwr.ru>, с авторефератом – в сети Интернет на сайтах ВАК РФ (<http://vak.ed.gov.ru/>) и ИВП РАН (<http://www.iwr.ru>).

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения) просим направлять по адресу: 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3, Институт водных проблем РАН, ученому секретарю диссертационного совета; e-mail: sokolovskiy@iwr.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

доктор физико-математических наук



М.А. Соколовский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Интенсивное зарастание, заиление и заболачивание в последние десятилетия многих рек и водоемов, как результат все усиливающейся антропогенной нагрузки на природную среду, распространение инвазивных видов макрофитов и изменение климата, особенно остро обозначило проблему наличия знаний о гидроэкологических процессах в зарастающих водных объектах и факторах их обуславливающих. Мелководные зарастающие зоны, как правило, имеют наибольшую биологическую продуктивность и могут занимать площадь от нескольких сот квадратных метров до десятков тысяч квадратных километров. В силу специфичности формирующегося здесь экокомплекса, именно эти зоны, с одной стороны нередко являются основной «кухней» формирования качества воды и биопродуктивности водотоков и водоемов, а с другой – наименее изучены, из-за труднодоступности, сложности происходящих там процессов и невозможности применения традиционных методов исследования водных объектов. Зарастающие зоны часто называют «почками природы» из-за их способности к фильтрации, метаболизму и снижению уровня загрязняющих веществ.

Существует ряд примеров, когда отсутствие знаний о закономерностях функционирования природного комплекса зарастающих водных объектов влечет за собой неоправданные затраты и даже человеческие жертвы. Разные стадии зарастания, различия в гидродинамической активности водных масс и видовом составе высшей водной растительности (ВВР) вызывают диаметрально противоположные отклики в экосистеме водных объектов – от улучшения экологического состояния и качества воды в водоеме или водотоке до полной потери рыбопродуктивности и изменения самой экосистемы.

Происходящие в зарастающих водных объектах процессы являются предметом исследования на стыке многих научных дисциплин: гидрологии, геоморфологии, гидродинамики, гидробиологии, гидрохимии, геоэкологии и биогеохимии. Наиболее развитыми являются направления гидрботанических исследований (Денисенков, 2000; Кокин, 1982; Матвеев, Соловьева, Саксонов, 2005; Папченков, 1999; Садчиков, Кудряшов, 2004; Соловьева, Лапиров, 2013; Экзерцев, 1973; Bornette, Puijalón, 2011), очистки воды с помощью искусственных ветлендов (Морозов, Телитченко, 1977; Рыбка, Щеголькова, 2019; Тимофеева, Меньшикова, 1986; Kadlec, Wallace, 2008; Rivera-Utrilla et al., 2013; Liu et al., 2013) и экспериментальные исследования гидравлических характеристик в заросшем русле (Головатюк, Соколов, 1988; Нгуен, 1973, 1984; Curran, Hession, 2013; Gurnell, 2013; Hino, 1981; Wang et al., 2015). Значительно менее разработаны направления классификации и типизации природных и искусственно созданных зарастающих водных объектов (Папченков, 1979, 1999; Тимченко, 1990; Classification of Wetlands..., 2013), а

также вопросы формирования донных отложений при различном видовом составе ВВР и их влияние на состав вод внутри растительной ассоциации и в целом в водном объекте (Gibbs, 2013; Trimmer, Sanders, Heppell, 2009; Wharton et al., 2006). Нишь в последние годы начали проводиться исследования о влиянии макрофитов на динамику природных и антропогенных микро-частиц (Казмирук, 2021; Mudd, D'Alpaos, Morris, 2010; Helcoski et al., 2020; Qian et al., 2021; Xia et al., 2022). Практически не разработано направление по созданию научных основ комплексного использования зарастающих водных объектов, методов улучшения их экологического состояния, реконструкции и экологической реабилитации (Йоргенсен, 1985; Мингазова, 2019; Прыткова, 2002; Сметанин, 2003). Очень редко проводятся системные исследования естественных и искусственных зарастающих водных объектов на единой методической основе (Тихомиров, 2011; Экология зарастающего озера..., 1999; Gibbs, 2013). В последнее десятилетие в целом ряде работ получило развитие рассмотрение макрофитов как «экосистемных инженеров», способных преобразовать окружающую среду (Gibbs, 2013; Gurnell, 2013; O'Hare et al., 2012; Ribaud et al., 2018). Несмотря на очевидную важность скорости движения воды в определении статуса сообществ макрофитов в равнинных реках, относительно мало что известно о природе процессов, контролирующих эту взаимосвязь. Особенно не хватает количественных знаний об обратной связи между ростом макрофитов и скоростью воды (Franklin, Dunbarb, Whitehead, 2008).

Цель и задачи работы. Основной целью работы является разработка системного подхода к установлению и анализу общих закономерностей функционирования природного комплекса разнотипных зарастающих водных объектов с учетом гидродинамической активности водных масс и на этой основе систематизация, совершенствование и развитие методов реконструкции зарастающих водоемов и водотоков.

Задачи исследования:

1. Разработка методологии полевых комплексных исследований зарастающих водных объектов различной природы, испытывающих разную степень и вид антропогенного воздействия, выделение приоритетных факторов формирования состава вод и донных отложений.
2. Разработка многоуровневой классификации зарастающих водных объектов, анализ и классификация антропогенных воздействий на них.
3. Разработка методов расчета скоростей движения воды с учетом пространственной неоднородности гидравлических сопротивлений, определяемых ВВР различных видов.
4. Установление закономерностей формирования состава вод, а также состава, состояния и свойств донных отложений в условиях зарастания водных объектов. Установление индикационных свойств ВВР и закономерно-

стей ее влияния на русловые и устьевые процессы. Изучение механизмов переноса и накопления микрочастиц синтетических полимерных материалов в прибрежной полосе водных объектов и барьерной роли ВВР.

5. Совершенствование и развитие методов улучшения экологического состояния и реконструкции зарастающих водотоков и водоемов, изучение экологических аспектов проведения инженерных мероприятий на зарастающих водных объектах, установление гидроэкологических критериев их хозяйственного использования.

Научная новизна

1. Предложена комплексная многоуровневая классификация зарастающих водотоков и водоемов, охватывающая весь спектр континентальных водных объектов от ручьев и прудов до водохранилищ и устьевых областей крупных рек, а также антропогенные воздействия на них. Получила развитие концепция «экосистемного инжиниринга» для зарастающих зон водных объектов в части средообразующей роли ВВР в формировании донных отложений и ледовых явлений. Впервые предложено использовать ВВР в качестве индикатора для анализа гидродинамической активности водных масс, скоростной структуры потока и типа донных отложений.

2. Разработаны алгоритмы расчета осредненных скоростей движения воды отдельно для случаев осреднения по ширине потока и по вертикали при мозаичном распределении гидравлических сопротивлений, определяемых естественной водной растительностью. Предложена полуэмпирическая формула определения гидравлических сопротивлений ВВР.

3. Показано, что ключевым фактором внутриводоемных процессов в зарастающих водных объектах является гидродинамическая активность водных масс, от которой в значительной степени зависят, как масштабы и скорость трансформации природных и антропогенных составляющих состава вод и донных отложений, так и сама возможность существования растительного покрова в водном объекте.

4. Изучены особенности формирования химического состава вод зарастающих мелководий при различной степени водообмена. Получены новые данные о скорости деструкции растительного опада в естественных условиях.

5. Впервые изучены механизмы формирования донных отложений различных зарастающих водных объектов при различных условиях гидродинамической активности водных масс, видовом составе и структуре ВВР.

6. Показано, что на устьевых участках рек и в других зонах со слабым водообменом происходит накопление и депонирование тяжелых металлов, обусловленное не только гидравлическими особенностями потока и осаждением мелкодисперсных частиц, но и накоплением тяжелых металлов растениями-концентраторами и образованием отложений из растительного опада.

Установлен факт концентрирования металлов в ризосфере некоторых видов ВВР.

7. Впервые определены пороговые значения проективного покрытия акватории ВВР и скорости движения воды, при которых происходит переход от снижения содержания взвешенных частиц в водной толще к его увеличению, что является результатом формирования и удержания полувзвешенных мелкодисперсных частиц из растительного опада. Получены новые данные о задержании микрочастиц природного происхождения на листьях и стеблях ВВР.

8. Впервые изучены особенности поведения микрочастиц синтетических полимерных материалов в прибрежной зоне континентальных водных объектов и механизмы задержания и депонирования микропластика в зарастающих зонах.

9. Впервые сформулированы гидроэкологические критерии хозяйственного использования зарастающих водных объектов. На основе анализа масштабов пространственной и временной изменчивости гидроэкологических процессов, разработана и реализована система мониторинга для зарастающих зон и примыкающих к ним территорий при их планируемой реконструкции и обустройстве.

10. Впервые изучены закономерности формирования состава вод и донных отложений зарастающих мелководий в условиях инженерных мероприятий по их реконструкции и обустройству.

Теоретическая и практическая значимость работы. Совокупность результатов исследований, приведенных в работе, может являться методической основой для комплексного анализа экологического состояния зарастающих водотоков и водоемов, понимания происходящих в них гидроэкологических процессов, мониторинга, рационального использования, обустройства и восстановления зарастающих водных объектов, а также разработки технологий защиты водных объектов от загрязнения, основанных на интенсификации водоохраных функций макрофитов.

Результаты исследований, разработанные подходы и система мониторинга были использованы при подготовке и реализации проектов: «Сохранение и предотвращение загрязнения реки Волги» (заказчик Минобрнауки РФ), ФЦП «Возрождение Волги» (заказчик Минприроды РФ), ФЦП «Экология России» (заказчик Минэкологии РФ), ФЦП «Мировой океан» (заказчик Минэкономразвития РФ), «Каспийское море» (заказчик ГКНТ СССР), «Устья» (заказчик ГКНТ СССР), «Генеральный проект на создание комплексной системы мониторинга геологической среды и водных объектов Верхне-Волжского бассейна (полигон Верхняя Волга)» (заказчик Минприроды РФ), «Разработка нормативов ПДВВ на участке Верхней Волги в створе Ивановского водохранилища» (заказчик Минприроды РФ), «Обоснование

инвестиций по улучшению водохозяйственной и экологической обстановки на Ивановском водохранилище» (заказчик Минприроды РФ), «Разработка научно-обоснованного комплекса водохозяйственных мероприятий для обеспечения устойчивого функционирования водохозяйственных систем, рационального использования водных ресурсов в условиях маловодья (в том числе затяжного) на примере Волги и Кубани» (заказчик Росводресурсы РФ), «Исследование современного состояния и научное обоснование методов и средств обеспечения устойчивого функционирования водохозяйственного комплекса Нижней Волги и снижения рисков вредного воздействия вод» (заказчик Росводресурсы РФ), «Разработка проекта нормативов допустимого воздействия по бассейну р. Волги от верховий Куйбышевского водохранилища до впадения в Каспийское море» (заказчик Росводресурсы РФ), International Project UNDP/GEF No. RER03G31 (00034997) «Caspian Environment Programme» (заказчик UNDP), «Разработка системы наблюдений и мероприятий по охране водных ресурсов Ивановского водохранилища» (заказчик АО «Институт Гидропроект»), «Натурные исследования миграции тяжелых металлов при обустройстве заболоченных мелководий» (заказчик ГФУП «Центрводхоз»), «Исследование состояния компонентов природной среды при подводной добыче нерудных строительных материалов» (заказчик ОАО «Тверской порт»), «Исследование гидролого-морфологических процессов в районе о. «Дом рыбака» с целью минимизации возможного влияния на остров подводно-технических работ при добыче нерудных строительных материалов» (заказчик ОАО «Тверской порт»), «Разработка проекта экспериментальных работ по улучшению экологического состояния залива Теменка (участок: мыс Светличный, оз. Селигер, Осташковский район Тверской области)» (заказчик ОАО «Тверской порт»), «Организация добычи строительных песков на месторождении «Залучье» в Осташковском районе Тверской области» (заказчик ОАО «Тверской порт»), «Анализ возможных воздействий подводно-технических работ при добыче нерудных строительных материалов на компоненты природной среды оз. Селигер и его водоохраной зоны» (заказчик ОАО «Тверской порт»), «Оценка естественных и техногенно обусловленных факторов формирования состава вод и донных отложений Осташковского плеса оз. Селигер» (заказчик ОАО «Тверской порт»), «Организация добычи песчано-гравийного материала на месторождении «Соболевское» (заказчик ООО «Геосервис»), «Seymour River Estuary Restoration» (заказчик City of North Vancouver, Canada), «Mackay Creek Marsh Restoration» (заказчик North Shore Wetland Partners Society, Canada).

Методология и методы исследования. Проведение исследований базировалось на системном междисциплинарном подходе, включая натурные исследования разнотипных естественных, антропогенно нарушенных и искусственных зарастающих водных объектов, дистанционные исследования с

применением аэрофото- и аэровдеосъемки, использование космических снимков, сравнительный анализ, лабораторные исследования и математическое моделирование. Широко использовался сравнительный анализ гидро-экологических процессов, происходящих в зарастающих и не зарастающих зонах водных объектов, а также в разнотипных водных объектах, с целью выявления общих закономерностей формирования состава вод и донных отложений.

Натурные исследования проводились на водных объектах зоны умеренного климата: отмеляя зона устьевого взморья Волги, дельта Волги, устьевые участки рек Мак-Кей (MacKay Creek, Канада), Москито (Mosquito Creek, Канада), Линн (Lynn Creek, Канада), Сеймур (Seymour River, Канада), Волго-Ахтубинская и Красноярско-Черебаевская поймы, Ивановское водохранилище и его притоки, Волгоградское водохранилище, искусственные озера-водохранилища Комо (Como Lake, Канада), Бернаби (Burnaby Lake, Канада), озера Селигер, Пено, Вселуг, Бологое, Имоложье, Островно, Едрово, Заверховье, Озеревки, Нестерово, другие малые реки, естественные и искусственные озера и пруды. Несмотря на то, что водные объекты существенно различались по размерам (от тысячных долей до сотен квадратных километров), водности, гидродинамическому режиму, климатическим условиям, степени и характеру зарастания, видовому составу ВВР, уровню и характеру антропогенной нагрузки, исследования проводились на единой методической основе и включали отбор проб воды, донных отложений и ВВР, их лабораторный анализ, измерения скоростей движения и глубины воды, ветро-волновых характеристик, морфологических характеристик ВВР, картирование характера зарастания.

Защищаемые положения.

1. Для зарастающих водотоков и водоемов с аллювиальными донными отложениями характер зарастания и видовой состав ВВР является результатом многолетнего взаимного приспособления растительности и условий движения воды. Предлагается комплексная многоуровневая классификация, охватывающая весь спектр зарастающих континентальных водных объектов, а также антропогенные воздействия на них. Характер зарастания, видовой состав и скорость распространения тех или иных видов ВВР могут служить индикатором преобладающих гидродинамических процессов, а также состава, состояния и свойств донных отложений.

2. Методика определения гидравлических сопротивлений в зарастающих зонах водных объектов и алгоритмы расчета скоростей движения воды.

3. ВВР является средообразующим фактором формирования донных отложений и содержания взвешенных частиц природного и антропогенного происхождения. Макрофиты способны эффективно задерживать микроча-

стицы синтетических полимерных материалов и выполнять барьерную роль при загрязнении водных объектов микропластиком.

4. Пространственная дифференциация состава вод и донных отложений зарастающих водных объектов имеет ярко выраженную неоднородность, что определяется различиями в гидродинамической активности водных масс, степенью зарастания и видовым составом ВВР.

5. В природных условиях влияние ВВР на содержание тяжелых металлов в воде и донных отложениях происходит опосредованно через формирование органического вещества растительного опада, задержание мелкодисперсных частиц с высокой сорбционной емкостью и изменение физико-химических условий среды.

6. Ключевым моментом реконструкции зарастающих водных объектов является создание оптимального гидродинамического режима для сохранения средообразующей и водоохранной роли ВВР. При планировании хозяйственного использования зарастающих водных объектов или зон зарастания следует учитывать предлагаемые гидроэкологические критерии. Система мониторинга при планировании реконструкции зарастающих зон должна учитывать пространственно-временные масштабы естественных процессов функционирования экосистемы зарастающих зон водных объектов, степень влияния самих работ и время восстановления экосистемы.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов исследования достигалась проведением полевых работ, измерений и лабораторных анализов по стандартным общепринятым методикам, статистической обработкой данных, использованием контрольных проб и стандартных образцов.

Результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на международных, всероссийских, всесоюзных и зарубежных конференциях, симпозиумах и семинарах: I Всероссийская конференция с международным участием по загрязнению окружающей среды микропластиком «MicroPlasticsEnvironment-2022» (Томск, 2022); V Всероссийский научно-практический семинар «Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства» (Москва, 2022); Общественный совет при Федеральном агентстве водных ресурсов РФ (Москва, 2021); Международные выставки-форумы EcwaTech WasteTech (Москва, 2021, 2020); Pacific Estuarine Research Society 39th Annual Conference (Brackendale, Canada, 2016); Международная научно-практическая конференция «О широком развитии мелиорации земель для получения высоких урожаев зерна и других сельскохозяйственных культур» (Москва, 2016); Международный научный форум «Проблемы управления водными и земельными ресурсами» (Москва, 2015); IV Всероссийская научная конференция с международным участием «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов» (Москва, 2015); Научная конференции с

международным участием «Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод» (Ростов-на-Дону, 2015); Международная научно-практическая конференция «Проблемы развития мелиорации и водного хозяйства в России» (Москва, 2014); VIII, VI, V, IV Международные конференции «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей» (Москва, 2014, 2004, 1999, 1994); Международная научно-практическая конференция «Проблемы комплексного обустройства техноприродных систем» (Москва, 2013); Конференция «Современные энерго- и ресурсосберегающие, экологически устойчивые технологии и системы сельскохозяйственного производства» (Рязань, 2013); Международная научно-практическая конференция «Роль мелиорации и водного хозяйства в инновационном развитии АПК» (Москва, 2012); Международная научно-практическая конференция «Проблемы развития мелиорации и водного хозяйства и пути их решения» (Москва, 2011); Третья и Вторая международные научно-практические конференции «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов» (Пермь, 2011, 2009); Научно-практический семинар «Обследование и мониторинг городских гидротехнических сооружений водных объектов г. Москвы» (Москва, 2010); Международная научно-практическая конференция «Роль мелиорации в обеспечении продовольственной и экологической безопасности России» (Москва, 2009); Международная научно-практическая конференция «Мелиорация и водное хозяйство XXI века. Наука и образование» (Горки, Беларусь, 2009); III Міжнародна науково-технічна конференція «Актуальні проблеми водного господарства та природокористування» (Ровно, Украина, 2009); VI и V Международные конференции «Сотрудничество для решения проблемы отходов» (Харьков, Украина, 2009, 2008); Международный семинар «Генетические и вероятностные методы в гидрологии: проблемы развития и взаимосвязи» (Одесса, 2009); Международная научно-практическая конференция «Роль мелиорации и водного хозяйства в реализации национальных проектов» (Москва, 2008); III Всероссийская конференция по водной токсикологии, посвященная памяти Б.А.Флерова «Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы», конференция по гидроэкологии «Критерии оценки качества вод и методы нормирования антропогенных нагрузок» (Борок, 2008); Всероссийские научно-практические конференции «Водные ресурсы Волги: настоящее и будущее, проблемы управления» (Астрахань, 2008, 2007); 10th International Symposium on River Sedimentation and Environmental Safety (Москва, 2007); Международная научная конференция «Инновационный потенциал естественных наук» (Пермь, 2006); VII, VI, V, IV, III, II, I Международные конгрессы «Вода: экология и технология» (Москва, 2006, 2004, 2002, 2000, 1998, 1996, 1994); Научная конференция «Современные проблемы стохастической гидрологии» (Москва, 2001); V Всероссийская конференция «Гидробиотаника

2000» (Борок, 2000); Всероссийский научный семинар «Проблемы региональной геоэкологии» (Тверь, 1999); The NATO Advanced Workshop on Stochastic Models of Hydrological Processes and Their Applications in Problems of Environmental Preservation (Москва, 1998); The Third International Conference on Regional Hydrology: Concepts and Models for Sustainable Water Resource Management (Ljubljana, Slovenia, 1997); Всероссийское совещание «Экологические проблемы Севера Европейской территории России» (Апатиты, 1996); Всероссийская конференция по международной геосферно-биосферной программе (Москва, 1995); Вторая Всероссийская конференция «Математические проблемы экологии» (Новосибирск, 1994); IV Всесоюзная конференция «Математические проблемы экологии» (Душанбе, 1991); Всесоюзные школы-семинары «Математическое моделирование в проблемах рационального природопользования» (Ростов-на-Дону, 1989, 1988); IV Всесоюзная межвузовская научная конференция «Закономерности проявления эрозийных и русловых процессов в различных природных условиях» (Москва, 1987) и др.

Основные положения диссертации изложены в 4 монографиях и 95 статьях, в том числе в 36 статьях в рецензируемых изданиях.

Диссертационная работа изложена на 441 странице, включает 74 рисунка и 50 таблиц, состоит из введения, 6 глав, заключения, списка условных обозначений и списка литературы из 665 библиографических ссылок.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы исследования, степень ее разработанности, цель и основные задачи исследования, его научную новизну, практическую значимость полученных результатов, краткое изложение используемой методологии и методов исследования, сформулированные положения, выносимые на защиту, а также обоснование степени достоверности и апробацию полученных результатов.

Глава 1. Зарастающие водные объекты и антропогенные воздействия на них

Рассматриваются особенности исследований зарастающих водных объектов и их мониторинг, факторы, определяющие зарастание водотоков и водоемов, средообразующая роль ВВР и ее функция как «экосистемного инженера», дана классификация зарастающих водотоков и водоемов и антропогенных воздействий на них, приведены примеры негативных экологических последствий чрезмерного зарастания водных объектов.

Концептуальная схема исследования основывается на анализе существующих знаний о функционировании природных процессов в аквальных комплексах зарастающих водных объектов. Рассматривается механическое и химическое взаимодействие движущейся воды, ложа водного объекта, слага-

емого аллювиальными грунтами, и ВВР, с учетом многообразия ее видового состава, экологических и морфологических особенностей, а также густоты произрастания, местоположения и состояния в разнотипных природных водных объектах в естественных условиях и при антропогенном вмешательстве. Предполагается, что ВВР является «экосистемным инженером», способным создавать особую среду для формирования физико-химических характеристик природных вод и состава, состояния и свойств донных отложений. С другой стороны, роль зарастающих зон в формировании состава вод и донных отложений, а также сама возможность существования ВВР в водных объектах определяется гидродинамической активностью водных масс.

Материалом для исследования послужили результаты многолетних экспедиционных работ, проведенных автором на разнотипных зарастающих водных объектах, включая малые, средние и крупные реки, озера, водохранилища и устьевые области, перечень которых приведен во введении. Кроме полевых измерений, был получен обширный массив результатов лабораторных анализов проб воды и донных отложений, а также образцов ВВР. По результатам полевых съемок были созданы карты-схемы особенностей зарастания различных участков водотоков, водоемов и устьевых областей, учитывающие видовой состав ВВР, ее проективное покрытие, грунты произрастания и преобладающие условия гидродинамической активности водных масс. В исследовании широко использовались материалы наземных, аэрофото- и видеосъемок, а также космические снимки. Проводились лабораторные и натурные эксперименты.

Показано, что взаимодействие природных и антропогенных факторов, их комбинации и удельный вес создают большое разнообразие типов зарастающих водных объектов. Детальное описание структурной организации природных зарастающих водных объектов позволяет сделать предложенная автором многоуровневая комплексная классификация, базирующаяся на функциональном подходе. Методологической основой классификации является концепция динамических взаимоотношений гидроморфологических процессов, происходящих в водном объекте, и процессов зарастания. При разработке такой классификации мы исходили из положения о том, что в естественных условиях плановый рисунок зарастания водотока или водоема, ложе которого слагают аллювиальные грунты, является следствием упомянутых выше процессов. Определяющими являются: гидродинамический, гидрологический и гидрохимический режим, русловые, седиментационные и устьевые процессы. На эти процессы накладываются процессы укоренения, развития и распространения ВВР, сукцессионные изменения структуры растительности и цикличность ее развития, а также антропогенные воздействия.

Были приняты следующие таксономические единицы зарастающих водных объектов: класс, тип, подтип, зона, подзона, участок. По преобладающе-

му движению водных масс и геоморфологическим особенностям ложа, все зарастающие водные объекты разделены на три класса водотоки, водоемы и устьевые области, для которых соответственно характерно однонаправленное движение воды, разнонаправленное движение или его отсутствие и переход от однонаправленного движения к разнонаправленному. Характер преобладающего движения воды определяет интенсивность и направленность флювиальных процессов, создающих основу для самого существования ВВР в том или ином месте водного объекта. Каждому классу соответствует несколько типов водных объектов, при выделении которых за основу были приняты их гидрографические особенности. За главный признак при выделении подтипов был принят гидродинамический режим и тесно с ним связанные зоны зарастания (рисунок 1). В рамках одной зоны зарастания возможно наличие нескольких подзон, где растительность по-разному влияет на скоростную структуру потока. Самой элементарной структурной единицей являются участки, на которых произрастают растения одного вида или однородные растительные ассоциации. Существенным преимуществом предложенной структурной классификации зарастающих водных объектов является увязка в единой системе взаимодействия движущейся воды, седиментов и ВВР, возможность анализа этого взаимодействия для водных объектов разной структурной организации, а использование в качестве элементарной структурной единицы зарастающих однородных участков, позволяет широко использовать дистанционные методы.

Антропогенные воздействия на зарастающие водоемы и водотоки можно разделить на прямые и опосредованные, которые имеют разную направленность и вызывают изменение характеристик ложа, водных масс или растительности. В конечном счете это приводит к измерению степени зарастания или структуры зарослей, что, в большинстве случаев, является следствием различных видов хозяйственной деятельности на водных объектах или их водосборах, а не специальных мероприятий по регулированию зарастаемости. Одни и те же виды хозяйственной деятельности могут вызывать различную направленность процессов зарастания на разных водных объектах или их частях.

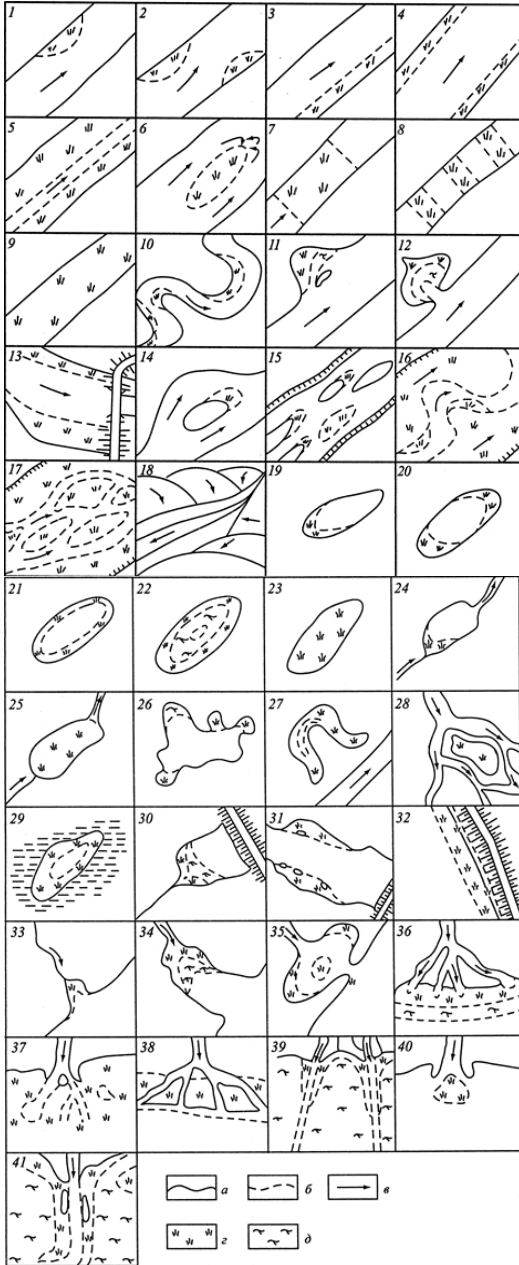


Рисунок 1. Характерные схемы зарастания водных объектов и элементов их гидрографической сети:

1-9 - отмели на прямолинейных участках русел, 10 - отмели меандрирующих русел, 11 - открытые заливы, 12 - полузакрытые заливы, 13 - приплотинные участки стесненных русел, 14 - отмели у островов, 15 - русловая многорукавность, 16, 17 - пойменные массивы, 18 - склоны, 19-23 - непроточные водоемы с плавной береговой линией, 24 - проточные водоемы, 25 - ботанические площадки, 26 - водоемы со сложной морфометрией, 27 - старицы, 28 - полои, 29 - озера болотных массивов, 30 - малые водохранилища, 31 - затопленные поймы и надпойменные террасы крупных водохранилищ, 32 - волнозащитные полосы дамб, 33, 34 - устья малых и средних рек соответственно, 35 - морские устья лагунного типа, 36 - мелководные устьевые взморья, 37 - плавни, 38 - крепи, 39 - култуки, 40 - баровые отмели, 41 - бровки каналов и кос (кулисы); а, б - береговая линия и граница зарослей соответственно, в - направление движения воды, г, д - воздушно-водная и погруженная растительность соответственно

Глава 2. Особенности экологии высшей водной растительности

Рассматриваются условия произрастания ВВР, индикационные свойства макрофитов, динамика их биомассы, формирование химического состава и деструкция растительного опада в естественных условиях. С точки зрения гидроэкологических макропроцессов, происходящих в зарастающих водных объектах, наибольший интерес представляют виды макрофитов, соответствующие одному или нескольким следующим критериям:

- способны создавать густые заросли на значительных территориях и поддерживать их достаточно длительный период времени;
- способны производить большую биомассу;
- аккумулируют или обезвреживают загрязняющие вещества, поступающие в водный объект.

К таким видам относятся, прежде всего, тростник обыкновенный и рогоз узколистный, в обилии встречающиеся почти на всех, обследованных нами водных объектах, манник большой, телорез алэвидный, чилим, роголистник темно-зеленый, также имеющие широкий ареал распространения. В южных районах России и, в частности, в отмелой зоне устьевого взморья Волги, встречаются обширные поля, заросшие ежеголовником прямым, рдестом блестящим, валлиснерией спиральной и сальвинией плавающей. В качестве примера, в таблице 1 приведены основные характеристики некоторых видов ВВР и условий их произрастания в устьевой области Волги (Казмирук, 1990).

Водная растительность подвержена влиянию многих факторов внешней среды и, в зависимости от ее состояния, развивается в том или иной направлении, а поскольку структура и морфологические характеристики ВВР отражают состояние водной среды и донных отложений, сама она может рассматриваться как биоиндикатор (Горбач, Казмирук, 1988; Казмирук, 2000; Токарь, 2006; Широков, Лопух, 1986; Bornette, Puijalón, 2011; Daniel, Bernez, Naurý, 2006; Solheim et al., 2008). В общем случае индикационными признаками ВВР, отражающими экологическое состояние водных объектов, могут быть:

- появление или исчезновение в водном объекте видов-индикаторов;
- места произрастания видов-индикаторов;
- скорость распространения видов-индикаторов;
- видовая структура растительной ассоциации (соотношение видов);
- пространственная структура одновидовых фитоценозов;
- морфологические особенности растений;
- наклон растительности как индикатор динамики водных масс.

Совокупность этих признаков позволяет достаточно точно судить о глубинах воды, скоростях и направлении течений, динамике взвешенных наносов, типе, состоянии и свойствах донных отложений, направленности руслового процесса, а также на ранних стадиях установить возможность зарожде-

Таблица 1. Основные характеристики ВВР и условия ее произрастания в дельте и отмелой зоне устьевого взморья Волги

Вид растительности	Средний объем растений в 1 м ³ воды, %	Средний удельный вес сырой растительности, кг/м ³	Период влияния на динамику потока, месяцы в году	Глубина воды, м	Средняя скорость движения воды, м/с	Характеристика грунта
Тростник обыкновенный	0,55	580	I - XII	0-2,0 (0,7)	0-0,13 (0,07)	Ил, ниже песок пылеватый
Сусак зонтичный	0,57	470	VI - XII	0-1,5 (0,6)	0-0,16 (0,06)	Ил
Рогоз широколистный	0,54	280	VI - XII	0-0,2 (0,1)	0-0,05 (0,00)	Ил с песком пылеватым
Рогоз узколистный	0,89	370	VI - XII	0-0,6 (0,2)	0-0,05 (0,02)	То же
Ежеголовник прямой	2,08	410	VI - XII	0-1,6 (1,0)	0-0,48 (0,07)	Ил, ниже песок пылеватый
Валлиснерия спиральная	0,20	900	VI - XI	0,3-2,2 (0,9)	0-0,55 (0,04)	Песок мелкозернистый, плотный
Роголистник темно-зеленый	0,43	1000	VI - XI	0,1-2,2 (1,0)	0-0,21 (0,05)	Ил
Наяда малая	0,78	880	VI - XII	0,05-1,3 (0,6)	0-0,04 (0,03)	Ил
Рдест блестящий	0,29	790	VI - XI	0,6-1,8 (1,2)	0,05-0,25 (0,12)	Песок мелкозернистый с илом и ракушей
Рдест плавающий	0,23	1130	VI - XI	0-1,5 (0,5)	0-0,24 (0,04)	Песок пылеватый с илом
Рдест тонкий	0,16	1080	VI - XI	0,2-1,6 (0,5)	0-0,06 (0,04)	Песок мелкозернистый
Нимфейник щитовидный	0,32	1190	VI - XI	0-1,4 (0,3)	0-0,04 (0,00)	Ил с песком пылеватым
Чилим	0,20	980	VI - XI	0,1-1,4 (0,9)	0-0,09 (0,02)	Песок мелкозернистый, плотный с примесью ракушки и ила
Кувшинка чисто-белая	0,49	770	VI - XI	0,5-0,9 (0,6)	0-0,04 (0,00)	Песок мелкозернистый с примесью ракушки и ила

Примечание. В скобках приведены наиболее часто встречающиеся значения.

ния новой гидрографической сети и дать фоновый прогноз тенденций ее развития. Например, хорошими индикаторами зон со слабой гидродинамической активностью являются кувшинка чисто-белая, кубышка желтая, лотос орехоносный, чилим. В таких зонах формируются органические илы, чему активно способствует присутствие роголистника темно-зеленого, элодеи канадской, наяды малой. Индикатором наличия заторфованных илов выступает телорез аллоидный, а зон сплавинообразования и заболоченных участков -

хвощ приречной, в то время как места произрастания валлиснерии спиральной могут служить индикатором распространения мелкозернистых песков и плотных донных отложений. Индикатором направления течений воды может быть мягкая растительность в толще воды, особенно рдесты.

Для формирования состава вод и донных отложений зарастающих водных объектов существенное значение имеют особенности деструкции растительного опада. Так, у тростника обыкновенного большая часть растений зимует в виде сухостоя, не погруженного в воду, то есть деструкция растительной массы фактически начинается не ранее, чем через полгода после окончания вегетационного периода и отмирания надземных частей растений. То же самое, но в меньшей степени, наблюдается для других видов воздушно-водной ВВР: камыша озерного, манника большого, рогозов узколистного и широколистного. Благодаря наличию пор в своем строении, плотность тканей воздушно-водной растительности в 2-3 раза меньше, чем у ряда погруженных растений, из чего следует, что их фрагменты могут плавать на поверхности воды и переноситься течениями, а также под воздействием ветра, на значительные расстояния от мест произрастания. Кроме того, под воздействием ветра, они могут скапливаться, формируя на поверхности воды мусорные поля и сплавины, а под воздействием ветровых волн выбрасываться и скапливаться в прибрежной полосе суши.

Совсем иная картина наблюдается при разложении погруженной растительности. Во-первых, стебли и листья погруженных растений являются более мягкими, количество клетчатки в структуре этих растений в 1,5-2 раза меньше, чем у тростника и рогоза. Во-вторых, растения этой группы имеют более короткий период вегетации и разложение растительного опада начинается сразу же после ее окончания, когда определенный период температура воды сохраняется достаточно высокой для активного протекания биогеохимических процессов. В-третьих, погруженные растения подвержены значительному воздействию гидродинамических процессов в водном объекте, у этих растений быстрее происходит процесс фрагментации, переноса и рассредоточения по акватории водоема и площади дна. Наконец, в-четвертых, биомасса погруженных растений ниже, чем воздушно-водных и для их разложения требуется меньшее количество кислорода, в результате деструкция опада погруженных растений, как правило, происходит в аэробных условиях.

Глава 3. Движение воды при наличии растительного покрова

Рассматриваются особенности формирования стоково-ветровых течений при пространственной неоднородности гидравлических сопротивлений, уравнения мелкой воды для зарастающих водоемов и алгоритм их решения методом конечных элементов, вертикальное распределение осредненных скоростей течения воды, гидравлические сопротивления растительности, влияние растительности на процессы турбулентного перемешивания, транс-

формацию ветровых волн и ледовые явления, а также приведены примеры расчета течений при мозаичном распределении ВВР.

Востребованность знаний о движении воды при наличии ВВР в настоящее время возрастает в связи с развитием методов фиторемедиации (Казмирук, 2016), созданием фитоочистных сооружений (Рыбка, Щегольковы, 2019; Kadlec, Wallace, 2008), а в последние годы, в связи с массовым строительством в развитых странах систем управления ливневыми стоками и устойчивого дренажа: зарастающих водных путей для отвода ливневых вод, природоохраных каналов («vegetated waterways», «grassed waterways») (Curran, Hession, 2013; Gurnell, 2013; Wang et al., 2015), дождевых садов, биосвалов и биологических задерживающих ячеек («bioretention cells») (Lange et al., 2022; Smyth et al., 2021).

Ключевым и вместе с тем одним из самых сложных и малоизученных вопросов решения внутренней задачи движения воды является определение гидравлических сопротивлений. Для зарастающих водотоков и водоемов эта задача усложняется еще и взаимным приспособлением потока воды и растительности. Автором предложена полуэмпирическая формула для определения коэффициента шероховатости зарастающих зон с естественной ВВР (Казмирук, 1990)

$$n_p = n_0 \sqrt{1 + \frac{K_2 h^{1/3} \sum_{i=1}^m C_d K_1 K_3 N_{50} \omega_{i,b}}{2gn_0^2}}, \quad (1)$$

где: h - глубина воды; n_0 - коэффициент шероховатости дна без растительности; N_{50} - число растений на одном метре ширины потока при проективном покрытии 50 %; $\omega_{i,b}$ - средняя площадь миделевого сечения затопленной части растений i -го вида; C_d - коэффициент сопротивления обтекания растения, учитывающий лобовое сопротивление, боковое трение и потери энергии потока на образование вихрей у вершин растений при полном их затоплении; K_1 - коэффициент густоты растительного покрова, характеризующий количество растений на одном метре ширины потока при проективном покрытии отличном от 50 %; K_2 - коэффициент видовой неоднородности растительного покрова, характеризующий наличие на выбранном однородном участке растений, оказывающих различное влияние на скоростную структуру потока; K_3 - коэффициент, учитывающий уменьшение общего сопротивления отдельных растений в результате образования за ними водоворотных зон, g - ускорение свободного падения. Под знаком суммы стоят величины, относящиеся к i -му виду ВВР.

Численные значения параметров и коэффициентов формулы (1) определены на основе данных натуральных измерений для 14 видов ВВР, произрастающих в природных условиях отмелей зоны устьевого взморья Волги (рисунок 2, таблицы 2-5) и проверены на независимом материале. Для растений с плавающими по поверхности воды листьями значения C_d носят приближенный характер, ввиду особенностей экологии и морфологии растений этой группы, не поддающихся инструментальным измерениям. Значения K_2 характеризуют наиболее часто встречающиеся соотношения между площадями однородных фитоценозов, когда растения одной из групп преобладают. Полученные эмпирические коэффициенты и параметры позволяют использовать формулу на практике, как при наземных натуральных исследованиях, так и с применением дистанционных аэро- и космических фотометодов.

На основе разработанной методики определения гидравлических сопротивлений зарастающих зон, автором были предложены алгоритмы расчета осредненных скоростей движения воды отдельно для случаев осреднения по ширине потока и по вертикали при мозаичном распределении гидравлических сопротивлений, реализованные для условий плавневых массивов отмелей зоны устьевого взморья Волги (Казмирук, 1998, 1999).

Глава 4. Зарастающие зоны как фактор формирования химического состава природных вод

Рассмотрено влияние зарастающих зон на кислородный режим и рН природных вод, содержание в них биогенных элементов, растворенного органического вещества, главных ионов и тяжелых металлов, а также влияние макрофитов на концентрации взвешенных веществ.

При всем многообразии видов и форм прямого и опосредованного влияния ВВР на формирование химического состава вод, они, в конечном счете, сводятся к трем основным видам влияния: 1) средообразующая роль ВВР, включая формирование донных отложений; 2) прижизненное поглощение и разложение в присутствии ВВР различных веществ, а также выделение продуктов жизнедеятельности растений; 3) поступление во внешнюю среду продуктов разложения растений после их отмирания. Влияние ВВР на химический состав вод зарастающих мелководий различных типов изучалось на примере Иваньковского водохранилища в сравнении с другими водными объектами. Исследования проводились автором в период 1993-2013 гг.

В застойных зарастающих зонах накапливаются огромные массы органического вещества, находящегося во взвешенном состоянии, концентрация которого может достигать до 480 мг/л. Насыщение воды кислородом на таких участках может уменьшаться до 7 %. В конце весны и летом для большинства типов зарастающих мелководий характерно более низкое содержание аммо-

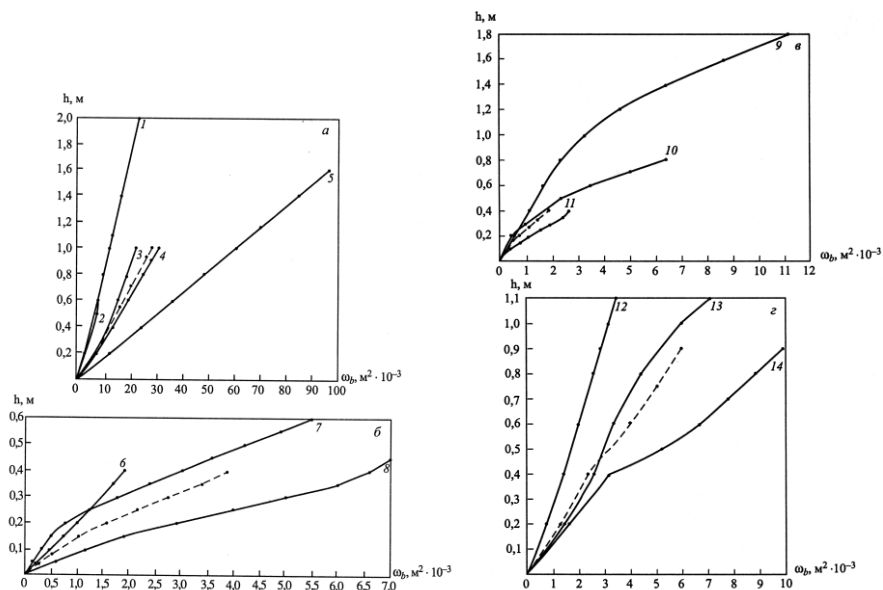


Рисунок 2. Зависимость средней площади миделевого сечения от глубины воды для групп растений

а – жесткая надводная, б – придонная, в – мягкая в толще воды, г – мягкая с плавающими по поверхности воды листьями. Числа у кривых – номера видов по таблице 2, пунктирная линия – среднее значение для групп

Таблица 2. Коэффициенты густоты растительного покрова

Проективное покрытие, %	90	70	50	30	10
K_1	1,34	1,18	1,00	0,78	0,45

Таблица 3. Коэффициенты неоднородности горизонтальной структуры растительного покрова

Группа растительности	K_2
Жесткая надводная	0,9
Придонная	2,2
Мягкая в толще воды	1,2
Мягкая с плавающими по поверхности воды листьями	1,4

Таблица 4. Значения коэффициента K_3

Вид растительности	Проективное покрытие, %				
	90	70	50	30	10
Тростник обыкновенный	0,84	0,96	1,00	1,00	1,00
Сусак зонтичный	-	-	0,45	0,58	1,00
Рогоз широколистный	-	-	0,69	0,88	1,00
Рогоз узколистный	0,44	0,50	0,59	0,75	1,00
Ежеголовник прямой	0,23	0,26	0,30	0,39	0,67
Рдест плавающий	0,42	0,48	0,57	0,73	1,00

Примечание. Проверки указывают, что растения этих видов не образуют зарослей с проективным покрытием больше 50 %.

Таблица 5. Значения параметров N_{50} и C_d

№ п/п	Вид растительности	N_{50}	C_d
1	Тростник обыкновенный	7	0,98
2	Сусак зонтичный	17	1,93
3	Рогоз широколистный	6	1,61
4	Рогоз узколистный	5	1,61
5	Ежеголовник прямой	5	1,62
6	Валлиснерия спиральная	67	0,67
7	Роголистник темно-зеленый	43	0,60
8	Наяда малая	26	0,47
9	Рдест блестящий	9	0,95
10	Рдест плавающий	20	1,66
11	Рдест тонкий	61	1,42
12	Нимфейник щитолистный	6	16,10
13	Чилим	1	6,20
14	Кувшинка чисто-белая	2	17,30

ния по сравнению с транзитным потоком. Так, в полужакрытых заливах концентрация аммония может быть в 1,4-1,9 раза, а растворенных форм фосфора на 15-40 % меньше, чем в то же время в транзитном потоке. Здесь же в середине лета наблюдаются минимальные концентрации нитритного азота (0,005 мг/л), в открытых заливах эти значения - 0,015-0,020 мг/л. Органическая составляющая общего фосфора в большинстве случаев в 3-8 раз превышает минеральную. По сравнению с транзитным потоком перманганатная окисляемость воды в полужакрытых заливах больше на 20-40 %, в открытых заливах - на 30-32 %, на прибрежных отмелях - на ~ 10 %. Такая же закономерность

характерна для значений БПК₅, величина которого в полузакрытых заливах в 1,7 раза выше, чем в транзитном потоке.

Минерализация и электропроводность воды в полузакрытых заливах, как правило, ниже, чем в транзитном потоке: ионов кальция и гидрокарбонатных ионов в 1,1-1,2 раза меньше, ионов калия - в 2,0 раза, ионов натрия - в 1,7 раза, хлоридных ионов - в 2,0-5,2 раза, электропроводность - в 1,1-1,3 раза. Только концентрация ионов магния в таких заливах может быть в 1,4-2,0 раза выше.

По данным многолетних исследований на Иваньковском водохранилище и Нижней Волге при непосредственном участии автора, было установлено, что значительная часть тяжелых металлов переносится на взвешенных частицах. Для тяжелых металлов характерна большая дифференциация, чем для других гидрохимических показателей воды. По нашим данным, концентрации Pb в приповерхностном слое воды мелководий Иваньковского водохранилища могут быть в 16-22 раза меньше, чем его содержание в придонной воде русловой ложбины. Такие же результаты нами были получены для ветлендов Сеймур и Мак-Кей. Так, для ветленда Мак-Кей, концентрации Cu, Zn, Pb и Cd в воде участков без растительности и с растительным опадом различались в 29, 32, 43 и 2 раза соответственно. В некоторых случаях разница в концентрации свинца была выше в 293 раза.

Глава 5. Формирование механических характеристик и химического состава грунтового комплекса зарастающих водных объектов

Рассмотрены механизмы формирования донных отложений и рельефа дна, типы донных отложений и их пространственная дифференциация, гранулометрический состав донных отложений, их водно-физические свойства, содержание обменных катионов и ионов водорастворимых солей, а также органического вещества, биогенных элементов и металлов.

Автохтонный и аллохтонный материал, поступающий в чашу водоема, подвергается действию комплекса внутриводоемных процессов пока, существенно трансформировавшись, в том числе пройдя отсортировку по гидравлической крупности, не седиментирует окончательно, формируя участки залегания донных отложений различных типов, отличающихся по водно-физическим свойствам, гранулометрическому и химическому составу.

В зарастающих водотоках распределение гранулометрического состава донных отложений более контрастное, чем в водоемах. В озерах гранулометрический состав донных отложений более однородный для зарастающих и незаросших участков. Эти же закономерности характерны для эфемерных водоемов и небольших ветлендов. Для водохранилищ как искусственных водоемов дифференциация гранулометрического состава донных отложений более сложная и, в зависимости от морфологических особенностей и степени

зарастания, на различных участках может иметь характерные черты водотоков и водосемов.

ВВР является основным источником органического вещества в зарастающих водных объектах. Кроме того, растительность оказывает опосредованное влияние на формирование количества органического вещества донных отложений - через влияние на динамику водных масс. Сравнение содержания химических элементов в однотипных грунтах на заросших участках и чистой воде показывает, что заросли ВВР существенно обогащают донные отложения, как в целом органическим веществом, так и биогенными элементами. На заросших участках наблюдается 1,1-3,0 кратное превышение органического вещества и продуктов его разложения, чем на незаросших открытых участках. Более 40 % массы опада остаются в донных отложениях литорали после 2 лет деструкции, которая идет медленно и приводит к образованию богатых органикой седиментов. Общее содержание органического вещества, накапливаемого в донных отложениях, существенно зависит от видового состава ВВР и ее расположения в водоеме.

В основных типах донных отложений наблюдается увеличение содержания биогенных элементов с уменьшением размеров частиц. По нашим данным, в илистом песке, сером и, особенно, сером песчанистом иле такое увеличение происходит до размерной фракции 0,2 мм. Во фракциях 0,01-0,2 мм содержание биогенных элементов находится примерно на одном уровне, а затем в тонкодисперсных фракциях вновь увеличивается.

Органический углерод является основным биогенным компонентом в химическом составе донных отложений. Пространственное распределение этого компонента в некоторой степени сходно с закономерностями распределения типов донных отложений и величиной содержания валового органического вещества (коэффициент корреляции 0,85) (рисунок 3). Среднее содержание органического углерода в песках составляет 0,10-0,36 %, песках илистых - 0,32-1,21 %, илах песчанистых серых - 0,88-2,48 %, илах серых - 2,10-3,65 %, илах переходных - 3,20-5,70 %, илах торфянистых и отложениях из макрофитов до 15 % и более.

Соединения азота также попадают в донные отложения почти исключительно с органическим веществом. Средние значения процентного содержания общего азота в песках составляют 0,05 %, в песках илистых - 0,17 %, илах песчанистых серых - 0,40 %, илах серых - 0,75 %, илах переходных - 0,87 %, а в илах торфянистых и отложениях из макрофитов могут достигать 2,5 %. Распределение количества общего фосфора в донных отложениях крайне неравномерное. Для различных слоев его содержание может отличаться в 6,3 раза. Минеральный фосфор составляет 75-80 % от общего. Донные отложения зарастающих зон демонстрируют в 1,5-2,8 раза более высокие содержания органического углерода, чем незаросшие участки. Соответствен-

но для соединений азота и фосфора эти величины составляют 1,2-1,5 и 1,5-2,0 раза.

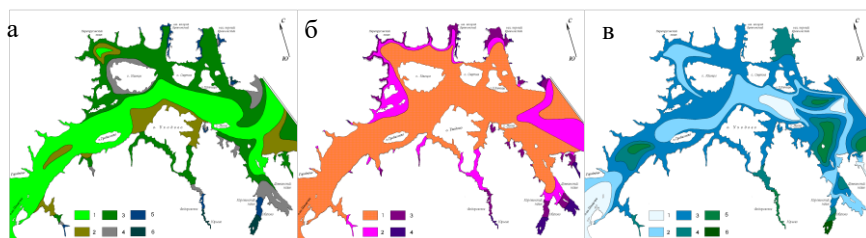


Рисунок 3. Фрагменты карт-схем распределения органического углерода (а), общего азота (б) и валового содержания общего фосфора (в) в донных отложениях Иваньковского водохранилища

ВВР оказывает множественное разнонаправленное влияние на распределение концентраций металлов в донных отложениях. Непосредственно в зарастающих зонах обычно преобладают органические илы. При низкой гидродинамической активности водных масс формирование таких илов из местного органического материала происходит довольно быстро, так как фрагментирование растительного опада происходит на несколько порядков быстрее, чем минеральных частиц. Именно органические лиганды и мелкодисперсные частицы, благодаря их высокой удельной поверхности и высокой способности к катионному обмену, предполагают накопление, удержание и повышенное содержание металлов в донных отложениях.

Наблюдаются сложные зависимости между гранулометрическим составом донных отложений и содержанием в них микроэлементов (таблица 6). Проведенное нами исследование для участков Верхней и Нижней Волги показало, что теснота и направленность связей может сильно варьировать для разных участков водоемов, типов грунтов и уровня антропогенной нагрузки, однако для большинства микроэлементов, концентрации которых связаны с антропогенным воздействием, а не с доминированием в окружающей среде, частицы размером 0,05-0,01 мм являются основным накопителем и переносчиком. Частицы именно такого размера имеют органическое происхождение и преобладают в органических илах. Второй диапазон размеров частиц, с которым тесно связаны многие металлы является 0,5-0,25 мм. Из этой схемы выпадает Cd, который более тесно связан с частицами размером 0,1-0,05 мм, а также Mo связанный частицами размером 0,25-0,1 мм.

Для многих металлов существуют устойчивые линейные или логарифмические зависимости между их концентрацией в донных отложениях и уров-

Таблица 6. Коэффициенты корреляции между содержанием тяжелых металлов в донных отложениях и их гранулометрическим составом в отмелой зоне устьевого взморья Волги

Размер частиц, мм	Mn	Fe	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Mo	Cd	Pb
> 1	0,30	0,12	0,71	0,09	-0,26	-0,31	-0,22	0,15	-0,90	-0,20
1-0,5	0,50	-0,56	0,10	0,48	0,52	0,61	0,60	-0,24	-0,19	0,45
0,5-0,25	0,35	-0,34	0,28	0,64	0,78	0,70	0,75	-0,92	0,02	0,76
0,25-0,1	-0,46	0,37	-0,51	-0,89	-0,84	-0,75	-0,81	0,73	0,16	-0,81
0,1-0,05	-0,66	0,20	-0,08	-0,11	-0,03	-0,12	-0,18	0,08	0,65	0,14
0,05-0,01	0,50	-0,37	-0,10	0,77	0,88	0,88	0,90	-0,68	0,24	0,70
0,01-0,005	0,16	-0,46	-0,13	0,21	0,39	0,42	0,43	-0,68	0,14	0,14
0,005-0,001	0,29	0,58	-0,36	0,15	0,10	0,08	0,09	0,34	0,12	0,17
< 0,25	-0,55	0,26	-0,67	-0,51	-0,33	-0,28	-0,37	0,35	0,72	-0,33
< 0,1	-0,07	-0,15	-0,15	0,49	0,65	0,59	0,56	-0,49	0,63	0,61
< 0,05	0,49	-0,37	-0,12	0,74	0,86	0,86	0,88	-0,70	0,25	0,67
< 0,01	0,23	-0,22	-0,26	0,28	0,47	0,47	0,49	-0,70	0,25	0,26
< 0,005	0,04	0,71	-0,17	0,01	-0,05	-0,13	-0,12	0,34	0,12	0,14
< 0,001	-0,55	0,48	0,38	-0,31	-0,35	-0,51	-0,50	0,09	0,04	-0,03

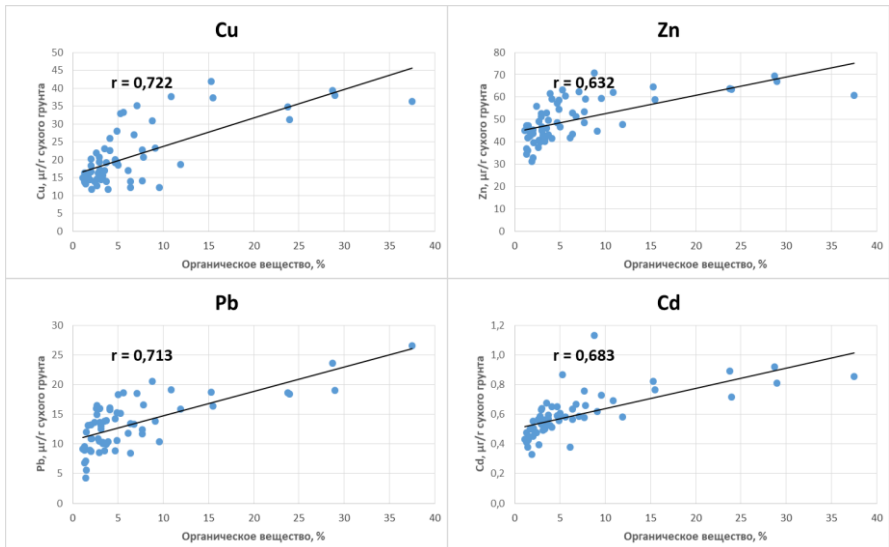


Рисунок 4. Зависимости между содержанием органического вещества и концентрацией тяжелых металлов в донных отложениях устьевого участка р. Линн

нем накопления органического вещества (рисунок 4). В зонах устойчивой седиментации наблюдаются повышенные концентрации тяжелых металлов и происходит их депонирование, следствием чего могут быть локальные геохимические аномалии. В зарослях ВВР по сравнению с донными отложениями проточных участков, содержание тяжелых металлов выше: Mn - в 1,8-2,3 раза, Co - 1,4, Ni - 1,4, Cu - 1,5-1,6, Zn - 1,7-1,8, Pb - 1,4.

Таблица 7. Содержание тяжелых металлов в ризосфере ВВР и в донных отложениях за ее пределами, мкг/г сухого грунта

Вид ВВР	Cu		Zn		Pb		Cd	
	Ризосфера	Фон	Ризосфера	Фон	Ризосфера	Фон	Ризосфера	Фон
Канареечник тростниковидный	1619,1	1252,4	1875,1	1428,0	393,4	369,3	5,5	5,4
Ирис желтый	2230,8	1202,4	1990,8	1507,2	839,4	519,6	4,9	4,3
Ситник развесистый	738,0	788,4	1103,1	2030,4	604,2	418,1	3,5	5,8
Осока (<i>Carex vulpinoidea</i> Michx.)	358,1	850,8	1138,8	532,3	244,0	265,2	4,1	2,4

Присутствие ВВР может изменить физико-химические условия в донных отложениях и последующую подвижность металлов, особенно в ограниченной области вокруг корней и корневищ, известной как ризосфера. Влияние ВВР на содержание и распределение металлов в донных отложениях усложняется различиями между видами макрофитов в скорости переноса кислорода от надземных частей к корням и, следовательно, их способности окислять донные отложения. По нашим данным, полученным для ветленда Мак-Кей, более высокие концентрации большинства металлов были обнаружены в донных отложениях в зоне корней и корневищ ВВР, чем в отложениях за пределами ризосферы (таблица 7). Для зарастающих водных объектов, расположенных на урбанизированных территориях, характерна высокая степень гетерогенности и контрастности распределения тяжелых металлов, как по площади донных отложений, так и по их глубине. Именно уровень и характер антропогенного загрязнения здесь является определяющим.

Глава 6. Реконструкция зарастающих водных объектов

Рассмотрены гидроэкологические критерии хозяйственного использования зарастающих водотоков и водоемов, барьерная роль макрофитов при загрязнении водных объектов микрочастицами природного и антропогенного происхождения, особенности реконструкции зарастающих водных объектов и экологические аспекты расчистки и обустройства зарастающих мелководий.

Существует много примеров как комплексного, так и узконаправленного использования зарастающих водных объектов или их мелководных зон. В диссертации приведены гидроэкологические критерии, соблюдение которых необходимо для осуществления того или иного вида хозяйственной деятельности, характеризующие состояние берегов и ложа водоема, его гидроэкологические и гидромеханические особенности, площади зарослей, проективное покрытие ВВР, ее видовой состав, степень загрязнения воды и донных отложений.

Способность ВВР и фрагментов уже погибших наземных частей растений задерживать и накапливать твердые частицы, имеет важное водоохранное значение. Так только ежеголовник прямой, который занимает около 10 % территории в отмелой зоне устьевого взморья Волги, может удерживать и накапливать до 10 % годового твердого стока реки, то есть 0,64 млн. т. По данным экспериментальных исследований степень перехвата макрофитами плавающих пластиковых микрочастиц (микропластика) колеблется в пределах от 22 % (рдест пронзеннолистный) до 76 % (роголистник темно-зеленый) при проективном покрытии растительностью акватории 50 % и от 31 % (манник большой) до 100 % (кувшинка чисто-белая, кубышка желтая, чилим) при проективном покрытии 100 % (Казмирук, 2021). При проективном покрытии прибрежных зарослей ВВР 50 % для 7 исследованных видов достаточно ширины полосы 3-4 м для перехвата более 90 % плавающих пластиковых микрочастиц и только для рдестов пронзеннолистного и тонкого ширина полосы должна составлять 8-10 м. Наличие даже узкой полосы (около 1 м шириной) сплошных зарослей из растений с плавающими на поверхности воды листьями позволяет перехватывать практически все плавающие пластиковые микрочастицы, что особенно актуально с учетом результатов недавних исследований, показывающих что ливневый сток с городских территорий, который никак не очищается, демонстрирует концентрации пластиковых микрочастиц на порядок выше, чем в неочищенных сточных водах (Lange et al., 2022).

Выполненные нами исследования также позволяют сделать следующие принципиальные выводы, что даже после формирования микрочастиц при разрушении предметов из синтетических полимерных материалов, находящихся в прибрежной зоне, для попадания этих микрочастиц с суши в водные объекты необходимо несколько месяцев (фрагменты пенополистирола, микроволокна), для фрагментов в виде пленок и пластин разной формы необходимо более полугод, а для тяжелых частиц из полимерных материалов высокой плотности, таких как поливинилхлорид и органическое стекло, может понадобиться несколько лет (Казмирук, Звезденкова, 2021).

Хотя ВВР выполняет важную водоохранную роль, перехватывая и обезвреживая многие загрязняющие вещества, ее избыточное количество в водном объекте может создавать целый ряд экологических, технологических и

социальных проблем. Кроме того, барьерная функции ВВР в некоторых случаях может привести к тому, что зарастающий водный объект или его отдельные участки превратятся в накопитель многих загрязняющих веществ, концентрации которых со временем могут достигнуть опасных значений, возникают заморы рыбы. В таких случаях возникает необходимость реконструкции и восстановления зарастающих водных объектов.

Среди существующих подходов по инженерной реконструкции зарастающих водных объектов наибольшее распространение и апробацию получили технологии частичного изъятия накопившихся отложений и ВВР, поскольку этот подход позволяет восстановить экосистему до состояния близкого к первоначальному, включая условия для существования аборигенных видов, что само по себе является фактором длительного стабильного существования экосистемы (Курзо, Карташевич, Самойленко, 2000; Маслов, 1998; Прыткова, 2002; Сметанин, 2000; Greenfield et al., 2007; Liužinas, Jankevičius, Šalkauskas, 2005; Loucks, Avakyan, 1995).

Расчистка и углубление зарастающих мелководий призваны решать несколько основных задач: 1) улучшение качества воды путем изъятия части органических илов и сплавин; 2) обеспечение условий для ската рыбы с мелководий в более глубокие участки акватории; 3) ликвидация заболоченных участков, прилегающих к мелководьям; 4) улучшение ландшафта прилегающих к мелководьям территорий; 5) добыча и использование органических илов.

Выполнено исследование изменения химических характеристик воды и донных отложений при проведении инженерных мероприятий по реконструкции зарастающих мелководий (Коровинский залив Иваньковского водохранилища, участки Завидовского государственного заповедника, залив Теменка оз. Селигер) и после их завершения. По нашим измерениям, через 2,5 часа после начала работы земснаряда концентрация растворенного в воде минерального фосфора возрастает более чем в 1,5 раза. На 10 % повышается цветность воды и концентрация сульфат-ионов. На седьмые сутки работы рефулера цветность воды в зоне его действия может достигать 200 градусов, в 2 раза превышая этот показатель на чистоводе. До 2-15-кратной величины возрастает количество фосфатов. В 1,4-1,8 раза повышается электропроводность воды и концентрация главных ионов.

Содержание в воде взвешенных веществ является одним из основных лимитирующих показателей при производстве дноуглубительных работ. В наших исследованиях, до производства работ, на участках предполагаемой расчистки, содержание взвешенных в воде веществ колебалось в пределах 8-174 мг/л. При производстве работ содержание взвешенных веществ в забое составляло 12-72 мг/л. Пятно повышенной мутности распространялось на расстояние 100-300 м (рисунок 5). Через 4-6 дней после завершения работ,

мутность воды в забое уменьшалась до санитарных норм, а через 20-25 дней – не отличалась от фоновой и составляла 10-17 мг/л.

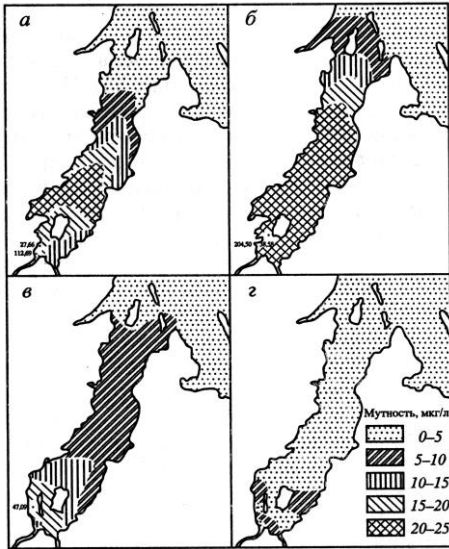


Рисунок 5. Поля мутности воды при реконструкции зарастающего мелководья

а) до производства работ по его расчистке; б) в 1-й день производства работ; в) на 38-й день производства работ; г) на 4-й день после завершения работ

С повышением мутности воды во время производства работ тесно связано изменение ее электропроводности и минерализации. Пятно повышенной минерализации воды распространяется на расстояние до 2 км. На расстоянии около 100 м от земснаряда минерализация уменьшается в 1,2-2,1 раза, а на расстоянии 300-400 м почти восстанавливается до фоновых значений. Только электропроводность воды и концентрация сульфат-ионов остаются повышенными даже на расстоянии 1,6 км.

Расчистка мелководий при их чрезмерном зарастании, изъятие органических илов, повышение гидродинамической активности водных масс, благоприятно влияет на кислородный режим (рисунок б). Уже через 2-3 часа после начала работы земснаряда концентрация растворенного в воде кислорода увеличивается на 20-25 %. Через 20-30 дней после окончания работ, на расчищенных участках концентрация растворенного в воде кислорода на 40-50 % выше чем на заболоченных массивах, а величина отношения $O_2/ПО$ (1,58-1,69) указывает на то, что условия существования гидробионтов значительно улучшаются.

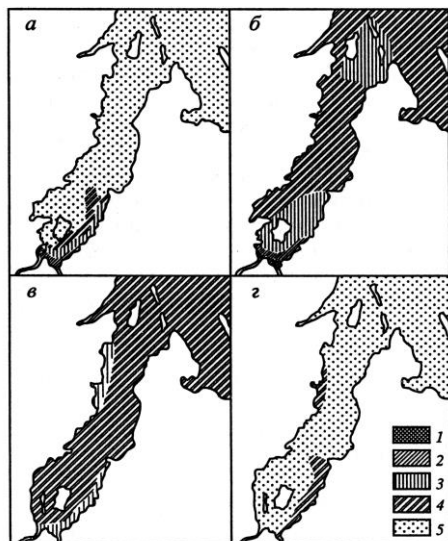


Рисунок 6. Концентрация растворенного кислорода при реконструкции зарастающего мелководья

а) до производства работ по его расчистке; б) в 1-й день производства работ; в) на 38-й день производства работ; г) на 4-й день после завершения работ. 1 - 2-4, 2 - 4-6, 3 - 6-8, 4 - 8-10, 5 - 10-12 мг/л

Количество органического вещества в донных отложениях расчищаемого участка уменьшается примерно в 3 раза. На контрольном заболоченном и сплавинном участке за этот же период содержание органического вещества возросло в 1,7 раза. На расчищенном участке также уменьшилось количество общего фосфора, в основном за счет сокращения органической составляющей. В донных отложениях реконструированных участков уменьшается количество тяжелых металлов. Например, работы по расчистке и обустройству Коровинского залива Иваньковского водохранилища способствовали уменьшению содержания тяжелых металлов в 3-5 раз и более.

Примерно через два месяца после расчистки сплавин и зарослей ВВР наблюдается стабилизация гидрохимического режима, который начинает приближаться к режиму на чистоводе. Эффективность работ всецело зависит от созданного в результате расчистки гидродинамического режима и соотношения площадей под сплавидами и чистоводом или редкими (до 30 %) зарослями ВВР. Наиболее благоприятный гидрохимический режим формируется на проточных участках через год после расчистки. Анализ собственных материалов и данных ГФУП "Центрводхоз" позволяет утверждать, что и через 30 лет на таких участках гидрохимический режим ухудшается незначительно.

В **заключении** приведены общие выводы по работе, основными из которых являются:

1. Развитие экосистем зарастающих водотоков и водоемов имеет целый ряд особенностей. Именно присутствие растительности создает в водном объекте гетерогенную среду с множеством обособленных экологических ниш. Растительность играет разностороннюю средообразующую роль: препятствует развитию гидродинамических процессов, способствует их затуханию и осаждению взвешенных в воде веществ, сорбирует взвешенные частицы на листьях и стеблях, препятствует размыву донных отложений, влияет на ледовые явления, накапливает и удерживает значительное количество биогенных и других химических элементов. Кроме того, растительность выступает грунтообразующим материалом. Для стабильного существования экосистемы зарастающих водных объектов в равной степени неблагоприятным является, как чрезмерное развитие растительности, приводящее к сплавинообразованию, заилению, заболачиванию, ухудшению качества воды, так и ее полное сведение, в результате чего происходит эрозия берегов, взмучивание и перекотление донного материала.

2. Предложена комплексная классификация разнотипных зарастающих водных объектов и антропогенных воздействий на них. Выявлены основные классификационные признаки зарастающих водотоков, водоемов и устьевых областей. Классификация позволяет учитывать гидрографические и геоморфологические особенности зарастающих водных объектов, преобладающее движение водных масс, пространственную структуру зон зарастания, их влияние на скоростную структуру потока, прямые и опосредованные антропогенные воздействия и их основную направленность. Выделены и проанализированы индикационные признаки для фитоиндикации динамики водных масс и состава, состояния и свойств донных отложений при дистанционном мониторинге зарастающих и заболачивающихся водных объектов.

3. Разработана методика определения гидравлических сопротивлений зарастающих водотоков, учитывающая свойства и морфологические особенности ВВР. Предложены алгоритмы расчета осредненных скоростей движения воды отдельно для случаев осреднения по ширине потока и по вертикали при мозаичном распределении гидравлических сопротивлений, определяемых естественной водной растительностью.

4. Показано, что гидродинамическая активность водных масс является ключевым фактором внутриводоемных процессов в зарастающих водных объектах. При фильтрации воды через заросли ВВР с проективным покрытием 50-70 % концентрация взвешенных частиц минерального происхождения экспоненциально уменьшается до значений менее 5 мг/л. Однако, на зарастающих и заболачивающихся участках с проективным покрытием ВВР более 70% содержание взвешенных веществ в большинстве случаев выше, чем на чистоводе. Это связано с формированием органических илов и отложений из

макрофитов, имеющих удельный вес близкий к удельному весу воды и находящихся в полувзвешенном состоянии.

5. Состав, состояние и свойства донных отложений зарастающих водных объектов имеют ярко выраженную гетерогенность, определяемую сложным взаимодействием разных механизмов формирования грунтов, ведущая роль в которых, ввиду слабого водообмена, принадлежит видовым, экологическим и морфологическим особенностям ВВР, создающим особую среду, регулирующую гидродинамическую активность водных масс, закрепление грунтов, перехват и удержание грунтообразующего материала из ВВР и других аллювиальных частиц.

6. В зарастающих водных объектах присутствие ВВР оказывает множественное разнонаправленное влияние на распределение концентраций металлов в донных отложениях. Основная роль ВВР состоит не в прижизненном поглощении металлов, хотя она тоже важна, а в создании биомассы (органического вещества) и, после отмирания надземных частей макрофитов, удержании ее в донных отложениях, тем самым создавая условия накопления металлов. Для многих металлов существуют устойчивые линейные или логарифмические зависимости между их концентрацией в донных отложениях и уровнем накопления органического вещества. В зонах устойчивой седиментации наблюдаются повышенные концентрации тяжелых металлов и происходит их депонирование, следствием чего могут быть локальные геохимические аномалии. Этому способствует накопление тяжелых металлов растениями-концентраторами и образование отложений из их растительного опада. Более высокие концентрации большинства металлов обнаруживаются в донных отложениях в зоне корней и корневищ ВВР, по сравнению с грунтами за пределами ризосферы.

7. Макрофиты выполняют важную барьерную водоохранную роль в предотвращении загрязнения водных объектов микрочастицами природного и антропогенного происхождения. Натурные и лабораторные эксперименты показывают, что существует целый ряд механизмов, под действием которых частицы оказываются задержанными в зарастающих зонах: 1) в результате создания дополнительных гидравлических сопротивлений происходит снижение скорости движения воды, транспортирующей способности потока и интенсивности турбулентного перемешивания, что приводит к осаждению твердых частиц; 2) возникновение в тыльной части растений водоворотных зон приводит к захвату микрочастиц, увеличению времени их нахождения непосредственно у растений и вероятности адгезии и агрегации; 3) снижение скорости ветра у поверхности воды, в результате чего снижается гидродинамическая активность водных масс; 4) гашение ветро-волновых явлений, приводящих к взмучиванию осевших частиц; 5) гашение кинетической энергии дождевых капель и снижение вероятности их прямого воздействия на плава-

ющие и уже задержанные микрочастицы; 6) механическое задержание частиц неровностями в структуре растений; 7) задержание частиц сито-подобными структурами из переплетений стеблей и листьев растений одного или нескольких видов; 8) создание макрофитами на дне, поверхности и в толще воды объемной массы растительного опада с пористой структурой; 9) задержание микрочастиц в результате адгезии поверхностей ВВР и частиц; 10) прикрепление частиц к липким поверхностям перифитона, покрывающего листья и стебли ВВР; 11) прилипание частиц к растениям и друг к другу в результате взаимодействия электрических полей; 12) агрегация свободноплавающих частиц с уже прикрепленными к растениям.

8. Для минимизации влияния микропластика на естественные биогеохимические процессы в пресноводных экосистемах и снижения вероятности транспорта пластиковых микрочастиц в морские экосистемы, предложено использовать барьерную роль ВВР. Эксперименты для 14 видов ВВР показали, что для плавающих частиц (микропленок и фрагментов) из полиэтилена высокой плотности, которые составляют более 50 % обнаруживаемых в водных объектах крупных пластиковых микрочастиц, степень перехвата макрофитами колеблется в пределах 22-76 % при проективном покрытии растительностью акватории 50 % и 31-100 % при проективном покрытии 100 %.

9. Разработаны гидроэкологические критерии для определения вариантов хозяйственного использования, реконструкции и обустройства зарастающих водных объектов. Составлен перечень мероприятий по улучшению экологического состояния таких водных объектов при различных целях их хозяйственного использования.

10. На основе обобщения опыта реконструкции зарастающих и заболачивающихся мелководий разработаны схемы проведения работ с учетом экологических требований. Показано, что эффективность мероприятий по реконструкции и улучшению экологического состояния зарастающих мелководий зависит от созданных в результате инженерных мероприятий условий для гидродинамической активности водных масс и водообмена в зарастающих зонах. При постоянных скоростях движения воды выше 10-15 см/с макрофиты не укореняются, хотя, уже существующие заросли, могут выдерживать периодические скорости движения воды до 1,5 м/с. Разработана типовая структура и методика мониторинга зарастающих водных объектов с учетом особенностей пространственно-временной изменчивости показателей компонент природной среды, характера и интенсивности антропогенных воздействий.

В рамках целей и задач данной работы наиболее перспективными и востребованными направлениями дальнейшей разработки темы являются натурные и лабораторные исследования, а также создание и совершенствование методов фитотехнологий и фиторемедиации для предотвращения загрязне-

ния водных объектов микрочастицами антропогенного происхождения и, прежде всего, микрочастицами синтетических полимерных материалов с учетом сезонных изменений макрофитов и среды их обитания.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

Монографии:

1. **Казмирук В.Д.** Микропластик в окружающей среде: Нарастающая проблема планетарного масштаба. - М.: URSS, 2020. - 432 с.
2. Бреховских В.Ф., **Казмирук В.Д.**, Вишневецкая Г.Н. Биота в процессах массопереноса в водных объектах. - М.: Наука, 2008. - 316 с.
3. Бреховских В.Ф., Казмирук Т.Н., **Казмирук В.Д.** Донные отложения Иваньковского водохранилища: Состояние, состав, свойства. - М.: Наука, 2006. - 176 с.
4. **Казмирук В.Д.**, Казмирук Т.Н., Бреховских В.Ф. Зарастающие водотоки и водоемы: Динамические процессы формирования донных отложений. - М.: Наука, 2004. - 310 с.

Работы, опубликованные в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК:

5. **Казмирук В.Д.** Механизмы перехвата пластиковых микрочастиц буферными зонами из макрофитов // Геосистемы переходных зон. - 2021. - Т.5, N4. - С.378-388.
6. **Казмирук В.Д.** Барьерная роль макрофитов при загрязнении водных объектов микропластиком // Наука. Инновации. Технологии. - 2021. - N3. - С.133-149.
7. **Казмирук В.Д.**, Звезденкова Г.А. Микропластик в прибрежной полосе: скорость и факторы попадания в водный объект // Геополитика и экогеодинамика регионов. - 2021. - Т.7(17), Вып.4. С.268-278.
8. Kazmiruk T.N., **Kazmiruk V.D.**, Bendell L.I. Abundance and distribution of microplastics within surface sediments of a key shellfish growing region of Canada // PLoS ONE. - 2018. - Vol.13, N5. - e0196005.
9. **Казмирук В.Д.**, Казмирук Т.Н. Экологическая защита городских водных объектов методами фитотехнологий // Экология урбанизированных территорий. - 2017. - N2. - С.131-138.
10. **Казмирук В.Д.**, Казмирук Т.Н. Микропластик в донных отложениях: методы определения // Вода: химия и экология. - 2017. - N1. - С.87-92.
11. **Казмирук В.Д.**, Казмирук Т.Н. Современные тенденции использования фитотехнологий для очистки и охраны вод // Теоретическая и прикладная экология. - 2016. - N3. - С.76-81.
12. Cluzard M., Kazmiruk T.N., **Kazmiruk V.D.**, Bendell L.I. Intertidal concentrations of microplastics and their influence on ammonium cycling as related to the shellfish industry // Archives of Environmental Contamination and Toxicology. -2015. - Vol.69, N3. - P.310-319.

13. Казмирук Т.Н., **Казмирук В.Д.** Реконструкция зарастающих и заболочивающихся водоемов // Природообустройство - 2009. - N2. - С.63-68.
14. Немировская И.А., Бреховских В.Ф., **Казмирук В.Д.** Алифатические и полиароматические углеводороды в донных осадках устьевого взморья р. Волги // Водные ресурсы. - 2006. - Т.33, N3. - С.274-284.
15. Бреховских В.Ф., Волкова З.В., Кочарян А.Г., **Казмирук В.Д.**, Казмирук Т.Н., Толкачев Г.Ю. Оценка накопления тяжелых металлов и биогенных элементов в донных отложениях Ивановского водохранилища // Инженерная экология. - 2006. - N4. - С.42-53.
16. Бреховских В.Ф., **Казмирук В.Д.**, Савенко А.В. Трансформация стока растворенных веществ в устьевой области Волги // Геохимия. - 2005. - Т.43, N6. - С.619-626.
17. Бреховских В.Ф., Волкова З.В., Катунин Д.Н., **Казмирук В.Д.**, Казмирук Т.Н., Островская Е.А. Тяжелые металлы в донных отложениях Верхней и Нижней Волги // Водные ресурсы. - 2002. -Т.29, N5. - С.539-547.
18. Бреховских В.Ф., **Казмирук В.Д.**, Казмирук Т.Н. Зарастающие мелководья водоемов: мониторинг, обустройство, оценка экологического состояния // Инженерная экология. - 2001. - N4. - С.36-48.
19. **Казмирук В.Д.** Общая характеристика основных типов мелководий Ивановского водохранилища в современных условиях // Гидробиологический журнал. - 2001. - N1. - С.106-113.
20. **Казмирук В.Д.** О вертикальном распределении осредненной скорости течения в заросшем русле // Метеорология и гидрология. - 1999. - N3. - С.60-64.
21. **Казмирук В.Д.** Общая характеристика и особенности гидрохимического режима мелководий Ивановского водохранилища // Водные ресурсы. - 1999. - Т.26, N3. - С.302-313.
22. **Казмирук В.Д.** Течения на мелководном устьевом взморье Волги: натурные наблюдения и численные расчеты // Метеорология и гидрология. - 1998. - N8. - С.64-75.
23. **Казмирук В.Д.** Экосистемы зарастающих водных объектов и гидроэкологические критерии их хозяйственного использования // Мелиорация и водное хозяйство. - 1998. - N4. - С.14-20.
24. **Kazmiruk V.D.** Hydraulic resistances of higher aquatic vegetation // Acta hydrotechnica. - 1997. - Vol.15/19. - P.79-84.
25. **Казмирук В.Д.** Гидравлические сопротивления высшей водной растительности // Водные ресурсы. - 1990. - N1. - С.101-108.

Работы, опубликованные в других изданиях

26. **Казмирук В.Д.** Микропластик в водных объектах: источники и некоторые особенности поведения частиц // Материалы I Всероссийской кон-

- ференции с международным участием по загрязнению окружающей среды микропластиком «MicroPlasticsEnvironment-2022». - Томск, 2022. - С.11-16.
27. **Казмирук В.Д.** Почему в зарослях макрофитов много микропластика: действующие механизмы // *Материалы I Всероссийской конференции с международным участием по загрязнению окружающей среды микропластиком «MicroPlasticsEnvironment-2022».* - Томск, 2022. - С.43-48.
 28. Белкина Н.А., **Казмирук В.Д.**, Потахин М.С. Поступление фосфора из донных отложений Иваньковского водохранилища в составе взвешенного вещества // *Озера Евразии: проблемы и пути их решения, Ч.2.* - Казань: Издательство АН РТ, 2019. - С.33-38.
 29. **Казмирук В.Д.**, Казмирук Т.Н. Оценка и мониторинг загрязнения водных объектов микропластиком // *Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири.* Т.П. Изучение и мониторинг процессов в почвах и водных объектах. - М., 2018. - С.373-377.
 30. **Казмирук В.Д.** Охрана и очистка вод методами фитотехнологий // *Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири.* Т.У. Планирование, управление и реабилитация ландшафтов. - М., 2018. - С.294-301.
 31. **Казмирук В.Д.**, Казмирук Т.Н. Очистка воды методами фитотехнологий // *Водоочистка.* - 2017. - N4. - С.71-75.
 32. Kazmiruk T.N., **Kazmiruk V.D.**, Ashley K. I., Bendell L.I. Trace metals in urban estuaries; implication for remediation // *2016 Salish Sea Toxics Monitoring Review: A Selection of Research.* PSEMP Toxics Work Group. Tacoma, WA, USA. - 2017. - P. 8.
 33. Казмирук Т.Н., **Казмирук В.Д.**, Бинделл Л.И., Казмирук З.В. Температурный фактор в процессах накопления микропластика донными отложениями // *Ледовые и термические процессы на водных объектах России.* - Владимир, 2016. - С.200-206.
 34. Kazmiruk T.N., **Kazmiruk V.D.**, Bendell L.I. Trace metals in urban estuaries; implication for remediation // *Pacific Estuarine Research Society 39th Annual Conference.* - Brackendale, Canada, 2016. - P.26-27.
 35. **Казмирук В.Д.**, Казмирук Т.Н. Фитотехнологии для очистки воды от медицинских препаратов // *Водоочистка.* - 2015. - N11-12. - С.30-34.
 36. **Казмирук В.Д.** Микропластик в водных объектах: опасности и мониторинг // *Проблемы управления водными и земельными ресурсами.* Ч.І. - М., 2015. - С.247-256.
 37. **Казмирук В.Д.**, Кочарян А.Г., Казмирук Т.Н., Лебедева И.П. Фиторемедиация в охране вод от тяжелых металлов // *Проблемы развития мелиорации и водного хозяйства в России.* Ч.ІІІ. - М., 2015. - С.353-358.

38. **Казмирук В.Д.**, Казмирук Т.Н. Зоны депонирования тяжелых металлов в водных объектах // *Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов*. - М., 2015. - С.413-416.
39. **Казмирук В.Д.**, Казмирук Т.Н. Об определении микропластика в донных отложениях // *Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод*. Ч.2. - Ростов-на-Дону, 2015. - С.16-20.
40. **Казмирук В.Д.**, Казмирук Т.Н. Охрана и очистка вод методами фитотехнологий // *Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.»*. Т.1. - Петрозаводск, 2015. - С.294-301.
41. Казмирук Т.Н., **Казмирук В.Д.** Некоторые особенности формирования состава и структуры наносов // *Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей*. Т.II. - М., 2014. - С.96-108.
42. **Казмирук В.Д.**, Казмирук Т.Н. Естественные барьеры поступления тяжелых металлов в Каспийское море // *Современные энерго- и ресурсосберегающие, экологически устойчивые технологии и системы сельскохозяйственного производства*. - Рязань, 2013. - С.486-494.
43. **Казмирук В.Д.** Фиторемедиация в охране вод: неограниченные возможности и возможные ограничения // *Современные энерго- и ресурсосберегающие, экологически устойчивые технологии и системы сельскохозяйственного производства*. - Рязань, 2013. - С.494-501.
44. **Казмирук В.Д.** Современные тенденции использования фиторемедиации для охраны вод // *Проблемы комплексного обустройства техноприродных систем*. - М., 2013. - С.109-114.
45. **Казмирук В.Д.** О термине «ветленд» // *Проблемы комплексного обустройства техноприродных систем*. - М., 2013. - С.192-197.
46. **Казмирук В.Д.**, Казмирук Т.Н. Использование фиторемедиации для охраны вод в России и мире // *Водная стихия: опасности, возможности прогнозирования, управления и предотвращения угроз*. - Новочеркасск, 2013. - С.332-337.
47. **Казмирук В.Д.** Водоохранные сооружения с высшей водной растительностью // *Роль мелиорации и водного хозяйства в инновационном развитии АПК*. - М., 2012. - С.372-380.
48. **Казмирук В.Д.** Регулирование зарастания водных объектов и управление ими // *Проблемы развития мелиорации и водного хозяйства и пути их решения*. Ч.IV. - М.: МГУП, 2011. С.126-132.
49. **Казмирук В.Д.** Особенности деструкции опада высшей водной растительности в естественных условиях // *Современные проблемы водохранилищ и их водосборов*. Т.VI. - Пермь, 2011. - С.77-82.

50. **Казмирук В.Д.** Хозяйственное использование зарастающих водных объектов // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Т. VI. - Пермь, 2011. - С.82-87.
51. **Казмирук В.Д.,** Казмирук Т.Н. Методы доочистки сточных вод с использованием высшей водной растительности // Экологический вестник России. - 2010. - N7. - С.32-37.
52. Казмирук Т.Н., **Казмирук В.Д.** Современные проблемы качества воды и донных отложений Иваньковского водохранилища как источника питьевого водоснабжения // Вісник національного університету водного господарства та природокористування. - Рівне, 2009. - С.175-180.
53. **Казмирук В.Д.** Причины и факторы зарастания водных объектов // Роль мелиорации в обеспечении продовольственной и экологической безопасности России. Ч.1. - М.: МГУП, 2009. - С. 435-441.
54. **Казмирук В.Д.** Улучшение экологического состояния и хозяйственное использование зарастающих водных объектов // Мелиорация и водное хозяйство XXI века. Наука и образование. - Горки, 2009. - С.213-217.
55. **Казмирук В.Д.** Гидрохимический режим и качество воды Иваньковского водохранилища в современных условиях // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Т. I. Пермь, 2009. - С.236-241.
56. **Казмирук В.Д.** Средообразующая роль высшей водной растительности в формировании экосистемы зарастающих мелководий водохранилищ // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Т. II. - Пермь, 2009. - С.289-294.
57. **Казмирук В.Д.** Деструкция опада высшей водной растительности в естественных условиях // Сотрудничество для решения проблемы отходов. - Харьков, 2009. - С.234-236.
58. **Казмирук В.Д.** Методы учета зарастания каналов при расчете формирования стока с мелиоративной сети // Генетические и вероятностные методы в гидрологии: проблемы развития и взаимосвязи. - Одесса, 2009. - С.51.
59. **Казмирук В.Д.,** Казмирук Т.Н. Методы доочистки сточных вод с использованием высшей водной растительности // Водоочистка. - 2009. - N1. - С.27-27.
60. **Казмирук В.Д.** Накопление тяжелых металлов высшей водной растительностью различных биотопов устьевой области Волги // Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы. Ч.1. - Борок, 2008. - С.30-33.
61. **Казмирук В.Д.,** Казмирук Т.Н. Структура высшей водной растительности как индикатор экологического состояния водных объектов // Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы. Ч.3. - Борок, 2008. - С.31-35.

62. **Казмирук В.Д.**, Казмирук Т.Н. Современные водохозяйственные и экологические проблемы Нижней Волги // Роль мелиорации и водного хозяйства в реализации национальных проектов. Ч.1. - М.: МГУП, 2008. - С.318-323.
63. **Казмирук В.Д.**, Казмирук Т.Н. Методы доочистки сточных вод с использованием высшей водной растительности // Сотрудничество для решения проблемы отходов. - Харьков, 2008. - С.262-264.
64. **Казмирук В.Д.**, Казмирук Т.Н. Современные экологические проблемы Ивановского водохранилища как водоема комплексного назначения // Водные ресурсы Волги: настоящее и будущее, проблемы управления. - Астрахань, 2008. - С.165-179.
65. **Казмирук В.Д.**, Казмирук Т.Н. Тяжелые металлы в донных отложениях Ивановского водохранилища // Водные ресурсы Волги: настоящее и будущее, проблемы управления. - Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2007. - С.119-121.
66. **Казмирук В.Д.** Современные экологические проблемы Ивановского водохранилища // Водные ресурсы Волги: настоящее и будущее, проблемы управления. - Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2007. - С.121-123.
67. Савенко А.В., Бреховских В.Ф., **Казмирук В.Д.** Межгодовая изменчивость распределения биогенных элементов в устье Волги в период летней межени // Инновационный потенциал естественных наук. Т.П. Экология и рациональное природопользование. Управление инновационной деятельностью. - Пермь, 2006, С.129-134.
68. Бреховских В.Ф., **Казмирук В.Д.**, Савенко А.В. Микроэлементный состав высшей водной растительности в устье Волги // Инновационный потенциал естественных наук. Т.П. Экология и рациональное природопользование. Управление инновационной деятельностью. - Пермь, 2006. - С.185-189.
69. **Казмирук В.Д.**, Казмирук Т.Н. Атлас состава и свойств донных отложений Ивановского водохранилища // Вода: экология и технология. - М., 2006. - С.16-18.
70. **Казмирук В.Д.**, Казмирук Т.Н. Динамика рельефа дна и устьевые процессы в зарастающих водоемах // Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей. - М., 2004. - С.543-545.
71. **Казмирук В.Д.**, Казмирук Т.Н. Моделирование движения воды в пресноводных ветландах: дельта и отмеляя зона устьевого взморья Волги // Вода: экология и технология. - М., 2002. - С.93.
72. **Казмирук В.Д.**, Казмирук Т.Н. О неоднородности полей гидрохимических характеристик и некоторых свойств донных отложений на зараста-

- ющих мелководьях Иваньковского водохранилища // Современные проблемы стохастической гидрологии. - М., 2001. - С.232-233.
73. **Казмирук В.Д.**, Казмирук Т.Н. Особенности гидрохимического режима мелководий // Иваньковское водохранилище: Современное состояние и проблемы охраны. - М.: Наука, 2000. - С.157-171.
74. Казмирук Т.Н., **Казмирук В.Д.** Состав и свойства донных отложений // Иваньковское водохранилище: современное состояние и проблемы охраны. - М.: Наука, 2000. - С.224-239.
75. Казмирук Т.Н., **Казмирук В.Д.** Процессы седиментации и взмучивания // Иваньковское водохранилище: современное состояние и проблемы охраны. - М.: Наука, 2000. - С.289-308.
76. **Казмирук В.Д.**, Казмирук Т.Н. Расчистка и обустройство зарастающих мелководий // Иваньковское водохранилище: современное состояние и проблемы охраны. - М.: Наука, 2000. - С.325-342.
77. **Казмирук В.Д.** Фитоиндикация состояния водных масс и донных отложений при дистанционном мониторинге водных объектов // Гидробиотика-2000: материалы V Всероссийской конференции по водным растениям. - Ярославль: Изд-во Ярославского гос. технического ун-та, 2000. - С.150-151.
78. **Казмирук В.Д.** Современные гидроэкологические проблемы дельты Волги и Северного Каспия // Вода: экология и технология. - М., 2000. - С.84.
79. Бреховских В.Ф., **Казмирук В.Д.**, Казмирук Т.Н. Особенности динамики донных отложений слабопроточного водоема (на примере Иваньковского водохранилища) // Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей. - М., 1999. - С.249-251.
80. **Казмирук В.Д.** Механизмы динамики рельефа дна и формирования мутности воды на зарастающих мелководьях // Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей. - М., 1999. - С.293-295.
81. Бреховских В.Ф., **Казмирук В.Д.**, Казмирук Т.Н. Взаимодействие водных масс и донных отложений как фактор экологического риска в субаквальных ландшафтах Иваньковского водохранилища // Проблемы геоэкологии. - Тверь, 1999. - С.49-51.
82. **Kazmiruk V.D.** Modeling velocity profiles in channels with vegetation // Stochastic models of hydrological processes and their applications to problems of environmental preservation. - Moscow, 1998. - P.228-231.
83. **Казмирук В.Д.** Опыт разработки конечноэлементной модели течений воды для многосвязной области с неоднородными гидравлическими сопротивлениями // Вода: экология и технология. - М., 1998. - С.65-66.

84. **Казмирук В.Д.** Расчистка зарастающих мелководий как фактор формирования их гидрохимического режима // Экологические проблемы Севера Европейской территории России. - Апатиты, 1996. - С.13-17.
85. **Казмирук В.Д.** Метод определения гидравлических сопротивлений зарастающих водотоков // Вода: экология и технология. - М., 1996. - С.163-174.
86. **Казмирук В.Д.** Гидравлика зарастающих водотоков // Динамика и термика рек, водохранилищ, внутренних и окраинных морей. Ч1. - М., 1994. - С.121-127.
87. **Казмирук В.Д.** Моделирование течений воды в плавневых массивах устьевых участков рек с использованием аэрокосмической информации // Динамика и термика рек, водохранилищ, внутренних и окраинных морей. Ч2. - М., 1994. - С.127-132.
88. **Казмирук В.Д., Харизоменов Д.А.** Колебания мутности воды в водотоках и на мелководьях устьевого области Волги // Динамика и термика рек, водохранилищ, внутренних и окраинных морей. Ч2. - М., 1994. - С.142-148.
89. **Казмирук В.Д.** О роли мелководий различных типов в формировании качества воды рек и водоемов // Вода: экология и технология. Т.1. - М., 1994. - С.158-163.
90. **Казмирук В.Д.** Об использовании энтропийной меры упорядоченности структуры ценозов высшей водной растительности для анализа состояния водной среды // Математические проблемы экологии. - Новосибирск, 1994. - С.155-159.
91. **Казмирук В.Д.** Модель течений воды в заросшем русле // Математические проблемы экологии. - Душанбе, 1991. - С.85-88.
92. **Казмирук В.Д.** Моделирование течений воды при пространственной неоднородности гидравлических сопротивлений // Математическое моделирование в проблемах рационального природопользования. - Ростов-на-Дону, 1989. - С.237-239.
93. **Казмирук В.Д.** Расчет гидравлических сопротивлений зарастающих водотоков при неоднородной горизонтальной структуре растительного покрова. - М., 1989. - 33 с.- Деп. в ВИНТИ 28.09.89, N 6049-B89.
94. **Казмирук В.Д.** Формула для расчета коэффициента шероховатости зарастающих водотоков // Человек в биосфере. - М., 1988. - С.156-160.
95. **Казмирук В.Д.** О математическом моделировании фоновых деформаций дна зарастающего мелководного устьевого взморья // Математическое моделирование в проблемах рационального природопользования. - Ростов-на-Дону, 1988. - С.221-223.
96. **Казмирук В.Д.** Высшая водная растительность как индикатор динамики водных масс на зарастающем мелководье // Вклад молодых ученых и

специалистов в решение современных проблем океанологии и гидробиологии: тез. докл. III науч.-техн. конф. - Севастополь, 1988. - С.74.

97. **Казмирук В.Д.** Расчет плана скоростей течения для анализа фоновых деформаций дна отмелого взморья р. Волги. - М., 1988. - 43 с. - Деп. в ВИНТИ 02.08.88, №6177-В88.
98. Горбач Т.Н., **Казмирук В.Д.** Структура потока и возможности ее фитоиндикации на зарастающем мелководье // Актуальные проблемы современной лимнологии. - Л, 1988. - С.17-18.
99. **Казмирук В.Д.** О возможности фонового прогноза развития гидрографической сети на мелководном устьевом взморье Волги // Закономерности проявления эрозионных и русловых процессов в различных природных условиях. - М.: Изд-во МГУ, 1987. - С.442-447.