

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ СОЗДАНИЯ И СПУСКА ВОДОХРАНИЛИЩ В СТЕПНОЙ ЗОНЕ

© 2024 г. В.И. Данилов-Данильян^{a,*}, Н.М. Новикова^{a,**}, О.Г. Назаренко^{b,***}

^aИнститут водных проблем РАН, Москва, Россия

^bГосударственный центр агрохимической службы “Ростовский”,
пос. Рассвет, Россия

*E-mail: vidd38@yandex.ru

**E-mail: nmnovikova@gmail.com

***E-mail: nazarenkoo@mail.ru

Поступила в редакцию 01.03.2024 г.

После доработки 05.03.2024 г.

Принята к публикации 13.03.2024 г.

В статье рассматриваются экологические последствия сооружения водохранилищ – ответные реакции водных и наземных экосистем и их компонентов на изменения водного режима. Такие реакции зонально специфичны и зависят от вмещающего ландшафта. Особенно ярко они проявляются в степной зоне. Авторы систематизировали последствия, природные и антропогенные факторы, определяющие их эволюцию, меры минимизации негативных экологических последствий, которые прослеживаются от верхнего бьефа водохранилища до водоёма – приёмника стока реки, где располагается сооружение. Ввиду снижения биопродуктивности и биоразнообразия был поставлен вопрос о целесообразности спуска водохранилищ. В результате длительных дискуссий сформировалось мнение, что в настоящее время экологически оправдан спуск малых водохранилищ, которые утратили свою функцию либо остались бесхозными. При этом необходимо проводить специальные гидромелиоративные и фитомелиоративные мероприятия, направленные на стабилизацию гидрологической и экологической ситуации.

Ключевые слова: трансформация среды, водные экосистемы, экотонные экосистемы, биопродуктивность, биоразнообразие, верхний бьеф, нижний бьеф, затопление, заиление, засоление, гидроморфизм почв, растительность, фауна.

DOI: 10.31857/S0869587324040038, EDN: GFJFPX

Водохранилище – искусственный водный объект объёмом более 1 млн м³ с замедленным водообменом, уровневый режим которого регулируется гидротехническими сооружениями, созданными для накопления воды в целях её хозяйственного исполь-

зования (и/или перехвата части стока половодий либо паводков с целью защиты от наводнений) [1]. Именно водохранилища позволяют осуществлять пространственно-временное регулирование водных ресурсов и становятся базовыми элементами



ДАНИЛОВ-ДАНИЛЬЯН Виктор Иванович – член-корреспондент РАН, научный руководитель ИВП РАН. НОВИКОВА Нина Максимовна – доктор географических наук, главный научный сотрудник лаборатории динамики наземных экосистем под влиянием водного фактора ИВП РАН. НАЗАРЕНКО Ольга Георгиевна – доктор биологических наук, директор ГЦАС “Ростовский”.

гидротехнических и водохозяйственных систем. С их помощью решаются проблемы гидроэнергетики, водоснабжения промышленности, сельского хозяйства, ЖКХ, судоходства и т.д. В мире насчитывается более 30 тыс. крупных водохранилищ объёмом свыше 1 млн м³, в том числе около 2.5 тыс. — более 100 млн м³ [2]. Малых и средних водохранилищ в сотни раз больше.

Влияние водохранилищ стало общепланетарным фактором: объём вод суши за счёт задержанной воды увеличился приблизительно на 6.6 тыс. км³ [3, 4], что в 5 раз больше суммарного объёма воды в речной сети земного шара [5], таким образом происходит частичная компенсация естественного отрицательного водного баланса суши [6]. Количество осадочного материала, которое откладывается в водохранилищах, соизмеримо с речным твёрдым стоком, поступающим в океан [7]. При общей площади водного зеркала 400 тыс. км² обусловленные водохранилищами изменения природной среды произошли на 700 тыс. км², а переустройство хозяйства — на 1.5 млн км² [8]. Создание водохранилищ относится к крупнейшим мероприятиям, меняющим природную среду в масштабе, соизмеримом с влиянием сельского хозяйства, урбанизации, гидромелиорации и добычи полезных ископаемых [9].

Один из немногих положительных антропогенных эффектов водохранилищ, как отметил С.Л. Вендров [10], заключается в увеличении почти вдвое меженного стока рек. Однако при этом продолжительность водообмена в реках, озёрах, речных бассейнах может отклоняться в неблагоприятную сторону, что ухудшает их способность к самоочищению и, соответственно, качество воды. Г.П. Калинин приблизительно определил, что уже к 1960 г. продолжительность водообмена в реках планеты удвоилась — с 20 до 40 суток [11]. К 1980-м годам, после почти полного зарегулирования Волги путём строительства каскада ГЭС и водохранилищ, водообмен в её бассейне замедлился в 8–10 раз [5]. Изменения ниже гидроузлов, в нижнем бьефе, обусловлены всё возрастающим безвозвратным изъятием и нарушением режима водного и гидрохимического стока. Искусственные водоёмы стали гигантскими отстойниками, в результате чего резко снижается сток взвешенных и растворённых веществ, в том числе минеральных, органических, биогенных и микроэлементов. Например, поступление твёрдых веществ в Каспийское море с Волжского бассейна уменьшилось более чем вдвое, биогенов и, особенно, фосфатов — в 3 раза. Сокращается поступление воды в устьевые области рек, крупные озёра и моря. Водоохранилища стали причиной резкого увеличения потерь воды за счёт испарения, а также безвозвратного водопотребления в поддерживаемых ими водохозяйственных системах. По данным Г.В. Воропаева [12], уже к 1980-м годам приток пресных вод в Каспийское море снизился на 35–40 км³ (почти

на 15%), в Азовское — на 13 км³ (более чем на 30%), в Аральское — на 75–80 км³ (на 70%). В настоящее время безвозвратные потери возросли во много раз и вызвали экологическую катастрофу Аральского моря и проблемы с Азовским морем [13].

Масштабные изменения режима, качества и пространственного распределения водных масс, переносимых ими потоков вещества объясняют не только прогнозируемые последствия, но и не менее значимые *экологические проблемы* — совокупность процессов трансформации природной среды и ответных реакций экосистем, природных комплексов и их компонентов. Сложность изучения и оценки экологических последствий обусловлена тем, что они, с одной стороны, развиваются скрытно, пока количественные параметры среды не достигают критических значений, что приводит к заметным сдвигам в биоте. С другой стороны, последствия следуют по цепочке трансформаций природных факторов и могут быть удалены от источника исходного воздействия, поэтому они долго не получали объективной оценки. Поначалу преимущественно рассматривались трансформации самих водохранилищ и территорий, непосредственно прилегающих к ним. Усилиями многих учёных [2, 3, 8, 9, 14–18] были изучены и оценены отдалённые в пространстве и времени процессы и явления в районах сокращения стока и его аккумуляции, а также пространственно-временные изменения экосистем самих водоёмов и их побережий.

Трансформации природных комплексов, классифицированные как негативные, потребовали разработки природоохранных мероприятий — подходов и методов, ослабляющих или компенсирующих их развитие [19–23]. В таблице 1 систематизированы процессы, явления, события и задачи, связанные с сооружением и функционированием водохранилищ. Наиболее важные компоненты будут подробнее рассмотрены ниже.

Организация водохранилищ затрагивает территорию речной долины ниже по течению, дельту и приёмный водоём. Ведущим фактором трансформации среды на каждом из участков выступает изменение речного стока: его объёма и режима, качества воды. Поэтому основные природоохранные мероприятия для решения возникающих экологических проблем нацелены на регулирование показателей речного стока [24, 25]. Природоохранная научная и практическая деятельность в России активно развивается, и для бассейновых округов разработаны схемы комплексного использования и охраны водных объектов (СКИОВО) и нормативы допустимого воздействия (НДВ) хозяйственной и иной деятельности на водные объекты, включая установление безвозвратного изъятия стока, экологического стока и попусков. Однако в большинстве речных бассейнов страны экологический сток, в том числе попуски, на практике не реализуется, что ухудшает состояние водных и пойменных экосистем [26].

Таблица 1. Пространственно-временные процессы трансформации среды, ответные реакции биоты, мероприятия по охране

Участок реки	Трансформация среды	Превентивные природоохранные меры	Ответные реакции экосистем	Природоохранные меры в период функционирования водохранилища	
Подготовительный этап – создание ложа водохранилища и строительство плотины					
Верхний бьеф, участок реки выше плотины	– Исчезновение биотопов, характерных для территории будущего ложа водохранилища; – фрагментация среды обитания многих видов фауны; – переселение жителей; – изменение инфраструктуры обширной территории (дороги, населённые пункты, постройки)	– Расчистка ложа водохранилища от лесной и кустарниковой растительности; – борьба с браконьерством; – планирование и разработка компенсационных мероприятий для поддержания биоразнообразия; – создание специальных проходных сооружений для животных	– Снижение численности многих видов фауны и флоры; – исчезновение редких видов	–	
	Наполнение водохранилища				
	– Затопление обширных участков суши под ложе водохранилища; – утрата высокопродуктивных пойменных и более удалённых от первоначального русла земель	– Временный запрет охоты; – долговременный запрет на ловлю рыб-реофилов; – биотехнические мероприятия по спасению животных на островах; – предотвращение гибели животных на пути их миграции при ледоставе	– Гибель локальной флоры и фауны пойм; – гибель мигрирующих животных при пересечении возникших больших водной и ледовой преград	Реализация компенсационных мероприятий в виде создания особо охраняемых природных территорий (ООПТ)	
	Функционирование водохранилища				
Изменения водной среды: – замедление проточности; – переработка берегов; – заиление чаши; – изменение температурного режима; – повышение минерализации воды; – обнажение обширных участков дна в летний период	– Создание проходов в плотинах для мигрирующих видов рыб; – определение водоохранной зоны на побережье и контроль за соблюдением режима природопользования на ней; – регулирование режима работы водохранилища, исходя из условий обитания биоты на водоёме и побережье	Изменение водной речной экосистемы: – замена реофильной фауны на лимнофильную; – снижение воспроизводства ценных промысловых видов рыб; – эвтрофирование Гидроморфизация природных комплексов побережий, вселение сорных и инвазионных видов растений	– Берегоукрепление, в том числе лесомелиорация побережий; – контроль за величиной суточного колебания уровня водохранилища (не более 50 см); – контроль за мелководной зоной и регулирование зарастания прибрежной зоны (не более 7–10%); – недопущение хозяйственной деятельности на территории водоохранной зоны		

Продолжение таблицы 1 на 333 с.

Таблица 1 (продолжение)

Участок реки	Трансформация среды	Превентивные природоохранные меры	Ответные реакции экосистем	Природоохранные меры в период функционирования водохранилища
	<p>Гидрогенная трансформация среды на побе-режье:</p> <ul style="list-style-type: none"> – периодическое заливание; – подтопление (подпор и разбавление грунтовых вод); – смыв гумусового горизонта почв; – перекрытие почв песчаными отложениями; – развитие окислительно-восстановительных реакций в почвах 			
<p>Нижний бьеф, участок реки ниже плотины</p>	<p>Изменение внутригодового распределения стока:</p> <ul style="list-style-type: none"> – сокращение объёма стока; – сокращение объёма весенних паводков и сроков их прохождения; – изменение температурного режима воды в паводок; – заглубление грунтовых вод; – трансгрессивная эрозия в приплотинной части; – осуходоливание поймы; – зимние паводки, затопление зимующих видов 	<p>Разработка правил управления работой водохранилища, включая:</p> <ul style="list-style-type: none"> – расчёт и установление предельно допустимого изъятия речного стока из водохранилища; – расчёт и установление режима и объёмов экологических попусков в нижний бьеф; – учёт работы водохранилища в системе каскада водохранилищ 	<ul style="list-style-type: none"> – Уменьшение воспроизводства ихтиофауны; – снижение рыбопродуктивности реки; – сукцессионные процессы в растительном покрове в сторону ксерофитизации; – гибель животных и прибрежной водной растительности при зимних паводках 	<p>Контроль за соблюдением правил управления работой водохранилища на основе предусмотренных объёмов и режимов:</p> <ul style="list-style-type: none"> – предельно допустимое изъятие речного стока из водохранилища; – режим и объёмы экологических попусков в нижний бьеф
<p>Дельта</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Сокращение стока воды и взвешенных веществ; – осолонение воды водоёмов и проток; – разрушение внешнего края дельты; – переформирование гидрографической сети (сокращение числа проток и дельтовых водоёмов, сосредоточение речного стока в основных руслах) 	<p>Разработка мероприятий по сохранению биоразнообразия и искусственному обводнению дельты</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Нарушение литоморфопедагогеза (формирования элементов рельефа и почвообразования); – ухудшение плодородия почв; – обеднение численности видов и биоразнообразия водных и наземных экосистем; – снижение продуктивности угодий 	<p>–</p>

Окончание таблицы 1 на 334 с.

Таблица 1 (окончание)

Участок реки	Трансформация среды	Превентивные природоохранные меры	Ответные реакции экосистем	Природоохранные меры в период функционирования водохранилища
Приёмный водоём (замкнутый)	<ul style="list-style-type: none"> – Снижение притока воды; – возрастание минерализации воды; – сокращение твёрдого стока; – образование обширных участков обсохшего дна; – вынос тонкодисперсного материала и возникновение пыльных бурь; – понижение уровня вплоть до усыхания водоёма 	<p>Разработка мероприятий:</p> <ul style="list-style-type: none"> – по искусственному зарыблению осоложняющихся водоёмов солеустойчивыми видами; – закрепление растительностью обсыхающих участков дна водоёма 	<ul style="list-style-type: none"> – Трансформация пресноводной экосистемы в солоноватоводную и гипергалинную; – снижение численности и разнообразия промысловых видов рыб; – превращение хозяйственных водоёмов в непригодные для хозяйства 	–

Источник: составлено по [1, 2, 16, 19, 20, 22].

Благодаря натурным исследованиям и анализу накопленных знаний была выявлена географическая детерминированность процессов перестройки биоты [18, 23, 27]. Иными словами, ответные реакции биоты зависят не только от вмещающих ландшафтов, определяющих направление и скорость перестройки среды, но и от того, что они зонально специфичны: в новых условиях формируются биокомплексы по типу эдафических (почвенных) вариантов, присущих данной природной зоне.

Цель настоящей работы – на основе современных данных показать, какие экологические последствия в степной зоне влечёт создание искусственных водоёмов для наземных экосистем не только на территории побережья, прилегающего к водоёму, но и вниз по течению, вплоть до приёмного водного объекта. Мы постарались более подробно разобрать основные особенности воздействия водохранилища на экосистемы побережья и их компоненты (почвы, растительность) на примере водохранилищ степной зоны России; систематизировать главные экологические последствия и проблемы в нижнем бьефе и на дельтовых участках; охарактеризовать разработанные природоохранные мероприятия и рассмотреть научные позиции в отношении спуска водохранилищ, а также экологические аспекты этой проблемы. Из всех природно-климатических зон России больше всего водохранилищ сконцентрировано в степной зоне. Они играют решающую роль в водообеспечении сельского хозяйства, при этом именно степные водохранилища по сравнению с таковыми в других зонах активнее влияют на окружающую среду и бы-

стрее претерпевают неизбежные трансформации под воздействием природных и антропогенных факторов.

Материалы и методы. Материалами послужили данные собственных многолетних полевых работ на водохранилищах степной зоны и научные публикации по экологическим проблемам водохранилищ в бассейнах Дона, Кубани и Волги. Исследования по проблемам усыхания Аральского моря и сохранения экосистем в дельте Амударьи 1980–2000 гг. в пустынной зоне [28, 29] позволили понять механизм гидрогенной трансформации среды при резком (периодически полном) сокращении притока речной воды к дельте и бессточному приёмному водоёму. Кроме того, привлечены новейшие результаты анализа природоохранных проблем водохранилищ на территории Сибири [16, 22, 26].

Общей теоретической платформой исследований стало представление о том, что водный фактор играет ведущую роль в трансформации исходных ландшафтов. В результате его комплексного воздействия на прилегающие территории исходные автоморфные ландшафты приобретают черты и свойства полу- и гидроморфных. В степных районах в дополнение к водному фактору появляется сопутствующий – засоление, определяющее ещё одну ветвь сукцессионных смен биоты.

Основной методический приём – комплексное рассмотрение изменений, вызванных вновь созданным водным объектом выше и ниже гидроузла, на разных участках реки, в дельте и приёмном водоёме. Под “водным фактором” понимается колебание режима не только поверхностных, но и связанных с ними

подземных вод, определяющих возрастание или сокращение гидроморфизма в условиях смены режима заливания и глубины залегания подземных вод. Ответные реакции биоты детерминированы не только географически, но и экологически. При изменении водного и солевого режимов биотопов появляются виды соответствующей экологической группы. Для изучения и выявления развития современного гидроморфизма на локальном, ландшафтном и региональном уровнях была разработана система критериев и показателей [23, 30] (табл. 2) и специальные методики [21].

В исследованиях используются показатели и критерии водного фактора и компонентов экосистем (почв, флоры, фауны). Почвенные показатели можно отнести к категории консервативных, их изменение происходит медленно и отражает тренды процессов трансформации водного фактора, в то

время как флора и фауна реагируют активно и непосредственно на флуктуации.

Результаты и обсуждение. Верхний бьеф гидроузла. Водоохранилища в долинах равнинных рек (в отличие от горных) характеризуются значительной площадью водного зеркала и затопления земель на единицу объёма, небольшой максимальной (обычно не более 25 м) и средней (5–10 м) глубинами, относительно умеренным падением уровня при сработке (2–7 м) с большими вариациями площади зеркала и обнажающегося дна, высокой интенсивностью переработки берегов. Длина равнинного водоохранилища превышает ширину. Наибольшая ширина – в приплотинной части в зоне подпора. Здесь сильнее всего развивается эрозия, дно максимально обнажается при сработке уровня.

Многие исследователи показали [5, 9, 15, 23, 30–34], что в результате изменения водного режима

Таблица 2. Индикаторы гидроморфизма

Показатель		Критерий	
Водный фактор	Атмосферное увлажнение	Радиационный индекс сухости, соотношение тепла и влаги (М.И. Будыко)	тундра – 0.5; лесная зона – от 0.5 до 1; степная – от 1 до 2; полупустынная > 2; пустынная > 3
		Гидротермический коэффициент Г.Т. Селянинова, ГТК=10P/ΣT	ГТК > 1 – гумидное; ГТК =1 – субгумидное; ГТК =1<0.5 – субаридное; ГТК <0.5 – аридное
	Поверхностные воды	Заливание (длительность и частота)	слабое – 10–15 дней, не ежегодное; среднее – 16–40 дней, ежегодное; сильное – более 40 дней, ежегодное
	Грунтовые воды (по глубине залегания)	Режим подтопления	сильное – 0.3–1 м; умеренное – 1.25 м; слабое – 2.5–5 м
Водный режим почв		гидроморфный – 0–1.5 м; полугидроморфный – 1.5–3 м; автоморфный > 3 м	
Почвы	– Повышенная мощность гумусового горизонта (А+В): для луговатых и луговых почв – более 130 см, для влажно-луговых – более 100 см; – признаки современных окислительно-восстановительных процессов: гидроокисные плёнки железа (охристые пятна), сизоватость, включение марганцево-железистых новообразований (слабое проявление лугового процесса – от 1 до 2 м, активный луговой процесс (под гумусовым горизонтом) – от 50 до 80 см); – признаки глеевого процесса; – глубина наличия первичного и вторичного гипса (для степной зоны), свидетельство поднятия/опускания капиллярной каймы грунтовых вод; – глубина карбонатной плесени или размытых палевых пятен белоглазки (CaCO ₃)		
Растительность	Структура сообществ по соотношению видового богатства и численности: – жизненные формы растений; – отношение к условиям водного режима (гигрофиты, гидрофиты, мезофиты, ксерофиты); – тип водного питания (фреатофиты, трихогидрофиты, омброфиты); – засоление почв (мезофиты, мезогалофиты, галофиты); – функционирование сообществ (запасы и структура фитомассы)		
Животные	Численность, плотность популяций индикаторных групп видов		

участка реки и превращения его в водохранилище на открытом побережье активизируются абразионные процессы. Под влиянием длительного затопления и волновой деятельности на периодически обнажающемся дне полностью разрушаются исходные природные комплексы. На участках побережья, подверженных кратковременному заливанню, одновременно идёт смыв верхних горизонтов почв и накопление на поверхности отложений, принесённых водой в паводок, формируются гидроморфные и полугидроморфные почвы и растительные сообщества; здесь и на прилегающей территории происходит активное пополнение и подпор грунтовых вод. На незаливаемых участках, где грунтовые воды залегают ближе 3–5 м от поверхности, идёт формирование полугидроморфных природных комплексов. Существовавшие в исходном ландшафте почвы, растительность и животное население в процессе адаптации к новым условиям водного режима в разной степени преобразуются в зависимости от гидролого-геоморфологического состояния биотопов и их зональной приуроченности.

Водоохранилище: внутриводоёмные процессы и изменение экосистем. Многие негативные экологические проблемы, в частности ухудшение качества воды и снижение рыбопродуктивности, связывают с тем, что водохранилища замедляют водообмен в гидрографической сети речных бассейнов. Так, после сооружения каскада водохранилищ, водообмен в бассейнах Волги и Днепра замедлился в 7–11 раз [4]. Экологическим следствием стала смена реофильной флоры и фауны на лимнофильную, однако в то же время повысилась рыбопродуктивность и способность новой экосистемы к самоочищению. Наибольшие проблемы для водопользования, прежде всего в субаридных и аридных районах, создают эвтрофирование, переформирование берегов и накопление наносов (заиление), осолонение воды.

Эвтрофирование — аномально высокое содержание биогенных веществ в воде. Благоприятная ситуация для развития эвтрофирования складывается в самом водоёме из-за замедления в нём водообмена, стратификации водной массы и образования обеднённых кислородом придонных слоёв. Основные источники биогенов — сельскохозяйственные угодья (пашня и пастбища), животноводческие фермы, урбанизированные территории, автостроды. Большую роль в поставке биогенов в первые годы существования водохранилища играет абразия. Часто биогенные элементы в водоёмы привносятся более загрязнёнными притоками — малыми реками. На первой стадии эвтрофирование выглядит положительно, так как в только что образованном водоёме быстро повышается продуктивность всех населяющих его организмов, в том числе рыб (за счёт малоценных видов) [7]. Затем численность ценных промысловых рыб постепенно снижается. В конечной фазе развиваются заморные явления,

и наступает омертвление водоёма. Оно происходит из-за того, что количество отмирающего фитопланктона становится очень большим, и на окисление мёртвого органического вещества расходуется почти весь растворённый кислород. В южных районах из-за сильного прогревания происходит цветение воды — массовое развитие сине-зелёных водорослей, что особенно характерно для Цимлянского водохранилища.

Заиление. Организация водохранилища может быть лишена всякого смысла, если не опираться на обоснованный прогноз темпов его будущего заиления. Известны водохранилища, занятые наносами настолько, что они больше не способны выполнять функции накопителя и регулятора речных вод. Исследования последних лет показали, что в Цимлянском водохранилище исходный рельеф дна заполнен наносами, оно выположено (снижена наклонная поверхность), что затрудняет судоходство, обеспечение которого — одна из главных функций гидроузла.

Донные отложения водохранилища формируются за счёт автохтонного органического вещества, ежегодно поступающего в осадок, и аллохтонного вещества — приносимых рекой и притоками наносов, продуктов разрушения берегов и мелководий, эолового материала, антропогенных сбросов. В водохранилищах оседает от 85 до 97% речных наносов. Американские исследователи, ссылаясь на статистические данные, связывают скорость заиления с размерами водохранилищ. Наиболее крупные заиляются медленнее и в год теряют менее 1% объёма, а мелкие — до 3%.

Переформирование берегов — наиболее агрессивный процесс, инициирующий прочие негативные последствия внутри водоёма. Именно размыв берегов составляет основной материал для заиления. Его природные предпосылки — рыхлые породы, крутосклонность и приглубость берегов, развитие оползней, отсутствие или сильная нарушенность водной и наземной растительности, ветровое волнение, удаление продуктов абразии вдольбереговыми течениями, перемещение контакта вода—берег в течение года.

В развитии берегов выделяют два периода. Первый — становление, во время которого преобладает эрозия. Второй — стабилизация, когда определяющими являются процессы аккумуляции. Однако наши наблюдения показывают, что стабилизация может и не наступить. Переформирование берегов всё ещё активно протекает на побережье Цимлянского водохранилища, сложенного лёссами. Согласно исследованиям [35], они очень близки к прогнозу, сделанному на начальном этапе создания этого водоёма. Для правого берега водохранилища характерно более медленное смещение береговой линии — со средней скоростью от 1.28 м/год (Нижний Чир) до 2.83 м/год (Хорошевская), а также замед-

ление этого процесса со временем. Смещение береговой линии левобережья изменяется от 2.82 м/год (Ильмень-Суворовский) до 6.34 м/год (Приморский) и, напротив, активизируется. За прошедшие более 50 лет берег отступил на расстояние от 64.18 м у посёлка Нижний Чир до 323.72 м у хутора Приморского. Выявлена общая закономерность: наибольшие величины смещения береговой линии водохранилища имеют место на приплотинном участке и уменьшаются по мере удаления от него вверх по течению. Таким образом, нужно решать серьёзнейшую проблему водохранилищ, созданных в степных районах на лёссовых отложениях, — предотвращать размыв побережий. С этой целью проводится важное природоохранное мероприятие — отсыпка побережий камнем или, в наиболее сложных случаях, укрепление каменными блоками, как было сделано в 2010-х годах на Цимлянском водохранилище у Хорошевой.

Осолонение воды. Минерализация и химизм поверхностных и подземных вод в зоне влияния водохранилищ соответствует эколого-географическим условиям вмещающих ландшафтов: с севера на юг в степной зоне минерализация воды возрастает от пресной (0.2–0.5 г/л) до солоноватой и солёной (1–3 и 3–10 г/л соответственно), а химизм изменяется с гидрокарбонатного в настоящих степях (Краснодарское) на хлоридно-сульфатный и сульфатно-хлоридный в сухостепных ландшафтах (Цимлянское). Повышение минерализации особенно характерно для небольших водоёмов на юге степной зоны, в её сухостепной подзоне. Как показали исследования в Калмыкии [36, 37], со временем минерализация водохранилищ, предназначенных для питьевого водоснабжения населения и скота, возрастает и достигает значений, при которых дальнейшее их использование становится затруднительно. Одновременно падает рыбопродуктивность.

Трансформация природных комплексов побережий водохранилищ происходит под прямым воздействием водного фактора путём заливания и подтопления, параметры которых зависят от колебания уровня водохранилища. Ежегодное изменение уровня влияет на природные комплексы всей территории побережья, и этот ведущий фактор зависит от водности года и поддаётся управлению. Анализ ежегодного хода уровня воды Цимлянского водохранилища (по данным управления гидроузлом, рис. 1) показывает, что за 7 лет наших наблюдений только в 2004, 2006 и 2008 гг. происходило затопление побережья. В остальные годы вода не доходила до берегового уступа, иногда — в течение нескольких лет подряд (2009–2013). Участки дна, освободившиеся от воды, стали покрываться проростками ив и тополей. Самый низкий уровень отмечался в 2011 г.: в осенне-зимний период он приблизился к отметке мёртвого объёма, а годовая амплитуда колебания была чуть выше 2 м (при 4 м в начале эксплуатации водохранилища).

Анализ годовых колебаний на Цимлянском водохранилище за 1951–2010 гг. выявил статистически значимую тенденцию снижения внутrigодового разброса значений уровня на 2 м с момента создания в 1951 г.

Грунтовые воды. На заливаемых участках побережья Цимлянского водохранилища глубина грунтовых вод после заливания — 0.5–1.5 м, на подтопленных — до 3 м и более. К осени грунтовые воды заглубляются по сравнению с весной в среднем на 1.5–2 м, минерализация увеличивается незначительно. Наблюдения за глубиной вскрытия грунтовых вод и установившимся уровнем на скважинах позволили выявить наличие напора.

Вода водохранилищ менее минерализована, чем грунтовые воды, и опресняет их. Это подтверждается тем, что на заливаемом участке, расположенном ближе к урезу воды, грунтовые воды оказываются менее минерализованными, чем на следующем за ним более удалённом незаливаемом. Однако в зоне сработки, на обнажающемся дне, вскрытие расположенных близко к поверхности грунтовых вод нередко показывает, что их минерализация в несколько раз выше воды водохранилища.

Минерализация и химизм поверхностных и подземных вод в зоне влияния водохранилищ (табл. 3) соответствуют эколого-географическим условиям вмещающих ландшафтов: с севера на юг минерализация воды водохранилищ возрастает, а химизм изменяется с гидрокарбонатного в настоящих степях (Краснодарское) на хлоридно-сульфатный и на сульфатно-хлоридный — в сухих (Цимлянское). В подзоне сухих степей рост минерализации воды водохранилищ и подземных вод усиливается региональными геологическими условиями — расположением маньчжских водохранилищ (Веселовское и Пролетарское) на морских сильно засоленных отложениях.

Исследования 2004–2013 гг. показали, что наиболее глубокие изменения в результате дополни-

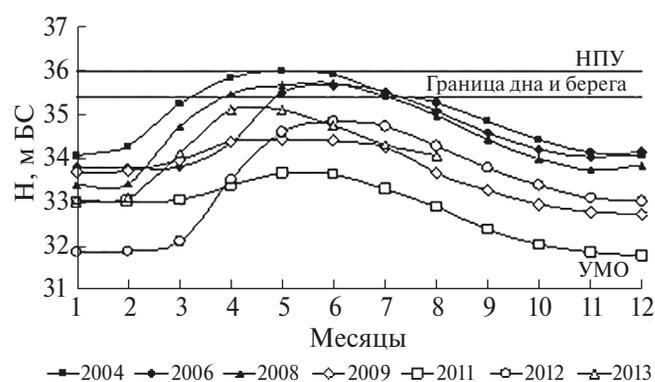


Рис. 1. Изменение уровня Цимлянского водохранилища за годы наблюдений
НПУ — нормальный подпорный уровень; УМО — уровень мёртвого объёма

тельного увлажнения происходят с растительностью: в степи и пустыне формируются аazonальные луговые и древесно-кустарниковые сообщества [32]. В составе фауны, особенно орнитокомплексов, появляются виды, характерные для водно-болотных биотопов. Водохранилища создают благоприятные условия для остановок сезонно мигрирующих птиц и поддерживают экологический каркас на региональном уровне, сохраняя редкие и охраняемые виды [37, 38].

Почвы побережий, как оказалось, претерпевают меньшую трансформацию вследствие заливания, однако во время кратковременного затопления сильно нарушается гумусовый горизонт: он либо разрушается, либо перекрывается песчаными или илистыми наносами. Особенность аридных районов – высокое залегание грунтовых вод на побережьях водохранилищ, что способствует накоплению солей; в результате почвы в зоне затопления и подтопления трансформируются в засоленные и солончаковые типы. В весенне-летний период в водохранилище в исходных зональных автоморфных почвах развивается глеевый процесс, выявляемый по наличию гидроокислов железа и присутствию сизоватых тонов в почвенном профиле. На Цимлянском водохранилище в сухостепных сухих аллювиальных аккумулятивных и сухостепных сухих лёссовых аккумулятивных ландшафтах произошли наиболее глубокие изменения почв на побережье, в них проявились все индикаторы вторичного гидроморфизма почв, указанные в таблице 2.

Основное мероприятие, направленное на снижение антропогенного воздействия на водохранилище (перехват загрязняющих веществ, поступающих с водосборов, которые заняты в этой зоне сельскохозяйственными полями, и недопущение хозяйственной деятельности) – организация водоохранной зоны. Её ширина, установленная для рассмотренных водохранилищ степной зоны, составляет 200 м, согласно современному законодательству (Водный кодекс РФ, № 74-ФЗ от 03.06.2006 г., ст. 65). Тем не менее эффект, оказываемый водохранилищами на побережье через подпор грунтовых вод, гораздо сильнее: на южном побережье Краснодарского во-

дохранилища максимальное удаление этой границы от уреза воды в межень проходит на расстоянии 560 м, на Цимлянском – 300 м, на Веселовском – 541 м и только на Пролетарском – 107 м. Водоохранная зона в таких случаях не может выполнять своих функций, так как располагающиеся близко к поверхности грунтовые воды (<3 м) могут легко пополняться за счёт поверхностного стока.

Природоохранная роль водохранилищ. Этот аспект обсуждается редко, в то время как в степной и, особенно, пустынной зонах природоохранная роль искусственных водоёмов проявляется наиболее ярко и положительно. Благодаря обратным экологическим связям формирующиеся на побережьях системы природных комплексов способствуют предотвращению загрязнения, засорения, заиления и истощения водных объектов. Они предупреждают эрозионные процессы, поддерживают стабильный гидрохимический режим [39]. Возникают редко встречающиеся в естественных условиях гидроморфные биотопы, поддерживая таким образом полноту природного биоразнообразия. На побережье Цимлянского водохранилища в 2004–2012 гг. в зоне его прямого (заливание) и косвенного (подтопление) влияния обнаружены 4 подтипа и 11 разновидностей почв с различными проявлениями признаков гидроморфизма в почвенном профиле, а также 253 вида растений и 138 видов птиц [38].

В степных и пустынных районах при условии организации заповедников и заказников на основе искусственных водоёмов может быть сформирован экологический каркас, в котором ООПТ будут служить ядрами концентрации биоты гидроморфных биотопов. Примером может послужить Республика Калмыкия, где с 1936 г. по настоящее время создано 256 искусственных водных объектов (в большинстве своём малых), а более 20 заповедано. Исследования С.С. Улановой [36, 37] показали, что на водоёмах Калмыкии присутствуют 6 типов почв гидроморфного ряда и один – полугидроморфного. Все почвы засолены. Флористическое богатство представлено 179 видами, фитоценотическое – 53 ассоциациями 24 формаций. Орнитофауна составляет 171 вид птиц, в том числе 22 вида, включённые в Красную

Таблица 3. Гидрохимические показатели поверхностных и грунтовых вод побережий водохранилищ

Показатель	Водохранилище			
	Краснодарское	Цимлянское	Веселовское	Пролетарское
Минерализация воды водохранилища, г/л	0.1–0.21	0.28–0.86	2.06–2.92	1.80–9.3
Тип засоления воды	SO ₄ –HCO ₃	Cl–SO ₄	Cl–SO ₄	Cl–SO ₄
Минерализация грунтовых вод, г/л	0.11–5	0.45–13.42	4.34–52.01	5.40–30.9
Тип засоления грунтовых вод	SO ₄ –HCO ₃	SO ₄ –Cl	Cl–SO ₄	SO ₄ –Cl

книгу РФ. Со временем водохозяйственная роль искусственных водоёмов уменьшается, однако усиливается средообразующая функция. Наиболее крупные водоёмы являются заповедниками местного и федерального значения, служат опорными элементами экологического каркаса территории, способствуют увеличению ландшафтного и биологического разнообразия на уровне региона.

Нижний бьеф — участок реки ниже плотины гидроузла. В этой части долины реки экологические процессы и трансформация природных комплексов (см. табл. 1) связаны с изменением объёма и режима стока и уменьшением взвешенных наносов (осветление воды). Снижение уровня затопления поймы или его прекращение в весенне-летний период приводит к сокращению площади кормовых угодий и кормовой базы всех видов рыб и, следовательно, к резкому спаду их воспроизводства. Страдают урожайность луговой растительности (кормовая база) и ухудшаются условия размножения водоплавающих птиц и млекопитающих [40, 41].

Здесь в наибольшей степени проявляются последствия изменений режима реки, определяемых Правилами использования водохранилища и пусков в нижний бьеф. На территории России водохранилища обычно наполняются за счёт половодья, поэтому в нижний бьеф весной поступает меньше воды, чем при естественном режиме, но в летне-осенний и зимний периоды — больше. Так, на Нижней Волге после создания каскада водохранилищ весенний сток уменьшился вдвое, летне-осенний увеличился в 1.5 раза, а зимний вырос в 2.8 раза. Экологическим следствием этого стало осуходоливание поймы, так как самые высокие её отметки — гривы и прирусловая высокая пойма — перестали заливаться [40]. Кроме того, происходит нарушение режима грунтовых вод: они заглубляются, амплитуда их внутригодового колебания сильно сокращается, в результате чего больше всех страдают древесные виды. Так, в пойме Волги гибель дубов связывают именно с этим явлением. Высопродуктивные луговые ценозы теряют урожайность и качество, в их состав внедряются так называемые неподаваемые виды, например, в нижнем бьефе Новосибирского водохранилища на расстоянии около 100 км от гидроузла произошло замещение луговой растительности сорнотравьем с доминированием хрена (*Armoracia rusticana*) [42].

Осуходоливание усиливается трансгрессивной эрозией в русле реки, которая начинается на приплотинном участке и распространяется вниз по течению со скоростью до нескольких десятков километров в год. Так, на Новосибирском водохранилище этот процесс развивался вниз по течению от гидроузла со скоростью 12–15 км в год и к настоящему времени охватил участок в 300 км [43]. Одновременно происходит углубление русла. В частности, на Волге, ниже плотины Волжского гидроузла,

выявлено углубление на 1.5 м, в результате чего уменьшилось заливание прибрежных территорий: пойменные участки перешли в режим надпойменных террас [40].

Зимняя полынья возникает из-за того, что зимой при температуре воздуха ниже 0°C в нижний бьеф из водохранилища сбрасывается вода температурой 8–9°C, и участок реки, прилегающий к плотине, не замерзает, либо ледовый покров остаётся непрочным на протяжении нескольких километров. Это служит непреодолимым препятствием для мигрирующих животных, случается их массовая гибель, особенно в первые годы после создания гидроузла, в результате сильно подрывается их численность. Это явление, особенно характерное для малонаселённых районов Сибири, описано в работе [16].

Зимние паводки типичны для нижнего бьефа водохранилищ с ГЭС. Зимний сток здесь имеет гораздо большие объёмы, чем при естественном режиме. Вода расплывается по поверхности льда и губит флору и фауну. Зимние паводки характерны для нижнего бьефа Волгоградского гидроузла. Для уменьшения опасности таких паводков следует корректировать режим работы ГЭС в зимний период.

Плотины создают большие проблемы для ценных промысловых видов рыб [20, 41]. Гидроузел становится преградой для нерестовых миграций проходных рыб, рыбопропускные сооружения даже лучших конструкций и в хорошем состоянии не обеспечивают массового безопасного прохода рыбы к нерестилищам, некоторые из которых вообще оказываются недоступными. Из-за изменений водного режима и условий обводнения оставшиеся нерестилища, по крайней мере в отдельные годы, высыхают прежде, чем мальки успевают их покинуть. Гидростроительство стало главной причиной катастрофического сокращения численности ценных видов рыбы на Волге и Дону — реках, зарегулированных водохранилищами. В совокупности с другими неблагоприятными факторами это поставило под угрозу исчезновения осетровых в бассейнах Каспийского и Азовского морей.

Природоохранные мероприятия в нижнем бьефе. Негативные процессы и явления, развивающиеся на разных участках нижнего бьефа гидроузлов, прежде всего снижение биоразнообразия и продуктивности экосистем, могут быть в определённой мере ослаблены, если управлять водохранилищами с учётом очереди путём сокращения безвозвратного изъятия стока по всей длине реки. К настоящему времени разработаны методики расчёта предельно допустимых объёмов изъятия воды, экологического стока и пусков [19]. Они используются в системе управления Волжско-Камским каскадом.

В отношении бассейна Аральского моря программа-минимум на ближайшие годы — экологическая стабилизация. Достижение этой скромной

цели во многом зависит от сохранения суммарного водного стока в дельтах Амударьи и Сырдарьи в объёме 10–15 км³/год [44]. Для этого необходимо провести реконструкцию ирригационных систем, снизить непроизводительные расходы в магистральных водотоках и на полях, провести структурное преобразование растениеводства пяти центрально-азиатских республик, направленное на снижение безвозвратных потерь в сельском хозяйстве за счёт замены на больших площадях водоёмких культур (риса, хлопчатника) менее водоёмкими (сады плодовых культур). Рекомендации были разработаны ещё в 1990 г. [45], однако реализованы не были, и проблема обеспечения минимально необходимого притока речной воды к дельтам и морю продолжает усугубляться [44, 46]. Важным результатом стало сохранение Малого моря – северной части бывшего Аральского моря, изолированной Кокаральской плотиной (2005) от “большого моря” – остаточных водоёмов, деградация которых продолжается. В Малом море благодаря притоку воды Сырдарьи уровень поднялся до 40–42 м (абс.) [44, 46], воссоздалась солонатоводная экосистема Аральского моря. Состояние этого водоёма – индикатор качества управления водным хозяйством и эффективности водопользования в бассейне Сырдарьи. Для более существенного улучшения экологического состояния Приаралья необходимо радикальное преобразование всей гидромелиоративной системы – переход к подземному капельному орошению.

Дельты и приёмные водоёмы. Создание водохранилищ влечёт за собой безвозвратное изъятие воды на хозяйственные нужды, что сокращает приток к дельте и приёмному водоёму. В результате уровень изолированного водоёма падает, и он может исчезнуть, как это случилось с Аральским морем [46, 47]. Большая часть территории его обсохшего дна – солончаковая пустошь. В дельтах рек Амударьи и Сырдарьи, питающих море, идёт опустынивание, охватившее все компоненты природной среды. Как показали исследования [28], в неосвоенной части дельты Амударьи продолжается процесс смены растительного покрова, характерного для пойм, типичным для зональных пустынь. В сообществах древесных тугаев (узкие изолированные друг от друга участки берегов рек с лесной растительностью, типичные для Центральной Азии) он обычно идёт сукцессионным путём, в то время как катастрофические смены характерны преимущественно для травяных и кустарниковых сообществ, особенно галофильных. На месте их гибели образуются долго не зарастающие пустоши, на которых формируется благоприятная обстановка для вселения видов, отличающихся от обитавших в предшествующей экосистеме. По берегам каналов и искусственных водоёмов в локальных гидроморфных условиях с режимом периодического затопления поймы сохраняются и даже вновь образуются растительные сообщества тугайного типа. Данные по засолению почв (солевые профили) дают основание

считать, что соли в настоящее время поступают не из атмосферы, а из залегающих близко к поверхности грунтовых вод.

Спуск водохранилищ. Длительный период эксплуатации действующих водохранилищ (более 70–90 лет) и проявившиеся негативные последствия обусловили возникновение идеи их спуска. В конце XX – начале XXI в. вокруг неё развернулась научная дискуссия. В пользу спуска водохранилищ выдвигались следующие аргументы: приближение гидроузлов к предельному запланированному сроку функционирования, усталость плотин, проблемы нижних бьефов, желание вернуть обширные территории речных плодородных пойм, служившие продуктивными пастбищами и сенокосами, восстановление прежнего качества речной воды и рыбопродуктивности. Аргументы против спуска опирались на то, что реки – мощные транспортные артерии, играющие важную роль в экономике страны, а при спуске водохранилищ судоходство перестанет быть круглогодичным. Будет нанесён ущерб энергетике. Кроме того, на базе каждого водохранилища сформировалась экономическая и социальная значимая водохозяйственная инфраструктура, не позволяющая вносить существенные изменения с экономических позиций. В отношении вероятных негативных экологических последствий высказывалось предположение, что при обнажении дна водохранилища в субэральное развитие вступят обширные территории, сложенные мелкодисперсным материалом, который содержит опасные загрязняющие вещества. Эта территория длительное время не будет зарастать и превратится в источник пыльных бурь, как на Аральском море.

В 1987 г. Госэкспертиза Госплана СССР рассматривала проект “Схемы улучшения технического состояния и благоустройства Рыбинского водохранилища”, предусматривавший снижение его нормального подпорного уровня (в то время 102 м) до минимального навигационного (99.5 м). Оценив прежде всего экономические последствия спуска водохранилища на 2.5 м (его средняя глубина – 5.6 м), эксперты убедительно обосновали заключение о неэффективности проекта. Развивая использованный экспертизой подход, А.Б. Авакян [48] впервые выполнил комплексный и корректный в научном отношении анализ хозяйственных и экологических последствий спуска крупных водохранилищ Волги, Камы, Дона, Днепра. Он пришёл к выводу, что функционирование существующих крупных водохранилищ с полным объёмом 0.1 км³ и более, площадью водного зеркала 500–100 км² экономически актуально, их спуск не решит никаких экологических проблем, напротив, вызовет ряд негативных последствий для ведения хозяйства, сложившейся инфраструктуры, а отрицательные экологические последствия проявятся как на территории ложа самого водохранилища, так и в нижнем бьефе. Из многочисленных негативных исходов наиболее нежелательны:

- прекращение работы ГЭС и необходимость компенсационных мероприятий по выработке электроэнергии;
- разрушение сложившихся транспортных систем, ущерб судоходству, потребность в альтернативных видах транспорта;
- переустройство инфраструктуры объектов, расположенных по берегам спускаемого водохранилища;
- увеличение паводковой опасности в нижних бьефах;
- уменьшение самоочищающей и разбавляющей способности рек, особенно в меженный период;
- добавление в период спуска к сбрасываемым водам огромной массы загрязняющих веществ, накопленных в донных отложениях;
- разрушение экосистем водохранилища и прилегающих территорий; ложе спущенных водохранилищ долго не будет зарастать и потребует длительных и весьма дорогостоящих работ по рекультивации.

В отношении спуска водохранилищ в итоге сложилось мнение, что это может быть целесообразным только для малых (полный объём < 0.01 км³, площадь водного зеркала < 2 км²), небольших (полный объём 0.01–0.1 км³, площадь водного зеркала 2–20 км²) и, в исключительных случаях, средних водохранилищ сезонного регулирования по следующим показаниям:

- аварийное состояние гидросооружений напорного фронта;
- бесхозность водоёма, отсутствие собственника гидротехнического сооружения, потеря водохозяйственного значения;
- длительный срок эксплуатации сооружений, заиливание мёртвого объёма водохранилища, интенсивное зарастание мелководий;
- негативное влияние на водные ресурсы (неоправданно большие потери стока на испарение, цветение воды, вторичное загрязнение протекающих вод донными отложениями).

Спуск малых водохранилищ актуален сам по себе, так как на территории России до 50% построенных ранее малых водохранилищ и прудов утратили своё экономическое значение, до 70% малых искусственных водоёмов создавались хозяйственным способом и не имеют технической документации, около 10% являются бесхозными, 25% находятся в аварийном состоянии, 40% эксплуатируются более 30 лет [49].

Мелиоративные работы после спуска малых водохранилищ потребуют меньших вложений, нежели для крупных, и фитомелиорация обнажившегося дна может завершиться за 5–7 лет, в течение которых экологическая ситуация на территории ложа, побережья и нижнего бьефа будет нестабильной. Для предотвращения развития негативных процессов и явлений разработан перечень работ по техниче-

ской и биологической рекультивации (табл. 4) [49]. Отметим, что предусмотренные мероприятия не имеют зональной специфики.

При рекультивации водный фактор остаётся ведущим, изменение условий влагообеспеченности запустит ряд быстрых смен растительности по градиенту сокращения увлажнения от болотного к луговому и лугово-степному. На прилегающих участках бывшего побережья при снижении уровня грунтовых вод до 3 м сукцессия закончится остепнёнными злаковыми и разнотравными лугами. Трансформация растительности будет опережать развитие почвенного покрова и способствовать ему. Гидро- и фитомелиорация может ускорить формирование устойчивых сообществ, закрепляющих и стабилизирующих динамику почвогрунтов.

Наши наблюдения в приплотинной части Цимлянского водохранилища, где дно на несколько лет освобождалось от воды на расстояние до 700 м, показали [23], что в течение первого года появлялись в основном проростки древесных видов, произрастающих на побережье, на второй-третий год сомкнутость растений возростала за счёт тростника и однолетников. Заболачивание отсутствовало, так как грунтовые воды находились на глубине более 1 м. Мы пришли к выводу, что в случае необходимости спуск водохранилища любого размера может быть осуществлён путём поэтапного понижения уровня, чтобы одновременно обнажалась полоса дна вдоль берега шириной не более 200 м. Так закрепление дна растительностью будет происходить постепенно под контролем мелиоративного состояния территории.

Старение водохранилищ, их заиливание, неудовлетворительное состояние гидротехнических сооружений становятся дополнительными факторами экологической опасности и причиной возникновения чрезвычайных ситуаций. В случае стихийного, неконтролируемого разрушения плотины наибольшую угрозу представляет волна прорыва гидротехнического сооружения, которая влечёт за собой катастрофические последствия: гибель людей и животных, разрушение построек, затопление населённых пунктов, как это имело место на Каховском водохранилище в 2023 г. В Институте водных проблем РАН и Институте географии РАН разработаны основные методические подходы к расчёту параметров волны прорыва, её картографированию и оценке ущерба [50–53]. Экологические последствия, развивающиеся после прохождения волны и спада затопления нижнего бьефа, аналогичны процессам, протекающим при контролируемом спуске водохранилища.

* * *

Экологические последствия строительства и эксплуатации водохранилищ — это ответные реакции экосистем и их компонентов на нарушения водного

Таблица 4. Перечень основных мероприятий по рекультивации ложа спущенных водохранилищ и решаемые при этом экологические проблемы

Стадия	Мероприятия	Решаемые проблемы
Изыскательские и проектные работы	<ul style="list-style-type: none"> – Определение мощности, водно-физических свойств, качественного состава отложений наносов; – анализ проектных материалов по топографическим и гидрогеологическим условиям в ложе водохранилища 	<ul style="list-style-type: none"> – Определение устойчивости отложений наносов к оползанию, водной эрозии, локализация участков с загрязнёнными отложениями, подлежащими удалению; определение пригодности отложений для биологической рекультивации; – выбор расчётной фильтрационной схемы, расчёт продолжительности сработки “вековых” запасов грунтовых вод, прогноз динамики водно-воздушного режима в ложе водохранилища; – разработка проекта рекультивации ложа водохранилища
Технический этап рекультивации	Расчистка русла водотока от иловых отложений или организация спуска воды таким образом, чтобы обеспечить осаждение продуктов размыва на поймах в нижнем бьефе	<ul style="list-style-type: none"> – Предупреждение заиления нижележащих участков русла; – увеличение дренирующей способности русла
	Проведение противоэрозионных мероприятий: устройство системы валов–каналов, регулирование поверхностного стока	Перехват продуктов водной эрозии, недопущение их поступления в водоприёмник до формирования устойчивого растительного покрова в ложе спущенного водохранилища
	Устройство системы нагорно-ловчих каналов	Повышение устойчивости склонов, предупреждение оползней, размыва отложений напорными грунтовыми водами, ускорение сработки грунтовых вод
	<ul style="list-style-type: none"> – Агротехническая обработка, известкование потенциально плодородных участков ложа водохранилища; – землевание неплодородных участков ложа иловыми отложениями с высоким содержанием биогенных и органических веществ; – удаление отложений, загрязнённых тяжёлыми металлами, радионуклидами, или их санация 	Подготовка ложа спущенного водохранилища для биологической рекультивации
Биологическая рекультивация	Создание устойчивого растительного покрова путём регулирования процессов самозарастания или искусственной культивации соответствующих видов водно-болотной и суходольной растительности	Предупреждение водной эрозии, повышение плодородия почв, создание условий для сельскохозяйственного освоения земель
Организация водоохраных зон	Залужение, закустаривание прибрежных полос, организация водорегулирующих лесокустарниковых насаждений, обеспечение режима хозяйственной деятельности в соответствии со статусом водоохранной зоны	Воспроизводство экологически полноценных водных ресурсов

Источник: составлено по [49].

режима, которые зависят от вмещающего ландшафта и зонально специфичны. В современных степных ландшафтах водохранилища стали важным элементом трансформации природной среды. На их побережьях в результате изменения режима речного стока завершились процессы гидрогенной трансформации ландшафтов: сформировались природные комплексы, приуроченные к условиям ежегодного заливания, подтопления и кратковременного освобождения дна от воды. Управляющий фактор их многолетней динамики — ежегодные колебания уровня водохранилища.

Как правило, влияние водохранилищ на побережья распространяется на территории, превышающие ширину их водоохраных зон (для водохранилищ на крупных реках — до 200 м). Это происходит через подпор и разбавление грунтовых вод. В связи с этим представляется целесообразным уточнять ширину водоохраной зоны по границе прямого воздействия водохранилища на побережье. Кроме того, эффект от организации водохранилища косвенно оказывается сильнее из-за овражно-балочной и речной систем. Если учитывать ещё и водохозяйственные системы (особенно обводнительно-оросительные), то общая площадь гидрогенной трансформации природной среды в степной зоне для одного водохранилища составит от сотен до миллионов га. Благодаря искусственным водоёмам в аридных условиях степной зоны возникают гидроморфные биотопы, редко встречающиеся в естественной среде, поддерживается природное биоразнообразие почв, растительности и фауны.

Природоохранная деятельность по смягчению или ликвидации негативных экологических последствий заключается в управлении объёмом, режимом и качеством речного стока. Что касается спуска, то в настоящее время это актуально лишь в случае малых водохранилищ, утративших своё значение, либо бесхозных. При этом могут потребоваться дорогостоящие гидромелиоративные и фитомелиоративные мероприятия. Спуск любых водохранилищ должен проводиться поэтапно и под строгим экологическим контролем.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках Государственного задания Института водных проблем РАН (тема № FMWZ-2022-0002, государственная регистрация 122041100236-4).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Авакян А.Б., Широков В.М.* (1994) Рациональное использование и охрана водных ресурсов. Екатеринбург: Виктор.

2. *Авакян А.Б.* (1982) Водохранилища и окружающая среда. М.: Наука.
3. *Авакян А.Б.* (1982) Reservoirs and the environment. Moscow: Science. (In Russ.)
3. *Кочарян А.Г., Лебедева И.П.* (2014) Гидроэкология: водохранилища — баланс противоречий // Инженерная экология. № 5. С. 13–31.
4. *Кочарян А.Г., Лебедева И.П.* (2014) Hydroecology: reservoirs — a balance of contradictions. Engineering ecology, no. 5, pp. 13–31. (In Russ.)
4. *Михайлов В.Н., Добровольский А.Д., Добролюбов С.А.* (2005) Гидрология: учебник для вузов. М.: Высшая школа.
5. *Михайлов В.Н., Добровольский А.Д., Добролюбов С.А.* (2005) Hydrology: textbook for universities. Moscow: Higher School. (In Russ.)
5. *Матарзин Ю.М.* (1983) Водохранилища как особые гидрологические объекты // Водные ресурсы. № 6. С. 108–118.
6. *Матарзин Ю.М.* (1983) Reservoirs as special hydrological objects. Water resources, no. 6, pp. 108–118. (In Russ.)
6. *Клиге Р.К., Данилов И.Д., Конищев В.Н.* (1998) История гидросферы. М.: Научный мир.
7. *Клиге Р.К., Данилов И.Д., Конищев В.Н.* (1998) The history of the hydrosphere. Moscow: Scientific world. (In Russ.)
7. *Горшков С.П.* (2001) Концептуальные основы геоэкологии. М.: Желдориздат.
8. *Горшков С.П.* (2001) Conceptual foundations of geoecology. Moscow: Zheldorizdat. (In Russ.)
8. *Авакян А.Б., Лебедева И.П.* (2002) Водохранилища XX века как глобальное географическое явление // Известия РАН. Серия географическая. № 3. С. 13–20.
9. *Авакян А.Б., Лебедева И.П.* (2002) Reservoirs of the twentieth century as a global geographical phenomenon. Izvestiya RAS. Geographical series, no. 3, pp. 13–20. (In Russ.)
9. *Эдельштейн К.К.* (1998) Водохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. М.: Геос.
10. *Эдельштейн К.К.* (1998) Reservoirs of Russia: environmental problems, ways to solve them. Moscow: Geos. (In Russ.)
10. *Вендров С.Л.* (1979) Проблемы преобразования речных систем СССР. Л.: Гидрометеоиздат.
11. *Вендров С.Л.* (1979) Problems of transformation of river systems of the USSR. Leningrad: Hydrometeoizdat. (In Russ.)

11. *Калинин Г.П.* (1970) О гидрологических основах управления режимом вод суши // *Метеорология и гидрология*. № 4. С. 5–9.
Kalinin G.P. (1970) On the hydrological foundations of land water regime management. *Meteorology and hydrology*, no. 4, pp. 5–9. (In Russ.)
12. *Воропаев Г.В.* (1982) Проблемы водообеспечения страны и территориальное перераспределение стока // *Водные ресурсы*. № 6. С. 3–28.
Voropaev G.V. (1982) Problems of the country's water supply and territorial redistribution of runoff. *Water resources*, no. 6, pp. 3–28. (In Russ.)
13. *Болгов М.В., Беляев А.И., Пугачёва А.М. и др.* (2020) Азово-Донская водная проблема // *Водные ресурсы*. № 6. С. 755–766.
Bolgov M.V., Belyaev A.I., Pugacheva A.M. et al. (2020) The Azov-Don water problem. *Water resources*, no. 6, pp. 755–766. (In Russ.)
14. *Кузьмина Ж.В.* (2007) Воздействие низконапорных гидротехнических сооружений на динамику наземных экосистем зоны широколиственных лесов Центральной и Восточной Европы // Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. М.: ИВП РАН.
Kuzmina J.V. (2007) The impact of low-pressure hydraulic structures on the dynamics of terrestrial ecosystems of the zone of broad-leaved forests of Central and Eastern Europe. Abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Geographical Sciences. Moscow: IVP RAS. (In Russ.)
15. *Новикова Н.М., Волкова Н.А., Назаренко О.Г.* (2014) Функционирование экотонных систем побережья Цимлянского водохранилища // *Аридные экосистемы*. № 4 (61). С. 24–35.
Novikova N.M., Volkova N.A., Nazarenko O.G. (2014) Functioning of ecotonic systems of the coast of the Tsimlyansk reservoir. *Arid ecosystems*, no. 4 (61), pp. 24–35. (In Russ.)
16. *Подольский С.А., Игнатенко С.Ю., Дарман Ю.А. и др.* (2004) Проблемы охраны и изучения диких животных при создании горных водохранилищ на примере Бурейского гидроузла / Под ред. С.А. Подольского. М.: РАСХН.
Podolsky S.A., Ignatenko S.Yu., Darman Yu.A. et al. (2004) Problems of protection and study of wild animals in the creation of mountain reservoirs on the example of the Bureysky hydroelectric complex. Ed. by S.A. Podolsky. Moscow: RAAS. (In Russ.)
17. *Стародубцев В.М.* (1986) Влияние водохранилищ на почвы. Алма-Ата: Наука.
Starodubtsev V.M. (1986) The influence of reservoirs on soils. Alma-Ata: Science. (In Russ.)
18. *Starodubtsev V.M., Petrenko L.R., Fedorenko O.L.* (2004) Dams and Environment: Effects on Soils. Kyiv: Nora-Print.
19. *Данилов-Данильян В.И., Болгов М.В., Дубинина В.Г. и др.* (2006) Оценка допустимых изъятий стока в бассейнах малых рек: основные методические положения // *Водные ресурсы*. № 2. С. 224–238.
Danilov-Danilyan V.I., Bolgov M.V., Dubinina V.G. et al. (2006) Assessment of permissible flow withdrawals in small river basins: basic methodological provisions. *Water resources*, no. 2, pp. 224–238. (In Russ.)
20. *Дубинина В.Г., Катунин Д.Н., Жукова С.В., Кочкиков В.Н.* (2011) Оценка негативных последствий антропогенного воздействия на водные экосистемы и их биоресурсы // *Устойчивость водных объектов, водосборных и прибрежных территорий; риски их использования* // Сб. науч. трудов Всероссийской науч. конференции. 25–30 июля 2011 г. Калининград: Капрос. С. 464–474.
Dubinina V.G., Katunin D.N., Zhukova S.V., Kochikov V.N. (2011) Assessment of the negative consequences of anthropogenic impact on aquatic ecosystems and their bioresources. Sustainability of water bodies, catchment and coastal territories; risks of their use. Collection of scientific proceedings of the All-Russian Scientific Conference. July 25–30, 2011. Kaliningrad: Kapros. Pp. 464–474. (In Russ.)
21. *Новикова Н.М., Волкова Н.А., Назаренко О.Г.* (2015) К методике изучения и оценки воздействия водохранилищ на природные комплексы побережий // *Аридные экосистемы*. № 4 (65). С. 84–94.
Novikova N.M., Volkova N.A., Nazarenko O.G. (2015) On the methodology of studying and assessing the impact of reservoirs on natural complexes of coasts. *Arid ecosystems*, no. 4 (65), pp. 84–94. (In Russ.)
22. *Подольский С.А.* (2003) Методические основы мониторинга и охраны животного населения в зоне влияния проектируемого Бурейского водохранилища // *Труды Государственного природного заповедника Буреинский*. № 2. С. 125–131.
Podolsky S.A. (2003) Methodological foundations of monitoring and protection of the animal population in the zone of influence of the projected Bureysky reservoir. Proceedings of the Bureinsky State Nature Reserve, no. 2, pp. 125–131. (In Russ.)
23. *Природные комплексы побережья Цимлянского водохранилища* / Под ред. Н.М. Новиковой. М.: Агронаучсервис, 2014.
Natural complexes of the coast of the Tsimlyansk reservoir. Ed. by N.M. Novikova. Moscow: Agronauchservice, 2014. (In Russ.)
24. *Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л.* (2010) Управление водными ресурсами. Согласование стратегий водопользования. М.: Научный мир.
Danilov-Danilyan V.I., Khranovich I.L. (2010) Water resources management. Coordination of water use strategies. Moscow: Scientific world. (In Russ.)
25. *Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения. Коллективная монография* / Под ред. В.И. Данилова-Данильяна. М.: РАН, 2020.

- Diffuse pollution of water bodies: problems and solutions. Collective monograph. Ed. by V.I. Danilov-Danilyan. Moscow: RAS, 2020. (In Russ.)
26. *Никитина О.И.* (2021) Влияние регулирования стока на водные экосистемы бассейна Амура и меры по их сохранению // Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: ИВП РАН.
Nikitina O.I. (2021) The impact of flow regulation on the aquatic ecosystems of the Amur basin and measures for their conservation. Abstract. dis. ... candidate of Geographical Sciences. Moscow: IWP RAS. (In Russ.)
27. *Каражанов К.Д.* (1977) Особенности почвообразования в дельтах рек пустынной зоны Казахстана // Известия АН КазССР. Серия биологическая. № 1. С. 59–65.
Karazhanov K.D. (1977) Features of soil formation in the river deltas of the desert zone of Kazakhstan. Izvestia of the Academy of Sciences of the Kazakh SSR. Biological series, no. 1, pp. 59–65. (In Russ.)
28. *Novikova N.M., Kuz'mina Zh.V., Mamutov N.K.* (2023) Desertification of the Amu Darya River Delta and Vegetation Dynamics in the Conditions of the Aral Sea Crisis. *Arid ecosystems*, vol. 13, pp. 371–385.
29. *Novikova N.M., Kuz'mina Zh.V.* (2008) Monitoring of the vegetation in conditions of the Aral Sea ecological crisis. Moscow: RAAS.
30. Экотонные системы “вода–суша”: методика исследований, структурно-функциональная организация и динамика / Под ред. Н.М. Новиковой. М.: КМК, 2011.
Ecotonic systems “water–land”: research methodology, structural and functional organization and dynamics. Ed. by N.M. Novikova. Moscow: KMK, 2011. (In Russ.)
31. *Назаренко О.Г., Новикова Н.М., Рыльщикова А.С.* (2008) Сравнительная характеристика морфологических свойств почв подтопленных территорий Цимлянского водохранилища // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. № 12. С. 34–40.
Nazarenko O.G., Novikova N.M., Rylshchikova A.S. (2008) Comparative characteristics of morphological properties of soils of flooded territories of the Tsimlyansk reservoir. *Land management, cadastre and monitoring of lands*, no. 12, pp. 34–40. (In Russ.)
32. *Новикова Н.М., Назаренко О.Г.* (2013) Природные комплексы побережий искусственных водоёмов на юге европейской части России // Аридные экосистемы. № 3. С. 35–62.
Novikova N.M., Nazarenko O.G. (2013) Natural complexes of the coasts of artificial reservoirs in the south of the European part of Russia. *Arid ecosystems*, no. 3, pp. 35–62. (In Russ.)
33. *Новикова Н.М., Уланова С.С.* (2012) Искусственные водоёмы Калмыкии: режим, использование, природоохранное значение // Изменение природной среды России в XX веке. М.: Молнет. С. 288–306.
Novikova N.M., Ulanova S.S. (2012) Artificial reservoirs of Kalmykia: regime, use, environmental significance. *Changing the natural environment of Russia in the twentieth century*. Moscow: Molnet. Pp. 288–306. (In Russ.)
34. Цимлянское водохранилище: состояние водных и прибрежных экосистем, проблемы и пути решения / Ред. Г.Г. Матишов. Ростов-на-Дону: ЮИЦ РАН, 2011.
The Tsimlyansk reservoir: the state of aquatic and coastal ecosystems, problems and solutions. Ed. by G.G. Matishov. Rostov-on-Don: SSC RAS, 2011. (In Russ.)
35. *Шумова Н.А.* (2013) Прогнозные и наблюдаемые смещения береговой линии Цимлянского водохранилища // Аридные экосистемы. № 3 (56). С. 43–50.
Shumova N.A. (2013) Forecast and observed displacements of the coastline of the Tsimlyansk reservoir. *Arid ecosystems*, no. 3 (56), pp. 43–50. (In Russ.)
36. *Уланова С.С.* (2023) Водные ресурсы Республики Калмыкия: современное состояние и использование // Экосистемы: экология и динамика. № 4. С. 29–58.
Ulanova S.S. (2023) Water resources of the Republic of Kalmykia: current state and use // *Ecosystems: ecology and dynamics*, no. 4, pp. 29–58. (In Russ.)
37. *Уланова С.С.* (2010) Эколого-географическая оценка искусственных водоёмов Калмыкии и экотонных систем “вода–суша” на их побережьях. М.: РАСХН.
Ulanova S.S. (2010) Ecological and geographical assessment of artificial reservoirs of Kalmykia and ecotonic systems “water–land” on their coasts. Moscow: RAAS. (In Russ.)
38. *Шаповалова И.Б.* (2013) Орнитофауна экотонной системы побережья Цимлянского водохранилища // Материалы Московского городского отделения РГО. № 17. С. 104–119.
Shapovalova I.B. (2013) Ornithofauna of the ecotone system of the coast of the Tsimlyansk reservoir. *Materials of the Moscow City Department of the Russian Geographical Society*, no. 17, pp. 104–119. (In Russ.)
39. *Груздева Л.П., Груздев В.С., Павлова Е.О.* (2005) Барьерные функции экотонов и их роль в оптимизации агроландшафтов // Научное и кадровое обеспечение земельно-имущественного комплекса России. Материалы Международной конференции. М.: ГУЗ. С. 141–145.
Gruzdeva L.P., Gruzdev V.S., Pavlova E.O. (2005) Barrier functions of ecotones and their role in optimizing agricultural landscapes. *Scientific and personnel support of the land and property complex of Russia*. Materials of

- the International Conference. Moscow: State University of Land Use Planning. Pp. 141–145. (In Russ.)
40. *Голуб В.Б., Чувашов А.В., Бондарева В.В. и др.* (2020) Изменения состава флоры Волго-Ахтубинской поймы после зарегулирования водного стока р. Волги // Аридные экосистемы. № 1 (82). С. 54–61.
Golub V.B., Chuvashov A.V., Bondareva V.V. et al. (2020) Changes in the composition of the flora of the Volga-Akhtuba floodplain after the regulation of the water flow of the Volga River. Arid ecosystems, no. 1 (82), pp. 54–61. (In Russ.)
41. *Фащевский Б.В.* (2019) О допустимых преобразованиях в речных экосистемах // Учёные записки РГГМУ. 2019. № 34. С. 93–102.
Fashevsky B.V. (2019) On permissible transformations in river ecosystems. Proceedings of RSHU, no. 34, pp. 93–102. (In Russ.)
42. Комплексные исследования Новосибирского водохранилища / Под ред. Ю.И. Подлипского, Т.С. Чайковской. М.: Гидрометеоздат, 1985.
Comprehensive studies of the Novosibirsk reservoir. Ed. by Yu.I. Podlipsky, T.S. Tchaikovskaya. Moscow: Hydrometeoizdat, 1985. (In Russ.)
43. Многолетняя динамика водно-экологического режима Новосибирского водохранилища / Ред. О.Ф. Васильева. Новосибирск: СО РАН, 2014.
Long-term dynamics of the water-ecological regime of the Novosibirsk reservoir. Ed. By O.F. Vasilyeva. Novosibirsk: SB RAS, 2014. (In Russ.)
44. *Духовный В.А.* (2017) Роль воды в функционировании экологической системы аридных территорий Центральной Азии // Проблемы освоения пустынь. № 3–4. С. 81–83.
Dukhovny V.A. (2017) The role of water in the functioning of the ecological system of arid territories of Central Asia. Problems of desert development, no. 3–4, pp. 81–83. (In Russ.)
45. *Глазовский Н.Ф.* (1990) Аральский кризис: причины возникновения и пути выхода. М.: Наука.
Glazovsky N.F. (1990) The Aral crisis: causes and ways out. Moscow: Science. (In Russ.)
46. The Aral Sea. The Devastation and Partial Rehabilitation of a Great Lake. Ed. by P. Micklin, N.V. Aladin and I. Plotnikov. Berlin: Springer-Verlag, 2014. Pp. 111–135.
47. *Данилов-Данильян В.И., Рейф И.Е.* (2018) Биосфера и цивилизация. В тисках глобального кризиса. М.: Едиториал УРСС.
Danilov-Danilyan V.I., Reif I.E. (2018) Biosphere and civilization. In the grip of the global crisis. Moscow: Editorial URSS. (In Russ.)
48. *Авакян А.Б.* (1991) Народнохозяйственные и экологические последствия спуска водохранилищ // Гидротехническое строительство. № 8. С. 1–8.
Avakian A.B. (1991) National economic and environmental consequences of the descent of reservoirs. Hydrotechnical construction, no. 8, pp. 1–8. (In Russ.)
49. *Понов А.Н., Штыков В.И.* (2012) К вопросу о ликвидации водохранилищ и последующей рекультивации их ложа и береговой полосы. Сообщение 1. К вопросу о ликвидации водохранилищ и возможных экологических последствиях при реализации мероприятия // Водное хозяйство России. № 5. С. 30–40.
Popov A.N., Shtykov V.I. (2012) On the issue of the liquidation of reservoirs and the subsequent reclamation of their beds and shorelines. Message 1. On the issue of liquidation of reservoirs and possible environmental consequences during the implementation of the event. Water management of Russia, no. 5, pp. 30–40. (In Russ.)
50. *Коронкевич Н.И., Малик Л.К., Барабанова Е.А.* (1995) Прогноз последствий разрушения гидроузлов // Известия РАН. Серия географическая. № 6. С. 39–48.
Koronkevich N.I., Malik L.K., Barabanova E.A. (1995) Prognosis of consequences of destruction of hydroelectric power plants. Izvestiya RAS. Geographical series, no. 6, pp. 39–48. (In Russ.)
51. *Малик И.К.* (2005) Факторы риска повреждения гидротехнических сооружений. Проблемы безопасности. М.: Наука.
Malik I.K. (2005) Risk factors for damage to hydraulic structures. Security problems. Moscow: Nauka. (In Russ.)
52. *Беликов В.В., Алексюк А.И.* (2020) Модели мелкой воды в задачах речной гидродинамики. М.: РАН.
Belikov V.V., Aleksyuk A.I. (2020) Shallow water models in problems of river hydrodynamics. Moscow: RAS. (In Russ.)
53. *Беликов В.В., Алексюк А.И., Борисова Н.М. и др.* (2023) Численное моделирование течений и деформаций дна в бьефах гидроузлов. М.: ЯНУС-К.
Belikov V.V., Aleksyuk A.I., Borisova N.M. et al. (2023) Numerical modeling of bottom currents and deformations in the waterworks. Moscow: JANUS-K. (In Russ.)

ENVIRONMENTAL CONSEQUENCES OF THE CREATION AND DISCHARGE OF RESERVOIRS IN THE STEPPE ZONE

V.I. Danilov-Danilyan^{a,*}, N.M. Novikova^{a,**}, O.G. Nazarenko^{b,***}

^a*Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*State Center of agrochemical service "Rostovsky", village "Rassvet", Russia*

**E-mail: vidd38@yandex.ru*

***E-mail: nmnovikova@gmail.com*

****E-mail: nazarenkoo@mail.ru*

The article examines the environmental consequences of the construction and operation of reservoirs – the responses of aquatic and terrestrial ecosystems and their components to changes in the water regime. Such reactions depend on the surrounding landscape and are zonally specific. They are especially pronounced in the steppe zone. The authors systematized the consequences, natural and anthropogenic factors determining their evolution, measures to minimize negative environmental consequences that can be traced from the upper reaches of the reservoir to the reservoir – receiver of the river flow, where it is built. In particular, the decrease in bioproductivity and biodiversity caused the problem of reservoir drainage. As a result of lengthy discussions, an opinion has been formed that the descent of small reservoirs, which have lost their importance, as well as orphan ones, is currently environmentally justified. At the same time, it is necessary to carry out special hydro-reclamation and phytomeliorative measures aimed at stabilizing the hydrological and ecological situation.

Keywords: environmental transformation, aquatic ecosystems, ecotonic ecosystems, bioproductivity, biodiversity, upstream, downstream, flooding, siltation, salinization, soil hydromorphism, vegetation, fauna.