

ГИДРОМОРФОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ СУДОХОДНЫХ УСЛОВИЙ НА СРЕДНЕЙ И НИЖНЕЙ ВОЛГЕ С УЧЕТОМ КЛИМАТИЧЕСКИХ И АНТРОПОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ РЕЧНОГО СТОКА

Г.Л. Гладков^{1*}, П.В. Беляков¹, А.О. Еремеева²,
А.Н. Ситнов³, Ю.Е. Воронина³

¹Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова,
г. Санкт-Петербург, Россия

²Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург, Россия

³Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

*gladkovgl@gumrf.ru

Поступила в редакцию 12.01.2026

После доработки 20.03.2026

Принята к публикации 13.04.2026

Аннотация: представлены результаты комплексных исследований гидроморфологического режима Нижней Волги на двух участках: в нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС и на Волго-Каспийском морском судоходном канале. Впервые объединены многолетние гидрологические и русловые наблюдения (с 1877 г. по настоящее время) с данными математического моделирования. Используются методы корреляционно-регрессионного анализа, оценки обеспеченности уровней, сопоставления планов русловых съемок. Установлено, что в нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС после 40 лет эксплуатации интенсивность эрозионных деформаций снизилась до 1.1 см/год, а корреляция уровней воды между постами «нижний бьеф ГЭС» и «с. Козловка» составляет 0.927, что свидетельствует об отсутствии необратимого падения уровней, связанного с разработкой русловых карьеров. На Волго-Каспийском канале доказано, что понижение уровня Каспийского моря провоцирует ускоренную трансформацию канала в речное русло с формированием перекатов, побочной и грядового рельефа, что ведет к росту заносимости и потребует увеличения объемов дноуглубления. Полученные результаты имеют прикладное значение для планирования дноуглубительных работ, оптимизации режимов попусков гидроузлов и расположения отвалов грунта.

Ключевые слова: морфометрические характеристики русла, скорость течения воды, транспорт наносов, параметры донных гряд, русловые переформирования, Волго-Каспийский канал, Чебоксарская ГЭС

DOI: [10.71367/3034-4638-2026-1-1-58-88](https://doi.org/10.71367/3034-4638-2026-1-1-58-88)

ВВЕДЕНИЕ

Современное состояние внутренних водных путей России, в частности Средней и Нижней Волги, характеризуется комплексным воздействием климатических изменений и антропогенной деятельности. Строительство каскада гидроузлов, регулирование речного стока, добыча нерудных строительных материалов, а также наблюдаемое потепление климата и изменение водности рек привели к значительной трансформации гидрологического и руслового режима. На отдельных участках эти изменения стали критическими для обеспечения безопасности судоходства, что требует

реконструкции существующих гидротехнических сооружений и совершенствования методов содержания судовых ходов.

Нижняя Волга является стратегической водной артерией России, обеспечивающей транзитное судоходство, выход в Каспийское море и функционирование крупных портов. За последние десятилетия ее гидрологический и русловой режим претерпел значительные изменения под влиянием двух групп факторов. Первая — климатические изменения: повышение температуры воздуха (тренд 0.14 °C/10 лет), перераспределение внутригодового стока (рост зимних попусков, снижение весеннего половодья), а с 2006 г. — устойчивая маловодная

фаза. Вторая — антропогенное воздействие: строительство каскада Волжско-Камских ГЭС, суточное и недельное регулирование стока, многолетняя добыча нерудных строительных материалов из русла.

Цель работы — выявление современных тенденций русловых деформаций на двух ключевых участках Средней и Нижней Волги (нижний бьеф Чебоксарской ГЭС и Волго-Каспийский морской судоходный канал), оценка их влияния на судоходные условия и обоснование мер по обеспечению гарантированных габаритов судовых ходов.

Задачи исследования:

1. Проанализировать многолетний (1877–2022 гг.) ход расходов и уровней воды в створе Чебоксарской ГЭС и на посту Козловка, выявить периоды различной водности и тренды.
2. Оценить интенсивность русловых деформаций на судовом ходу в нижнем бьефе гидроузла по данным карт внутренних водных путей за 1968–2022 гг.
3. Установить наличие и тесноту корреляционной связи между уровнями воды в нижнем бьефе и в удаленном створе для оценки влияния карьерных разработок.
4. На основе совмещенных планов Волго-Каспийского канала за 2020–2024 гг. выявить характер переформирований (формирование побочней, перекаатов, гряд) и определить причины ускорения заносимости.
5. Сформулировать рекомендации для практического обеспечения судоходства.

1. ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УЧАСТКА РЕКИ ВОЛГИ И УСЛОВИЯ СУДОХОДСТВА В НИЖНЕМ БЬЕФЕ ЧЕБОКСАРСКОГО ГИДРОУЗЛА

Основная особенность гидрологического и руслового режима в нижних бьефах бесподпорных гидроузлов заключается в том, что ниже створа гидроузла с самого начала его эксплуатации вследствие перехвата твердого стока развивается и прогрессирует эрозия русла, что приводит к необратимому снижению уровня воды и ухудшению судоходных условий. Основным фактором, обуславливающим эрозионные процессы в нижних бьефах, является работа ГЭС. Добыча нерудных строительных материалов и другие инженерные мероприятия в нижних бьефах гидроузлов могут негативным образом сказаться на уровненом режиме реки и привести к интенсификации деформаций размыва речного русла.

В результате осуществления недельного и суточного регулирования стока в меженные периоды

навигации на участках водного пути, расположенных в нижних бьефах гидроузлов, движение воды приобретает неустановившийся характер. При этом нарушается однозначность связи между расходом и уровнем воды. В моменты прохождения максимальных попусковых расходов воды на судовом ходу возрастает скорость течения и активизируется транспорт наносов, что приводит к усилению заносимости дноуглубительных прорезей и нарушению устойчивости судовых ходов.

При малых расходах воды в ночное время суток, напротив, эти процессы затухают. При этом на участке водного пути устанавливаются минимальные уровни воды и судоходные глубины, лимитирующие прохождение крупнотоннажных судов.

Чебоксарский гидроузел, завершающая ступень Волжского гидроэнергетического каскада, проектировался и строился с целью создания в европейской части России единого глубоководного пути с гарантированной глубиной судового хода, равной 4 м, а также для регулирования стока Волжского бассейна в интересах водного транспорта, сельского хозяйства, снижения паводковых затоплений в нижнем бьефе и обеспечения водоснабжения крупных населенных пунктов за счет использования водных ресурсов Чебоксарского водохранилища. Планировалось соединение транспортными магистралями Чувашской Республики с Республикой Марий Эл, Республикой Татарстан, Кировской областью, а также увеличение мощности электростанций в ЕЭС европейской части России на 1.4 млрд кВт и среднегодовой выработки на 3.5 млрд кВт·ч.

Строительство Чебоксарского гидроузла было начато в 1969 г. по утвержденному в 1967 г. и уточненному в 1974 г. техническому проекту. Все сооружения гидроузла строились под проектную отметку водохранилища — 68.0 м БС и затрагивали интересы трех субъектов Российской Федерации — Чувашской Республики (16.5%), Республики Марий Эл (52%) и Нижегородской области (31.5%). В связи с неполной готовностью зоны затопления и незавершенными работами по защите земель и населенных пунктов в 1981 г. по соглашению с данными субъектами РФ было решено заполнить водохранилище на 2–3 года до промежуточной отметки 63.0 м БС.

По ряду причин до настоящего времени гидроузел продолжает работать при промежуточной отметке 63.0 м БС в непроектном режиме. Строительство ни одного из 19 объектов инженерной защиты в зоне водохранилища полностью не завершено (в т. ч. и для отметки 63.0 м БС), гидроузел не сдан в постоянную эксплуатацию, а финансирование

работ по обустройству зоны водохранилища было прекращено.

При эксплуатации Чебоксарского гидроузла с регламентированной подпорной отметкой 63.0 м БС приточные расходы воды круглогодично пропускаются транзитом в нижний бьеф. Водоохранилище осуществляет только суточное перераспределение притока к гидроузлу в интересах энергетики. Форсировка уровня воды сверх отметки 63.0–63.3 м БС производится лишь в половодья с вероятностью превышения менее 10%.

Куйбышевское водохранилище было образовано в результате перекрытия Волги плотиной Волжской гидроэлектростанции в Тольятти в 1955 г. Оно заполнено до проектной отметки в 53.0 м БС. Водоохранилище располагается на территории Самарской, Ульяновской областей, Республик Татарстан, Марий Эл и Чувашской Республики. Площадь составляет 5900 км². Объем водохранилища составляет 56 км³; протяженность 510 км. Водоохранилище имеет сезонное регулирование стока. Колебания уровня воды составляют до 7.5 м; на территории Чувашской Республики этот показатель составляет около 4 м. Протяженность правобережной линии в пределах Чувашии составляет 89 км.

Объектом настоящего научного исследования является участок р. Волги, расположенный в нижнем бьефе Чебоксарского гидроузла.

Настоящая работа выполнена на основании систематизации и анализа материалов инженерных изысканий и исследований, проведенных на р. Волге в нижнем бьефе Чебоксарского гидроузла за разные годы, материалов многолетних наблюдений за уровнем воды на стационарном гидрологическом посту Козловка, а также с использованием аппарата математического моделирования параметров движения воды и транспорта наносов в реках.

Для оценки гидрологического режима и расчета основных гидрологических характеристик расхода и уровня воды для исследуемых створов р. Волги ниже Чебоксарской ГЭС в работе использованы данные, опубликованные в гидрологических ежегодниках и справочниках Государственного водного кадастра Росгидромета РФ по стационарным гидрологическим постам за многолетний период наблюдений, а также сведения о расходе и уровне воды за 2022–2023 гг., предоставленные Филиалом ПАО «РусГидро» – «Чебоксарская ГЭС».

В качестве исходных данных для анализа деформаций речного русла на исследуемом участке р. Волги использовались Атласы ЕГС ЕЧ РФ, том 6, ч. 1 (выпуски 1968, 1977, 2006, 2022 гг.), русловая съемка Чебоксарского речного порта за 2023 г., монографии, научные публикации и другие резуль-

таты исследований гидрологического и руслового режима р. Волги в нижнем бьефе Чебоксарского гидроузла.

1.1. Климатическая характеристика района. Гидрография

Средняя Волга на участке от г. Нижнего Новгорода до устья р. Камы относится к атлантико-континентальной европейской области с умеренно-теплым летом, продолжительной холодной зимой с устойчивым снежным покровом. Континентальность климата увеличивается с запада на восток. В течение года в районе преобладает влияние умеренных морских и континентальных воздушных масс. Важным фактором формирования климата является регулярная адвекция арктического и тропического воздуха. Изменчивость атмосферной циркуляции создает большую неустойчивость режима увлажнения и температуры (Георгиевский и др., 2015).

Основной особенностью современных изменений климата в бассейне Волги, как и на всей территории России, является повышение температуры воздуха с конца 70-х гг. XX в. На рис. 1.1 приведен временной ход среднегодовой температуры воздуха по м/с Чебоксары за период 1901–2017 гг. со значимым положительным трендом. Среднее значение температуры за период 1901–1977 г. составило 3.6 °С, за период 1977–2017 гг. – 4.6 °С. Градиент увеличения температуры воздуха по тренду за весь период наблюдений с 1901 по 2017 г. равен 0.14 °С/10 лет.

В теплый период года распределение температуры воздуха в бассейне реки в большей степени соответствует географической широте местности. Средняя температура самого теплого месяца (июль) составляет 16–20 °С, убывая с юга на север. В зависимости от месяца года максимальные значения температуры воздуха изменяются в пределах от 3 до 37 °С. Средняя температура воздуха за летний сезон в бассейнах средней Волги и Камы составляет около +17 °С.

В годовом режиме направлений ветра преобладают южная и западная составляющие. Среднемесячные скорости ветра заметно больше в холодное время года. На открытых пространствах скорость ветра примерно на 0.5 м/с больше по сравнению с другими ландшафтами. Средняя максимальная скорость ветра на большей части территории составляет 20–25 м/с. При порывах она может возрастать до 40 м/с и больше. Суточный ход изменения скорости ветра лучше выражен в теплое время года, и он проявляется в увеличении скорости ветра в дневные часы.

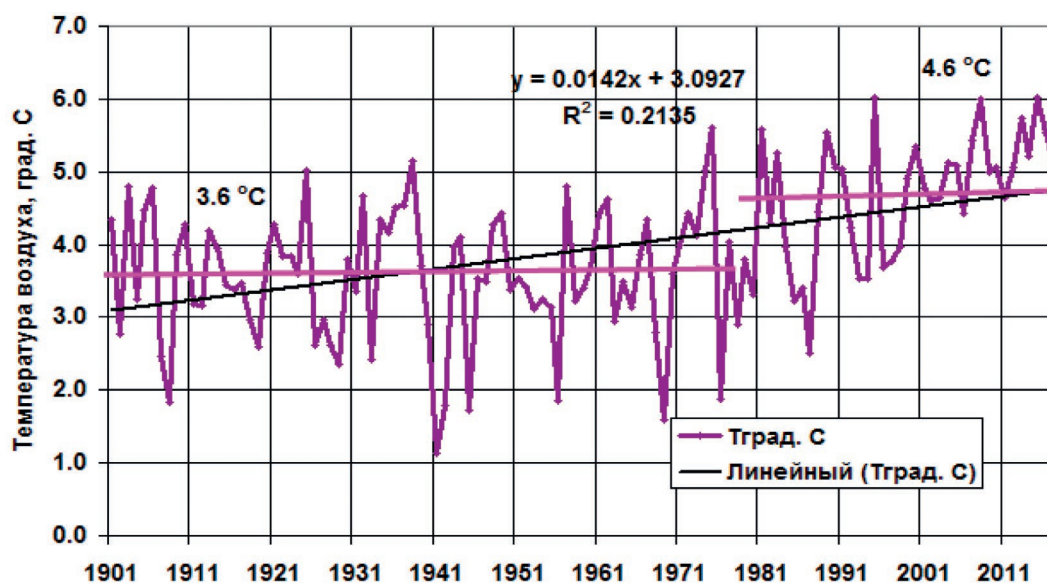


Рис. 1.1. Временной ход среднегодовой температуры воздуха по м/с Чебоксары.
Прямой черной линией показан линейный положительный тренд в 1901–2017 гг.

Fig. 1.1. Time course of the average annual air temperature by m/s Cheboksary.
The straight black line shows a linear positive trend in 1901–2017

Бассейн Волги относится к зоне достаточного увлажнения — количество осадков превышает испарение. В отдельные засушливые годы на юго-востоке региона это соотношение может меняться. На западных склонах водосборов и на возвышенных участках Валдайской, Среднерусской, Смоленско-Московской возвышенностей количество осадков возрастает. Средняя многолетняя годовая сумма осадков и сумма за теплый период убывает с северо-запада на юго-восток. Режим осадков в основном определяется циклонической деятельностью. Летом заметный вклад в изменение количества осадков и интенсивность их выпадения вносят внутримассовый характер погоды и активизация атмосферных фронтов, определяющих выпадение конвективных осадков. В зимний и летний период интенсивность осадков заметно возрастает.

Межгодовая изменчивость средних годовых сумм осадков составляет 15–20%. Среднее максимальное суточное количество осадков в году формируется обильными дождями в летние месяцы и может достигать 30–35 мм. Среднее суточное количество осадков в среднем за год составляет 3–4 мм. Жидкие осадки составляют 65–75, твердые — 15–25, смешанные — 10–15% общего количества осадков за год. Сумма осадков за холодный период года на 26% меньше, чем за теплый период. Наибольшее количество осадков (70–90 мм и более) приходится на июль. Среднее максимальное суточное количество осадков составляет 20–30 мм

и более. Наименьшая продолжительность осадков характерна для мая — августа (Алексеевский и др., 2013). Многолетнее изменение годовых значений атмосферных осадков по м/с Чебоксары за 1901–2017 гг. характеризуется положительным трендом со средним градиентом 33.1 мм /10 лет.

Снежный покров в Верхневолжском бассейне появляется в основном в последней декаде октября — первой декаде ноября. Устойчивый снежный покров образуется к концу ноября, а разрушается в первой — второй декаде апреля. Высота снежного покрова достигает наибольших значений к концу февраля — началу марта; колеблется от 160 мм и более (на северо-востоке) до 80 мм и менее на юго-западе региона.

Окончательный сход снежного покрова в среднем происходит на 4–10 дней позже по сравнению со средними датами. Продолжительность залегания снежного покрова уменьшается со 170 дней (северо-восток) до 140 дней (юго-запад бассейна). В регионе велика вероятность стаивания, проседания и уплотнения снега во время оттепелей. Плотность снежного покрова по территории меняется незначительно и составляет 230–290 кг/м³.

Речная сеть по территории бассейнов Верхней Волги распределена неравномерно. В среднем течении, ниже впадения р. Оки, Волга становится полноводной рекой. Она течет вдоль северного края Приволжской возвышенности. Правый берег Волги высокий, левый — низменный. Ниже г. Чебоксары

на Средней Волге находятся Чебоксарское и Куйбышевское водохранилища, входящие в состав водохранилищ Волжско-Камского каскада. Крупнейшие притоки р. Волги на участке от устья р. Оки до г. Казани: слева – Ветлуга, справа – Цивиль и Свияга (Шикломанов, 1989). Густота речной сети колеблется от 0.20–0.30 км/км² в средней части бассейна Оки до 0.71–0.75 км/км² в бассейне р. Ветлуги.

Особенностью строения речной сети рассматриваемого района является асимметричность водосборов рек. Долины рек хорошо выраженные, обычно трапецеидальные, с широким пойменным дном. В районах возвышенностей, особенно на правом берегу р. Волги и на отрогах Бугульминско-Белебеевской возвышенности, они более глубокие, с изрезанными оврагами склонами.

Бассейн крайне неоднороден по условиям, оказывающим влияние на формирование стока: размерам частных бассейнов, их лесистости, рельефу, распространению пород почв, распределению запасов воды в снеге, выпадению осадков, развитию речной сети, климатическим особенностям. Реки имеют широкие поймы, деформирующиеся русла, длительный период наблюдаются ледовые явления.

Создание каскада водохранилищ на Волге изменило гидрографическую сеть значительных территорий. Многие притоки р. Волги стали непосредственно впадать в водохранилища, появились заливы – затопленные устьевые участки водотоков.

Через створ Куйбышевского гидроузла проходит почти 97% волжского стока. Гидроузел перераспределяет речной сток, задерживая воду в половодье и отдавая накопленные ее запасы в период межени. Длина распространения подпора по р. Волге 650 км, по р. Каме от прежнего устья – 350 км. Наибольшая ширина водохранилища достигает 27 км (Минеева и др., 2021).

1.2. Материалы и методы

Первые инструментальные наблюдения за уровнем воды на р. Волге в районе г. Чебоксары начаты в конце 1976 г. В настоящее время на территории Верхне-Волжской УГМС действует гидрологическая наблюдательная сеть Федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, включающая 16 озерных и 92 речных поста, большинство из которых были открыты в середине XX в. С 1981 г. ведутся постоянные наблюдения за объемом сброса и уровнем воды в нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС. В табл. 1.1 приводятся сведения о гидрологических постах Росгидромета, данные которых использованы для гидрологической характеристики района исследований.

В соответствии с распоряжением Росморречфлота № АТ-531-р от 27.12.2024 в створах гидрологических постов на участке р. Волги установлены следующие значения отметок проектных уровней воды:

Таблица 1.1. Сведения о гидрологических постах Росгидромета на реке Волге

Table 1.1. Information on hydrological posts of Roshydromet on the Volga River

Код поста	Река – пост	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км ²	Отметка нуля поста, м БС	Дата открытия	Принадлежность поста
75016	р. Волга – г. Горький	2229	479 000	63.12	04.11.1876 по 1980	Верхне-Волжская УГМС
1500683	р. Волга – г. Горький	2229	479 000	62.00	01.09.1981	Верхне-Волжская УГМС
77024	р. Волга – г. Чебоксары	1961	604 000	49.06	13.09.1876 по 1980	Верхне-Волжская УГМС
1500817	р. Волга – г. Чебоксары	1961	604 000	62.00	12.1980	Верхне-Волжская УГМС
77025	р. Волга – НБ Чебоксарской ГЭС	1947	604 000	45.00	1981	Верхне-Волжская УГМС
3500051	р. Волга – с. Козловка	1870	615 000	45.00	04.09.1987	УГМС Республики Татарстан

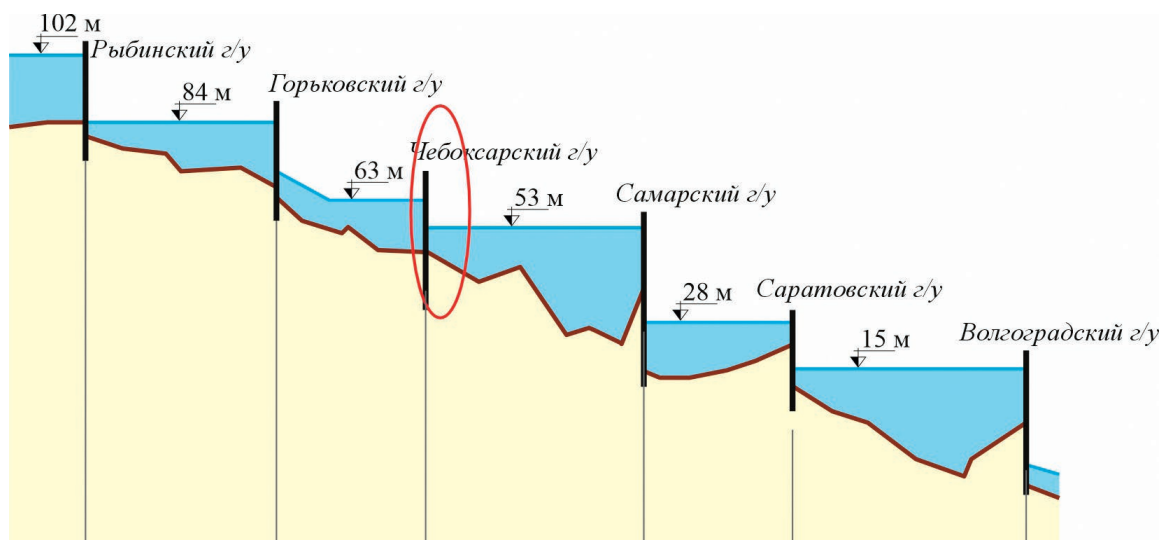


Рис. 1.2. Схематический продольный профиль р. Волга от Рыбинского до Волгоградского гидроузла

Fig. 1.2. Schematic longitudinal profile r. Volga from Rybinsk to Volgograd hydroelectric complex

- р. Волга – г. Горький (Нижний Новгород) – 63.5 м БС;
- р. Волга – ВБ Чебоксарского г/у – 63.0 м БС;
- р. Волга – НБ Чебоксарского г/у – 50.0 м БС;
- р. Волга – ВБ Самарского г/у – 49.0 м БС.

Для оценки гидрологического режима и расчета основных гидрологических характеристик расхода и уровня воды для исследуемых створов р. Волги ниже Чебоксарской ГЭС использованы данные, опубликованные в гидрологических ежегодниках и справочниках Государственного водного кадастра Росгидромета РФ за 1962–2019 гг. Определение тенденций изменения основных гидрологических характеристик уровня и расхода воды верхней Волги проводилось в соответствии с действующими нормативными документами СП 11-103-97 и СП 33-101-2003. Расчет основных гидрологических характеристик, проверка рядов на однородность и стационарность с использованием статистических критериев Стьюдента и Фишера проводилась с помощью сертифицированной программы «HydroStatCalk», разработанной в ФГБУ «Государственный гидрологический институт».

Для определения значений основных гидрологических характеристик (расход и уровень воды) строились эмпирические или аналитические кривые. Для рядов расходов и уровней воды было использовано трехпараметрическое гамма-распределение, параметры которого были определены методом наибольшего правдоподобия или методом моментов.

1.3. Характеристика основных элементов водного баланса Чебоксарского водохранилища

Чебоксарское водохранилище является долинным водохранилищем и пятой ступенью волжского каскада (см. рис. 1.2). Создано в 1980 г. путем перекрытия р. Волги у г. Новочебоксарска. В 1981 г. водохранилище было заполнено до промежуточной отметки 63.0 м БС (вместо проектной 68.0 м БС), и до настоящего времени его эксплуатация осуществляется в условиях незавершенного строительства (Кривошей, 2003, 2011; Родионов и др., 2022).

Бассейн водохранилища располагается в юго-восточной подобласти атлантико-континентальной лесной области в зоне достаточной увлажненности. От г. Городца до устья р. Оки водохранилище расположено на Балахнинской равнине и имеет относительно симметричные берега. Ниже устья Оки правый берег высокий и крутой (высотой до 100 м), а левый низкий. Крупнейшим притоком водохранилища является р. Ока.

Чебоксарское водохранилище характеризуется наибольшей боковой приточностью и самыми высокими значениями коэффициента водообмена среди водохранилищ средней Волги и всего волжского каскада. Водообмен в водохранилище происходит от 15.6 раза в маловодные до 24.3 раза – в многоводные годы, т. е. смена воды в водоеме происходит в среднем за 15–24 суток.

Основные показатели Чебоксарского водохранилища при трех разных отметках нормального

Таблица 1.2. Показатели Чебоксарского водохранилища

Table 1.2. Indicators of the Cheboksary reservoir

Показатель	Значение при отметке НПУ		
	68.0 м БС	65.0 м БС	63.0 м БС
Площадь зеркала, км ²	2190	1510	1110
Объем водохранилища, млн м ³	12.9	7.5	4.6
Объем полезный, млн м ³	5.6	2.7	0
Длина водохранилища, км	341	310	280
Ширина водохранилища, км:			
средняя	6.4	4.9	4.0
максимальная	16	16	15
Протяженность береговой линии, км	3102	2700	2431
Глубина водохранилища, м:			
средняя	5.9	4.8	4.1
максимальная	34	27	24
Санитарный попуск, %	19	20	
тыс. м ³	1100	1000	700
Площадь переработки берегов, км ²	68	40	25

подпорного уровня воды (НПУ водохранилища) приведены в табл. 1.2.

В результате потепления климата, которое проявилось в бассейне Волги с конца 70-х гг., произошли количественные и качественные изменения составляющих водного баланса водохранилища (Алексеевский и др., 2013; Георгиевский и др., 2015). Наибольшие изменения за этот период в водном балансе коснулись бокового притока, который выржен значимым отрицательным трендом.

Боковой приток в Чебоксарское водохранилище формируется в основном в бассейнах трех больших рек – Оки, Суры и Ветлуги. Гидрометрические створы на этих реках освещают 86% площади водосбора. Общая освещенность измерениями расходов с учетом створов на малых реках составляет 92%. Самую большую площадь водосбора имеет бассейн р. Оки, 244 000 км², а самую малую площадь водосбора из рек – притоков, привлеченных к расчету бокового притока, – р. Юронга, 674 км².

Уменьшение годового бокового притока к водохранилищу за маловодный период 2007–2018 гг. составило 12% по сравнению с многоводным 1993–2006 гг. В период весеннего половодья, в апреле – мае приток уменьшился соответственно на 18 и 20%. Летне-осенний приток воды к водохранилищу также уменьшился. Зимой сток увеличился, в январе на 23%, в феврале на 6%, в марте на 7% (см. рис. 1.3).

Таким образом, из-за климатических изменений произошло внутригодовое перераспределение бокового притока Чебоксарского водохранилища.

Годовой сток воды за 1982–2022 гг. через плотину Чебоксарской ГЭС имеет значимый отрицательный тренд со средним градиентом 3.16 км³/10 лет.

Для оценки межгодовой изменчивости стока Верхней Волги у г. Чебоксары были использованы материалы гидрологических наблюдений за среднегодовым расходом воды на трех гидропостах Росгидромета за период с 1877 по 2022 г.: с 1877 по 1980 г. в створе р. Волга – г. Горький, с 1946 по 1956 г., р. Волга – г. Чебоксары, а после завершения заполнения Чебоксарского вдхр. с 1981 по 2022 г. данные створа р. Волга – Чебоксарская ГЭС (нижний бьеф).

Для восстановления рядов среднегодовых расходов воды у г. Чебоксары за 1877–1945 и 1957–1980 гг. гидропост р. Волга – г. Горький был взят в качестве поста-аналога. Восстановленный хронологический график годовых расходов воды у г. Чебоксары за 1877–2022 гг. приводится на рис. 1.4, где прослеживается последовательное чередование периодов различной водности.

Период 1 – с 1877 по 1889 г. характеризуется повышенной водностью со среднегодовым расходом 3890 м³/с. Во 2-м периоде с 1890 по 1929 г. водность реки была на уровне средней (3470 м³/с).

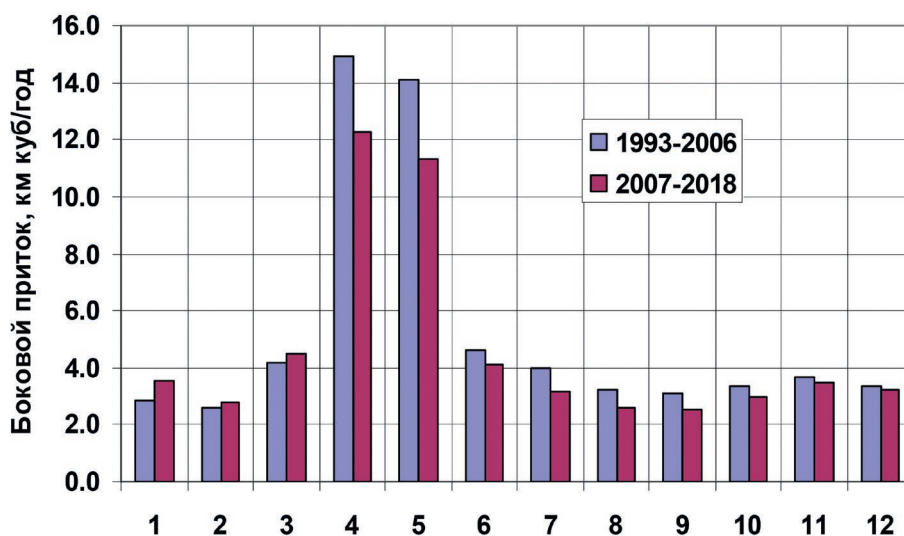


Рис. 1.3. Внутригодовой ход бокового притока к Чебоксарскому водохранилищу по месяцам (км³) за 1993–2006 и 2007–2018 гг.

Fig. 1.3. Annual course of lateral inflow to Cheboksary reservoir by month (km³) for 1993–2006 and 2007–2018

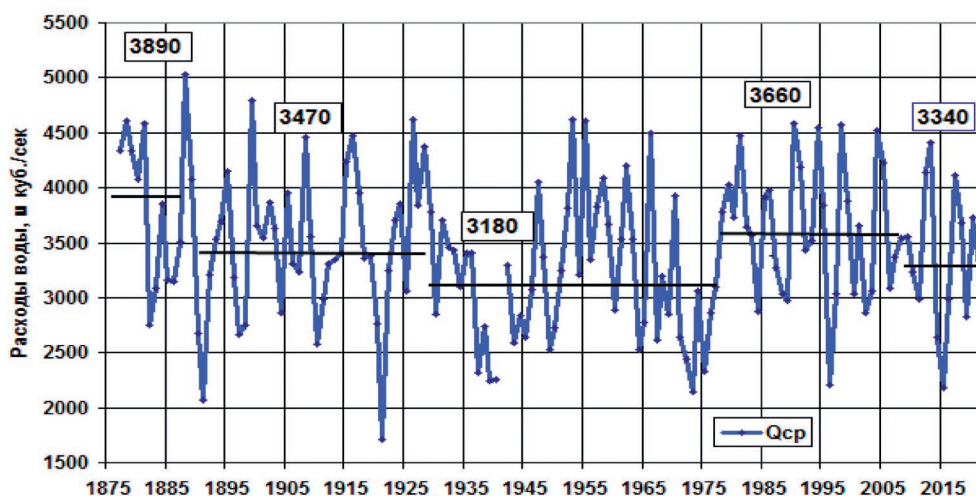


Рис. 1.4. Хронологический ход среднегодового расхода воды в створе г. Чебоксары за 1877–2022 гг.

Fig. 1.4. Chronological course of average annual water consumption in the alignment of Cheboksary for 1877–2022

Затяжным маловодьем отмечен третий период с 1930 по 1977 г. (3180 м³/с). В дальнейшем климатические изменения привели к росту годового стока с фазой более повышенной водности 1978–2005 гг. с расходом 3660 м³/с (период 4).

После 1978 г. наблюдается рост среднегодовой температуры 0.53 °С/10 лет, что привело к увеличению ее в сравнении с серединой XX в. на 1.2–1.4 °С. Эти изменения оказали значительное воздействие на факторы формирования стока как в целом за год, так и в масштабах гидрологических сезонов (Болгов и др., 2013).

С 2006 г. началась маловодная фаза, которая продолжается до настоящего времени (период 5). Средне-

годовой расход последней фазы составляет 3340 м³/с. Аналогичные периоды водности ранее были отмечены для участка Нижней Волги в районе г. Волгограда.

Внутри выделенных периодов режим водности Волги характеризуется чередованием лет с пониженным, средним и повышенным объемом стока. Последствия длительного маловодья в 30-е гг. привели к строительству на Нижней Волге водохранилищ Волго-Камского каскада.

Маловодье в 1970-х гг. и связанное с ним снижение до критических отметок уровня Каспия стали основанием для развертывания проектных работ по межбассейновым переброскам стока (Шикломанов и др., 2008).

По интенсивности воздействия результатов строительства и заполнения Чебоксарского водохранилища на сток р. Волги можно выделить два качественно различных периода — это период условно естественного стока 1877–1980 гг. и зарегулированного стока (являющегося сбросом в нижний бьеф гидроузла) 1981–2022 гг. Средние годовые расходы за период условно естественного (1877–1980) и зарегулированного (1981–2022) стока близки и составляют соответственно 3400 и 3520 м³/с.

Для периода условно естественного стока (1877–1980 гг.) характерна большая его изменчивость со стандартным отклонением от среднего — 690 м³/с. В период зарегулированного стока (1981–2022 гг.) стандартное отклонение равно 634 м³/с. Амплитуда колебания между максимальным и минимальным среднегодовым расходом за 1877–1980 гг. составила 3320 м³/с, после зарегулирования она снизилась до 2400 м³/с.

В период условно естественного стока различают ненарушенный, слабонарушенный и сильно нарушенный сток (Шикломанов и др., 2008; Коронкевич и др., 2010). Период с 1877 по 1936 г. принято считать периодом ненарушенного стока р. Волги, средний объем годового стока у г. Чебоксары в этот период равен 3540 м³/с при стандартном отклонении 662 м³/с.

Время с 1937 по 1980 г. связано с началом строительства гидроузлов и заполнения каскада водохранилищ и является периодом слабонарушенного стока. Средний годовой расход в этот период составил 3200 м³/с ($s = 685$ м³/с). С 1937 по 1958 г. были заполнены Ивановское, Угличское, Верхневолжское и Рыбинское водохранилища, а наполнение Чебоксарского водохранилища началось в 1980 г.

В гидрологическом режиме р. Волги у г. Чебоксары период с 1981 г. по настоящее время является периодом зарегулированного стока, регулирование которого осуществляется в соответствии с Временными основными правилами использования водных ресурсов Чебоксарского водохранилища (РВ — 249-82, 1982).

Сток воды р. Волги ниже Чебоксарского водохранилища определяется сбросом воды через плотину, водослив и шлюз Чебоксарской ГЭС и зависит от гидрологического режима р. Волги, который регулируется диспетчерским графиком работы всего каскада Волжско-Камских водохранилищ. Средний за 1981–2022 гг. объем стока через Чебоксарский гидроузел составил 111 км³/год, или 3520 м³/с при стандартном отклонении 634 м³/с.

Потепление климата, происходящее в бассейне р. Волги в течение последних десятилетий, выражается не только ростом амплитуды колебаний и изменением годовых и сезонных значений речного стока, а также изменением характера внутригодового перераспределения стока (Шикломанов и др., 2008; Коронкевич и др., 2010).

Межгодовая изменчивость среднегодового расхода воды после ввода в эксплуатацию Чебоксарской ГЭС свидетельствует о последовательном чередовании периодов различной водности. Можно выделить два периода водности р. Волги в районе г. Чебоксары после строительства Чебоксарской ГЭС: период с 1981 по 2005 г. с расходом 3630 м³/с и маловодье 2006–2022 гг. со среднегодовым расходом 3340 м³/с.

Максимальные среднегодовые величины стока за указанные периоды были отмечены в 2004 и 2013 гг. и составили соответственно 143 и 139 км³/год, или 4520 и 4410 м³/сек. Минимальный среднегодовой сток приурочен к 1996 г. — 69.6 км³/год (2200 м³/с) и 2015 г. — 68.7 км³/год (2180 м³/с).

Минимальный попуск в нижний бьеф Нижегородского гидроузла в современных условиях составляет: 880–890 м³/с — в период летне-осенней межени и 500 м³/с — зимой. Минимальный среднесуточный расход воды в нижнем бьефе Чебоксарского гидроузла — 700 м³/с. При снижении суммарного притока к Чебоксарскому гидроузлу до 700 м³/с недельное регулирование мощности Чебоксарской ГЭС не проводится.

В последние годы наметилась тенденция снижения наибольших расходов воды в период весеннего половодья из-за увеличения зимних расходов, что связано с внутригодовым перераспределением стока из-за потепления климата. За период 1993–2005 гг. средний сток воды в половодье (апрель — июнь) составил 52.9 км³, за 2006–2018 — 44.1 км³. Анализ зимних попусков воды за последние годы показывает, что ее сбрасывается более чем на 20% больше, чем за период 1981–2006 гг.

Анализ хода минимального среднемесячного стока воды в створе Чебоксарской ГЭС за 1993–2018 гг. свидетельствует, что в рассматриваемый временной период климатические изменения в регионе привели к увеличению минимального месячного стока воды в зимний межнавигационный период и его уменьшению в период открытого русла. Значимые положительные тренды месячного стока через плотину ГЭС за период 1993–2018 гг. отмечены за январь, февраль и декабрь. Отрицательные тренды фиксируются в период половодья (апрель — май) и летне-осеннюю межень, кроме ноября.

1.4. Режим уровня воды

Колебание уровня воды в р. Волге ниже Чебоксарского гидроузла полностью определяется режимом попусков из Чебоксарского водохранилища. Годовой ход уровня воды характеризуется резко выраженным весенним половодьем, при котором наблюдаются наивысшие годовые уровни воды. После прохождения весеннего половодья устанавливается устойчивая летне-осенняя межень с недельными колебаниями уровня в пределах $0.5 \div 1.0$ м, связанными с изменениями нагрузок в потреблении электроэнергии, в отдельные годы межень прерывается более высоким подъемом уровня вследствие прохождения дождевых паводков.

Зимняя межень, как правило, несколько выше летне-осенней, а амплитуда колебаний уровня воды вследствие недельного регулирования стока достигает $1.0 \div 1.5$ м. В отдельные годы, в результате предполоводной сработки вышерасположенных водохранилищ, наблюдается значительный подъем уровня воды в марте — начале апреля.

С удалением от створа плотины Чебоксарского гидроузла амплитуда колебания уровня воды вследствие недельного и суточного регулирования стока снижается.

Максимальный уровень весеннего половодья наблюдается в конце первой декады мая. В отдельные годы годовые максимумы уровня воды могут быть связаны с режимом работы вышерасположенных водохранилищ и наполнением Куйбышевского водохранилища и наблюдаются не только в весен-

нее половодье, так, например, в 1976 г. высший за год уровень воды наблюдался в начале сентября.

Минимальный уровень зимнего периода наблюдается преимущественно в конце марта и в среднем составляет 48.7 м БС. Первые ледовые явления на рассматриваемом участке р. Волги отмечаются обычно в конце первой декады ноября. Осенний ледоход начинается практически сразу же, в начале второй декады ноября. Средняя продолжительность осеннего ледохода составляет 10–15 дней.

На рис. 1.5 показан годовой ход уровня воды в нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС за маловодные 2010, 2015 и 2020 гг.

Максимальная амплитуда колебания уровня была отмечена в многоводный 1981 г. и составила 840 см, а минимальная — 146 см в маловодный 2015 г. Величина средней амплитуды уровня за маловодный период 2006–2022 гг. снизилась по сравнению с предшествующим периодом более чем на 130 см.

Хронологический ход максимального и минимального годового уровня воды за навигационный период в нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС на весь период эксплуатации 1981–2022 гг. показал, что среднее максимальное значение уровня маловодья 2006–2022 гг. (55.5 м БС) оказалось на 1.2 м ниже по сравнению с периодом 1981–2005 гг. (56.7 м БС), что связано с внутригодовым перераспределением стока в сторону увеличения меженного стока за счет снижения весеннего стока, что вызвано потеплением климата.

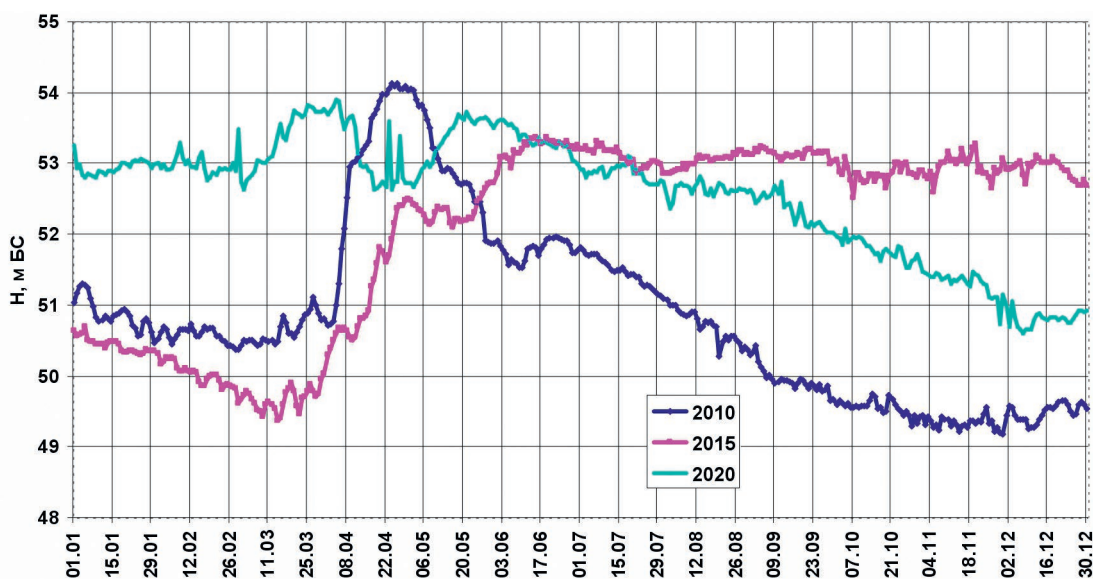


Рис. 1.5. Годовой ход уровня в нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС за маловодные 2010, 2015 и 2020 гг.

Fig. 1.5. Annual progress of the level in the downstream of the Cheboksary hydroelectric station for low-water 2010, 2015 and 2020

В свою очередь, средний минимальный навигационный уровень за период маловодья 2006–2022 гг. оказался несколько выше (51.2 м БС), чем за предшествующие 1981–2005 гг. (51.0 м БС). Однако в последние годы наметился выраженный понижательный тренд уровня при общем положительном тренде за весь период наблюдений.

Графики изменения суточного уровня воды за маловодные 1995 и 2010 гг. на г/п р. Волга – нижний бьеф Чебоксарской ГЭС и г/п р. Волга – с. Козловка, который находится в 70 км ниже створа гидроузла, даны на рис. 1.6 и 1.7.

Наибольшая суточная амплитуда колебания уровня между постами отмечается в период поло-

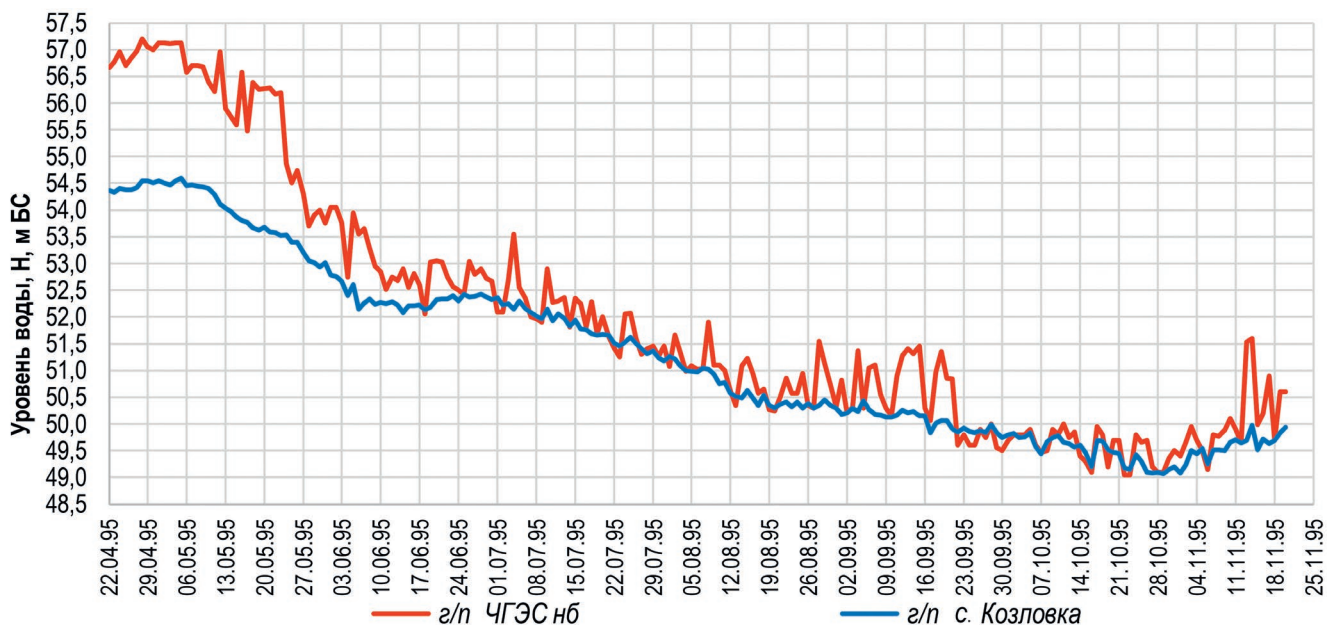


Рис. 1.6. Годовой ход уровня в нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС и на г/п р. Волга – с. Козловка за маловодный 1995 г.

Fig. 1.6. Annual course of the level in the downstream of the Cheboksary hydroelectric station and the Volga river town – s. Kozlovka for low-water 1995

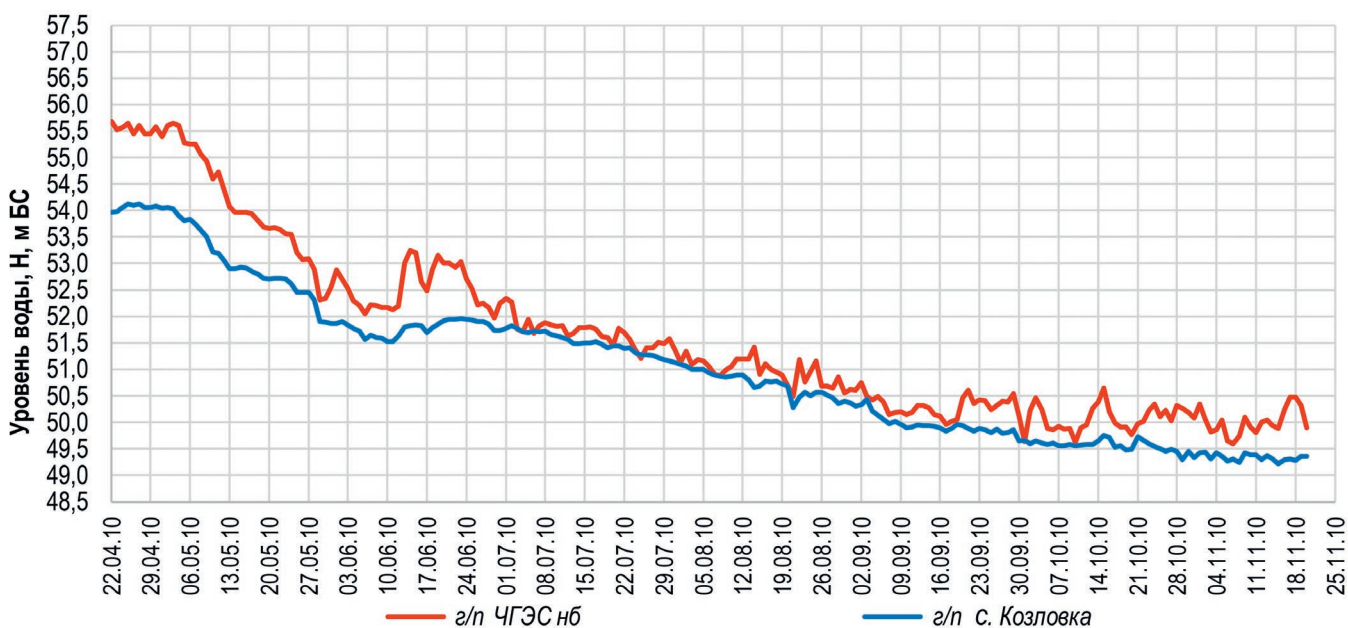


Рис. 1.7. Годовой ход уровня в нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС и на г/п р. Волга – с. Козловка за маловодный 2010 г.

Fig. 1.7. Annual course of the level in the downstream of the Cheboksary hydroelectric station and the Volga river town – s. Kozlovka for low-water 2010

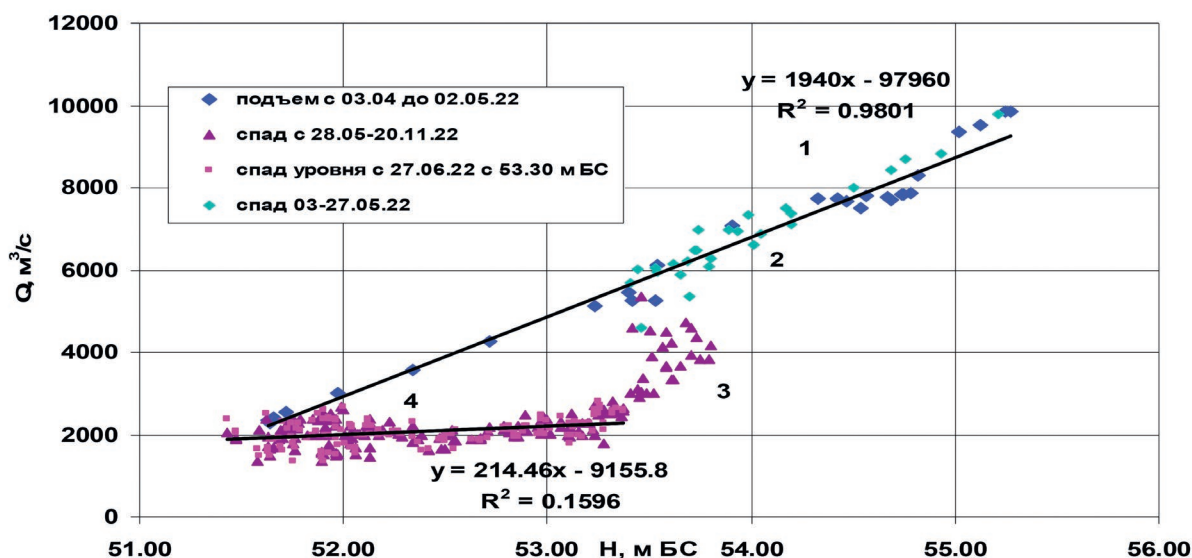


Рис. 1.8. Кривые связи $Q(H)$ для нижнего бьефа Чебоксарской ГЭС за 2022 г.

Fig. 1.8. Coupling curves $Q(H)$ for the lower shelf of the Cheboksary HPP for 2022

водья: в 1995 г., превышая 400 см, и в 2015 г. — до 150 см. На спаде половодья и в меженный период разница в уровнях не более 100 см, не считая редких дождевых паводков.

Наименьший годовой уровень воды в створе г/п р. Волга — с. Козловка за маловодный период 2008–2021 отмечен в маловодный 2010 г. — 48.99 м БС и в 2015 г. — 49.2 м БС.

Анализ совмещенных хронологических графиков минимального уровня воды за навигационный период 1982–2022 гг. в нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС и на г/п р. Волга — с. Козловка свидетельствует о синхронности их колебаний. В маловодье конца 2000-х гг. отмечен незначительный тренд на понижение минимального уровня воды в нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС.

На рис. 1.8 представлена кривая связи расхода с уровнем воды $Q(H)$ для нижнего бьефа Чебоксарской ГЭС, полученная по данным измерений в 2022 г.

Отсутствие четкой линейной связи расхода с уровнем воды связано с влиянием суточного регулирования сбросов на Чебоксарском и Куйбышевском водохранилищах.

Рассчитанные максимальные и минимальные значения обеспеченного уровня воды за различные периоды водности приведены в табл. 1.3 и 1.4.

Для количественной оценки зависимости ежедневного уровня воды в навигационный период между створом НБ Чебоксарской ГЭС и г/п р. Волга — с. Козловка были использованы суточные уровни воды за маловодные 1995 и 2010, 2013 и 2015 гг.

Характеристики корреляционно-регрессионного анализа, включая тесноту связи уровней воды, которая определялась по рассчитанному коэффициенту корреляции, выполнены с помощью программы STATISTICA 10 RU (табл. 1.5, рис. 1.9). Связь

Таблица 1.3. Максимальные значения обеспеченного уровня за различные периоды водности 1981–2022 гг.

Table 1.3. Maximum secured levels for various water periods 1981–2022

Период	Средний макс. за многолетний период уровень воды, м БС	Принятые значения		Максимальные значения уровня воды различной обеспеченности, м БС					
		Cv	Cs/Cv	обеспеченность, %					
				0.1	1	5	10	20	25
р. Волга — нижний бьеф Чебоксарской ГЭС, ПУ = 50.0 м БС									
1981–2021	56.2	0.03	–5.32	60.3	59.4	58.5	58.0	57.4	57.2
1981–2005	56.7	0.02	–21.42	59.9	59.3	57.7	58.3	57.8	57.7
2006–2022	55.5	0.05	2.12	62.0	60.3	58.8	58.0	57.1	56.8

Таблица 1.4. Минимальные значения обеспеченного уровня навигационного периода за различные периоды водности 1981–2022 гг.**Table 1.4.** Minimum secured levels of navigation period for various periods of water content 1981–2022

Период	Средний мин. за многолетний период уровень воды, м БС	Принятые значения		Минимальные значения уровня воды различной обеспеченности за период навигации, м БС					
		C _v	C _s /C _v	обеспеченность, %					
				75	80	90	95	99	99.5
р. Волга – нижний бьеф Чебоксарской ГЭС, ПУ = 50.0 м БС									
1981–2021	51.1	0.02	–0.42	50.6	50.4	50.0	49.7	49.3	49.0
1981–2005	51.0	0.02	–0.23	50.4	50.3	49.9	49.5	48.9	48.6
2006–2022	51.2	0.01	–0.61	50.8	50.6	50.2	49.9	49.2	48.9
р. Волга – с. Козловка, ПУ = 49.0 м БС									
1981–2021	51.0	0.02	–0.40	50.4	50.3	49.9	49.5	48.8	48.5
1981–2005	50.9	0.02	–2.83	50.3	50.1	49.7	49.3	48.6	48.4
2006–2022	51.0	0.01	–31.87	50.5	50.4	50.0	49.7	49.1	48.8

Примечание: жирным шрифтом выделены минимальные значения обеспеченного уровня воды, которые ниже проектных значений уровня, установленных для условий безопасного судоходства на исследуемых участках Нижней Волги.

Таблица 1.5. Характеристики корреляционно-регрессионного анализа навигационных уровней воды, нижний бьеф Чебоксарской ГЭС – г/п с. Козловка**Table 1.5.** Characteristics of correlation and regression analysis of navigational water levels, downstream of Cheboksary HPP – Kozlovka settlement

Период наблюдений	Число пар значений	Уравнение регрессии	Средняя ошибка уравнения регрессии, м	Коэффициент корреляции, R ²
1995	213	$y = 0.682x + 15.865$	0.4028	0.9404
2010	213	$y = 0.8122x + 9.1119$	0.2968	0.9541
2013	213	$y = 0.3515x + 34.158$	0.2835	0.7579
2015	213	$y = 0.0039x^2 - 0.0728x + 45.7$	0.2534	0.8352
1995, 2010, 2013 и 2015	852	$y = 0.0071x^4 - 1.5182x^3 + 121.13x^2 - 4287.9x + 56\ 869$	0.2402	0.9271

уровней между постами составляет 0.76–0.95, т. е. является высокой.

Совмещенный график связи за рассматриваемые годы свидетельствует о высокой тесноте связи между значениями уровня воды. Коэффициент корреляции ежедневных уровней воды за навигацию за все годы в створах г/п нижний бьеф Чебоксарской ГЭС – г/п Козловка составил 0.9271, средняя ошибка уравнения регрессии ± 24 см.

Наименьший уровень воды на обоих гидропостах был отмечен в маловодные 1995 и 2010 гг., с падением почти до отметки 49.00–49.50 м БС. В более многоводные годы однозначной связи

уровней между постами не наблюдается из-за того, что они расположены на зарегулированном участке Куйбышевского водохранилища, где велико влияние суточного регулирования Чебоксарской и Самарской ГЭС.

1.5. Режим скоростей течения и анализ параметров твердого стока в условиях неустановившегося движения воды в нижнем бьефе гидроузла

Для анализа гидрологических характеристик потока были обработаны данные наблюдений за уровнем воды и сбросным расходом воды по Че-

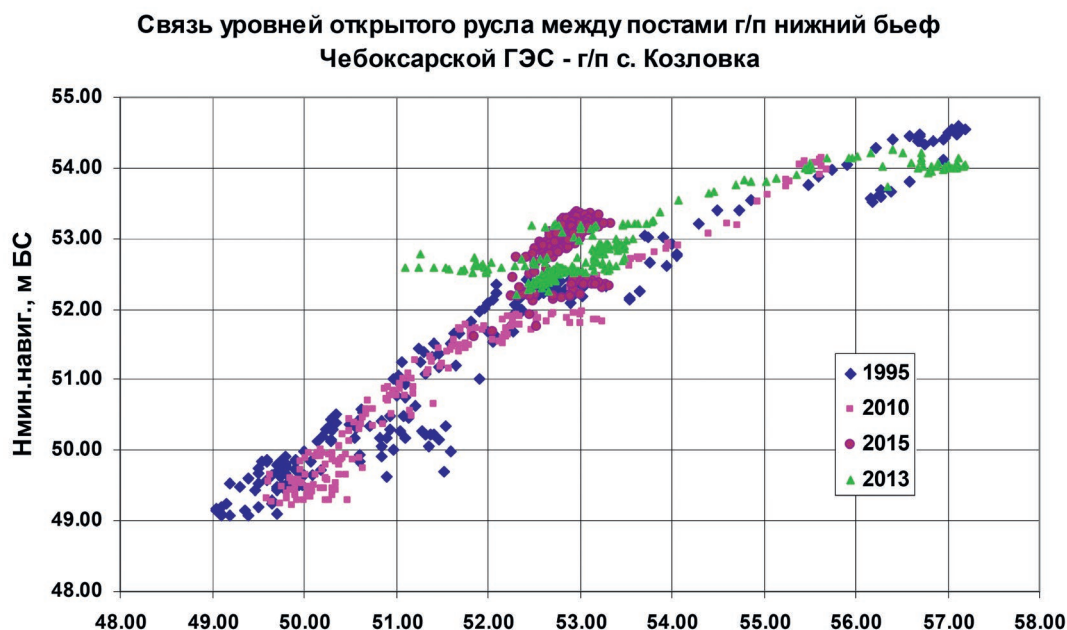


Рис. 1.9. График связи ежедневных навигационных уровней воды между створами постов г/п нижний бьеф Чебоксарской ГЭС – г/п Козловка по данным наблюдений за 1995, 2010, 2013 и 2015 гг.

Fig. 1.9. Schedule of daily navigational water levels between the gates of the posts of the lower basin of the Cheboksary hydroelectric power station – Kozlovka settlement according to the observations of 1995, 2010, 2013 and 2015

боксарской ГЭС за навигацию 2022 г. Полученные результаты представлены графически на рис. 1.10 в виде совмещенных хронологических графиков сбросных среднесуточных расходов и уровней воды в нижнем бьефе гидроузла.

Анализ материалов наблюдений за среднесуточным уровнем и расходом воды, переданных филиалом ПАО «РусГидро» – «Чебоксарская ГЭС», позволяет сформулировать следующие выводы.

Перед началом весеннего половодья в 2022 г. минимальный сбросной расход воды в нижний бьеф Чебоксарской ГЭС наблюдался 6 апреля. Его величина составила $2280 \text{ м}^3/\text{с}$ при уровне воды в верхнем бьефе, равном 62.9 м БС .

В нижнем бьефе отметка уровня воды на этот момент была равной 51.64 м БС .

В последующие дни до 17 апреля началось резкое увеличение сброса воды через гидроузел. Расход воды на эту дату увеличился до $7750 \text{ м}^3/\text{с}$. В верхнем бьефе к этому времени установилась минимальная отметка уровня воды, равная 62.64 м БС , а в нижнем бьефе уровень воды повысился до отметки 54.33 м БС .

Далее, в течение последующих десяти дней, до 26–27 апреля, интенсивность увеличения сбросного расхода воды в нижний бьеф несколько снижается.

При этом уровень воды в верхнем бьефе гидроузла возрастает, и к этому моменту достигает максимальной годовой отметки, равной 63.29 м

БС при расходе воды $8290 \text{ м}^3/\text{с}$. В нижнем бьефе гидроузла отметка уровня воды на эту дату составила 54.82 м БС .

Затем до 30 апреля наблюдается еще одна краткосрочная фаза увеличения сбросного расхода воды. На эту дату было установлено самое большое годовое значение расхода, равное $9860 \text{ м}^3/\text{с}$. В верхнем и нижнем бьефах гидроузла установились максимальные годовые значения уровня воды, равные соответственно 63.29 м БС и 55.27 м БС .

Уровень воды в створе поста Козловка на пике половодья был зафиксирован на отметке 53.6 м БС , а в верхнем бьефе Куйбышевского гидроузла на отметке 51.32 м БС .

Таким образом, на пике весеннего половодья на приплотинном участке, от створа Чебоксарского гидроузла до гидрологического поста Козловка наблюдаются максимальные значения сбросного расхода и наибольшее падение уровня воды. При этом средний уклон свободной поверхности на данном участке оказался достаточно небольшим и составил около 2.8 см/км . На нижерасположенном участке, от Козловки до створа Самарского гидроузла, его значение в половодье оказалось еще меньше, порядка 0.5 см/км .

После достижения максимальных паводковых значений расхода воды в период до 10 мая 2022 г. происходило интенсивное уменьшение сброса воды в нижний бьеф Чебоксарского гидроузла.

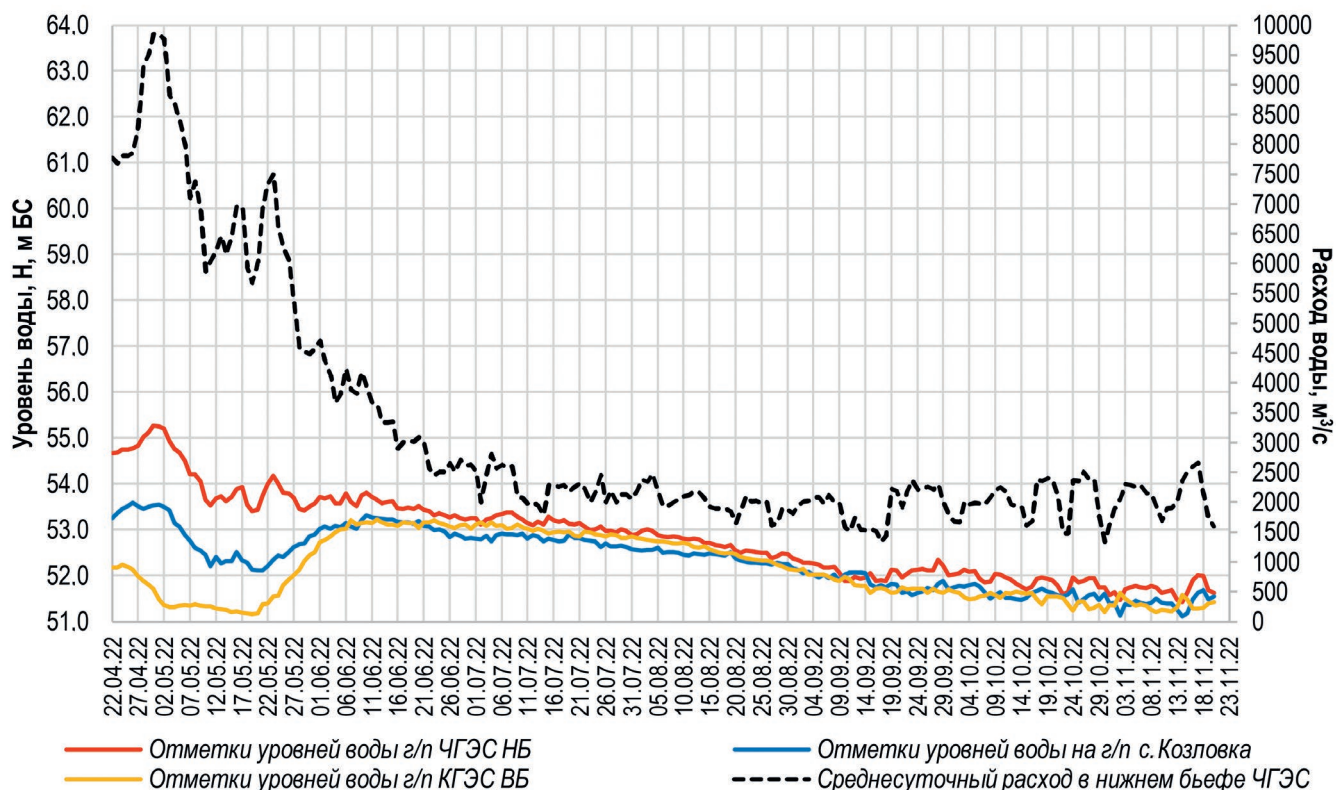


Рис. 1.10. Хронологические графики сбросного среднесуточного расхода и уровня воды в нижнем бьефе Чебоксарского гидроузла за навигационный период 2022 г.

Fig. 1.10. Chronological graphs of discharge average daily flow rates and water levels in the downstream of the Cheboksary hydroelectric complex for navigation period 2022

Среднесуточный расход воды на эту дату составил $5870 \text{ м}^3/\text{с}$, а уровень воды в верхнем бьефе гидроузла поддерживался практически на постоянной отметке, равной 63.2 м БС. К этому времени в нижнем бьефе ГЭС установился уровень воды, равный 53.65 м БС, и закончилось интенсивное понижение уровня воды в створе поста Козловка. Наполнение Куйбышевского водохранилища в этот период еще не начиналось.

В последующие 10–12 дней сброс воды из Чебоксарского водохранилища поддерживался в среднем около величины $6500 \text{ м}^3/\text{с}$. В верхнем бьефе Самарского гидроузла 21 мая была достигнута минимальная отметка уровня воды, равная 52.11 м БС, и с этого момента до 12 июня было осуществлено наполнение Куйбышевского водохранилища до максимальной годовой отметки, равной 53.23 м БС. В результате распространения подпора от створа гидроузла вверх по реке отметки свободной поверхности выровнялись по длине водохранилища. В створе поста Козловка уровень воды на эту дату составил 53.26 м БС.

Таким образом, наиболее значительных переформирований в русле р. Волги в нижнем бьефе

Чебоксарского гидроузла следует ожидать в период пропуска весеннего половодья до того момента, пока не началось наполнение Куйбышевского водохранилища. При этом на приплотинном участке наблюдаются наибольшие значения сбросного расхода воды. Однако вследствие подпора со стороны Куйбышевского водохранилища уклоны свободной поверхности в половодье остаются относительно небольшими и уменьшаются в последующем, по мере его наполнения.

После пропуска весеннего половодья определяющим фактором русловых переформирований в нижнем бьефе гидроузла становится суточный режим регулирования стока воды.

Кинематическая структура потока и динамика морфологических изменений в нижнем бьефе гидроузла (Гришанин, 1979; Muste et al., 2020; Агеев, 2021) в условиях недельного и суточного регулирования стока представляют собой сложную картину. В нижнем бьефе отсутствует однозначная связь между расходом и уровнем воды. При прохождении волны пуск максимумы скорости течения воды и максимум наступления уровня воды не совпадают по времени, последний наступает позже.

Волна попуска расплывается по мере своего распространения от створа гидроузла вниз по течению реки. Величина попускового расхода воды по длине реки уменьшается. Аналогично уменьшается и высота волны попуска. При этом эпюра распределения скорости течения воды по вертикали трансформируется при прохождении волны попуска, а максимум скорости смещается в направлении дна потока. Наиболее сильно это проявляется в непосредственной близости от гидроузла.

Особенности гидравлики потока обуславливают сложный характер русловых переформирований в нижних бьефах гидроузлов. Наряду с фоновыми эрозийными процессами, происходящими ниже створа гидроузла, при прохождении волны попуска в русле реки с деформируемым дном наблюдается транспорт донных наносов в виде донных гряд и происходят знакопеременные деформации дна и берегов. Прогноз русловых переформирований в данных условиях и оценка устойчивости дноуглубительных прорезей представляют собой сложную задачу.

Учитывая актуальность данной проблемы для судоходства, был проведен ряд исследований, посвященных изучению гидравлики потока и параметров транспорта наносов в нижних бьефах Нижне-Свирского гидроузла на р. Свирь, Волгоградского и Нижегородского (Гладков и др., 2023) гидроузлов на р. Волге. В ходе исследований на основании данных почасовых наблюдений за расходом и уровнем воды в нижних бьефах указанных гидроузлов были проведены численные эксперименты для оценки скоростного режима потока и параметров транспорта наносов.

Полученные результаты показали, что условия транспорта наносов в нижних бьефах изменяются в зависимости от величины сбросного расхода воды. В течение всего периода весеннего половодья скорость течения превышает значения неразмывающей скорости, что свидетельствует о возможности активного транспорта наносов и русловых деформаций на данном участке реки.

В меженно-осенний и осенне-зимний периоды навигации сбросный расход воды через створы гидроузлов уменьшается, а амплитуда его суточного колебания определяется режимом регулирования стока. Скорость течения на судовом ходу изменяется в значительных пределах и превышает величину неразмывающей скорости течения лишь в моменты прохождения пиков суточных попусков воды из верхнего бьефа. Отсюда следует, что движение наносов в нижних бьефах имеет эпизодический характер. При этом частицы грунта на дне потока приходят в движение в течение ограниченного периода времени, отвечающего моментам попусков,

а все остальное время в течение суток донные частицы находятся в состоянии покоя.

Гидроморфологический режим реки предопределяет условия транспорта наносов и русловых переформирований. При неустановившемся движении воды, обусловленном суточным регулированием речного стока, происходит активизация транспорта наносов. При этом в связи с незначительной амплитудой суточного колебания уровня воды при распространении волны попуска вниз по течению реки, а также вследствие инерционности процесса переформирования донных гряд не ожидается значительного изменения их размеров (высоты и длины) по сравнению со стационарным режимом стока.

В свою очередь, такие параметры твердого стока, как скорость движения гряд и расход наносов, в этих условиях изменяются существенно. Как показали проведенные численные эксперименты, средняя величина расхода наносов в условиях неустановившегося движения воды в меженно-осенний период оказалась в полтора раза больше, чем при установившемся режиме стока. Как показали результаты численных экспериментов (Гладков и др., 2023), в осенне-зимний период это увеличение составляет в отдельных створах до 3.5 раза по сравнению со стационарным течением при среднесуточном расходе воды. Причина такого увеличения расхода наносов связана, скорее всего, с возрастанием скорости перемещения гряд в моменты прохождения волны суточных попусков воды.

В связи с отсутствием сведений о почасовом расходе и уровне воды для Чебоксарского гидроузла такую оценку для рассматриваемого участка р. Волги в рамках настоящей работы выполнить не удалось. При этом на верховом участке Куйбышевского водохранилища в силу специфики гидроморфологического режима следует ожидать сходной картины проявления русловых деформаций при суточном регулировании стока, хотя и с меньшей интенсивностью, чем на других рассмотренных выше гидроузлах.

Оценка русловых переформирований в зоне влияния карьерных разработок в нижнем бьефе Чебоксарского гидроузла будет получена ниже в ходе анализа картографических материалов и по результатам математического моделирования.

1.6. Русловой режим и судоходные условия в нижнем бьефе Чебоксарского гидроузла

Наиболее значительное и, как правило, необратимое воздействие на русловой режим судоходных рек оказывает строительство гидротехнических со-

оружений — плотин, возводимых на реках с целью регулирования речного стока, а также массовая добыча речного аллювия — нерудных строительных материалов (НСМ) из русловых карьеров (Гладков, Чалов, Беркович, 2023).

В результате перекрытия стока реки плотиной на участке водохранилища полностью прерывается транзит влекомых наносов. Влияние плотины сказывается на характеристиках руслового режима реки в границах от верхового участка водохранилища до самого устья реки. По длине зарегулированного участка реки — в зоне выклинивания подпора от водохранилища, в прибрежных зонах водохранилища и в нижнем бьефе плотины — русловые процессы изменяются по сравнению с бытовым состоянием русла реки. На каждом из этих участков изменения проявляются различным образом и по-разному сказываются на судоходных условиях.

В случае массовых карьерных разработок, равно как и при строительстве глухих плотин в составе подпорных гидроузлов, происходит перехват твердого стока реки. Однако, в отличие от первого случая, эти процессы в многолетнем разрезе представляют собой лишь задержку во времени части твердого стока в зоне влияния карьеров. После заполнения руслового карьера наносами, которое в реальных условиях может занимать десятки лет, транзит влекомых наносов в реке на участке карьерных разработок возобновляется. При этом, однако, исходные характеристики речного потока и русла реки не могут быть восстановлены в прежних значениях.

Степень воздействия карьерных разработок на русловой режим реки зависит от гидрологических и морфометрических характеристик потока и русла реки, размеров выемки (руслового карьера) и интенсивности ее разработки, а также от параметров естественного твердого стока. Необратимые изменения гидрологического и руслового режима судоходных рек в зоне влияния карьерных разработок на реках, как правило, затрагивают интересы всех остальных водопользователей и населения, проживающего в речных бассейнах.

На ряде судоходных рек изменения руслового режима, проявившиеся вследствие интенсивной добычи нерудных строительных материалов в прежние годы, приобрели к настоящему времени необратимый характер. Добыча руслового аллювия на судоходных реках, как правило, приводит к ухудшению судоходных условий в зоне влияния карьерных разработок.

До строительства каскада Волжско-Камских водохранилищ процессы руслоформирования на Волге во многом определялись естественной из-

менчивостью речного стока. На режиме Нижней Волги дополнительно сказывалось влияние изменения отметок уровня Каспийского моря.

На участках с относительно низкими темпами переформирования за период естественного развития русла (до 1955 г.) наблюдалась многолетняя направленная тенденция по наращиванию выпуклых и размыву вогнутых берегов излучин в пределах относительно стабильного русла. На участках интенсивных русловых переформирований активная перестройка русла (формирование новых разветвлений, спрямление излучин, перераспределение стока) совпала с периодом зарегулированного стока.

После строительства Куйбышевской ГЭС до момента ввода в эксплуатацию Чебоксарского гидроузла исследуемый участок р. Волги в районе г. Чебоксары и на вышерасположенном участке оказался в зоне переменного подпора. На таких участках, как правило, превалирует отложение наносов, поступающих с вышерасположенного участка реки.

Исследования, выполненные Волжской государственной академией водного транспорта (1990), показали, что до 1984 г. в зоне карьерных разработок происходило уменьшение емкости русла реки со средней интенсивностью около 0.7 млн м³ в год.

Впоследствии, после создания Чебоксарского гидроузла, характер русловых переформирований на данном участке изменился — преобладающими стали деформации размыва русла. За период с 1984 по 1989 г. емкость русла возрастала со средней интенсивностью около 1.5 млн м³ в год. При этом среднегодовой объем добычи речного аллювия на данном участке за данный период составлял около 0.8–0.85 млн м³.

Таким образом, после заполнения Чебоксарского водохранилища и начала эксплуатации ГЭС в нижнем бьефе начался взаимный процесс естественного приспособления между потоком и руслом в изменившихся условиях взаимодействия сбросного расхода воды и деформируемого русла реки. В первоначальный период это нашло выражение в увеличении скорости горизонтальных и вертикальных деформаций на перекатах. В дальнейшем темпы деформаций начали снижаться, что в целом благоприятно сказалось на сезонных деформациях перекатов и условиях судоходства в нижнем бьефе гидроузла.

Характер и интенсивность русловых деформаций на исследуемом участке р. Волги в районе планируемых карьерных разработок определяются регулирующим воздействием вышерасположенного каскада водохранилищ. В целом на данном участке

Таблица 1.6. Средние значения глубин на судовом ходу на участке судового хода с 1185.0 км по 1257.0 км по данным карт внутренних водных путей

Table 1.6. Average depths at sea in the sea passage section from 1185.0 km to 1257.0 km according to inland waterway maps

Год выпуска карты	1968	1977	2006	2022
Средняя глубина на судовом ходу, м	8.74	8.91	10.19	10.36

реки изменился характер внутригодового распределения стока воды, снизился максимальный расход воды, уменьшился объем стока взвешенных наносов и произошел полный перехват стока влекомых наносов.

Расположенный в нижнем бьефе гидроузла приплотинный участок Чебоксарской ГЭС находится в зоне переменного подпора со стороны Куйбышевского водохранилища. При прохождении паводкового сбросного расхода воды через створ гидроузла в начальные моменты наполнения Куйбышевского водохранилища возможны активные переформирования русла реки в приплотинной зоне. При этом материал от размыва поступает на нижерасположенные перекаты, что приводит к повышению отметок их гребней в половодье. Кроме этого, суточные колебания расхода воды в меженные периоды также приводят к интенсификации эрозионных процессов в нижнем бьефе гидроузла.

Затруднения для судоходства в нижнем бьефе Чебоксарского гидроузла обусловлены также и горизонтальными деформациями русла. Гидравлические характеристики речного потока на исследуемом участке реки в районе проектируемых русловых карьеров определяются морфологическими особенностями русла, а именно наличием ряда крупных русловых разветвлений в районе о-вов Казин – Верхний Сидельниковский, Нижний Сидельниковский, Ураковский и Криушинский.

К участкам разветвлений русла приурочены перекаты на судовом ходу – перевал Вход в Новинскую воложку, перекат Марпосадский, перекат Демешкинский, перекат Водолеевский, перекат Ураковский, перекат Кушниковский и перекат Криушинский.

Для анализа современной динамики переформирований дна в нижнем бьефе Чебоксарского гидроузла по данным карт внутренних водных путей за 1968, 1977, 2006 и 2022 гг. были построены продольные профили по оси судового хода. Полученные данные позволяют оценить характер и интенсивность переформирований, произошедших на стрежне потока за рассматриваемый (с 1968 г.) период.

Для анализа изменения морфометрических характеристик русла р. Волги в нижнем бьефе

гидроузла по материалам карт внутренних водных путей за разные годы были рассчитаны средние значения глубин русла реки на участке судового хода с 1185.0 по 1257.0 км. Результаты вычислений приведены в табл. 1.6.

Результаты выполненного анализа показали, что за рассматриваемый период на участке судового хода в районе г. Чебоксары происходили следующие изменения.

До ввода Чебоксарского гидроузла в эксплуатацию на данном участке р. Волги происходили ограниченные переформирования с незначительной тенденцией к увеличению глубины на судовом ходу. С 1968 по 1977 г. средняя глубина на судовом ходу увеличилась на 0.17 м, т. е. глубина возрастала со средней интенсивностью около 1.9 см в год. Добычи нерудных строительных материалов в данный период на исследуемом участке не проводилось.

За период с 1977 по 2006 г. практически по всей длине рассматриваемого участка активизировались эрозионные процессы. Средняя глубина на судовом ходу за этот период наблюдений увеличилась на 1.28 м, т. е. она возрастала со скоростью около 4.4 см в год. Определяющим фактором русловых переформирований на участке за данный период наблюдений является завершение строительства и ввод в эксплуатацию Чебоксарского гидроузла. Русловые карьеры в границах исследуемого участка р. Волги начали разрабатываться с 1989 г. (месторождение Приверх острова Казин), а также с 2003 г. (Криушинское месторождение) и с 2004 г. (Покровское и Сидельниковское месторождения).

За последний анализируемый отрезок времени – с 2006 по 2022 г. на участке наблюдались незначительные знакопеременные деформации. На верхнем 30-километровом отрезке водного пути, расположенном от створа Чебоксарского гидроузла до н.п. Ураково, наблюдалась тенденция понижения отметок дна на судовом ходу. При этом средняя глубина на судовом ходу за указанный период увеличилась на 0.17 м, т. е. она возрастала в среднем на величину около 1.1 см в год, сопоставимую с интенсивностью понижения минимального уровня воды в нижнем бьефе гидроузла за последние двадцать лет. На данном участке с 2008 г. началось освоение месторождения Ураковское.

В целом результаты выполненного анализа показали, что к настоящему времени на участке р. Волги, расположенном в приплотинной области Чебоксарской ГЭС и на нижерасположенном участке судового хода, интенсивность сезонных и многолетних русловых деформаций значительно снизилась по сравнению с предшествующим периодом наблюдений, что свидетельствует о стабилизации руслового режима реки через 40 лет с начала эксплуатации водопропускных и водосбросных сооружений гидроузла.

В связи с тем, что все разрабатываемые карьеры НСМ расположены на данном участке в непосредственной близости от кромок судового хода, с течением времени, по мере аккумуляции наносов в отработанных емкостях, возможно ожидать дальнейшего понижения отметок дна на судовом ходу со средней интенсивностью порядка 1.1 см в год. На данный момент пока не прослеживается однозначной корреляционной связи между изменением (понижением) отметок дна на судовом ходу и разработкой русловых карьеров. Скорее всего, этот эффект станет проявляться позже, с течением времени.

Определяющим фактором возможного влияния русловых карьеров на судоходные условия в данном случае следует считать потенциальную опасность дополнительного понижения уровня воды в нижнем бьефе гидроузла в маловодные годы вследствие их разработки. Оценка влияния карьеров на уровеньный режим реки была получена по результатам математического моделирования.

Строительство Волжско-Камского каскада ГЭС в значительной степени повлияло на водный режим Волги, и к настоящему времени порядок эксплуатации отдельных гидроузлов и каскада в целом определяет гидрологический режим реки.

Регулирование режима работы водохранилищ Волжско-Камского каскада на верховом участке Куйбышевского водохранилища осуществляется Федеральным агентством водных ресурсов в соответствии с «Временными основными правилами использования водных ресурсов Чебоксарского водохранилища на р. Волге (на период начальной эксплуатации)» (РВ — 249-82, 1982) и «Основными правилами использования водных ресурсов Куйбышевского, Саратовского и Волгоградского водохранилища на р. Волге» (1983).

Минимальный навигационный уровень воды в Куйбышевском водохранилище установлен на отметке 49.0 м БС.

Куйбышевское водохранилище осуществляет суточное, недельное и годовое регулирование речного стока (Сазонов, 2015). В конце апреля —

начале мая, в средние по водности годы, уровень водохранилища достигает отметок, близких к нормальному подпорному уровню (НПУ). Обычно в середине мая в связи с «рыбным попуском» уровень сработки составляет 1.0–1.5 м.

Наполнение водохранилища до отметки нормального подпорного уровня воды, как правило, происходит в июне. В маловодные годы уровень водохранилища в течение всей навигации поддерживается на 1.0–1.5 м ниже отметки НПУ.

В навигационный период сработка водохранилища начинается обычно в конце июля — начале августа и к концу навигации составляет 1.5–1.8 м. В маловодные годы сработка водохранилища к концу навигации может составить 2.5–3.0 м, что в значительной степени сказывается на уменьшении проходной глубины на участке от Чебоксарского гидроузла до г. Казани.

В период навигации под влиянием ветров наблюдаются сгонно-нагонные явления. Наибольшие колебания отмечаются при сильных северных ветрах, при которых уровень воды на участке от с. Верхний Услон до с. Нижние Вязовые понижается на величину 0.4–0.5 м. При значительном падении уровня воды отдельные судоходные трассы закрываются для транзитного судоходства.

Скорость течения воды по длине Куйбышевского водохранилища изменяется в достаточно больших пределах и зависит от величины попусков через гидроузлы, а также от боковой и транзитной приточности (Сазонов, 2015). Во время половодья скорость течения на речной части водохранилища достигает 5.5–6.0 км/ч, в узкостях — 6.5 км/ч. В период «провальных» уровней воды скорость течения уменьшается и составляет на приплотинном участке 0.3–0.4 км/ч, в узкостях 1.5–2.0 км/ч. На приплотинном участке скорость течения в суточном диапазоне изменяется в пределах 25–35% за счет изменения режимов попуска.

Минимальная скорость течения наблюдается ночью и утром, максимальная — во второй половине дня.

В соответствии с распоряжением Росморречфлота «Об установлении категорий внутренних водных путей, определяющих для участков внутреннего водного пути габариты судовых ходов и навигационно-гидрографическое обеспечение условий плавания судов, перечень судовых ходов, а также сроки работы средств навигационного оборудования и судоходных гидротехнических сооружений в навигацию 2025 года» от 27.12.2024 № АТ-531-р судоходный участок в нижнем бьефе Чебоксарского гидроузла относится к внутренним водным путям первой категории.

Судоходство на рассматриваемом участке р. Волги регламентируется «Правилами плавания по внутренним водным путям» (2018) и «Правилами движения и стоянки судов в Волжском бассейне внутренних водных путей Российской Федерации» (2018).

Содержание судовых ходов в нижнем бьефе Чебоксарского гидроузла осуществляет Казанский район водных путей и судоходства – филиал ФБУ «Администрация Волжского бассейна внутренних водных путей» в соответствии с «Правилами содержания судовых ходов и судоходных гидротехнических сооружений» (2020).

По данным лоцийного описания, составленного для верхней части озерно-речного участка р. Волги, расположенного в нижнем бьефе Чебоксарского гидроузла (Сазонов, 2015; Атлас ЕГС ЕЧ РФ, 2022), на отдельных участках данного водного пути установлены ограничения на расхождение и обгон крупнотоннажных судов и составов. К ним относятся:

- участок 1186.5–1188.1 км, расположенный на подходе к нижнему подходному каналу Чебоксарских шлюзов, выше месторождения Приверх острова Казин;

- участок 1191.31192.5 км, расположенный на входе в Новинскую воложку, ниже месторождения Приверх острова Казин;

- участок 1208.7–1213.5 км, расположенный на участках Демешкинского и Водолеевского перекатов, в границах горного отвода месторождения II Ураковское;

- участок 1239.8–1241.5 км, расположенный выше приверха о-ва Криушинский, в границах горного отвода месторождения Криушинское;

- участок 1244.51248.0 км, расположенный в границах переката Криушинский, за пределами участков горного отвода месторождения Криушинское.

Гарантированные габариты судового хода р. Волги на Куйбышевском водохранилище на навигацию 2025 г. приведены в табл. 1.7 согласно Приложению № 2 к распоряжению Росморречфлота «Об установлении категорий внутренних водных путей, определяющих для участков внутреннего водного пути габариты судовых ходов и навигационно-гидрографическое обеспечение условий плавания судов, перечень судовых ходов, а также сроки работы средств навигационного оборудования и судоходных гидротехнических сооружений в навигацию 2025 года» от 27.12.2024 № АТ-531-р.

Установленная данным распоряжением продолжительность навигационного периода (период содержания навигационного оборудования) на Куйбышевском водохранилище составляет 213 суток – с 22 апреля по 20 ноября.

Рассчитанные значения обеспеченного навигационного уровня воды по данным наблюдений за уровнем воды на стационарных гидрологических постах в нижнем бьефе ГЭС за последние двадцать лет показали, что обеспеченность проектного уровня воды в створе поста НБ Чебоксарского гидроузла составляет 98.3%, что соответствует установленным нормативным значениям для участка водного пути данной категории.

Обеспеченность проектного уровня воды в створе гидрологического поста Козловка составила более 99.9%, что выше нормируемых значений обеспеченности.

Таблица 1.7. Гарантированные габариты судового хода р. Волги на Куйбышевском водохранилище

Table 1.7. Guaranteed dimensions of the ship passage of the river Volga on the Kuibyshev reservoir

Границы участков	Протяженность, км	Габариты судового хода			Водпост	Проектный уровень воды, м БС
		глубина, м	ширина, м	радиус, м		
Чебоксарский шлюз – н.п. Ураково	30	4.0	100	1200	НБ Чебоксарского г/у	(50.00)
н.п. Ураково – г. Казань	96	4.0	100	1200	ВБ Самарского г/у	(49.00)
г. Казань – Самарский шлюз	354	4.0	400	2500	ВБ Самарского г/у	(49.00)

1.7. Основные выводы

Проведенные исследования гидрологического и руслового режимов на рассматриваемом участке реки Волги, а также результаты математического моделирования характеристик движения воды и русловых деформаций в нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС, позволили получить следующие основные выводы, затрагивающие вопросы обеспечения безопасности судоходства при освоении месторождений нерудных строительных материалов на верхнем участке Куйбышевского водохранилища.

1. Хронологический ход среднегодовых расходов воды у г. Чебоксары за 1877–2022 гг. свидетельствует о последовательном чередовании периодов различной водности, который подтверждает разностная интегральная кривая с пятью периодами повышенного и пониженного стока воды.

С 2006 г. началась маловодная фаза гидрологического цикла, которая продолжается до настоящего времени. Среднегодовой расход этой фазы составляет 3340 м³/с. Аналогичные периоды водности ранее были установлены для участка Нижней Волги в районе г. Волгограда.

2. С момента ввода Чебоксарского гидроузла в эксплуатацию в нижнем бьефе активизировались эрозионные процессы, что привело к однонаправленному понижению отметок дна на судовом ходу. До 2006 года средняя глубина на судовом ходу ежегодно увеличивалась на 4.4 см.

За последний анализируемый отрезок времени — с 2006 по 2022 гг. — на участке наблюдались незначительные знакопеременные деформации. На верхнем 30-километровом отрезке водного пути, расположенном от створа Чебоксарского гидроузла до н.п. Ураково, наблюдалась тенденция понижения отметок дна на судовом ходу со средней интенсивностью около 1.1 см в год.

3. Анализ совмещенных хронологических графиков минимальных уровней воды за навигационные периоды 1982–2022 гг. в нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС и г/п р. Волга — с. Козловка свидетельствует о синхронности их колебаний. За период с 2006 г. по настоящее время наметился незначительный тренд на понижение минимальных уровней воды в нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС со средней интенсивностью около 1.24 см в год.

В створе гидрологического поста Козловка отметки минимальных навигационных уровней воды понижаются менее интенсивно, на величину порядка 0.29 см в год.

4. Совмещенный график связи минимальных навигационных уровней воды в створах постов нижний бьеф Чебоксарской ГЭС — г/п с. Козлов-

ка, построенной за маловодные 1995 и 2010, 2013 и 2015 гг. наблюдений, свидетельствует о высокой тесноте связи между значениями уровней воды. Коэффициент корреляции связи ежедневных навигационных уровней воды за маловодные годы в створах данных постов составил 0.9271; средняя ошибка уравнения регрессии ± 24 см.

Эти результаты свидетельствуют о том, что на данный момент за весь период эксплуатации Чебоксарской ГЭС в нижнем бьефе гидроузла не произошло однонаправленного необратимого понижения уровней воды вследствие развития эрозионных процессов и карьерных разработок.

2. ТРАНСФОРМАЦИЯ ВОЛГО-КАСПИЙСКОГО МОРСКОГО СУДОХОДНОГО КАНАЛА В УСЛОВИЯХ Понижения УРОВНЯ ВОДЫ В КАСПИЙСКОМ МОРЕ

ВКМСК является одним из крупнейших гидротехнических сооружений в мировом масштабе и стратегически важным для экономики юга России объектом. В настоящее время состояние канала определяет возможность реализации ряда экономических и геополитических интересов государства, включая освоение нефтяных месторождений Каспийского моря российскими компаниями, транспортировку углеводородов, как добытых на шельфе, так и проходящих транзитом в другие бассейны, развитие судоходства и судоводных путей, входящих в состав трансконтинентальных транспортных коридоров, формирование рыбных запасов и нерестовой миграции ценных видов рыб.

Однако одним из основных факторов, усложняющих условия нормальной эксплуатации ВКМСК, является его заносимость, которая складывается из таких составляющих, как твердый сток Волги, сгонно-нагонные, ветро-волновые и ледовые явления. Различное сочетание этих составляющих, изменяющихся в весьма широких пределах как по величине, так и по эффективности своего воздействия, влечет за собой чрезвычайно изменчивые из года в год деформации дна и отложения наносов как по всему каналу, так и на отдельных его участках.

Условно ВКМСК, протяженностью 188 км, можно разделить на три характерных участка.

1. Речной участок, расположенный в дельте р. Волги (0–80 км судового хода).

2. Морской участок с бровками из отвалов грунта по обеим кромкам канала (80–155 км судового хода).

3. Свободный морской участок Каспийского моря (155–188 км судового хода).

В результате понижения уровня воды в Каспийском море канал претерпел изменения, связанные с трансформацией участков канала по их длине.

Для оценки влияния понижения уровня воды в Каспийском море на русловые переформирования ВКМСК и последствий для судоходства выполнен подробный анализ деформаций канала в виде их многолетних плановых форм. Для этого на морском участке ВКМСК с бровками из отвалов грунта произведено построение совмещенных планов участков за ряд лет, что позволит также уточнить влияние различных факторов заносимости судового хода на морфометрические характеристики канала. Кроме того, по планам можно установить тенденции развития деформаций в продольном направлении в условиях продолжающегося понижения уровня воды в Каспийском море, выявить наиболее проблемные с точки зрения влияния на естественный ход русловых процессов участки, а также провести оценку возможности поддержания навигационной глубины в целом.

Анализ совмещенных планов за 2020–2024 гг. дает представление о русловых переформированиях в условиях ограничения канала забровочными отвалами (в морской части), береговой полосой, а также об изменениях, происходящих на участках по наиболее характерным изобатам, которые в планах отдельных километров назначены по глубинам 4.2 м, 5.0 м, 5.2 м и 6.0 м.

Основные проблемы по обеспечению навигационных габаритов судового хода на канале наблюдаются в его морской части. В связи с этим

представляет интерес выявление основных направлений развития процессов трансформации морской ограниченной бровками части канала как наиболее деформируемой и влияющей на заносимость всего морского открытого участка ВКМСК и на подходах к нему со стороны Каспийского моря.

Участок 112–117 км ВКМСК

Участок на уровне характерных глубин 4.2 м и 5.0 м за период 2020–2024 гг. имеет достаточно устойчивое состояние судового хода в границах восточной и западной бровок канала, что говорит о стабильности глубин с локальными незначительными оползаниями откосов канала, связанными с начальной стадией процесса формирования признаков речного русла относительно прямолинейного типа. Для него характерны песчаные вдольбереговые образования, которые в естественных руслах располагаются в шахматном порядке по длине водотока (рис. 2.1).

Участок 117–120 км ВКМСК

Этот участок, как и вышерасположенный, также трансформируется в речной поток. Исходя из того, что ВКМСК создан с незначительными углами поворота, в условиях понижения уровня Каспийского моря на поворотном участке канала запущен естественный процесс размыва вогнутого берега вдоль восточной бровки. Значительную роль в данном процессе играют стеснение канала бровками обмелевших мест отвалов грунта, расположенных в близости от кромок судового хода. Поток на участке «собран» в пределах своего водотока,

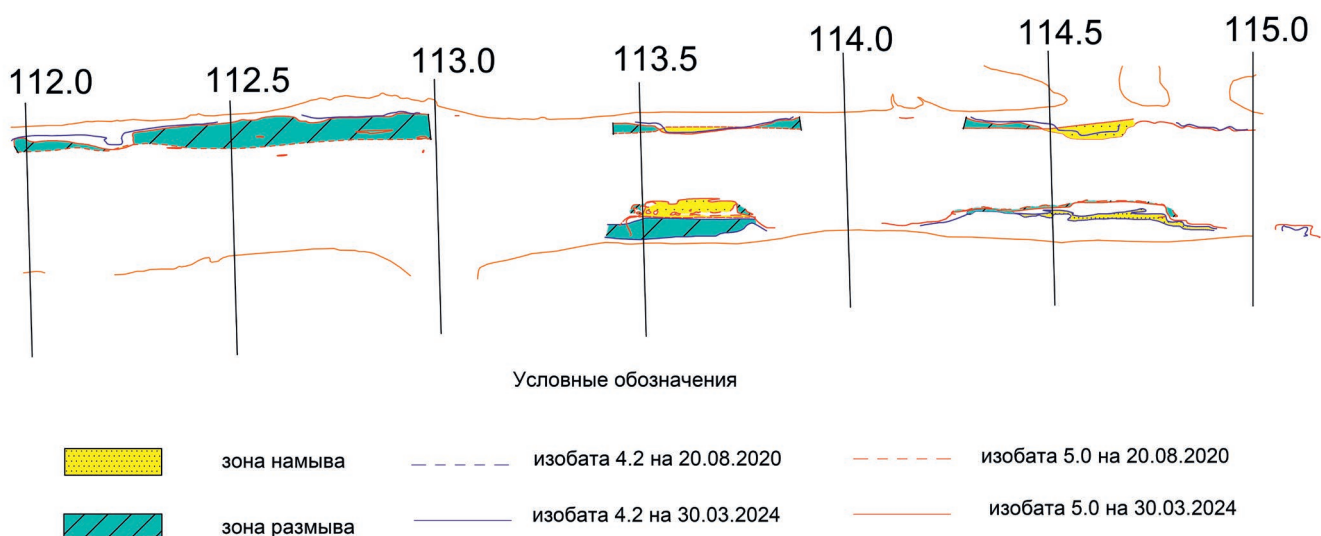


Рис. 2.1. Совмещенный план за 2020 и 2024 гг. 112–117 км судового хода

Рис. 2.1. Combined plan for 2020 and 2024 112–117 km of ship passage

образуя достаточно устойчивое течение, направленное в сторону восточной искусственной бровки. В дальнейшем, при последующем продолжающемся понижении УКМ, вдоль выпуклой западной бровки будут откладываться наносы, переносимые потоком с вышерасположенного участка.

Участок 120–125 км ВКМСК

На прямолинейном участке, как и на участке 112–117 км, продолжается процесс формирования побочной системы. Причем из-за поворота канала на 117–118 км, где поверхностные течения размывают восточную бровку, здесь идет перенаправление потока уже к западной, формируя цикличность процесса «переваливания» стрежня потока от одного бровочного берега к другому. Такой процесс характерен для абсолютно всех равнинных рек. Таким образом, здесь продолжается трансформация канала в форму речного русла с его изгибами и отмелями. Основным источником поступления наносов на участок является переработка берегов. Однако из-за достаточно больших глубин на участке этот фактор не сказывается на потере проходной способности участка. Здесь же формируется грядовый рельеф с шагом побочной около 3 км. Так, в будущем, при продолжающемся процессе формирования речного русла на 121 км и 124 км будут накапливаться наносы, которые преобразуют форму дна в вид переката. Остановить запущенный природой процесс не представляется возможным, однако при повышении уровня воды Каспийского моря речная трансформация естественным образом должна прекратиться.

Участок 125.85–130 км ВКМСК

Для наглядности картины деформаций совмещение данного участка производилось по двум изобатам 5.0 м и 6.0 м. В соответствии с описанным выше процессом трансформации канала здесь на уровне глубинных изобат отчетливо виден грядовый рельеф дна и перемещающиеся на глубине микроформы русла — донные гряды, размеры которых меньше глубины водотока, сформированного в канале. Микроформы покрывают, как правило, все дно реки и не создают морфологического строения русла, но выполняют две важные функции: гидравлическую — увеличивая шероховатость русла и интенсифицируя потери энергии, и гидрологическую — являясь формой перемещения донных наносов (рис. 2.2).

Участок 131–133 км ВКМСК

На рассматриваемом совмещенном плане на уровне более глубоких изобат 5.0 м и 6.0 м вдоль обеих кромок канала также наблюдается движение гряд в виде неровности дна и «пилообразности» глубин за обоими откосами участка (восточного и западного). Появление песчаных скоплений в виде чешуйчатых гряд, как типичных микроформ, является следствием локальных неравномерностей полей скоростей, которые появляются в волнообразной свободной поверхности воды, повсеместно нарушая равномерное донное движение наносов. Причиной, вызывающими такие чешуйчатые формы, являются разнонаправленность действия ветра и формирование пространственных ветровых волн.

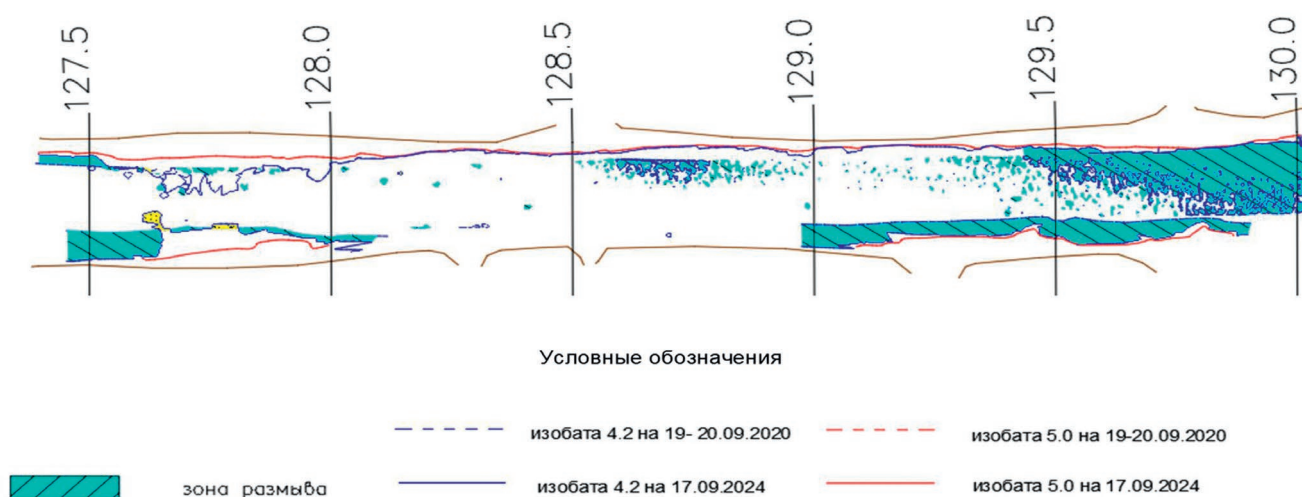


Рис. 2.2. Совмещенный план за 2020 и 2024 гг. 127.45–130 км судовой хода

Fig. 2.2. Combined plan for 2020 and 2024 127.45–130 km of ship passage

Участок 135–137 км ВКМСК

Совмещенный план участка построен в осенний период, когда наблюдаются затяжные восточные ветры (17.11.2020 и 13.10.2024). Такие планы позволяют оценить влияние нагонных явлений на канале с точки зрения его заносимости в условиях ограниченных бровок.

Так, в рассматриваемый период на всем участке наблюдается сползание наносов в ВКМСК с восточной бровки с интенсивностью 25–70 см/год. Однако западная бровка тормозит наносы, поступающие в канал с противоположного отвала, и не позволяет им уходить транзитом за границы судового хода. Здесь у западной ограниченной отвалами бровки наносы, находящиеся уже в менее слежавшемся (разрыхленном) состоянии, легко уносятся потоком из-за повышенных скоростей (более 1 м/с) на участке ВКМСК (рис. 2.3).

Участок 136–140 км ВКМСК

На совмещенном плане участка просматривается влияние удаленности кромки отвала от ближайшей границы канала. Так, западная бровка отвала располагается в удалении на 160 м от бровки. И если на вышерасположенном участке из-за ограниченности канала с двух сторон наносы спускались вниз по течению, то здесь из-за удаленности бровки происходит их аккумуляция за счет увеличения площади поперечного сечения канала в районе 137 км. Процесс заносимости предсказуем и направлен на плановую трансформацию канала. При отсутствии же западной бровки (на 138–139 км) наносы перемещаются уже за пределы ВКМСК, что подтверждает нецелесообразность ограничения канала с двух сторон, а требуется ограничение лишь со стороны наиболее неблагоприятного ветрового

воздействия (в данном случае с восточной стороны). Причем удаленность отвала играет не последнюю роль в интенсивности заносимости канала.

Участок 140–144.25 км ВКМСК

По участку просматривается достаточно стабильный размыв западной бровки канала с его интенсификацией в районе протяженного восточного прорана.

Причины указанных плановых деформаций видятся в следующем.

1. Влияние открытой восточной стороны значительно. Кроме того, при восточном ветре, в период действия которого построен план, без закрытия указанной стороны канала наблюдаются значительные переформирования. Если на вышерасположенном участке, где нет таких протяженных проранов вдоль восточной бровки, идет аккумуляция наносов из отвалов, то здесь — размыв левой кромки канала. Для уменьшения заносимости рассматриваемого участка канала необходимо закрытие восточной стороны, однако местоположение отвала должно быть по возможности удалено от кромки ВКМСК минимум на 100–200 м.

2. Ввиду значительной зоны донной эрозии на 143–143.75 км в плане поток снабжается дополнительным расходом наносов, которые при резком снижении скорости течения ниже по участку всегда будут откладываться на канале совместно с влекомыми и взвешенными наносами,двигающимися по рассматриваемому участку транзитом.

3. Ввиду наблюдаемых повышенных скоростей движения потока по участку здесь наблюдается достаточно стабильный процесс саморазмыва канала даже без участия неблагоприятного действия ветра. Поэтому все частицы грунта, вымываемые потоком

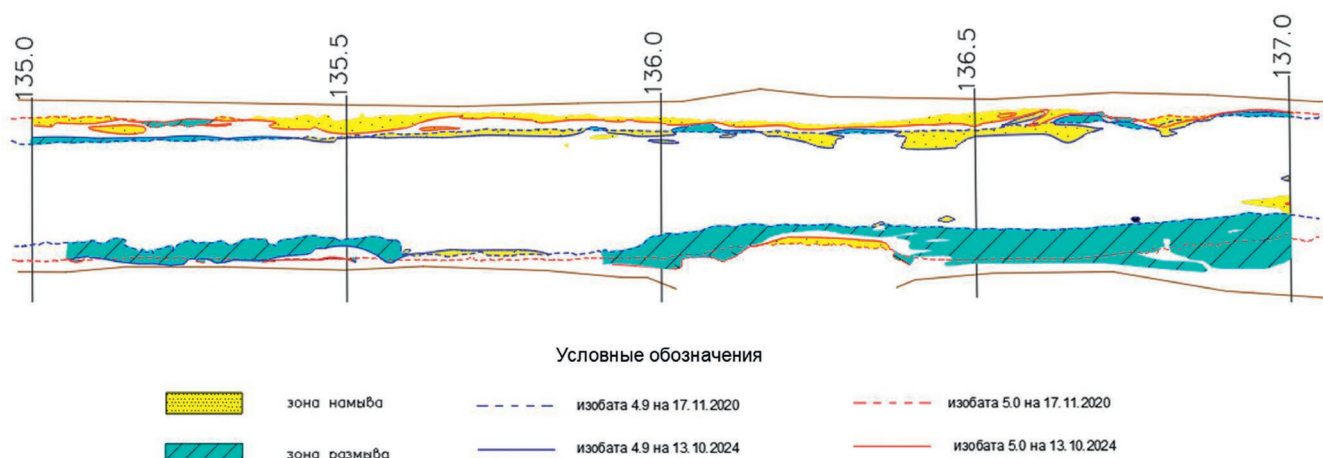


Рис. 2.3. Совмещенный план за 2020 и 2024 гг. 135–137 км судового хода

Fig. 2.3. Combined plan for 2020 and 2024 135–137 km of ship passage

со дна и забровочного пространства, подпитывают заносимость канала ниже рассматриваемых километров судового хода. Для уменьшения заносимости целесообразнее всего найти возможность снизить скорость движения потока по участку.

Участок 147–150 км ВКМСК

В настоящее время именно рассматриваемый участок судового хода является началом перехода зоны интенсивного размыва канала в зону направленной аккумуляции наносов. Непосредственно здесь начинается зона выклинивания подпора уровня Каспийского моря со всеми вытекающими отсюда процессами резкого уменьшения скоростного поля, наличия обратных уклонов свободной поверхности, наиболее сильного влияния ветровых течений и связанных с ними процессов образования ветровых волн. Кроме того, на участке ввиду понижения «экстремальных» для канала значений скорости течения более 1 м/с до наиболее благоприятных (0.6–0.7 м/с) опять запущен процесс переформирования ВКМСК в русловую систему с мелководными участками, боковыми побочными и остальными русловыми образованиями, связанными с деформациями русел естественных рек.

Участок 150–155 км ВКМСК

Изменения в районе поворота канала в большей степени связаны с русловыми переформированиями, когда поток плавно переваливается от одного берега (в данном случае от одной кромки) к другому. Здесь создается ограниченное бровками искривление судового хода с характерными вдолькромочными отмелями.

Кроме того, максимальное по размерам песчаное образование (коса) формируется у выпуклой

(восточной) стороны канала, распространяясь практически до вогнутой (западной) кромки канала, создавая отмель по всей ширине ВКМСК (рис. 2.4).

На основе проведенного подробного анализа совмещенных планов с 2020 по 2024 г. можно сделать следующие основные выводы:

1. Канал до 140 км к 2024 г. в значительной степени разработан не только по глубине, но и по ширине потока. Это связано с интенсификацией скоростей течения по длине канала.

2. При скоростях течения, приближенных к характерным значениям для естественных русел равнинных рек, на канале наблюдается трансформация в виде формирования перекатных участков — локальных аккумуляций наносов побочного типа вдоль кромочных отмелей. Они искривляют динамическую ось канала и свидетельствуют о наличии грядового режима движения.

3. За счет увеличения скорости течения на поворотных участках (особенно на Большом повороте, 151 км) происходит формирование более крутых изгибов: размыв условно вогнутых бровок и заносимость выпуклых — по принципу движения потока на поворотах реки.

4. Изменения скоростного поля потока в сторону значительных величин спровоцированы следующими факторами:

а) ограниченность потока двумя кромками канала с близко расположенными отмелями, образованными отвалами грунта, которые при понижении уровня Каспийского моря «обсохли»;

б) понижение уровня Каспийского моря и отступление морской части с относительно горизонтальным уровнем воды ниже 155 км канала;

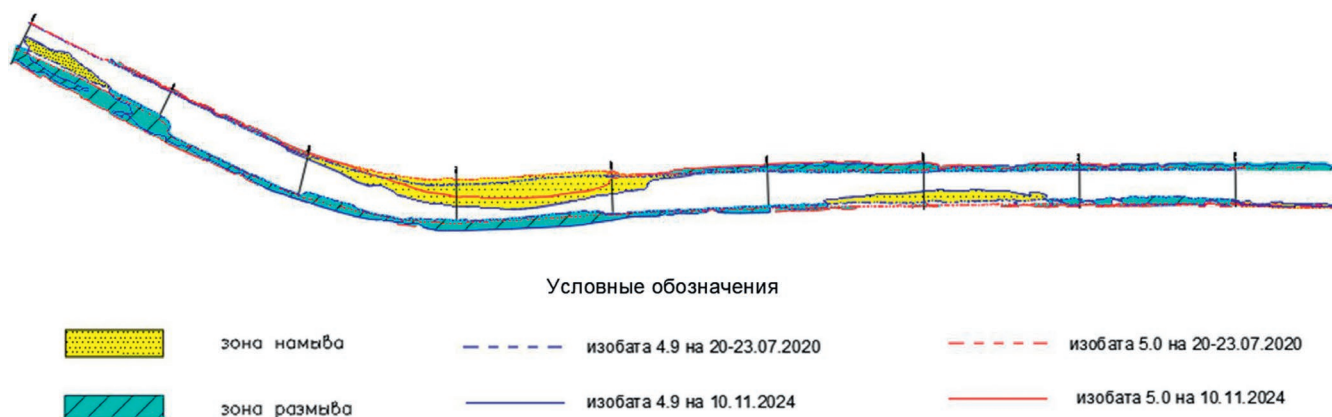


Рис. 2.4. Совмещенный план за 2020 и 2024 гг. 150–157 км судового хода

Fig. 2.4. Combined plan for 2020 and 2024 150–157 km of ship passage

в) наличие занесенных проранов различной ширины, которые не гасят поток и не оттягивают его частично в сторону свободной морской забровочной части.

5. Специфика канала состоит в том, что на достаточно протяженном участке требуется выдерживать навигационную глубину, достигаемую только дноуглублением до заданной постоянной отметки дна. Ровное по длине дно после дноуглубительных работ оказывает малое сопротивление потоку, и весь поток стекает в море по принципу гидравлического лотка трапецеидального сечения.

6. Близко расположенные вдоль канала отвалы грунта оказывают сильное влияние на возвратную заносимость.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что в связи с понижением уровня Каспийского моря интенсивность заносимости морских участков канала в ближайшей перспективе будет расти ускоренными темпами. Это потребует увеличения объемов ремонтных дноуглубительных работ для обеспечения безопасных условий судоходства, если не принимать организационно-технических мер по снижению заносимости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что в нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС за период эксплуатации сформировалась устойчивая тенденция эрозионного врезания русла. Однако к настоящему времени (спустя 40 лет) интенсивность деформаций снизилась до 1.1 см/год, что сопоставимо с понижением межженных уровней воды. Анализ многолетних данных не выявил однонаправленного необратимого падения уровней, обусловленного разработкой русловых карьеров, хотя потенциальная опасность дополнительного понижения в маловодные годы сохраняется.

На Волго-Каспийском канале доказано, что понижение уровня Каспийского моря провоцирует ускоренную трансформацию канала в речное русло с формированием перекаатов, побочней и грядового рельефа. Это ведет к росту заносимости и потребует увеличения объемов дноуглубительных работ.

Общим выводом является необходимость учета естественных и антропогенных изменений при планировании дноуглубления, проектировании карьеров и управлении режимами пусков гидроузлов. Рекомендовано продолжить мониторинг русловых деформаций и совершенствовать математическое моделирование для своевременной адаптации судоходной инфраструктуры к изменяющимся условиям.

ЛИТЕРАТУРА

Агеев С.О. Совершенствование научно-методического обеспечения эксплуатации низконапорных гидроузлов в целях улучшения условий судоходства в их бьефах (на примере Нижегородского низконапорного гидроузла на р. Волга): автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.19 <Эксплуатация водного транспорта, судовождение>, Н. Новгород, 2021.

Алексеевский Н.И., Фролова Н.Л. и др. Оценка влияния изменений климата на водный режим и сток рек бассейна Волги // Вода, химия и экология, № 4, апрель 2013. С. 2–12.

Атлас единой глубоководной системы Европейской части РФ (т. 6, ч. 1. Река Волга от Чебоксарского гидроузла до Самарского гидроузла). ФБУ «Администрация Волжского бассейна». 2022.

Болгов М.В., Левит-Гуревич Л.К. Задачи и функции системы поддержки водохозяйственных решений по управлению водными ресурсами Нижней Волги // Водные ресурсы. № 5. Т. 40. 2013. С. 507–518.

Водные ресурсы России и их использование / Под ред. И.А. Шикломанова. СПб: ГГИ, 2008. 600 с.

Временные основные правила использования водных ресурсов Чебоксарского водохранилища на р. Волге (на период начальной эксплуатации), РВ-249-82, утверждены приказом Министерства мелиорации и водного хозяйства РСФСР от 2 сентября 1982 г. № 531.

Гладков Г.Л. Гидравлические характеристики речного потока и условия транспорта наносов в нижнем бьефе гидроузла / Г.Л. Гладков, П.С. Ржаковская // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2023. Т. 15. № 3. С. 344–358.

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-344-358.

Гладков Г.Л., Католиков В.М. Гидроморфологическое обоснование судоходства в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла на реке Волге. Тридцать восьмое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов: доклады и сообщения. Пермь, 2023. С. 27–42.

Гладков Г.Л., Католиков В.М., Ржаковская П.С. Гидравлика потока и параметры транспорта наносов при неустановившемся движении воды в нижних бьефах гидроузлов на судоходных реках // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей: Сб. науч. тр.: Вып. 6 / Под ред. проф. Г.Л. Гладкова, К.П. Моргунова. СПб.: ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, 2023. С. 24–43.

Гладков Г.Л. Гидроморфология русел судоходных рек / Г.Л. Гладков, Р.С. Чалов, К.М. Беркович. 4-е изд., стер. Санкт-Петербург: Лань, 2023. 432 с. ISBN 978-5-507-46274-2. Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система.

URL: <https://e.lanbook.com/book/305216>

Гладков Г.Л. Водные пути / Г.Л. Гладков, М.В. Журавлев, А.Ю. Жук. Санкт-Петербург: Лань, 2023. 504 с. ISBN 978-5-507-45475-4. Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. URL: <https://e.lanbook.com/book/302396>

Гришанин К.В. Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеоздат, 1979. 311 с.

Добыча нерудных строительных материалов в водных объектах. Учет руслового процесса и рекомендации по проектированию и эксплуатации русловых карьеров. СТО ФГБУ «ГГИ» 52.08-2012.

Ежегодные данные о ресурсах поверхностных вод суши. Ч. 1. Реки и каналы. Т. 1. Вып. 24. Бассейны Волги (среднее и нижнее течение) и Урала. 1962–2019 гг.

Информация по погоде по данным метеостанции «Аэропорт Нариманово»

<https://ru.weatherspark.com/map?id=148839&pageType=7&yearNumber=2007>

Кодекс внутреннего водного транспорта Российской Федерации от 07.03.2001 № 24-ФЗ (ред. от 10.07.2023).

Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Зайцева И.С. Вклад деятельности человека в формирование экстремальных гидрологических ситуаций // Экстремальные гидрологические ситуации / Отв. ред. Н.И. Коронкевич, Е.А. Барабанова, И.С. Зайцева. М.: ООО «Медиа-ПРЕСС». 2010. С. 163–178.

Кривошей В.А. О Чебоксарском водохранилище и Городецком шлюзе // Гидротехника, 2011. № 4 (25). С. 21–30.

Минеева К.К., Русинова Н.Г. Планы строительства Чебоксарской ГЭС в 1940-е годы // Вестник Чувашского университета, № 2, 2021, с. 127–132.

Научно-прикладной справочник: Основные гидрологические характеристики рек бассейна Верхней Волги [Электронный ресурс] / Коллектив авторов; под редакцией Георгиевского В.Ю. Электрон. текстовые и граф. дан. в формате PDF (2 файла: 35Мб). Ливны: Издатель Мухаметов Г.В., 2015.

Основные гидрологические характеристики (за 1963–1970 гг. и весь период наблюдений). Т. 12. Нижнее Поволжье и Западный Казахстан. Вып. 1. Нижнее Поволжье. Л.: Гидрометеоздат, 1976, 1980 гг.

Основные правила использования водных ресурсов Куйбышевского водохранилища на р. Волге, утверждены приказом Министерства мелиорации

и водного хозяйства РСФСР от 11 ноября 1983 г. № 596.

Правила движения и стоянки судов в Волжском бассейне внутренних водных путей Российской Федерации. Утверждены приказом Минтранса России от 2 августа 2018 г. № 282.

Правила плавания по внутренним водным путям. Утверждены приказом Минтранса России № 19 от 19 января 2018 г. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 7 марта 2018 г. (регистрационный № 50283).

Правила содержания судовых ходов и судоходных гидротехнических сооружений. Утверждены приказом Минтранса России № 113 от 8 апреля 2020 г. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 9 июня 2020 г. (регистрационный № 58613).

Распоряжение Росморречфлота от 27.12.2024 № АТ-531-р «Об установлении категорий внутренних водных путей, определяющих для участков внутренних водных путей габариты судовых ходов и навигационно-гидрографическое обеспечение условий плавания судов, перечень судовых ходов, а также сроки работы средств навигационного оборудования и судоходных гидротехнических сооружений в навигацию 2025 года».

Рекомендации по прогнозу трансформации русла в нижних бьефах гидроузлов. СО 34.21.204-2005. ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева». Санкт-Петербург, 2006.

Родионов А.А., Румянцев В.А., Федоров М.П. и др. Варианты решения проблем судоходства на лимитированном участке реки Волги от Городецкого гидроузла до Нижнего Новгорода, в том числе с учетом оценки влияния на санитарно-эпидемиологическую и экологическую ситуацию в регионе // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 4. С. 109–131.

doi:10.48612/fpg/abfh-m2n7-9mn6

Руководство по улучшению судоходных условий на свободных реках. СПб.: ЛИВТ, 1992. 312 с.

Сазонов А.А. Специальная лоция ЕГС. Ч. V. Куйбышевское, Саратовское и Волгоградское водохранилища: учеб. пособие для студ. и курсан. оч. и заоч. обуч. высш. и сред. спец. учеб. завед.: специальность 180402 «Судовождение» / А.А. Сазонов, В.С. Добровольский. Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2015. 92 с.

СП 11-103-97. Инженерно-гидрометеорологические изыскания для строительства. Одобрено Департаментом развития научно-технической политики и проектно-изыскательских работ Госстроя России (письмо от 10.07.1997 № 9-1-1/69). Принят и введен в действие с 15 августа 1997 г.

ОБ АВТОРАХ

СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. Одобрен для применения в качестве нормативного документа постановлением Госстроя России № 218 от 26 декабря 2003 г. М.: Госстрой России, 2004. 73 с.

Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна р. Волга. Книга 7. Сводный том СКИОВО. 219 с.

Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р.

Характерные уровни воды рек, каналов, озер и водохранилищ (погодичные данные). Т. 1. РСФСР, вып. 24. Бассейны р. Волги (среднее и нижнее течение) и Урала. Л.: Гидрометеиздат, 1985, 1989.

Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика / Р.С. Чалов. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. Т. 1: Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. 608 с.

Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика / Р.С. Чалов. М.: КРА-САНД, 2011. Т. 2. Морфодинамика речных русел. 960 с.

Шикломанов И.А. Влияние хозяйственной деятельности на речной сток. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 334 с.

Marian Muste, Kyutae Lee, Dongsu Kim, Ciprian Vacotiu, Marcela Rojas Oliveros, Zhengyang Cheng & Felipe Quintero (2020) Revisiting hysteresis of flow variables in monitoring unsteady streamflows, *Journal of Hydraulic Research*, 58:6, 867-887, DOI: 10.1080/00221686.2020.1786742

Гладков Геннадий Леонидович – ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова». Доктор технических наук, профессор. Заведующий кафедрой водных путей и водных изысканий. Служебный адрес: РФ, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7. gladkovgl@gumrf.ru

Беляков Пахом Витальевич – ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова». Кандидат технических наук, доцент кафедры водных путей и водных изысканий. Служебный адрес: РФ, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7. belyakovpv@gumrf.ru

Еремеева Анна Олеговна – ФГБУ «Государственный гидрологический институт». Кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Служебный адрес: РФ, г. Санкт-Петербург, 2-я линия ВО, д. 23. eranol@mail.ru

Ситнов Александр Николаевич – ФГБОУ ВО «ВГУВТ». Доктор технических наук, профессор. Заведующий кафедрой водных путей и гидротехнических сооружений. Служебный адрес: РФ, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5а. sitnov.an@vsuwt.ru

Воронина Юлия Евгеньевна – ФГБОУ ВО «ВГУВТ». Кандидат технических наук, доцент кафедры водных путей и гидротехнических сооружений. Служебный адрес: РФ, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5а. Yulez@yandex.ru

HYDROMORPHOLOGICAL REGIME AND PROVISION OF NAVIGABLE CONDITIONS ON THE MIDDLE AND LOWER VOLGA, TAKING INTO ACCOUNT CLIMATIC AND ANTHROPOGENIC CHANGES

G.L. Gladkov^{1*}, P.V. Belyakov¹, A.O. Eremeeva²,
A.N. Sitnov³, Yu.E. Voronina³

¹ Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russia

² State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

³ Volzhsky State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

*gladkovgl@gumrf.ru

Abstract. The paper presents the results of comprehensive studies of the hydromorphological regime of the Lower Volga at two sites: the tailrace of the Cheboksary HPP and the Volga-Caspian Sea Navigation Canal. For the first time, longterm hydrological and channel observations (from 1877 to the present) are combined with mathematical modeling data. Methods of correlation-regression analysis, water level exceedance probability assessment, and comparison of channel survey plans are used. It is established that in the tailrace of the Cheboksary HPP, after 40 years of operation, the intensity of erosion has decreased to 1.1 cm/year, and the correlation of water levels between the

gauges “HPP tailrace” and “Kozlovka village” is 0.927, indicating the absence of irreversible water level lowering associated with the development of channel quarries. On the Volga-Caspian Canal, it is shown that the lowering of the Caspian Sea level provokes accelerated transformation of the canal into a river channel with the formation of riffles, side bars, and dune bedforms, leading to increased siltation and necessitating larger dredging volumes. The obtained results are of practical importance for planning dredging operations, optimizing hydropower release regimes, and locating spoil disposal sites.

Keywords: channel morphometric characteristics, flow velocity, sediment transport, dune bedform parameters, channel deformations, Volga-Caspian Canal, Cheboksary HPP

REFERENCES

- Ageev S.O. Improvement of scientific and methodological support for the operation of low-head hydroelectric facilities in order to improve navigation conditions in their tailraces (using the example of the Nizhny Novgorod low-head hydroelectric facility on the Volga River): abstract of Candidate of Technical Sciences dissertation: 05.22.19 “Operation of water transport, navigation”. Nizhny Novgorod, 2021. (In Russ.)
- Alekseevskiy N.I., Frolova N.L. et al. Assessment of the impact of climate change on the water regime and river runoff of the Volga basin // *Water, Chemistry and Ecology*. No. 4, April 2013. P. 2–12. (In Russ.)
- Annual Data on Surface Water Resources of Land. Part 1. Rivers and Canals. Vol. 1. Issue 24. Volga Basins (middle and lower reaches) and Ural. 1962–2019. (In Russ.)
- Atlas of the Unified Deep-Water System of the European Part of the Russian Federation (Vol. 6, Part 1. Volga River from the Cheboksary Hydroelectric Facility to the Samara Hydroelectric Facility). Federal Budgetary Institution “Administration of the Volga Basin”. 2022. (In Russ.)
- Basic Rules for the Use of Water Resources of the Kuibyshev Reservoir on the Volga River, approved by Order No. 596 of the Ministry of Land Reclamation and Water Management of the RSFSR dated November 11, 1983. (In Russ.)
- Bolgov M.V., Levit-Gurevich L.K. Tasks and functions of the decision support system for water resources management of the Lower Volga // *Water Resources*. No. 5. Vol. 40. 2013. P. 507–518.
- Chalov R.S. River Channel Science: Theory, Geography, Practice / R.S. Chalov. Moscow: LKI Publishing House, 2008. Vol. 1: Channel Processes: Factors, Mechanisms, Forms of Manifestation and Conditions of River Channel Formation. 608 p. (In Russ.)
- Chalov R.S. River Channel Science: Theory, Geography, Practice / R.S. Chalov. Moscow: KRASAND, 2011. Vol. 2: Morphodynamics of River Channels. 960 p. (In Russ.) Characteristic Water Levels of Rivers, Canals, Lakes and Reservoirs (annual data). Vol. 1. RSFSR, issue 24. Basins of the Volga River (middle and lower reaches) and the Ural River. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985, 1989. (In Russ.)
- Code of Inland Water Transport of the Russian Federation dated 07.03.2001 No. 24-FZ (as amended on 10.07.2023). (In Russ.)
- Code of Practice SP 11-103-97. EngineeringHydro-meteorological Surveys for Construction. Approved by the Department of Development of ScientificTechnical Policy and DesignSurvey Works of Gosstroy of Russia (letter No. 9-1-1/69 dated 10.07.1997). Adopted and put into effect on August 15, 1997. (In Russ.)
- Code of Practice SP 33-101-2003. Determination of Basic Calculated Hydrological Characteristics. Approved for use as a normative document by Resolution No. 218 of Gosstroy of Russia dated December 26, 2003. Moscow: Gosstroy of Russia, 2004. 73 p. (In Russ.)
- Extraction of NonMetallic Construction Materials in Water Bodies. Consideration of Channel Processes and Recommendations for Design and Operation of Channel Quarries. Standard of the Organization (STO) of the Federal State Budgetary Institution “State Hydrological Institute (GGI)” 52.08-2012. (In Russ.)
- Gladkov G.L., Chalov R.S., Berkovich K.M. Hydromorphology of Navigable River Channels. 4th ed., ster. St. Petersburg: Lan’, 2023. 432 p. ISBN 978-5-507-46274-2. Text: electronic // Lan’: electronic library system. URL: <https://e.lanbook.com/book/305216> (In Russ.)
- Gladkov G.L., Katolikov V.M. Hydromorphological substantiation of navigation in the tailrace of the Nizhny Novgorod Hydroelectric Facility on the Volga River // Thirtyeighth Plenary Interuniversity Coordination Meeting on the Problem of Erosion, Channel and Estuary Processes: reports and communications. Perm, 2023. P. 27–42. (In Russ.)
- Gladkov G.L., Katolikov V.M., Rzhakovskaya P.S. Flow hydraulics and sediment transport parameters under unsteady water movement in tailraces of hydroelectric facilities on navigable rivers // *Waterways and Channel Processes. Hydraulic Structures of Waterways: Collection of scientific papers. Issue 6 / Ed. by prof. G.L. Gladkov, K.P. Morgunov*. St. Petersburg: Admiral S.O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 2023. P. 24–43. (In Russ.)
- Gladkov G.L., Rzhakovskaya P.S. Hydraulic characteristics of river flow and sediment transport conditions

- in the tailrace of a hydroelectric facility // Bulletin of the Admiral S.O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping. 2023. Vol. 15. No. 3. P. 344–358. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-344-358. (In Russ.)
- Gladkov G.L., Zhuravlev M.V., Zhuk A.Yu. Waterways. St. Petersburg: Lan', 2023. 504 p. ISBN 978-5-507-45475-4. Text: electronic // Lan': electronic library system.
- URL: <https://e.lanbook.com/book/302396> (In Russ.)
- Grishanin K.V. Dynamics of Channel Flows. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979. 311 p. (In Russ.)
- Guidelines for Improving Navigation Conditions on Free Rivers. St. Petersburg: Leningrad Institute of Water Transport (LIVT), 1992. 312 p. (In Russ.)
- Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Zaitseva I.S. The contribution of human activity to the formation of extreme hydrological situations // Extreme Hydrological Situations / Ed. by N.I. Koronkevich, E.A. Barabanova, I.S. Zaitseva. Moscow: Media-PRESS LLC. 2010. P. 163–178. (In Russ.)
- Krivoshey V.A. On the Cheboksary Reservoir and the Gorodets Lock // Gidrotehnika (Hydraulic Engineering). 2011. No. 4 (25). P. 21–30. (In Russ.)
- Main Hydrological Characteristics (for 1963–1970 and the entire observation period). Vol. 12. Lower Volga and Western Kazakhstan. Issue 1. Lower Volga. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1976, 1980. (In Russ.)
- Marian Muste, Kyutae Lee, Dongsu Kim, Ciprian Bacotiu, Marcela Rojas Oliveros, Zhengyang Cheng & Felipe Quintero (2020) Revisiting hysteresis of flow variables in monitoring unsteady streamflows // Journal of Hydraulic Research. 58:6, 867-887.
- DOI: 10.1080/00221686.2020.1786742
- Mineeva K.K., Rusinova N.G. Plans for the construction of the Cheboksary HPP in the 1940s // Bulletin of the Chuvash University. No. 2, 2021. P. 127–132. (In Russ.)
- Order of the Federal Agency for Maritime and River Transport (Rosmorrechflot) dated December 27, 2024 No. AT531r “On establishing categories of inland waterways that determine the dimensions of navigable channels and navigational hydrographic support for navigation conditions of vessels, the list of navigable channels, as well as the operating periods of navigation aids and navigable hydraulic structures during the 2025 navigation season”. (In Russ.)
- Recommendations for Predicting Channel Transformation in Tailraces of Hydroelectric Facilities. Standard of the Organization (SO) 34.21.204-2005. JSC “B.E. Vedenev All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering (VNIIG)”. St. Petersburg, 2006. (In Russ.)
- Rodionov A.A., Rumyantsev V.A., Fedorov M.P. et al. Options for solving navigation problems on the con-
- strained section of the Volga River from the Gorodets Hydroelectric Facility to Nizhny Novgorod, including assessment of the impact on the sanitary-epidemiological and environmental situation in the region // Fundamental and Applied Hydrophysics. 2022. Vol. 15, No. 4. P. 109–131.
- DOI: 10.48612/fpg/abfh-m2n7--9mn6 (In Russ.)
- Rules for Navigation and Anchoring of Vessels in the Volga Basin of Inland Waterways of the Russian Federation. Approved by Order No. 282 of the Ministry of Transport of Russia dated August 2, 2018. (In Russ.)
- Rules for the Maintenance of Navigable Channels and Navigable Hydraulic Structures. Approved by Order No. 113 of the Ministry of Transport of Russia dated April 8, 2020. Registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on June 9, 2020 (registration No. 58613). (In Russ.)
- Rules of Navigation on Inland Waterways. Approved by Order No. 19 of the Ministry of Transport of Russia dated January 19, 2018. Registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on March 7, 2018 (registration No. 50283). (In Russ.)
- Sazonov A.A., Dobrovolsky V.S. Special Pilotage Guide of the Unified Deep Water System (EGS). Part V. Kuibyshev, Saratov and Volgograd Reservoirs: textbook for students and cadets of higher and secondary specialized educational institutions, specialty 180402 “Navigation”. Nizhny Novgorod: Publishing House of Volga State University of Water Transport (VGUVT), 2015. 92 p. (In Russ.)
- Scheme for Integrated Use and Protection of Water Bodies of the Volga River Basin. Book 7. Summary Volume of the Scheme (SKIOVO). 219 p. (In Russ.)
- Scientific and Applied Handbook: Main Hydrological Characteristics of Rivers of the Upper Volga Basin [Electronic resource] / Team of authors; ed. by Georgievskiy V. Yu. Electronic text and graphics in PDF (2 files: 35 MB). Livny: Publisher Mukhametov G.V., 2015. (In Russ.)
- Shiklomanov I.A. Influence of Economic Activities on River Runoff. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989. 334 p. (In Russ.)
- Temporary Basic Rules for the Use of Water Resources of the Cheboksary Reservoir on the Volga River (for the period of initial operation), RV-249-82, approved by Order No. 531 of the Ministry of Land Reclamation and Water Management of the RSFSR dated September 2, 1982. (In Russ.)
- Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035. Approved by Order No. 3363r of the Government of the Russian Federation dated November 27, 2021. (In Russ.)
- Water Resources of Russia and Their Use / Ed. by I.A. Shiklomanov. St. Petersburg: State Hydrological Institute (GGI), 2008. 600 p. (In Russ.)

ABOUT THE AUTHORS

Gladkov Gennady Leonidovich – FSBEI HE «GUMRF named after Admiral S.O. Makarov.» Doctor of Technical Sciences, Professor. Head of the Department of Waterways and Water Surveys. Business address: 5/7 Dvinskaya St., gladkovgl@gumrf.ru, St. Petersburg, Russia

Belyakov Pakhom Vitalievich – FSBEI HE «GUMRF named after Admiral S.O. Makarov.» Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Waterways and Water Surveys. Business address: 5/7 Dvinskaya St., belyakovpv@gumrf.ru, St. Petersburg, Russia

Eremeeva Anna Olegovna – FSBI «State Hydrological Institute». Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher. Business address: 23, 2nd line VO, St. Petersburg, Russian Federation, eranol@mail.ru

Sitnov Alexander Nikolaevich – FSBEI HE «VGUVT» Doctor of Technical Sciences, Professor. Head of the Department of Waterways and Hydraulic Structures. Business address: Russian Federation, Nizhny Novgorod, st. Nesterova, 5a. sitnov.an@vsuwt.ru

Voronina Julia Evgenievna – FSBEI HE «VGUVT» Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Waterways and Hydraulic Structures. Business address: Russian Federation, Nizhny Novgorod, st. Nesterova, 5a. Yulez@yandex.ru