

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

О.Г. Савичев

ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РЕШЕНИЙ

Монография

Издательство
Томского политехнического университета
2021

УДК 556.504.4
ББК 26.22:20.1
С13

Савичев О.Г.

С13 Гидроэкологическое обоснование водохозяйственных решений : монография / О.Г. Савичев ; Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2021. – 167 с.

ISBN 978-5-4387-1038-7

В монографии проанализированы базовые понятия о водных объектах и их водосборах, структура, внутренние и внешние связи водосборных геосистем с окружающей средой; рассмотрены методы оценки опасных процессов, связанных с негативным воздействием вод на инженерные объекты и негативным антропогенным воздействием на водные объекты. Предложены базовые положения методологии и методика гидроэкологического обоснования водохозяйственных решений в рамках градостроительной деятельности, направленного на сопряжение жизненных циклов водосборных геосистем и инженерных объектов в их пределах.

Предназначено для специалистов в области гидрологии, гидрогеологии, инженерной геологии и геоэкологии, а также аспирантов и студентов вузов, обучающихся по специальностям и направлениям профиля наук о Земле.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-55-80015.

УДК 556.504.4
ББК 26.22:20.1

Рецензенты

Кандидат геолого-минералогических наук
директор Сибирского регионального центра ГМСН –
филиала ФГБУ «Гидроспецгеология»
В.А. Льготин

Доктор геолого-минералогических наук
директор томского филиала Института нефтегазовой геологии
и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН
О.Е. Лепкурова

ISBN 978-5-4387-1038-7

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2021
© Савичев О.Г., 2021
© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2021

ВВЕДЕНИЕ

Исследования водных объектов в той или иной форме проводятся при реализации всех видов градостроительной деятельности, под которой, согласно [70, ст. 1, п. 1], понимается «деятельность по развитию территорий, в том числе городов и иных поселений, осуществляемая в виде территориального планирования, градостроительного зонирования, планировки территории, архитектурно-строительного проектирования, строительства, капитального ремонта, реконструкции, сноса объектов капитального строительства, эксплуатации зданий, сооружений, комплексного развития территорий и их благоустройства». Эта деятельность должна осуществляться на основе соблюдения принципа соблюдения прав человека на благоприятную окружающую среду, качество которой (состояние, характеризующееся совокупностью физических, химических, биологических и иных показателей) обеспечивает устойчивое функционирование естественных экологических систем, природных, природно-антропогенных и антропогенных объектов [150].

При этом соблюдение требований природоохранного законодательства должно осуществляться на всех стадиях жизненного цикла всех объектов градостроительной деятельности (под жизненным циклом производственной системы в целом понимаются последовательные или взаимосвязанные стадии от приобретения сырья или разработки природных ресурсов до утилизации продукции [68], а под жизненным циклом здания или сооружения – период, в течение которого осуществляются инженерные изыскания, проектирование, строительство, эксплуатация, реконструкция, капитальный ремонт, снос [268]).

В самых общих чертах эти стадии сводятся к: а) разработке стратегии и тактики развития территорий; б) постановке задач и обоснованию мероприятий их решения в виде модели объекта (проектно-изыскательской документации, комплекса предварительных и последующих согласований и утверждений) с прохождением государственной и общественной (строительной и экологической) экспертизы; в) строительству (включая производственный экологический контроль и мониторинг, государственный контроль и надзор строительных работ) с получением акта приемки в эксплуатацию; г) эксплуатации (включая производственный и государственный экологический контроль и мониторинг, нормирование негативных воздействий на окружающую среду и постановку природоохранных задач с переходом к п. «а»); д) реконструкции или ликвидации объекта, в том числе разработке модели соответствующих работ.

Указанная выше схема теоретически должна обеспечить соблюдение природоохранного законодательства при осуществлении всех видов градостроительной деятельности. Тем не менее, до сих пор периодически отмечаются случаи экстремального загрязнения водных объектов, наводнения и иные негативные явления [27, 28, 30, 69], что указывает на необходимость построения общей методологии и методики *гидроэкологического обоснования градостроительной деятельности*, под которым далее будет пониматься *сопряжение оценки жизненного цикла водосборных геосистем и жизненных циклов зданий и сооружений на их территории для обеспечения прав человека на благоприятную окружающую среду и условия жизнедеятельности посредством разработки системы взаимосвязанных и взаимосогласованных документов по территориальному планированию, градостроительному зонированию, планировке территорий, архитектурно-строительному проектированию, строительству, эксплуатации, реконструкции и сносу зданий и сооружений в пределах водосбора и водных объектов (в их составе)*.

Именно такая цель, но с акцентом на изучение, использование и охрану водных объектов, поставлена в рамках рассматриваемой работы, а именно – *разработка методологии и методики гидроэкологического обоснования водохозяйственных решений в рамках градостроительной деятельности* (решений, связанных с учетом, изучением, использованием, охраной водных ресурсов и предупреждением негативного воздействия вод [48, 65]). Нет сомнений, что это обоснование может приобрести более или менее заверченный вид только в результате коллективной работы государственных органов управления, научных, проектно-исследовательских организаций и иных организаций, осуществляющих водохозяйственную деятельность. Поэтому степень ее достижения автором, конечно же, заведомо соответствует только какому-то приближению к требуемому результату и, самое главное, приглашению к дискуссии.

Общая структура работы (в соответствии с требованиями [159, 160, 255]) определяется необходимостью: 1) рассмотрения водосбора как геосистемы и фиксации используемой терминологии; 2) анализа структуры, внутренних и внешних связей водных объектов и их водосборов с окружающей средой; 3) анализа опасных процессов и явлений, связанных с негативным действием вод на инженерные объекты и с негативным антропогенным воздействием на водные объекты и водосборы; 4) формулирования основных положений гидроэкологического обоснования водохозяйственной деятельности на основе анализа структуры водосборных геосистем и протекающих в них опасных гидрологических и геохимических процессов.

1. ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ КАК ЧАСТЬ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

1.1. Водосбор как геосистема. Свойства водосбора

Достижение указанной во введении цели (разработки методологии и методики гидроэкологического обоснования водохозяйственных решений в рамках градостроительной деятельности) предусматривает рассмотрение некоторой системы с характерными структурой и связями между компонентами и окружающей средой, в пределах которой формируется водный сток, иными словами – водосбора, под которым, согласно [47], понимается «часть земной поверхности и толща почв и горных пород, откуда вода поступает к водному объекту». В соответствии с [150] и с учетом [7, 181], водосбор далее рассматривается как комплекс (или совокупность комплексов) функционально связанных природных, природно-антропогенных и антропогенных объектов, образующий геосистему – обобщенное понятие социально-экономических систем и экосистем [38, 214].

Согласно [238, 266], любая система представляет собой отображение объектов, их связей и свойств на языке и в целях «наблюдателя» и обладает (1) статическими, (2) динамическими и (3) интегральными свойствами: 1.1) целостность (способность выступать (по крайней мере, с точки зрения наблюдателя) как единое целое, отличающееся от окружающей среды – совокупности объектов, изменение свойств которых взаимосвязано с состоянием системы); 1.2) открытость; 1.3) внутренняя неоднородность; 1.4) структурированность (взаимосвязанность частей системы); 2.1) функциональность (исходя из определения системы наблюдатель оценивает процессы на ее выходе, то есть функции системы, представляющие собой поведение системы в окружающей среде); 2.2) стимулируемость (изменение состояния вследствие воздействий извне); 2.3) изменчивость во времени; 2.4) существование в изменяющейся среде; 3.1) эмерджентность (наличие качеств, присущих только этой системе); 3.2) неразделимость на части (следствие эмерджентности, выделяемое отдельно с точки зрения практической важности изучения или управления системой); 3.3) ингерентность (приспособленность и совместимость с окружающей средой); 3.4) целесообразность (система рассматривается как средство достижения цели).

Сопоставление понятий о водосборе и ландшафте (территориальной системе, состоящей из взаимодействующих природных или природных и антропогенных компонентов и комплексов более низкого таксономического ранга [44]) указывает на их определенное сходство. Это позволяет использовать при изучении водосборов те же подходы, что и

при изучении ландшафтов. В частности, классификацию водосборов, как и классификацию ландшафтов, целесообразно проводить в соответствии с рекомендациями [45] на основе анализа сочетаний антропогенных и природных факторов их формирования. Безусловно, в общем случае водосборы и ландшафты представляют собой, согласно [38], пересекающиеся, но не идентичные множества объектов (выделяемых разными способами вследствие несовпадения целей наблюдателей). Но этот вопрос в какой-то мере может быть решен, если рассматривать наименьший таксономический уровень геосистемы «водосбор» как специфический ландшафт с обязательным наличием водного объекта.

Под последним, согласно [29], понимается природный или искусственный водоем, водоток либо иной объект, постоянное или временное сосредоточение вод в котором имеет характерные формы и признаки водного режима, представляющего собой изменение во времени уровней, расхода и объема воды. Такой водосбор (ландшафт, в пределах которого сформировался водный объект) может быть охарактеризован как «малый» с учетом выделения категории «малая река» по [47]: к малым рекам относятся водотоки, водосборы которых расположены в одной географической зоне, а гидрологический режим (совокупность закономерно повторяющихся изменений состояния водного объекта, присущих ему и отличающих его от других водных объектов) вследствие влияния местных факторов может быть не свойственен для других водотоков этой зоны. Если использовать терминологию, принятую в [68], то наименьший таксономический уровень водосбора – элементарный водосбор – это минимально возможная в конкретном ландшафте совокупность материально и энергетически связанных единичных процессов (продукционная система), которая выполняет одну или более конкретных функций формирования гидрологического режима. Соответственно, расширение водосборной территории в пределах одной географической зоны (согласно [181], части физико-географического пояса с особыми характером геоморфологических процессов и типами климата, растительности, почв и животного мира) позволяет выделить категорию «средний водосбор», а в двух и более – «большой водосбор».

В целом (с учетом указанных выше свойств геосистем и требований [252]), можно сформулировать следующие свойства водосборов: 1) категории водосборов и водных объектов в их составе должны совпадать; 2) гидрологические характеристики водных объектов с малыми водосборами определяются локальными факторами, соответствующими геосистемам уровня не менее «ландшафт»; комплексы уровней «фация», «урочище», «местность» соответствуют частям водосбора или водного объекта; картирование гидрологических характеристик малых водных

объектов может проводиться в основном путем составления карт или схем однородных районов; 3) гидрологические характеристики водных объектов со средними водосборами отражают зональные изменения, а их картирование может осуществлено путем построения карт или схем изолиний; 4) гидрологические характеристики водных объектов с большими водосборами в общем случае являются уникальными, а их картирование сводится, преимущественно, к интерполяции между створами с известными характеристиками с учетом географических зон.

1.2. Водные объекты. Типы, виды и границы водных объектов

Определение водного объекта, согласно [29], приведено в разд. 1.1, но все же следует отметить следующее. Во-первых, при анализе отличительных признаков водного объекта целесообразно говорить не о водном, а гидрологическом режиме, включающем в себя изменение во времени не только уровней, расходов и объемов воды (то есть водный режим), но также содержаний и стока твердых и растворенных веществ, гидробионтов, температуры воды и теплового потока, ледовых образований, а также границ водных объектов, связанных с деформациями берегов и дна водоемов и водотоков.

Во-вторых, в действующем Российском законодательстве (по состоянию на 2021 г.) нет однозначных определений понятия о характерных формах, в которых выявляется некоторое сосредоточение вод. В случае поверхностных водных объектов под такими формами обычно имеется ввиду дно и берега в пределах береговой линии – границы водного объекта. Дно поверхностного водного объекта сложено наносами, являющимися продуктом взаимодействия воды с горными породами [47], и представляет собой, согласно [147], границу между поверхностными водными объектом и недрами, то есть между средами с разными гидрологическими режимами. Этот признак может быть использован и при определении характерных форм подземных водных объектов и их границ (пространство взаимодействия двух и более объектов с различными гидрологическими режимами, сформированное продуктами их взаимодействия).

Таким образом, под водным объектом, с учетом положений системного анализа и определений [29, 47, 67], целесообразно понимать сосредоточение природных вод на поверхности суши или в горных породах, изменения состояния которого в пространстве и времени статистически значимо отличаются от изменений состояния вод в окружающей среде. В настоящее время в Российской Федерации, в зависимости от положения относительно недр (на их верхней границе или в толще), к

группе поверхностных водных объектов относятся сосредоточения вод на поверхности суши, к группе подземных – в горных породах, а в рамках указанных групп – типы и виды (табл. 1.2.1).

Таблица 1.2.1

Классификация водных объектов согласно [66]

Группа	Тип	Вид
Поверхностные водные объекты	Моря или их отдельные части	Внутренние моря (средиземные и полузамкнутые), окраинные, межостровные; проливы, заливы, в т. ч. бухты, лиманы и др.
	Водотоки	Реки, ручьи, каналы
	Водоемы	Озера, пруды, обводненные карьеры, водохранилища
	Болота	Болота грунтового водного питания, атмосферно-грунтового водного питания, атмосферного водного питания
	Природные выходы подземных вод	Родники, гейзеры
	Ледники, снежники	–
Подземные водные объекты	Бассейны подземных вод	Артезианские бассейны; бассейны грунтовых, трещинных вод; бассейны подземного стока
	Водоносные горизонты	Первый, второй и другие водоносные горизонты

Подобный подход понятен с точки зрения земле- и водопользования, но его теоретическая обоснованность не столь очевидна по целому ряду причин. Например, область разгрузки подземных вод в виде родников и гейзеров – то есть частей подземных водных объектов – отнесена к поверхностным водным объектам (табл. 1.2.1), но при этом никак не обозначены способы определения их границ. Другой яркий пример – отнесение к поверхностным водным объектам болот, но: 1) на их поверхности произрастает растительность, включая древесную; 2) по крайней мере, верхняя часть болота отвечает условиям отнесения к почвам; 3) акватория во многих случаях отсутствует; 4) движение болотных вод аналогично движению подземных, а не поверхностных вод; 5) присутствие болотных вод в толще торфа является обязательным признаком болота согласно [47]; 6) торф рассматривается как полезное ископаемое, а его скопления, которые оце-

нены и пригодны для использования, – как месторождение полезного ископаемого, то есть часть недр и т. д.

Конечно, найти консенсус по этим (и многим другим) вопросам сложно, но, все же, было бы целесообразно рассматривать: 1) выходы подземных вод (родники и гейзеры) именно как части подземных водных объектов, но со специфическим режимом использования и охраны; 2) болота – как особый вид природных и природно-антропогенных объектов, для использования и охраны которых требуется специальная нормативная база. Еще одна важная особенность любого водного объекта – наличие водосбора (если, конечно, принять эту концепцию). Тогда понятия о водном объекте и его водосборе абсолютно взаимосвязаны и взаимодополняемы – без водного объекта нет водосбора, а без водосбора нет водного объекта.

Обозначенная выше проблема критериев существования водного объекта сопряжена с другой, не менее важной проблемой, – определением границ водного объекта и его водосбора. Выше было высказано предложение рассматривать границы водных объектов как пространство взаимодействия двух и более объектов с различными гидрологическими режимами, сформированное продуктами такого взаимодействия. Какого-либо другого определения границы водного объекта в действующем Российском законодательстве по состоянию на 2021 г. нет, за исключением определения границы ландшафта (поверхности раздела смежных ландшафтов, отражающей смену их качеств, свойств [44]) и некоторых результатов научных исследований в области географии [7, 181], но имеют методические указания по оценке границ (береговой линии).

Так, согласно [29], граница поверхностного водного объекта определяется для: 1) моря – по постоянному уровню воды, а в случае периодического изменения уровня воды – по линии максимального отлива; 2) реки, ручья, канала, озера, обводненного карьера – по среднемуголетнему уровню вод в период, когда они не покрыты льдом; 3) пруда, водохранилища – по нормальному подпорному уровню воды; 4) болота – по границе залежи торфа по нулевой глубине. В [151] приводится уточнение методики определения границ водного объекта, которая в общем случае основана на анализе картографического материала наиболее крупного масштаба, данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и не предполагает масштабных полевых топогеодезических работ.

Однако, согласно [252, п. 5.45], «перенос уровней воды по продольному профилю водной поверхности производят в пределах небольших по длине речных участков (1–3 км) с учетом зависимости уклона от уровня в условиях установившегося потока», что предполагает более масштабные действия (по сравнению с указаниями [151, 152]). С учетом этого, а также неопределенности оценки среднемуголетнего

уровня воды при недостаточности и отсутствии данных наблюдений заметно возрастает вероятность конфликтных ситуаций, связанных с неоднозначной трактовкой результатов определения береговой линии.

Есть проблемы с определением границ и других объектов – болот (их признаком, согласно [47], является наличие торфа, который может не образовываться в долинах больших рек с высокой амплитудой изменения уровней воды [76]), родников, гейзеров и объектов, относящихся по [29] к подземным (водоносные горизонты и бассейны подземных вод). В последнем случае проблема с границами водного объекта последовательно перерастает в проблему определения границ подземного водосбора, без полноценного решения которой невозможно и адекватное решение почти всех гидрологических и геохимических задач.

1.3. Геосток и геобаланс

По мнению Н.Л. Беручашвили [7], функционирование – совокупность процессов обмена и трансформации веществ и энергии в геосистемах – является одним из важнейших понятий ландшафтоведения, которое тесно связано с закрепленным в нормативной литературе [47] понятием о водном стоке – движении воды по поверхности земли, в толще почв и горных пород в процессе круговорота ее в природе. В свою очередь, под круговоротом воды понимается непрерывный процесс циркуляции воды на земном шаре под влиянием солнечной радиации и силы тяжести [47].

Обобщением понятия «водный сток», в соответствии с представлениями С.Д. Муравейского [136], является *понятие о геостоке – суммарном стоке воды, влекомых и взвешенных наносов, веществ в растворенной и коллоидной формах, гидробионтов и тепла*. Геосток является одновременно интегральным показателем состояния геосистемы и причиной его изменения, а исследования геостока, по сути, аналогичны, диагностике организма по результатам исследования его кровеносной системы. Это исследование, представляющее собой анализ процессов, условий формирования и закономерностей пространственно-временных изменений геосистемы, требует понимания соотношения прихода и расхода энергии и вещества в геосистеме.

Действующая нормативная база позволяет охарактеризовать в основном только тепловой и водный компоненты этого соотношения – тепловой и водный балансы. Под тепловым балансом деятельной поверхности, согласно [46], понимается сумма потоков лучистой и тепловой энергии, получаемых и отдаваемых деятельной поверхностью за рассматриваемый интервал времени. В соответствии с [47], водный баланс – это соотношение прихода и расхода воды с учетом изменения

ее запасов (также за какой-либо интервал времени), а математическое выражение, его описывающее, называется уравнением водного баланса. Составляющие этого уравнения – элементы водного баланса – характеризуют приход, расход и изменения запасов воды. Очевидно, что аналогичный подход можно применить и к определению *геобаланса*, под которым далее будет пониматься соотношение прихода и расхода воды, влекомых и взвешенных наносов, веществ в растворенной, коллоидной и взвешенной (не учтенной при оценке твердого стока) формах, гидробионтов, тепла за некоторый интервал времени.

Определение элементов геобаланса и его важнейшей составляющей – водного баланса в пространственно-временном разрезе составляет, фактически, сущность ряда научных дисциплин и содержание инженерных изысканий, экологического мониторинга и водохозяйственной деятельности в целом, включая планирование водохозяйственных мероприятий на основе анализа водохозяйственного баланса (соотношения прихода и расхода воды с учетом потребностей водопользователей в сравнении с доступными водными ресурсами) и нормирование сбросов загрязняющих веществ (ЗВ) согласно [123, 124].

Общая проблема составления и анализа уравнений как водного баланса, в частности, так и геобаланса, в целом, заключается в неопределенности границ исследуемой геосистемы и нелинейном характере связей между элементами геобаланса. Например, в работах [78, 138] рассмотрена система уравнений, описывающих изменения слоев водного стока Y и влагозапасов в водосборе W :

$$\frac{dY}{dt} = G(Y; W) - \frac{Y}{\tau}; \quad (1.3.1)$$

$$\frac{dW}{dt} = P_e - Y, \quad (1.3.2)$$

где t – время; $G(Y; W)$ – движущая сила стока, пропорциональная силе тяжести; τ – время релаксации водосбора (время добегаания водных масс); P_e – эффективное увлажнение водосбора (жидкие атмосферные осадки и талые воды за вычетом инфильтрации I и испарения E); $Y = Q/F$, где Q – расход воды в расчетном створе водосбора площадью $F = B \cdot L$, шириной B и длиной L . При ряде допущений функция $G(Y; W)$ приобретает вид [78]:

$$G(Y; W) = \frac{g \cdot J \cdot Y}{L}, \quad (1.3.3)$$

где g – ускорение свободного падения; J – уклон водной поверхности, который, согласно [90], связан элементами потока и русла зависимостью:

$$J = \left(\frac{G_S}{k_1 \cdot h_a^{k_2} \cdot (D_a \cdot u)^{k_3} \cdot Q_r} \right)^{k_4}, \quad (1.3.4)$$

где G_S – расход наносов; Q_r – руслоформирующий расход воды; h_a – средняя глубина потока; D_a – средний диаметр частиц активного слоя донных отложений; u – средняя гидравлическая крупность транспортируемых наносов; k_1, k_2, k_3, k_4 – коэффициенты в одной из формул для определения транспортирующей способности потока [90].

Атмосферные осадки в уравнении (1.3.2) включают в себя транзитную и местную составляющие, которые могут быть приближенно оценены с помощью коэффициента влагооборота K_P (1.3.5) на основе предложений О.А. Дроздова [81]:

$$K_P = \frac{P}{P_A} \approx 1 + \frac{E \cdot L_P}{2 \cdot u_w \cdot w_a}; \quad (1.3.5)$$

$$E = f(u_w) \cdot \frac{e_s(T_b) - e_a}{p_{aa}}, \quad (1.3.6)$$

где P – суммарные атмосферные осадки; P_A – адвективные атмосферные осадки; L_P – линейный размер территории; u_w – среднее значение прямолинейной составляющей скорости движения водяного пара; w_a – влагосодержание атмосферного воздуха на наветренной части контура рассматриваемой территории; E – испарение с водосборной территории, в общем случае, согласно [18, 273], являющееся функцией температуры испаряющей поверхности T_b (в свою очередь, функции теплового и водного баланса поверхности водосбора), разницы между давлением насыщенного $e_s(T_b)$ и ненасыщенного водяного пара e_a , атмосферного давления p_{aa} и условий переноса в зависимости от функции скорости ветра $f(u_w)$. Уравнения (1.3.1, 1.3.2) описывают изменение удельных характеристик, в связи с чем при оценке элементов водного баланса, выраженных в единицах объемов воды, требуется учет временных изменений размеров водосборной территории [197]. Таким образом, исходная система (1.3.1–1.3.2) приобретает весьма сложный вид, причем возникает масса вопросов по оценке параметров уравнений (1.3.1–1.3.6) и площадей поверхностного и подземного водосборов. Поэтому на практике обычно используют те или иные линейные приближения, что в ряде случаев не позволяет выявить как редко случающиеся опасные события, так и тенденции изменения водных экосистем.

Необходимо отметить и неопределенность уже на уровне идентификации элементов водного баланса. Так, весьма запутанной является система

терминов в части составляющих стока [47], в соответствии с которой: поверхностный сток – сток по земной поверхности; почвенный сток – в почвенной толще; русловой сток – по русловой сети; дождевой сток – в результате выпадения дождей. Очень часто дождевой сток даже малой реки состоит не только из дождевых вод, под которой, согласно [56], понимается вода атмосферных осадков, в которую еще не поступили растворимые вещества из поверхностного слоя земли. Причем в последнем же источнике [56] указано, что подземная вода – это вода, находящаяся в подземных водных объектах. Если же учесть, что родники, в соответствии с [29], относятся к поверхностным водным объектам, то противоречия только углубляются. По этой причине целесообразно, во-первых, установить некоторый условный (временной) фильтр при определении составляющих не только геостока, но и водного стока. Например, дождевое и снеговое питание рек соответствует количеству атмосферных осадков в теплый и холодный периоды (в соответствии с [249], в зависимости от среднемесячной температуры атмосферного воздуха), поступающих в речную сеть (часть русловой сети из отчетливо выраженных русел постоянных водотоков [47]) в течение рассматриваемого календарного года.

Во-вторых, под подземным стоком, по мнению Б.В. Боровского и М.Л. Маркова [14], следует понимать не только количество подземных вод, поступивших в русловую сеть или котловину водоема, но и движение воды в толще почв и горных пород по всему сечению водоносных отложений в пределах поверхностного и подземного водосборов. Это, с одной стороны, поможет снять вопрос по оценке стока при отсутствии русловой сети, а с другой стороны – может привести к пересмотру существующих взглядов на выделение поверхностной и подземной составляющей стока и, как следствие, оценку ресурсов подземных вод. При проведении подобной оценки часто используется предположение, что в створе реки наблюдается подпорный режим, при котором существует постоянная гидравлическая связь подземных вод с поверхностными и подпор подземных вод во время половодья и паводков [47]. Соответственно, при выявлении такого типа подземного питания (характерного соотношения взаимосвязи речных и подземных вод, определяющее динамику притока подземных вод в водотоки и водоемы [47]) подземное питание стремится к нулю.

В то же время, в каждом створе реки обычно имеется пологий и обрывистый берега. С учетом [47] в первом случае ожидается подпорный тип подземного питания, а во втором – нисходящий, при котором отсутствует гидравлическая связь подземных вод с поверхностными в условиях свободного стока подземных вод. Кроме того, имеются подрусловые (подземные воды в горных породах, слагающих русло реки [47]) и иные виды вод, которые могут быть отнесены к подземным, но гидравлически не связаны или слабо связаны с поверхностными водами.

2. СТРУКТУРА, ГРАНИЦЫ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ И ИХ ВОДОСБОРОВ

2.1. Структура и границы водных объектов и их водосборов

2.1.1. Структура и границы водосбора

С учетом изложенного в разд. 1.1 подхода к определению водосбора как специфическому ландшафту (комплексу ландшафтов) с обязательным наличием не менее одного водного объекта и терминологии, принятой при изучении ландшафтов [44], под структурой водосбора далее будет пониматься набор, соотношение и взаимосвязь компонентов водосбора, сочетание, пространственное расположение и потоки вещества и энергии между ними.

Формально компоненты водосбора – антропогенные объекты и компоненты природной среды (включая природно-антропогенные объекты), под которыми, согласно [150], понимаются:

а) земля (земля – это «важнейшая часть окружающей природной среды, характеризующаяся пространством, рельефом, климатом, почвенным покровом, растительностью, недрами, водами, являющаяся главным средством производства в сельском и лесном хозяйстве, а также пространственным базисом для размещения предприятий и организаций всех отраслей народного хозяйства», земельные ресурсы – «земли, которые используют или могут быть использованы в отраслях народного хозяйства», земельные угодья – «земли, систематически используемые или пригодные к использованию для конкретных хозяйственных целей и отличающиеся по природно-историческим признакам» [52, п. 1–3]);

б) недра («часть земной коры, расположенная ниже почвенного слоя, а при его отсутствии – ниже поверхности земли и дна водоемов и водотоков, простирающаяся до глубин, доступных для геологического изучения и освоения» [67, п. 3.16]); в ряде случаев используется понятие о части земной коры – геологической среде, включающей в себя горные породы, циркулирующие в них флюиды и связанные с горными породами и флюидами физические поля и геологические процессы, оказывающие влияние на жизнедеятельность человека и другие организмы [95]; составной частью недр являются подземные воды – воды, находящиеся в подземных водных объектах [56];

с) поверхностные воды – воды, находящиеся на поверхности суши в виде различных водных объектов [47];

д) растительный, животный мир и иные организмы (согласно [146], животный мир – совокупность живых организмов всех видов диких животных, постоянно или временно населяющих территорию

и находящихся в состоянии естественной свободы, а по [62], растительный мир – это совокупность произрастающих дикорастущих растений (автотрофных, кроме растений-паразитов), и, как правило, хлорофилльных-гелиотрофных (за исключением паразитических форм, вторично утративших хлорофилл) организмов, размножающихся спорами, семенами и вегетативными частями, состоящих из клеток, которые обладают целлюлозными стенками и поэтому не способны к активному передвижению), образованных ими популяций, растительных сообществ и насаждений; важным компонентом растительного мира является лес – целостная динамичная экологическая система преимущественно лесных древесных растений, почвы, животных, грибов, микроорганизмов и других природных компонентов, имеющая внутренние взаимосвязи и связи с внешней средой, характеризующаяся по данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации (FAO) площадью более 0,5 га с деревьями высотой более 5 м и лесным покровом, составляющим более 10 %, или деревьями, способными достичь этих пороговых значений [63]; обобщающее понятие – биологические ресурсы – согласно [62], генетические ресурсы, организмы или их части, популяции или любые другие биотические компоненты экосистем, имеющие фактическую или потенциальную полезность или ценность для человечества);

е) почвы (согласно [54, п.1], почва – это «самостоятельное естественно-историческое органоминеральное природное тело, возникшее на поверхности земли в результате длительного воздействия биотических, абиотических и антропогенных факторов, состоящее из твердых минеральных и органических частиц, воды и воздуха и имеющее специфические генетико-морфологические признаки, свойства, создающие для роста и развития растений соответствующие условия»;

ф) атмосферный воздух («жизненно важный компонент окружающей среды, представляющий собой естественную смесь газов атмосферы, находящуюся за пределами жилых, производственных и иных помещений» [149, ст. 1]), а также озоновый слой атмосферы и околоземное космическое пространство (согласно [50], атмосфера планеты – это газовая среда вокруг планеты (связанная с ней гравитационно), а космическое пространство – пространство за пределами атмосферы планеты), обеспечивающие в совокупности благоприятные условия для существования жизни на Земле.

С учетом указанных выше общих свойств геосистем [238] в структуру водосбора целесообразно включить те компоненты, которые играют значимую роль в формировании геостока и гидрологического режима, а именно:

1) земли части земной поверхности в пределах водораздельной линии, с которой вода поступает в рассматриваемый водный объект;

2) часть геологической среды в пределах зоны активного водообмена, в нижней части которой (на границе с зоной среднего водообмена) заметно уменьшается влияние эрозионного вреза гидрографической сети и изменяется гидрологический (гидрогеологический) режим в направлении снижения сезонных изменений [281]; согласно [29, 66, 147], подземные водные объекты в составе геологической среды включают в себя водоносные горизонты и бассейны подземных вод, но последние часто существенно превышают размеры поверхностного водосбора даже больших рек; по этой причине в состав подземных водных объектов водосбора целесообразно включать преимущественно водоносные горизонты (или комплексы водоносных горизонтов) и только в исключительных случаях (при дополнительном обосновании) – бассейны подземных вод;

3) поверхностные водные объекты – водотоки, водоемы, ледники, болота; при значительной озерности (заболоченности) территории в ряде случаев (когда из одного озера, болота или ледника вытекает более одного водотока или при природно-антропогенных деформациях почти плоской поверхности водосборов) смежные водосборы целесообразно рассматривать как геосистемы с пересекающимися границами; степень пересечения оценивается по соотношению характерных (максимальных, минимальных, средних) уровней воды в смежных озерах и характерных уровней подземных и болотных вод с учетом погрешности измерений и деформаций относительно плоской поверхности болот и грунтов в зоне многолетней мерзлоты (например, амплитуда изменений поверхности переходного Тимирязевского болота у г. Томска в долине реки Томь (Западная Сибирь) превышает 0,2 м [283]);

4) почвенно-растительный покров в пределах водораздельной линии, характеризуемый пространственным распределением (равномерным или неравномерным, в том числе по долине или водоразделу, в верхней, средней и нижней части водосбора), абсолютной и относительной площадью распространения типов и классов ландшафтов; согласно рекомендациям [270], тип ландшафта принимается по наиболее яркому индикатору интенсивности биологического круговорота химических элементов – растительности, а класс – по преобладающему типу почв, характеризующему общие условия физико-химической миграции на границе атмо-, био- и литосфер (объединение почвенного и растительного покровов в один компонент целесообразно с учетом его общего влияния на испарение с поверхности почвы, под которым, согласно [263, п. 3.1.11], понимается «процесс поступления водяного пара в атмосферу из деятельного слоя почвы и в результате транспирации растительного покрова, произрастающего на ее поверхности»);

5) пограничный слой атмосферы, под которым по [59] понимается нижний слой атмосферы, свойства которого в основном определяются динамическими и термическими характеристиками этой поверхности, толщина пограничного слоя зависит от шероховатости поверхности и турбулентности и достигает примерно 2000–3000 м, но не менее 500 м [60]; можно предположить, что максимальная верхняя граница (с учетом методики определения коэффициента влагооборота [81], по которой роль местного испарения при прочих равных условиях возрастает с увеличением линейного масштаба территории (1.3.5)) соответствует водосбору большого водного объекта, а минимальная – водосбору малого; горизонтальные границы атмосферного компонента водосбора в общем случае всегда больше границ, определяемых по поверхности Земли, вследствие трансграничного переноса атмосферного воздуха и примесей; например, согласно [134], расчеты рассеивания выбросов загрязняющих веществ (ЗВ) в атмосферном воздухе проводятся на расстоянии до 100 км от источника выброса;

б) антропогенные и природно-антропогенные объекты в пределах водосбора, а также (при наличии) системы переброски стока и системы водоснабжения с размещением источника водоснабжения и водопотребителей в разных водосборах.

Таким образом, для определения границ водосбора (горизонтальных и вертикальных) требуется не только выделение водораздельной линии, но и определение возможности формирования геостока и гидрологического режима с учетом времени добегания водных масс, бессточных областей, постоянного или временного характера водного объекта, временных изменений, антропогенного влияния, несовпадения границ поверхностного и подземного водосбора, значительной озерности или заболоченности территории, дефицита достоверных гидрогеологических данных, необходимых для оценки границ подземного водосбора [173, 252]. Принимая это во внимание, целесообразно придерживаться следующего алгоритма:

1) первое приближение оценки границ водосбора проводится согласно [173, 252] по окраинным наивысшим точкам водосбора по картам в масштабе, зависящем от площади исследуемого водосбора;

2) устанавливаются границы зоны активного водообмена по данным о пространственно-временных изменениях минерализации подземных и поверхностных вод (оценка методом смещения (2.1.1.1–2.1.1.2) притока в речную сеть в зимнюю межень подземных вод из разных водоносных горизонтов), соотношении их уровней (оценка расхода и уровней подземных вод с использованием уравнения Дюпюи (2.1.1.3–2.1.1.4) при ряде допущений), а также об изменениях с глубиной средневзвешенного (по мощности водоносных отложений) коэффициента фильтрации (2.1.1.5);

2.1) метод смешения для оценки притока подземных вод из двух водоносных горизонтов в меженное русло реки при отсутствии значимой инфильтрации:

$$Q_{g2} = Q_g \cdot \frac{(C_{rw} - C_{g1})}{(C_{g2} - C_{g1})}; \quad (2.1.1.1)$$

$$Q_{g1} = Q_g - Q_{g2}, \quad (2.1.1.2)$$

где Q_g – расход подземных вод, ориентировочно принятый по меженному расходу речных вод; Q_{g1} и Q_{g2} – составляющие подземного стока, соответствующие притоку подземных вод из водоносных горизонтов 1 и 2; C_{rw}, C_{g1}, C_{g2} – средние значения суммы главных ионов (с учетом преобладания так называемых консервативных веществ) в речных водах в меженный период при отсутствии значимой инфильтрации, в водах водоносных горизонтов 1 и 2; использование метода смешения при наличии более двух водоносных горизонтов и/или концентраций неконсервативных веществ может приводить к неоднозначным результатам и требует дальнейшей проработки; пример оценки поступления в притоки реки Томь подземных вод из отложений четвертичного и палеогенового возраста приведен в [24];

2.2) расчет удельного расхода подземных вод q (на единицу длины водосбора с одной из двух сторон) по уравнению (2.1.1.3) и уровней подземных вод в междуречье рек 1 и 2 по уравнению (2.1.1.4) при установившемся движении в однородных пластах и горизонтальном залегании водоупора:

$$q = k_f \cdot \frac{h_x^2 - h_{r1}^2}{2 \cdot x}; \quad (2.1.1.3)$$

$$h_x = \sqrt{h_{r1}^2 - \frac{h_{r1}^2 - h_{r2}^2}{L_{1-2}} \cdot x + \frac{I_b}{k_f} \cdot (L_{1-2} - x) \cdot x}, \quad (2.1.1.4)$$

где h_{r1}, h_{r2} и h_x – мощность подземного потока у уреза смежных рек 1 и 2 и на расстоянии x от п. 1; L_{1-2} – расстояние между пп. 1 и 2; k_f – коэффициент фильтрации; I_b – удельная инфильтрация [282, 294]; соотношение I_b / k_f может быть определено либо подбором по известным измеренным значениям h_x , либо приравнено к нулю в случае использования данных о минимальных среднемесячных уровнях воды в середине зимней межени при допущении: а) отсутствия инфильтрационного питания при оттепелях; б) преобладании подземной составляющей речного стока;

2.3) при необходимости (например, в аридных районах, когда формально бессточное озеро 1 имеет значительно меньшую минерализацию по сравнению с рядом расположенным другим бессточным озером 2 вследствие подземного стока в направлении 1→2) – составление и анализ уравнений геобаланса смежных озер и их водосборов; пример подобной ситуации – озера Ши́ра с минерализацией 12–31 г/кг и Иткуль 0,6–0,7 г/кг в Хакасии (Средняя Сибирь) – подробно рассмотрен в [292];

2.4) расчет средневзвешенного значения коэффициента фильтрации k_{fm} :

$$k_{fm} = \frac{\sum k_{f,i} \cdot h_i}{\sum h_i}, \quad (2.1.1.5)$$

где $k_{f,i}$ и h_i – коэффициент фильтрации и мощность i -го слоя [282, 294];

2.5) подбор глубины, при которой средневзвешенное значение коэффициента фильтрации k_{fm} сопоставимо со значением коэффициента фильтрации в уравнении (2.1.1.4); пример – график снижения средневзвешенных коэффициентов фильтрации отложений в междуречье рек Икса – Шегарка – Обь в Западной Сибири [232], свидетельствующий о заметном снижении интенсивности водообмена на глубинах 110–120 м (формально точное решение – 114 м для $k_{fm} = 9,88$ м/сут), которые в первом приближении могут рассматриваться как граница зон активного и среднего водообмена в створе с. Мельниково на реке Обь;

3) по данным инженерных изысканий, режимных гидрогеологических и гидрологических наблюдений:

3.1) строятся схемы изолиний уровней подземных вод (прежде всего – грунтовых) в межень и половодье (с привлечением данных об уровнях поверхностных вод), по которым оценивается направление движения подземных вод;

3.2) при отсутствии информации об уровнях подземных вод проводится оценка уровней подземных вод по предварительно установленной водораздельной линии по уравнению (2.1.1.4) для расчетных максимальных уровней поверхностных вод;

3.3) если уровни подземных вод (измеренные или расчетные) в районе размещения водораздельной линии позволяют отнести эту территорию, согласно [162, 245], к одной из подзон подтопления (сильного – при глубинах подземных вод менее 0,3 м, заболачивании или засолении верхних горизонтов почвы; умеренного – при глубинах подземных вод от 0,3–0,7 до 1,2–2,0 м, олуговении или засолении средних горизонтов почвы; слабого – при глубинах подземных вод от 1,2–2,0 до 2,0–3,0 м в гумидной

и до 5,0 м в аридной зоне, оглеении или засолении нижних горизонтов почвы), то водосборы смежных водных объектов объединяются (с последующим перерасчетом характерных расходов и уровней воды).

В случае каких-либо сомнений при проведении любых расчетов, за исключением оценки минимального водного стока, из двух возможных вариантов целесообразно выбрать вариант с большей площадью водосбора. Это связано не только с большей площадью аэрокомпонента водосбора, но и с общей тенденцией к переходу на этапах строительства и эксплуатации инженерных объектов от относительно четких границ к постепенным и экотонам (по терминологии, приведенной в [7]) с расширением верхней границы. В ряде случаев это может быть связано с непроектным функционированием систем ливневой канализации, тепло- и водоснабжения. Иногда процедуры инженерных изысканий и проектирования формально соответствуют установленным нормам, но не учитывают региональные особенности формирования геостока, усугубляющие недоработки методологии расчетов (как следствие – затопление и подтопление населенных пунктов).

2.1.2. Структура и границы водного объекта

Структура водного объекта, если следовать определениям [29, 147], формально более простая – водные массы, берега и донные отложения. Но фактически вопрос о донных отложениях является открытым, поскольку разница между взвешенными и влекомыми наносами, донными и подрусловыми отложениями весьма условна и зависит от гидрологического режима территории как в настоящем, так и в прошлом [4, 275]. Не менее запутанным является вопрос и о береговой линии. Например, протока является, по сути, частью водного объекта. Поэтому все, что находится между бровкой протоки и меженного берега основного русла, находится фактически внутри водного объекта.

Если же учитывать влияние формы сосредоточения вод в рельефе и недрах на характер циркуляции воды, тепла и растворенных газов, то с учетом определений [47, 276] в случае водотоков можно выделить части (подсистемы) от элементов русла (выработанного потоком ложа, по которому осуществляется сток без затопления поймы), поймы (части дна речной долины, сложенной наносами и периодически затапливаемой в половодье и паводки) и долины (вытянутого по длине углубления в земной поверхности, сформированного в результате длительного действия вод и характеризующегося наличием русла) до русловой сети (совокупности русел и всех водотоков в пределах какой-либо территории) с выделением ярусов приточности согласно Хортону, Штумму и ряду других авторов [194, 300]. В структуре водоемов выделяют эпи-, мета- и гипо-

лимнион, в вертикальном разрезе болот (если считать их, вслед за [29], водными объектами) – деятельный и инертный горизонты [47].

Использование данного подхода к выделению частей водных объектов может вызвать определенные возражения. Но еще сложнее выделение компонентов подземных водных объектов, в структуре которых, видимо, целесообразно вычленить (в зависимости от проницаемости и фактической влажности) подсистемы водоупорных и водовмещающих отложений, а среди последних – подсистемы с преобладанием поровых, трещинных, трещинно-поровых, трещинно-карстовых вод.

В целом, анализ структуры водного объекта представляет собой сложную задачу, частично рассмотренную в разд. 1.2, при решении которой целесообразно говорить не столько о разделимости геосистем разного уровня (вплоть до гидросферы) на части, сколько о различимости этих частей [266]. Тем не менее, выделение границ водных объектов требуется при решении всех научных и инженерных задач и, согласно [29], оно сводится к: 1) определению типа исследуемого водного объекта; 2) выявлению гидротехнических сооружений; 3) выбору варианта расчетов – при наличии данных наблюдений или при их отсутствии (при недостаточности данных наблюдений имеющиеся ряды наблюдений удлиняются, либо используется вариант при отсутствии данных); 4) собственно расчетам границ водного объекта.

При наличии данных гидрологических наблюдений на незарегулированных реках и озерах расчеты подразумевают оценку среднего уровня в период открытого русла с учетом требований [130, 252], хотя в [29] нет однозначных указаний относительно определения расчетного периода и метода расчета среднего значения [117] – формально можно использовать период в несколько лет и в несколько десятков лет, а средние значения можно рассчитать как (а) среднее арифметическое для суточных уровней воды за период открытого русла (что потребует использования суточных данных об уровнях воды и ледовой обстановки и, следовательно, резко увеличит стоимость работ), либо как (б) среднее арифметическое для разницы погодичных значений максимального и минимального за летне-осенний период уровней по данным Росгидромета (например, издания серии «Характерные уровни...»), либо как (с) среднее арифметическое между расчетными максимальным и минимальным (за летне-осенний период) уровнями (в этом случае нет четких указаний о расчетной обеспеченности, но, с учетом требований [162], верхний предел может определен для обеспеченности 1 %, а нижний – как симметричное отражение максимальной границы, то есть 99 %), либо как (d) уровень, соответствующий норме водного стока с учетом поправки на несоответствие среднего многолетнего уровня и среднего за период открытого русла.

Теоретически наиболее корректным вариантом является расчет по среднесуточным уровням воды при отсутствии ледовых явлений, но на практике более предпочтительны два последних варианта, поскольку при их использовании обеспечивается методологическая однородность расчетных уровней воды при наличии и отсутствии данных. При этом в случае отсутствия данных наблюдений и гидротехнических сооружений (фактически – утвержденной проектной и эксплуатационной документации) расчет уровней воды, соответствующих береговой линии, проводится, согласно [252], в последовательности:

1) для рек:

1.1) получение данных о высотных отметках Z долины, поймы, русла и построения поперечного профиля долины (между незатапливаемыми отметками на правом и левом берегах);

1.2) построение по уравнению Шези кривой связи $Z = f(Q)$;

1.3) определение расчетных средних, максимальных и минимальных расходов воды известными методами;

1.4) оценка поправок за счет несоответствия высотных отметок береговой линии, рассчитанных по данным наблюдений (для реки-аналога и створа-аналога) как среднее арифметическое для среднесуточных уровней воды с учетом ледовой обстановки и по выбранному варианту; в простейшем случае поправок принимается равной единице;

1.5) определение характерных уровней воды по кривой связи $Z = f(Q)$ и соответствующих (средним, максимальным и минимальным) расходам воды с учетом поправок (п. 1.4 рассматриваемого алгоритма), изменения гидравлических условий при наличии ледовых явлений и несоответствия максимального расхода воды и расхода воды при ледоходе; примечание: вариант интерполяции отметок береговой линии между створами с измеренными уровнями согласно [151] в ряде случаев противоречит условию [252, п. 5.45];

2) для озер:

2.1) выявление наличия стока из водоема;

2.2.1) в случае проточных озер: оценка высотной отметки порога стока Z_F ; расчет среднемноголетнего весенне-летнего подъема воды $\Delta Z_{L,m}$ в озере над порогом стока (2.1.2.1); определение коэффициентов вариации Cv_a и асимметрии Cs_a уровней воды в озерах-аналогах; определение расчетного максимального уровня воды в озере $Z_{L,p}$ по кривой обеспеченности с параметрами $\Delta Z_{L,m}$, Cv_a и Cs_a (2.1.2.2); введение поправок на нагон и ветровое волнение [252]; расчет минимального уровня вод озер в действующих нормативных документах не определен,

но можно предположить, что расчетный минимальный уровень воды в сточном озере может быть принят по отметке порога стока из озера;

$$\Delta Z_{L,m} = k_L \cdot \sqrt{\frac{F_{bL}}{F_{aL}}}; \quad (2.1.2.1)$$

$$Z_{L,p} = Z_F + \Delta Z_{L,p}, \quad (2.1.2.2)$$

где F_{bL} и F_{aL} – площадь водосбора и акватории озера; k_L – коэффициент, определяемый по аналогам (ориентировочно для Карелии и Кольского полуострова $k_L = 20$, для северных и центральных районов европейской территории Российской Федерации $k_L = 32$) [252];

2.2.2) в случае бессточных озер расчетные уровни воды определяются по кривой связи объемов и уровней воды в озере и расчетному притоку воды в озеро [167].

Для водохранилищ положение береговой линии принимается по нормальному подпорному уровню. В связи с этим вариант отсутствия данных наблюдений (то есть основных параметров – неотъемлемой части проектной и эксплуатационной документации) для водохранилищ не может рассматриваться – либо необходима разработка проектной документации на реконструкцию или ликвидацию гидроузла и собственно его реконструкция или ликвидация, либо водоем рассматривается не как водохранилище, а как озеро.

Для определения границы болот, согласно [29] требуется информация о глубинах залежи торфа – органической горной породы, образующейся в результате отмирания и неполного распада болотных растений в условиях повышенного увлажнения при недостатке кислорода и содержании не более 50 % минеральных компонентов на сухое вещество [49], которую формально можно определить по картам согласно [173]. Однако в [29] говорится о болотах (природных образованиях, занимающих часть земной поверхности и представляющих собой отложения торфа, насыщенные водой и покрытые специфической растительностью [47]), а в [49] рассматриваются торфяные болота («болото с отложениями торфа от 0,3 до 1,0 м в неосушенном состоянии», п. 4) и заболоченные земли («болото с минеральными почвами или отложениями торфа не более 0,3 м в неосушенном состоянии», п. 3). Следовательно, к болотам следует относить и заболоченные земли, но, согласно [173, п. 6.3.3], «отдельные мелкие заболоченные участки размером не более 0,5 км² и узкие заболоченные поймы рек и озер, не оконтуренные на картах, при определении заболоченности водосборов площадью более 10 км² не учитываются». Таким образом, достоверную информацию о положении границы болота фактически можно

получить только в результате полевых работ, что не всегда возможно (многие болота в Западной Сибири имеют площадь в десятки квадратных километров и более [114]).

Необходимо отметить, что при оценке границ водотоков должны учитываться русловые деформации [151], предельная величина которых, согласно [264], равна и больше ширины поймы. Следовательно, границей водотока, по сути, является граница поймы, под которой понимается «часть дна речной долины, сложенная наносами и периодически заливаемая в половодье и паводки» [47, п. 161].

При этом остается неоднозначность определения поймы в виде термина «периодически затапливаемая», которая может быть преодолена, исходя из требований к оценке гидрометеорологической изученности согласно [252, 255, 256] и следующих соображений: 1) периодически встречающимся событием может считаться событие, отмеченное более чем один раз за период, в течение которого степень гидрометеорологической изученности может быть охарактеризована как «изученная»; 2) обеспеченность уровня воды (в долях единицы) для определения границ поймы не может быть менее: 1/25 для лесной зоны и лесотундры; 1/30 – лесостепи; 1/40 – степи и горных районов; 1/50 – засушливых степей и полупустынь (табл. 2.1.2.1); 3) при расчете максимальных уровней воды вводятся поправки на нагон и ветровое волнение [252], для расчета которых требуются данные за период не менее 20 лет; 4) на практике *границу поймы целесообразно определять* как верхнюю границу перечисленных в п. 1–3 значений, то есть *по уровню воды обеспеченностью 1 %*.

Таким образом, граница водотоков – это не линия, а полоса, ограниченная бровкой меженного русла, с одной стороны, и границей поймы по уровню воды обеспеченностью около 1 %, с другой. Подверженность поймы затоплениям обуславливает специальный режим ведения хозяйственной деятельности в ее пределах. Этот режим в действующих нормативных документах [29, 152] установлен для территорий, обозначенных как «водоохранная зона», но фактически не выполняющих такую роль вследствие искусственного выделения в пределах поймы. Аналогичный подход целесообразно применить и к незарегулированным водоемам без сооружений инженерной защиты.

Граница болот также имеет вид полосы, но методика ее определения базируется уже на других принципах, а именно – от границы подзоны слабого подтопления согласно [162] до максимального расчетного уровня болотных вод. Обеспеченность такого уровня с учетом единства подходов [162] логично принять в размере 1 %.

Таблица 2.1.2.1

Показатели оценки степени гидрометеорологической изученности [255]

Степень гидрометеорологической изученности	Условия, определяющие степень гидрологической и метеорологической изученности территории
Изученная	Наличие репрезентативного поста (станции), отвечающего условиям: 1) расстояние до площадки строительства и гидрометеорологические условия позволяют осуществлять перенос в ее пределы значений по каждой из требуемых характеристик режима; 2) наблюдения ведутся за всеми гидрометеорологическими характеристиками, необходимыми для обоснования проектирования объекта; 3) качество наблюдений отвечает требованиям к достоверности данных, используемых для расчетов; 4) ряд максимальных расходов рек может быть признан достаточным для определения расчетных расходов, если продолжительность периода наблюдений составляет не менее, лет: 25 – для лесотундровой и лесной зон; 30 – для лесостепной зоны; 40 – для степной зоны и горных районов; 50 – для засушливых степей и полупустынных зон; 5) ряды метеорологических наблюдений являются достаточными, если их продолжительность составляет при определении: температуры воздуха – 30–50 лет; температуры почвы – не менее 10 лет; максимальной глубины промерзания почвы – 25–30 лет; расчетной толщины стенки гололеда – 25–30 лет; ветровых нагрузок – не менее 20 лет; 6) ряды наблюдений других гидрометеорологических характеристик являются достаточно продолжительными для установления надежной связи с опорной станцией района, репрезентативной для определяемой характеристики
Недостаточно изученная	Имеющиеся посты (станции) не отвечают хотя бы одному из условий, характеризующих территорию как изученную
Неизученная	Отсутствие репрезентативных постов (станций), а также при изучении: гидрометеорологического режима, в формировании которого локальные факторы и условия преобладают над зональными (бассейны малых рек, горные района, глубоко вдающиеся в сушу участки моря и др.); водного баланса и проведении специальных исследований

2.2. Внешние и внутренние связи водосборной геосистемы

Анализ баланса вещества и энергии – основа анализа функционирования водосборной геосистемы и принятия управленческих решений в области использования и охраны природных ресурсов в ее пределах. Практическая реализация этого подхода заключается в составлении и анализе уравнений геобаланса, причем, прежде всего, уравнений водного и геохимического баланса водосбора [219].

2.2.1. Водный баланс водосбора

Первый этап – составление уравнения водного баланса с количественной оценкой источников водного питания. Решение этой задачи возможно с разной степенью достоверности и, соответственно, трудоемкости. Но с учетом соображений, высказанных в разд. 1.3, для решения большинства задач инженерных изысканий и проектирования целесообразно использовать упрощенную математическую модель годового водного баланса в среднем за многолетний период со сосредоточенными параметрами в виде (мм/год):

$$P_r + P_{smf} + P_{gl} - E_{wp} - E_{sp} - Y_{sf} - Y_{gr} + Y_{A+} - Y_{A-} \approx \Delta V, \quad (2.2.1.1)$$

где P_r – жидкие атмосферные осадки; P_{smf} – водоотдача из сезонного снежного покрова; P_{gl} – талые воды, поступающие в результате абляции ледников (при их наличии); E_{wp} и E_{sp} – испарение с поверхности водосбора за холодный и теплый периоды; Y_{sf} и Y_{gr} – поверхностная и подземная составляющие суммарного водного стока Y ; Y_{A+} и Y_{A-} – поступление и изъятие поверхностных и подземных вод в результате хозяйственной деятельности (поступление – сброс сточных вод, переброска стока из других водных объектов или водохозяйственных систем, утечки из систем водо- и теплоснабжения и водоотведения, фильтрационные потери из водохранилищ и мелиоративных систем, перераспределение стока при строительстве и эксплуатации инженерных объектов; изъятие – забор поверхностных и подземных вод, осушительная мелиорация, перераспределение стока при строительстве и эксплуатации инженерных объектов, разработка месторождений полезных ископаемых, включая торфяные); ΔV – изменение влагозапасов в водосборе.

Основные допущения: 1) процессы формирования элементов водного баланса принимаются условно стационарными в рамках действующей версии нормативного документа по строительной климатологии; 2) относительная погрешность определения элементов водного баланса при наличии измерений принимается 5 %, при использовании расчетных методов – 20 %; 3) величина ΔV принимается для заболоченных равнинных территорий лесной (таежной) зоны Западной Сибири с заболоченностью водосбора более 20 % – 1 мм/год (средняя скорость вертикального прироста торфяной залежи [116, 145, 161]), а на прочих территориях – 0 мм/год [219].

Первый вопрос, который необходимо решить при составлении уравнения водного баланса, – выбор способа оценки водного стока – по результатам гидрологических наблюдений, либо расчетным способом. Согласно [120, 240, 252], условия использования данных наблюдений: 1) соответствие требованиям (см. табл. 2.1.2.1); 2) относительная по-

грешность оценки характеристик годового и сезонного стока не должна превышать 10%, максимального и минимального стока – 20 %:

$$\delta_{S^*} = \frac{100 \cdot \delta_S}{S}; \quad (2.2.1.2)$$

$$\delta_A = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \cdot \sqrt{\frac{1+r(1)}{1-r(1)}}; \quad (2.2.1.3)$$

$$\delta_A = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \cdot \sqrt{\frac{1 + \frac{2 \cdot r(1)}{N \cdot (1-r(1))} \cdot \left(N - \frac{1-r(1)^N}{1-r(1)} \right)}{1 - \frac{2 \cdot r(1)}{N \cdot (N-1) \cdot (1-r(1))} \cdot \left(N - \frac{1-r(1)^N}{1-r(1)} \right)}}; \quad (2.2.1.4)$$

$$\delta_{Cv} = \frac{Cv}{N + 4 \cdot Cv^2} \cdot \sqrt{\frac{N \cdot (1 + Cv^2)}{2} \cdot \left(1 + \frac{3 \cdot Cv \cdot r(1)^2}{1+r(1)} \right)}, \quad (2.2.1.5)$$

где δ_S и δ_{S^*} – абсолютная и относительная погрешность определения статистики S ; δ_A и δ_{Cv} – абсолютные погрешности определения среднего арифметического A и коэффициента вариации Cv ; N – объем выборки; σ – среднее квадратическое отклонение; $r(1)$ – коэффициент автокорреляции между смежными членами выборки; при $r(1) < 0,5$ используется уравнение (2.2.1.3), при $r(1) \geq 0,5$ – уравнение (2.2.1.4); погрешность δ_{Cv} определяют по зависимости (2.2.1.5) для $Cv = 2 \cdot Cs$ [252].

При наличии данных, но несоблюдении указанных выше требований, ряды наблюдений на исследуемом водном объекте могут быть удлинены по водному объекту-аналогу или с использованием метеорологической информации при условиях:

$$N' \geq (6 - 10); |r| \geq 0,7; |r|/\delta_r \geq 2; |k_r|/\delta_k \geq 2, \quad (2.2.1.6)$$

где N' – количество лет совместных наблюдений на исследуемом водном объекте и аналоге; r – коэффициент корреляции между характеристиками исследуемого объекта и аналога; k_r – коэффициент уравнения регрессии; δ_r и δ_k – погрешности определения коэффициента корреляции и коэффициента уравнения регрессии [252].

При отсутствии данных наблюдений, согласно [240, 252], характеристики водного стока исследуемого водотока определяют по аналогу, по картам и эмпирическим зависимостям от различных факторов. В последнем случае целесообразно использовать те же зависимости, что и для

определения испарения при отсутствии данных наблюдений, например, уравнение (2.2.1.7) в рамках метода гидроклиматических расчетов [121]:

$$Y = H - E_m \cdot \left(1 + \left(\frac{H}{E_m} \right)^{-n_M} \right)^{-\frac{1}{n_M}}; \quad (2.2.1.7)$$

$$E_m = 5,1 \cdot \sum T_{a,m,\geq 0} + 382, \quad (2.2.1.8)$$

где Y – слой суммарного речного водного стока за год; H – суммарные ресурсы увлажнения (слой), включающие атмосферные осадки, изменение влагозапасов в водосборе и разницу между притоком и оттоком из водосбора подземных вод помимо расчетного створа в русле исследуемого водотока; E_m – водный эквивалент теплоэнергетических ресурсов; $\sum T_{a,m,\geq 0}$ – сумма положительных среднемесячных значений температуры атмосферного воздуха; n_M – параметр, зависящий водно-физических свойств почвы. Имеется ряд уравнений для определения n_M в зависимости от уклона водосбора, коэффициента шероховатости русла и других факторов. Однако далеко не всегда понятны закономерности изменения его значений для разных рек и природных зон, что в целом характерно для большинства эмпирических и полуэмпирических способов [184, 263]. С учетом этого для составления уравнения водного баланса, особенно на этапе предварительной проработки идеи проекта, целесообразно использовать наиболее простые модели с минимальным количеством параметров, имеющих понятный физический смысл.

Указанным условиям вполне отвечает уравнение Шрейбера [312], физический смысл которого становится очевидным, если предположить, что соотношение суммарного испарения E и слоя общего увлажнения H в последовательности испытаний Бернулли [290] с учётом максимально возможного в конкретных природных условиях испарения E_m определяется соотношением:

$$Pr(E \leq E_m) \approx 1 - \exp\left(-\frac{E_m}{H}\right), \quad (2.2.1.9)$$

где $Pr(E \leq E_m)$ – вероятность того, что значение E меньше или равно E_m . Если принять $Pr(E \leq E_m) \approx \frac{E}{H}$, то при $\Delta V \rightarrow 0$ в (2.2.1.1) можно записать (2.2.1.10) и, используя разложение в ряд Тейлора [293], получить аппроксимацию математического ожидания Y_a и стандартного отклонения σ_Y слоя стока:

$$Y = H \cdot \exp\left(-\frac{E_m}{H}\right); \quad (2.2.1.10)$$

$$Y_a \approx H_a \cdot \exp\left(-\frac{E_m}{H_a}\right) \cdot \left(1 + \frac{Cv_H^2}{2} \cdot \frac{E_m^2}{H_a^2}\right); \quad (2.2.1.11)$$

$$\sigma_Y \approx \sigma_H \cdot \left| \left(1 + \frac{E_m}{H_a}\right) \right| \cdot \exp\left(-\frac{E_m}{H_a}\right), \quad (2.2.1.12)$$

где H_a , σ_H , Cv_H – математическое ожидание, стандартное отклонение и коэффициент вариации слоя общего увлажнения [229].

Для апробации указанного подхода был проведен анализ опубликованных данных [26, 35, 185–193, 242] о среднемноголетних значениях (за период примерно с 1930-х до первой половины 1970-х гг.) слоя водного стока Y , испарения с поверхности водосбора E , атмосферного увлажнения P , температуры атмосферного воздуха T_a и других характеристик для центров водосборов ряда рек (Печора, Уса, Онега, Пижма, Цильма, Сула, Кама, Белая, Вятка, Песчаная, Ануй, Чарыш, Бердь, Иня, Томь, Уса, Мрас-Су, Кондома, Верхняя Терсь, Средняя Терсь, Тайдон, Белый Июс, Черный Июс, Чулым, Урюп, Кия, Четь, Чичка-Юл, Улу-Юл, Яя, Кеть, Шегарка, Икса, Чая, Бакчар, Парабель, Чузик, Васюган, Тым, Большой Юган, Тром-Юган, Омь, Тартас, Тара, Уй, Пяку-Пур, Надым, Щучья, Полуй, Абакан, Мана, Кан, Баргузин, Чикой, Уда, Турухан, Чарын, Чилик). Водосборы, ограниченные расчетными створами, в целом соответствует категории «средняя река» по [47].

Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования уравнения (2.2.1.10) для расчета среднемноголетнего слоя водного стока (рис. 2.2.1.1) с учетом оценки максимально возможного испарения E_m по уравнению (2.2.1.8) и общего увлажнения H как функции годовой суммы атмосферных осадков P и абляции ледников P_{gl} (при их наличии) по уравнениям (2.2.1.13–2.2.1.16):

$$H = k_H \cdot (P + P_{gl}); \quad (2.2.1.13)$$

$$k_H = a_0 + a_1 \cdot \ln(Z_{b, \max} - Z_{p0}) - a_2 \cdot \ln\left(\frac{f_{mr} + 1}{100}\right); \quad (2.2.1.14)$$

$$A_{gl} = 1,33 \cdot (T_{asm} + 9,66)^{2,85}; \quad (2.2.1.15)$$

$$P_{gl} = A_{gl} \cdot f_{ab} \cdot \frac{f_{gl}}{100}, \quad (2.2.1.16)$$

где $(Z_{b, \max} - Z_{p0})$ – разность высот самой высокой точки в водосборе и «ноля» графика гидрологического поста в км с округлением до второго

знака после запятой; f_{mr} – заболоченность водосбора, %; f_{gl} – доля ледников в площади водосбора, %; f_{ab} – доля зоны абляции в площади ледников, доли единицы; A_{gl} – абляция ледников по уравнению В.Г. Ходакова и А.Н. Кренке (2.1.15; приводится по [236]), мм; P_{gl} – поступление талых вод в речную сеть с ледников; T_{asm} – средняя летняя (июнь – август) температура атмосферного воздуха, °С; a_0 , a_1 , a_2 – коэффициенты регрессии, полученные методом наименьших квадратов ($a_0 = 0,984 \pm 0,076$; $a_1 = 0,060 \pm 0,022$; $a_2 = 0,043 \pm 0,021$; квадрат корреляционного отношения $R^2 = 0,49$) для коэффициентов k_H , которые были предварительно подобраны методом общего понижающего градиента

(в среде MS Excel) для целевой функции $\frac{S}{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum (y_{o,i} - y_{s,i})^2}{\sum (y_{o,i} - y_{o,a})^2}} \rightarrow 0$

($y_{o,i}$, $y_{s,i}$ – измеренные и вычисленные значения функции y , $i = 1, \dots, N$; $y_{o,a}$ – среднее арифметическое значение для измеренных значений; $\frac{S}{\sigma} = 0,0001$). Физический смысл зависимости (2.2.1.14) заключается в

увеличении атмосферного увлажнения в горных районах по сравнению с равнинными и частичной (временной) аккумуляции влаги в болотах.

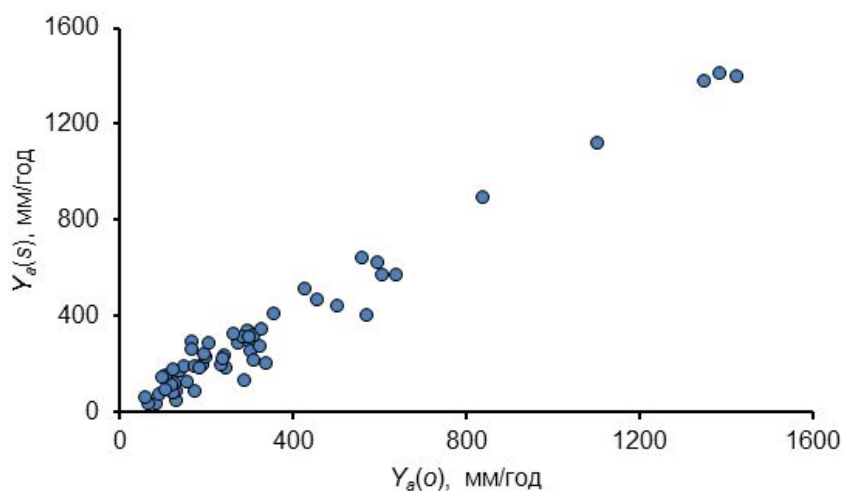


Рис. 2.2.1.1. Отношение измеренных $Y_a(o)$ и расчётных $Y_a(s)$ значений годового слоя водного стока средних рек в Евразии, $R^2 = 0,97$

При изучении водного баланса средней реки (с выделением категории по [47]) и наличии данных наблюдений за стоком целесообразно провести сопоставление значений среднемноголетнего водного стока измеренных и вычисленных по уравнению (2.2.1.10). В случае расхож-

дения более чем на 20 % (с учетом рекомендаций [122, 124, 172]) следует дополнительно проверить наличие неучтенных особых условий формирования водного стока (карст, переброска, регулирование и изъятие стока и т. д.) и достоверность данных наблюдений. При отсутствии таких условий и явных ошибок в получении и обработке информации наиболее вероятной причиной отклонения измеренных и вычисленных значений водного стока является несоответствие принятых в расчет атмосферных осадков и фактического атмосферного увлажнения водосбора. Чаще всего подобное несоответствие по ряду причин наблюдается в горных районах. В таких случаях можно попытаться использовать разные способы оценки атмосферного увлажнения водосбора (как среднее арифметическое, среднее взвешенное, изогипты) согласно [124]. Если удовлетворительная сходимость по водному стоку так и не была получена, то целесообразно подобрать величину суммарного атмосферного увлажнения P_a по уравнению (2.2.1.10) и известному значению Y_a .

Среднемноголетнее испарение с водосбора E_a при наличии гидрологических наблюдений рассчитывается как разница между среднемноголетними значениями суммы атмосферных осадков P_a и абляции ледников Y_{gl} (при их наличии), с одной стороны, и водного стока Y_a , с другой:

$$E_a = P_a + P_{gl} - Y_a, \quad (2.2.1.17)$$

а при отсутствии данных – методами теплового баланса, турбулентной диффузии, пульсационным и по эмпирическим формулам на их основе (включая совмещение теплового и водного балансов), в том числе:

$$E_a = (P_a + P_{gl}) \cdot \left(1 - \exp \left(- \frac{E_m}{(P_a + Y_{gl})} \right) \right). \quad (2.2.1.18)$$

Следующий этап – расчет сезонного и внутригодового распределения испарения с поверхности водных объектов и водосбора. Слой испарения с водной поверхности E_w за безледоставный период оценивается, согласно [124], по данным плавучих испарителей по уравнению (2.2.1.19), а при их отсутствии – по зависимостям от максимальной и фактической упругости водяного пара вида (2.2.1.20–2.2.1.22), либо для водоемов площадью менее 5 км² (слой испарения E_{w5}) – по уравнению (2.2.1.23):

$$E_w = k_{elz} \cdot E_{lz} \cdot \frac{e_s - e_2}{e_{slz} - e_2}; \quad (2.2.1.19)$$

$$E_w = 0,14 \cdot N_s \cdot (e_s - e_2) \cdot (1 + 0,72 \cdot u_2); \quad (2.2.1.20)$$

$$e_2 = e_{2m} + (0,8 \cdot e_{sm} - e_{2m}) \cdot k_{em}; \quad (2.2.1.21)$$

$$T_{w2} = T_{w2m} + (T_w - T_{w2m}) \cdot k_{em}; \quad (2.2.1.22)$$

$$E_{w5} = E_{20} \cdot k_{w1} \cdot k_{w2} \cdot k_{w3} \cdot k_{wt}; \quad (2.2.1.23)$$

$$u_2 = k_{u1} \cdot k_{u2} \cdot k_{u3} \cdot u_f, \quad (2.2.1.24)$$

где E_{lz} – испарение по плавучему испарителю; k_{elz} – коэффициент, учитывающий инструментальную поправку к показаниям испарителя (для испарителя ГГИ-3000, установленного в пойме, $k_{elz} = 0,80$); e_s – парциальное давление (среднее значение) водяного пара в насыщенном влажном воздухе при температуре поверхности воды в водоеме, гПа; e_{slz} – парциальное давление водяного пара в насыщенном влажном воздухе при температуре поверхности воды в испарителе, гПа; e_2 – фактическое парциальное давление водяного пара в ненасыщенном влажном воздухе на высоте 2 м (в (2.2.1.19) – над испарителем, в (2.2.1.20) – над водоемом), гПа; u_2 и u_f – средние значения скорости ветра над водоемом на высоте 2 м и на высоте флюгера (10 м), м/с; N_s – количество суток безледоставного периода в расчетном интервале времени; e_{2m} и e_{sm} – средние значения за расчетный интервал времени фактического парциального давления водяного пара в ненасыщенном влажном воздухе, измеренного на континентальной метеостанции, и парциального давления водяного пара в насыщенном влажном воздухе за этот же интервал времени, определенного при температуре поверхности воды в водоеме, гПа; k_{em} – коэффициент трансформации (табл. 2.2.1.1) в зависимости от средней длины разгона воздушного потока и температурой воздуха на метеостанции; T_{w2} – средняя температура воздуха над водоемом на высоте 2 м; T_{w2m} – средняя за расчетный интервал времени температура воздуха на метеостанции; T_w – температура поверхности воды; E_{20} – средняя многолетняя величина испарения с водной поверхности испарительного бассейна площадью 20 м²; k_{w1} – поправочный коэффициент на глубину водоема; k_{w2} – поправочный коэффициент на защищенность водоема от ветра; k_{w3} – поправочный коэффициент на площадь водоема; k_{wt} – коэффициент перехода от годового значения ($k_{wt} = 1$) к конкретному месяцу в зависимости от природной зоны (значения E_{20} , k_{w1} , k_{w2} , k_{w3} , k_{wt} приведены в [124]); где k_{u1} , k_{u2} , k_{u3} – коэффициенты, учитывающие степень защищенности метеостанций на суше, характер рельефа в пункте наблюдений и среднюю длину разгона воздушного потока над водоемом; для стандартных условий водоиспарительных площадок: $k_{u1} = 1,5$, $k_{u2} = 1,0$, $k_{u3} = 1,0$; погрешность расчета испарения без учета разницы скорости ветра над водоемом на высоте флюгера и 2 м составляет не более 22–25 мм [184, 263].

Таблица 2.2.1.1

Значения коэффициента трансформации k_{em}
в уравнениях (2.2.1.21, 2.2.1.22) [124]

Соотношение температуры воды и воздуха	Средняя длина разгона воздушного потока над водоемом, км									
	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100
$T_w \approx T_{w2m}$	0,02	0,03	0,08	0,12	0,16	0,23	0,28	0,34	0,44	0,51
$T_w \leq T_{w2m} - 4$	0,03	0,06	0,13	0,18	0,24	0,33	0,38	0,45	0,53	0,60
$T_w \geq T_{w2m} + 10$	0,01	0,02	0,03	0,05	0,07	0,10	0,15	0,19	0,28	0,37

При отсутствии информации о слое над водоемом, параметры уравнений (2.2.1.20–2.2.1.24) рассчитываются по материалам наблюдений на ближайших от водоема метеостанциях [124]. Близкие по смыслу способы расчета испарения с водной поверхности (Пенмана, Марсиано и Харбека и др.) приведены в [300].

Заметно сложнее (и с большей погрешностью) расчет испарения с поверхности водосбора. Во Всемирной метеорологической организации (WMO) и Продовольственной и сельскохозяйственной организации Организации объединенных наций (ООН) для оценки часового, суточного (основной расчетный период), декадного и месячного испарения в качестве эталонного рекомендуется уравнение Пенмана-Монтейта в версии ФАО для суточного интервала времени Δt [294, 300]:

$$E_{b(PM)} = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_{nf} - G_s) + \gamma_E \cdot \frac{900}{T_{a2} + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma_E \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)}; \quad (2.2.1.25)$$

$$e_s = 0,611 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot T_a}{T_a + 237,3}\right); \quad (2.2.1.26)$$

$$\Delta = \frac{4098 \cdot e_s}{(T_a + 237,3)^2}; \quad (2.2.1.27)$$

$$\gamma_E = \frac{c_p \cdot P}{\varepsilon \cdot \lambda} = 0,665 \cdot 10^{-3} \cdot P; \quad (2.2.1.28)$$

$$G_s = c_s \cdot \frac{T_{a,i} + T_{a,i-1}}{\Delta t} \cdot \Delta z_s, \quad (2.2.1.29)$$

где $E_{s(PM)}$ – слой испарения по Пенману-Монтейту, мм/сут; R_{nf} – радиационный баланс деятельной поверхности (поверхности растений), МДж/(сут·м²); G_s – поток тепла в почву, МДж/(сут·м²); T_{a2} – среднесуточная температура воздуха на высоте 2 м, °С ($T_{a,i}$ – температура атмо-

сферного воздуха в i -й расчетный период времени, °C); u_2 – скорость ветра на высоте 2 м, м/с; e_s – парциальное давление водяного пара в ненасыщенном влажном воздухе, кПа; e_a – фактическое парциальное давление водяного пара в ненасыщенном влажном воздухе, кПа; $d_a = (e_s - e_a)$ – дефицит влажности воздуха, кПа; Δ – наклон кривой давления пара, кПа/°C; γ_E – психрометрическая постоянная, кПа/°C; P – атмосферное давление, кПа; c_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянной температуре, $c_p = 1,013 \cdot 10^{-3}$ МДж/(°C·кг); λ – скрытая теплота парообразования, $\lambda = 2,45$ МДж/кг; ε – отношение молекулярных весов водяного пара и сухого воздуха, $\varepsilon = 0,622$; c_s – удельная теплоемкость почвы, МДж/(°C·м³).

При отсутствии материалов метеорологических наблюдений в FAO рекомендуется использование уравнения Харгрейва [285] в виде:

$$E_{b(H)} = a_0 + a_1 \cdot \left(0,023R_a \cdot (T_{a,a} + 17,8) \cdot \sqrt{T_{a,\max} - T_{a,\min}} \right), \quad (2.2.1.30)$$

где $E_{b(H)}$ – слой испарения по Харгрейву, мм/сут; R_a – внеземная радиация, МДж/(сут·м²); $T_{a,a}$, $T_{a,\max}$, $T_{a,\min}$ – среднее, максимальное и минимальное (за расчетный интервал времени) значения температуры атмосферного воздуха; a_0 , a_1 – эмпирические коэффициенты, определяемые по данным конкретной метеостанции для перевода к месячному и годичному расчетному интервалу.

В Российской Федерации для расчета декадного и месячного суммарного испарения используется метод М.И. Будыко, основанный на предположении о пропорциональности испарения и влажности почвы:

$$E_{b(B)} = \begin{cases} E_{b0}, & W_b \geq W_{b0}; \\ E_{b0} \cdot \frac{W_{ba}}{W_{b0}}, & W_b < W_{b0}; \end{cases} \quad (2.2.1.31)$$

$$W_{ba} = \frac{W_{b1} + W_{b2}}{2}; \quad (2.2.1.32)$$

$$E_{b0} = 0,69 \cdot N_s \cdot k_D \cdot (e_s - e_a), \quad (2.2.1.33)$$

где E_b и E_{b0} – испарение и испаряемость, соответственно, мм; W_{ba} – среднее значение продуктивных влагозапасов почвы за исследуемый период, мм; W_{b1} и W_{b2} – продуктивные влагозапасы почвы на начало и конец расчетного периода, мм; W_{b0} – критические продуктивные влагозапасы в почве, при которых $E_b = E_{b0}$, мм; e_s – среднее за расчетный период парциальное давление насыщенного водяного пара при температу-

ре испаряющей поверхности, гПа; e_a – среднее за расчетный период фактическое парциальное давление ненасыщенного водяного пара, гПа; N_s – количество суток в расчетном периоде; k_D – интегральный коэффициент турбулентной диффузии (табл. 2.2.1.2), см/с [18, 131, 132, 263]; согласно [244], расчетная скорость ветра при оценке испарения составляет примерно 70 % от расчетной скорости ветра на высоте флюгера.

Таблица 2.2.1.2

Значения коэффициента k_D в уравнении (2.2.1.33) [131]

Средняя скорость ветра на высоте флюгера с поправкой на изменение с высотой и защищенность, м/с	1	2	3	4	5	6	7
k_D	0,65	0,80	1,00	1,30	1,70	2,45	3,51

Для определения значений W_{b1} и W_{b2} используют региональные эмпирические зависимости от температуры атмосферного воздуха и атмосферных осадков за предыдущие месяцы, а при отсутствии данных наблюдений за влажностью почвы: 1) по опубликованным данным об агрогидрологических свойствах почвы в разных регионах принимается: W_{b1} = НПВ (наименьшая полевая влагоемкость), W_{b0} = ПВ (полная влагоемкость почвы); 2) проводится расчет W_{b2} по уравнению (2.2.1.34) и осреднение полученных результатов для расчетного периода:

$$W_{b2} = \begin{cases} \frac{W_{b1} \cdot \left(1 - \frac{E_{b0}}{2 \cdot W_{b0}}\right) + P - Y}{\left(1 + \frac{E_{b0}}{2 \cdot W_{b0}}\right)}, & W_{ba} < W_{b0}, \\ W_{b1} + P - Y, & W_{ba} \geq W_{b0} \end{cases}, \quad (2.2.1.34)$$

где P и Y – атмосферные осадки и водный сток за расчетный период [115, 131, 263].

При проведении ориентировочных расчетов внутригодового распределения (месячного) суммарного испарения в среднем за многолетний период удовлетворительную сходимость с результатами использования Пенмана-Монтейта показал способ, основанный на зависимости испарения от дефицита влажности воздуха [109] в виде:

$$E_{b,i} = E_{b,y} \cdot f\left(\frac{d_{a,i}}{\sum d_{a,i}}\right), \quad (2.2.1.35)$$

где $E_{b,y}$ – годовое суммарное испарение, полученное по уравнению водного баланса (2.2.1.17) или расчетным способом; $f\left(\frac{d_{a,i}}{\sum d_{a,i}}\right)$ – функция отношения среднемесячного дефицита влажности атмосферного воздуха $d_{a,i}$ за i -й месяц к сумме значений дефицита влажности за год. В частности, для 22 водосборов средних рек Евразии, для которых имеются измеренные значения характеристик теплового и водного балансов [26, 155, 278], получено:

$$f\left(\frac{d_{a,i}}{\sum d_{a,i}}\right) = k_{E,i} \cdot \frac{d_{a,i}}{\sum d_{a,i}}, \quad (2.2.1.36)$$

где $k_{E,i}$ – эмпирический коэффициент, учитывающий состояние растительного покрова по месяцам календарного года: $k_{E,I} = 0,80$; $k_{E,II} = 0,70$; $k_{E,III} = 0,74$; $k_{E,IV} = 0,83$; $k_{E,V} = 1,13$; $k_{E,VI} = 1,04$; $k_{E,VII} = 1,12$; $k_{E,VIII} = 0,96$; $k_{E,IX} = 0,73$; $k_{E,X} = 0,48$; $k_{E,XI} = 0,67$; $k_{E,XII} = 0,85$; $S / \sigma = 0,32$ (рис. 2.2.1.2).

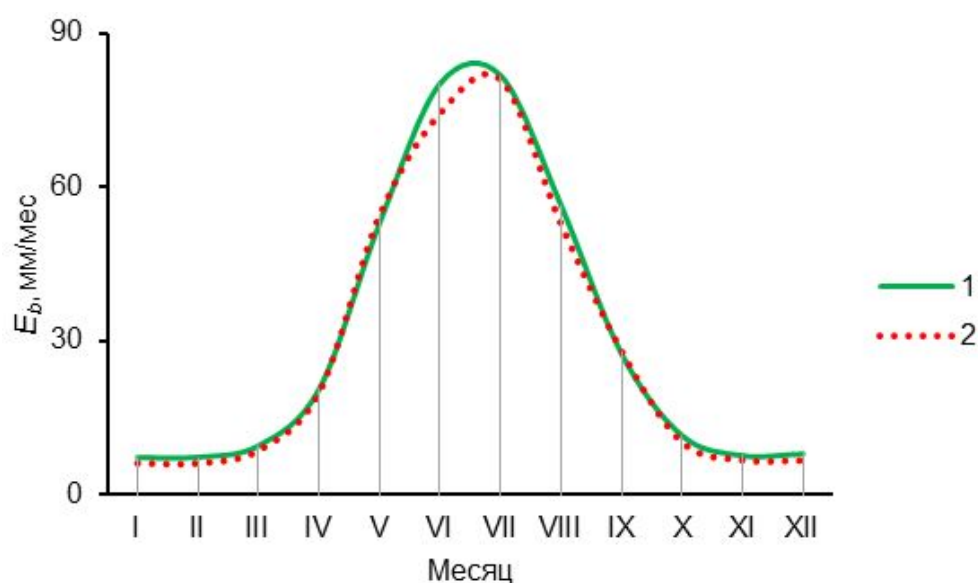


Рис. 2.2.1.2. Средние значения месячного суммарного испарения с поверхности водосборов, вычисленные по: 1) методу Пенмана-Монтейта; 2) зависимости (2.2.1.36)

Приемлемые результаты для водосборов средних рек в Северной Евразии могут быть получены и для $k_E = \text{const} = 1$; $S / \sigma = 0,38$. При расчете суммарного испарения за конкретные годы, особенно с поверхности водосборов с сильно заболоченными водосборами, могут использоваться функции дефицита влажности и иного вида [232]. Но во всех

случаях рекомендуется дополнительное выравнивание вычисленных значений месячного испарения по уравнению:

$$E_{b,i} = E_{b,y} \cdot f \left(\frac{d_{a,i}}{\sum d_{a,i}} \right) \cdot \frac{P_y - Y_y}{\sum E_{bs,i}}, \quad (2.2.1.37)$$

где $\sum E_{bs,i}$ – сумма месячных значений испарения за год по уравнению (2.2.1.35), мм/год; P_y, Y_y – годовые значения слоя атмосферных осадков с учетом талых вод с ледников и водного стока, мм/год.

Еще проще может выполнен расчет сезонного распределения испарения с ориентировочным выделением холодного и теплого периодов по среднемесячной температуре атмосферного воздуха:

1) в холодный период (при температуре воздуха менее 0 °С) рассчитывается испарение с поверхности суши (при допущении наличия снежного покрова) за i -й месяц $E_{bc,i}$ (мм/мес) по формуле П.П. Кузьмина [188]:

$$E_{bc,i} = 0,34 \cdot d_{a,i} \cdot N_i, \quad (2.2.1.38)$$

где N_{si} – количество дней в месяце; $d_{a,i}$ – среднемесячный дефицит влажности атмосферного воздуха (гПа); при отсутствии данных об измеренных месячных значениях $d_{a,i}$ они рассчитываются как разница давления насыщенного водяного пара e_s и фактического парциального давления ненасыщенного водяного пара e_a , причем значения e_s оцениваются по формуле Магнуса; принимая во внимание погрешности осреднения и использование температуры атмосферного воздуха, а не испаряющей поверхности, в расчетные значения $d_{a,i}$ следует внести коррективы с учетом поправки Э.М. Ольдекопа [109, с. 247] или по региональным зависимостям; например, для 95 метеостанций в Западной Сибири (по данным [143, 144, 241]) подбором по месячным значениям получено уравнение связи (2.2.1.39) между среднемесячными (за многолетний период) наблюдаемыми значениями дефицита влажности $d_{a(o),i}$ и значениями $d_{a(c),i}$, вычисленными по уравнению Магнуса (параметры приняты по [316]) над поверхностью воды (2.1.40) и льда (2.1.41):

$$d_{a(o),i} = 0,96 \cdot d_{a(c),i} + 0,90; \quad \frac{S}{\sigma} = 0,31; \quad N = 1045; \quad (2.2.1.39)$$

$$e_{s(W)} = 6,1 \cdot 10^{\frac{7,5 \cdot T}{T+237,2}}; \quad (2.2.1.40)$$

$$e_{s(i)} = 6,1 \cdot 10^{\frac{9,5 \cdot T}{T+265,5}}, \quad (2.2.1.41)$$

где N – объем выборки; среднемесячный дефицит влажности $d_{a,i}$ в гПа, температура в °С;

2) суммарное испарение за холодный период $E_{bc,y}$ (мм/год) определяется как сумма месячных значений, вычисленных по формуле (2.2.1.38);

3) суммарное испарение за теплый период $E_{bw,y}$ (мм/год) определяется как разница годового испарения $E_{b,y}$ и испарения за холодный период $E_{bc,y}$:

$$E_{bw,y} = E_{b,y} - E_{bc,y}; \quad (2.2.1.42)$$

4) проводится контроль результатов расчета с учетом данных о норме испарения за безледоставный период: в зоне тундры – 200–350 мм; в лесной зоне – 350–650 мм; в степной зоне – 650–1000 мм; в зоне полупустынь и пустынь – 1000–1700 мм [109].

После расчета месячного (сезонного) суммарного испарения проводится определение сезонного и внутригодового распределения жидких атмосферных осадков и водоотдачи из сезонного снежного покрова. Распределение притока талых вод с ледников можно приближенно принять по (2.1.15, 2.1.16) пропорционально отношению температуры за конкретный летний месяц к сумме летних значений. При отсутствии метеонаблюдений, особенно на этапе предварительного обоснования проекта и подготовки программы инженерных изысканий, можно принять, что жидкие осадки выпадают при положительной среднемесячной температуре приземных слоев атмосферного воздуха, а твердые – при отрицательной, хотя фактически жидкие и смешанные осадки могут выпадать при среднемесячных температурах воздуха ниже минус 10 °С [201].

Расчет водоотдачи из снежного покрова при наличии срочных метеонаблюдений может быть выполнен методом теплового баланса, в том числе, упрощенными способами на его основе, предложенными П.П. Кузьминым и Е.Г. Поповым [8, 34, 106, 164]. Наиболее простой вариант – использование температурных коэффициентов k_{sm} для расчета интенсивности снеготаяния $k_{sm} \cdot T_a \cdot N_s$, где T_a – средняя температура атмосферного воздуха за период продолжительностью N_s суток [8, 23, 34, 164, 301]. При этом зависимость для оценки месячной водоотдачи из снежного покрова приобретает вид:

$$P_{snf,i} = k_{sm} \cdot k_{sr} \cdot k_{sF} \cdot T_{a,i} \cdot N_{s,i}, \quad (2.2.1.43)$$

где $P_{snf,i}$ – водоотдача из снежного покрова за i -месяц из $N_{s,i}$ суток при среднемесячной температуре воздуха $T_{a,i}$, мм/мес; k_{sm} – коэффициент стаивания, м/(°С·сут); k_{sr} – коэффициент, учитывающий влагоемкость снега, доли единицы; k_{sF} – доля водосбора со снежным покровом, доли единицы. Для месячного интервала, в течение которого стаивает значительная часть снега, а снеготалые воды поступают в речную сеть, расчет водоотдачи выполняется по уравнениям (2.2.1.44–2.2.1.45):

$$P_{snf,i} = \begin{cases} 0, & VS_{i-1} - VS_i \leq 0; \\ VS_{i-1} - VS_i, & VS_{i-1} - VS_i > 0; \end{cases} \quad (2.2.1.44)$$

$$VS_i = VS_{i-1} + (P_{sn,i} - k_{sm*} \cdot T_{a,i} \cdot N_{s,i} - E_{b,i}), \quad (2.2.1.45)$$

где VS_i – влагозапасы в снежном покрове за i -й месяц (если $VS_i < 0$, то $VS_i = 0$); $P_{sn,i}$ – атмосферные осадки в виде снега (влагозапас), мм/мес; $E_{b,i}$ – суммарное испарение с поверхности водосбора, мм/мес; k_{sm*} – обобщенный коэффициент снеготаяния и водоотдачи (мм/(°С·сут)), который может либо подобран по результатам снегосъемок, наблюдений за расходами воды и температурой атмосферного воздуха, либо принят приближенно как средневзвешенное значение по природным районам с заранее оцененными региональными значениями k_{sm} , например по данным [8, 301].

Следующий блок воднобалансовых расчетов – оценка подземного стока и его внутригодового распределения. Согласно [17, 104, 156, 165], методы решения указанных задач основываются на: 1) расчленении гидрографов общего речного стока (гидролого-гидрогеологический метод); 2) анализе водного баланса, элементы которого определяются путем измерения расходов речных вод в меженный период (гидрометрический метод), уровней подземных вод и проведения лизиметрических наблюдений или расчетным способом в среднем для многолетнего периода; 3) анализе геохимического баланса в среднем для многолетнего периода (гидрогеохимический метод); 4) законах движения подземных вод в виде систем дифференциальных или алгебраических уравнений, решение которых находится аналитически, численными методами или путем физического моделирования [17, 104, 156, 165]. Все эти методы, по сути, тесно взаимосвязаны и составляют единый комплекс, упрощение которого в ту или иную сторону обладает одновременно и определенными преимуществами, и недостатками по отношению к другим методам [204, 210].

Применительно к целям и задачам гидроэкологического обоснования водохозяйственной деятельности достаточно эффективным является способ расчленения гидрографа, в рамках которого: 1) выделяется межженный период с отсутствием или несущественным объемом инфильтрации; 2) в пределах этого периода подземный сток приравнивается к речному при допущении, что погрешности такой оценки не превышают 20 %; 3) в остальную часть года подземный сток вычисляется: 3.1) при наличии данных наблюдений за уровнями речных и подземных вод – по регрессионной зависимости, имеющий вид уравнения Дюпюи (2.2.1.46); 3.2) при отсутствии данных наблюдений за уровнями речных и подземных вод – линейной интерполяцией между значениями подземного стока в конце и начале межженного периода (2.2.1.47):

$$Y_{g,i} \approx \begin{cases} a_0 + a_1 \cdot (Z_{g,i}^2 - Z_{r,i}^2) + a_2 \cdot Z_{g,i}, & i \in [wb; we], \\ Y_i, & i \in [wb; we], \end{cases} \quad (2.2.1.46)$$

$$Y_{g,i} \approx \begin{cases} Y_{g,we} + (Y_{g,wb} - Y_{g,we}) \cdot \frac{(i - we)}{(wb - we)}, & i \in [wb; we], \\ Y_i, & i \in [wb; we] \end{cases}, \quad (2.2.1.47)$$

где Y_i – слой общего речного стока (мм/мес) за i -й месяц; wb и we – начало и конец межженного периода (при отсутствии или незначительной инфильтрации); Y_{wb} и Y_{we} – слой общего речного стока в начале и конце межженного периода (мм/мес); $Z_{g,i}$ и $Z_{r,i}$ – среднемесячные значения уровней подземных и речных вод; a_0, a_1, a_2 – эмпирические коэффициенты, оцениваемые методом наименьших квадратов регрессии при условии (2.2.1.6) по данным за межженный период [201, 204, 210, 221].

Назначение wb и we может выполняться для: 1) периода зимней межени согласно [129]; 2) для холодного периода при среднемесячной температуре атмосферного воздуха менее 0 °С; 3) для холодного периода при отсутствии резкого изменения стока и за исключением месяцев, граничных с теплым периодом; 4) месяцев, когда месячная сумма жидких осадков $P_{r,i}$, талых вод, образующихся при таянии сезонного снежного покрова $P_{snf,i}$ и ледников $Y_{gl,i}$, стремится к нулю (меньше удвоенной суммарной погрешности их определения).

Наиболее корректный способ оценки месячного подземного стока – четвертый, наименее трудоемкий – первый и второй. Третий способ уступает четвертому в теоретической обоснованности, а первым двум – в трудоемкости, но при отсутствии данных режимных гидрогеологических наблюдений позволяет наиболее точно оценить границы периода,

когда $(P_{r,i} + P_{snf,i} + Y_{gl,i}) \rightarrow 0$. Например, для 58 средних рек Северной Евразии (описание рек приведено выше) получено удовлетворительное приближение к результатам моделирования притока в речную сеть по уравнениям (2.2.1.36, 2.2.1.39, 2.2.1.44, 2.2.1.45) при использовании условия:

$$Y_{g,i} = Y_i,$$

если: $T_{a,i-1} < 0; T_{a,i} < 0; Y_{i-2} < Y_{i-1}; Y_{i-1} < Y_i; |Y_i - Y_{i+1}| / Y_i < 0,5$. (2.2.1.48)

Годовой подземный сток (слой стока) определяется суммированием месячных значений, а поверхностный сток Y_s (месячный и годовой) – как разница суммарного (Y) и подземного (Y_g) стока:

$$Y_s = Y - Y_g. \quad (2.2.1.49)$$

Следует отметить, что между долей подземной составляющей годового стока Y_{gr} / Y , рассчитанной по (2.2.1.47, 2.2.1.48), и коэффициентом вариации месячных значений слоя суммарного речного стока $Cv(Y)$ выявлена статистически значимая связь (рис. 2.2.1.3). Аналогичный вывод был ранее получен и для ряда малых водотоков – притоков реки Томь (речная система Томь – Обь) [24]. Наличие подобной зависимости в целом позволяет снизить стоимость и повысить эффективность поисков и оценки ресурсов пресных подземных вод за счет использования гидрографов речного стока даже при отсутствии данных гидрометрических наблюдений.

При оценке годового водного баланса в среднем за многолетний период с однородными условиями формирования водного стока расчет завершается. Но в случае составления водного баланса за конкретный год или внутри характерного года в среднем за многолетний период обычно требуется определение изменения влагозапасов в водосборе ΔV (2.2.1.1).

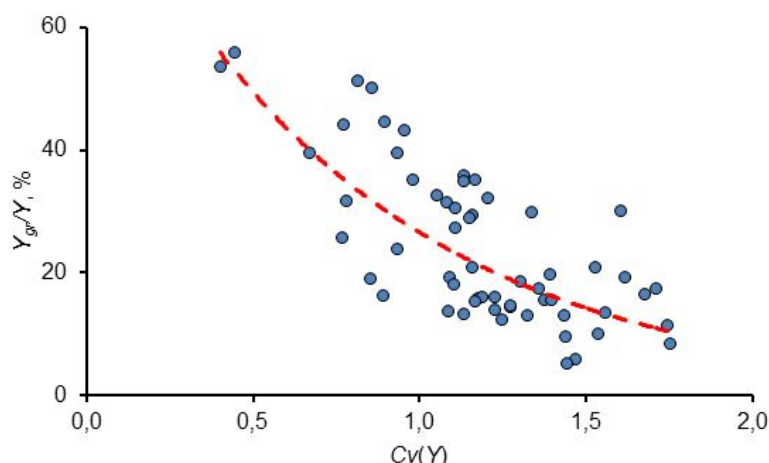


Рис. 2.2.1.3. Связь доли подземной составляющей годового стока Y_{gr}/Y с коэффициентом вариации месячных значений слоя суммарного речного стока $Cv(Y)$: $Y_{gr}/Y = 91,951 \cdot \exp(-1,243 \cdot Cv(Y))$; $R^2 = 0,56$

По смыслу эта величина является функцией эффективного увлажнения и стока в период, предшествующий расчетному, и связана с продуктивными запасами в почве, которые представляют собой часть ΔV . Соответственно, значение ΔV_i за i -й месяц при отсутствии данных наблюдений может быть вычислена по зависимости вида:

$$\Delta V_i = a_0 + a_1 \cdot (P_{w,i} + P_{snf,i} + P_{gl,i} - E_{b,i}) + \sum_{j=1}^{i-Nf} a_j \cdot (P_{w,j} + P_{snf,j} + P_{gl,j} - E_{b,j} - Y_j), \quad (2.2.1.50)$$

где Nf – время значимого влияния эффективного увлажнения на водный сток (относительно i -го месяца); a_0, a_1, \dots – эмпирические коэффициенты; остальные обозначения приведены выше для уравнений (2.2.1.1, 2.2.1.35, 2.2.1.46, 2.2.1.47, 2.2.1.49). Другой подход к оценке месячных значений ΔV_i заключается в поиске зависимостей от подземного стока за период Nf с учетом взаимосвязей между влагозапасами в водосборе, подземным стоком и уровнем режимом поверхностных и подземных вод [206, 221].

В общем случае связь между всеми элементами водного баланса может быть отражена в виде уравнения свертки:

$$Y_t = \int_0^t (P_{w,t-\tau} + P_{snf,t-\tau} + P_{gl,t-\tau} - E_{b,t-\tau}) \cdot f(\tau) d\tau, \quad (2.2.1.51)$$

где $f(\tau)$ – функция трансформации, принимаемая в ряде случаев виде функции распределения Пуассона или гамма-распределения [8, 20, 23, 72]. Бураков Д.А. предложил рассматривать эту функцию как плотность распределения добегания элементарных объемов воды с соответствующей интерпретацией параметров $f(\tau)$ [20]. В случае месячного слоя стока расчетный период обычно не превышает двух-трех месяцев, включая расчетный. Например, для 58 рассмотренных выше рек Евразии подбором по методу общего понижающего градиента получена зависимость для месячного слоя суммарного водного стока в среднем за многолетний период:

$$Y_i = -5,735 + 0,158 \cdot Y_{i-1} + 0,520 \cdot (P_{w,i} + P_{snf,i} + P_{gl,i} - E_{b,i}) - 0,198 \cdot (P_{w,i-1} + P_{snf,i-1} + P_{gl,i-1} - E_{b,i-1}). \quad (2.2.1.52)$$

2.2.2. Классификация водных объектов по геофизическим показателям

Необходимо отметить, что любые гидрологические расчеты, включая воднобалансовые, должны, с одной стороны, начинаться с классификации водного объекта. С другой стороны, результаты составления и анализа уравнения водного баланса должны каким-то образом упорядо-

чены, что, собственно, и составляет основу классификации водных объектов по водному режиму и питанию. В настоящее время наиболее проработаны вопросы классификации рек. Их подробный обзор по состоянию на 2021 г. приведен в [272]. Здесь лишь кратко рассмотрим несколько ключевых классификаций, имеющих важное историческое и практическое значение в отечественной гидрологии.

Первая классификация рек по типам питания и водному режиму разработана А.И. Воейковым в конце XIX века. В ее основу положено допущение о ключевом влиянии климатических факторов на тип питания рек и внутригодовое распределение стока, а сама классификация предусматривает выделение девяти типов, в том числе водотоков со снеговым питанием на равнинах и в горах, с дождевыми максимумами водности в теплый или холодный период года, пересыхающих рек аридных районов и временных водотоков полярных стран [11, 276].

Дальнейшим развитием идей А.И. Воейкова стала классификация М.И. Львовича с использованием двух основных классификационных признаков – источника водного питания реки и характера внутригодового распределения стока. Количественная оценка источников проводится путем расчленения гидрографа и выделением снегового, дождевого, ледникового и грунтового питания (80 % и более – источник имеет исключительное значение, от 50 до 80 % – преимущественное, все источники, за исключением ледников, до 50 % – смешанное; в случае ледникового питания – соответствующие граничные значения – 25 и 50 % вместо 50 и 80 % для других источников; источники с долей менее 10 % могут вообще не учитываться). Учет внутригодового распределения сводится к выделению одного из четырех типов в зависимости от сезона (календарного года) с повышенной водностью (весенний, летний, осенний, зимний) [11, 135, 276].

Большой акцент на внутригодовое распределение водного стока сделан в классификации Б.Д. Зайкова, который предложил выделять три основные группы рек на территории бывшего СССР, внутри которых с учетом водного питания выделяется ряд типов: 1) с весенним половодьем; типы: 1.1) казахстанский; 1.2) восточноевропейский; 1.3) западносибирский; 1.4) восточносибирский; 1.5) алтайский; 2) с половодьем в теплую часть года; типы: 2.1) дальневосточный; 2.2) Тяньшанский; 3) с паводочным режимом в течение всего года; типы: 3.1) причерноморский; 3.2) крымский; 3.3) северокавказский [11, 71, 135, 276].

Аналогичный подход, но с еще с большей детализацией по природной зоне, преобладающему типу водного питания и особенностям главных фаз водного режима (половодий и паводков), использован в классификации П.С. Кузина, в соответствии с которой на территории бывшего

СССР выделено три основные типа и 14 подтипов водного режима, а также аazonальный четвертый тип – реки с преобладанием подземного питания и равномерным распределением стока в течение года [105, 276].

Общие вопросы к указанным выше и ряду других классификаций заключаются в неоднозначности понятий «половодье», «паводок» и неопределенности количественной оценки долей снегового, дождевого, ледникового и «грунтового» питания. Так, в российских нормативных документах используются определения: фаза водного режима реки – «характерное состояние водного режима реки, повторяющееся в определенные гидрологические сезоны в связи с изменением условий питания»; половодье – это «фаза водного режима реки, ежегодно повторяющаяся в данных климатических условиях в один и тот же сезон, характеризующаяся наибольшей водностью, высоким и длительным подъемом уровня воды, и вызываемая снеготаянием или совместным таянием снега и ледников»; паводок – «фаза водного режима реки, которая может многократно повторяться в различные сезоны года, характеризуется интенсивным обычно кратковременным увеличением расходов и уровней воды и вызывается дождями или снеготаянием во время оттепелей» [47, п. 71–73].

Следовательно, там, где не формируется устойчивый сезонный снежный покров, половодья исключаются, что, в свою очередь, ставит под сомнение необходимость использования для классификации признака (наличие половодья), не имеющего повсеместного распространения. Кроме того, во многих регионах выделение снегового, дождевого, ледникового и подземного питания – непростая задача, которая часто решается весьма субъективно проведением на гидрографе неких условных линий, отражающих, по мнению исследователя, влияние того или иного источника. Конечно, выходом из этой ситуации могло бы стать использование компьютерной реализации некой стандартной математической модели, отражающей все основные процессы формирования водного стока. Одновременно эта модель должна быть достаточно простой и основанной на использовании минимума доступной информации.

Опыт проведения гидрологических исследований в Сибири показал, что указанным условиям вполне удовлетворяет модель месячного водного стока в среднем за многолетний период (2.2.1.1, 2.2.1.8, 2.2.1.10, 2.2.1.13–2.2.1.16, 2.2.1.18, 2.2.1.35, 2.2.1.36, 2.2.1.44, 2.2.1.45, 2.2.1.47, 2.2.1.48, 2.2.1.49, 2.2.1.50). Исходная информация о месячных значениях температуры атмосферного воздуха и парциального давления водяного пара, сезонных значениях атмосферных осадков на территории Российской Федерации принимается по [249], о месячных значениях – из справочников Росгидромета по климату (www.meteo.ru) с последующим приведением к данным [249], о расходах и уровнях речных вод – по дан-

ным Росгидромета (требования к гидрологической информации указаны в [255, 256], дополнительные источники – в [272]), об уровнях подземных вод – по данным государственного мониторинга недр.

Основное уравнение классификации по водному питанию (в мм/год) – уравнение водного баланса (2.2.1.1) за год в среднем за многолетний период, приведенное при условии к виду:

$$Y = Y_{sf} + Y_{gr} \approx P_{T \geq 0} + P_{T < 0} + P_{gl} - E_{b, T \geq 0} - E_{b, T < 0}, \quad (2.2.2.1)$$

где индекс « $T \geq 0$ » соответствует теплому периоду с положительными среднемесячными температурами атмосферного воздуха, а « $T < 0$ » – холодному периоду с отрицательными температурами; E_b – суммарное испарение с поверхности водосбора; прочие обозначения соответствуют обозначениям в уравнении (2.2.1.1). Основными допущениями (помимо приближения слоя дождевых и снеготалых вод суммами атмосферных осадков за теплый и холодный периоды) являются предположения о том, что: 1) поверхностный сток формируется только при предварительном накоплении влагозапасов в почвогрунтах и формировании подземного стока; 2) инфильтрация в среднем за многолетний период при $\Delta V \rightarrow 0$ и отсутствии внешнего притока подземных вод примерно равна подземному стоку из водосбора.

Первым этапом классификации является количественная оценка источников водного питания в следующей последовательности:

1) рассчитывается эффективное увлажнение за счет дождей H_r и снеготалых вод H_{sn} :

$$H_r = P_r - E_{T \geq 0} \approx P_{T \geq 0} - E_{T \geq 0};$$

$$H_{sn} = P_{smf} - E_{T < 0} \approx P_{T < 0} - E_{T < 0};$$

2) если $H_r < 0$, то: $E'_{T < 0} = E_{T < 0} - H_r$;

$$E'_{T \geq 0} = E_y - E_{T < 0};$$

$$H'_r = P_{T \geq 0} - E'_{T \geq 0};$$

иначе:

$$E'_{T < 0} = E_{T < 0};$$

$$E'_{T \geq 0} = E_y;$$

$$H'_r = H_r;$$

$$H'_{sn} = H_{sn};$$

3) определяется подземный водный сток за холодный ($T_a < 0$ °C) и теплый ($T_a \geq 0$ °C) периоды по уравнениям (2.2.1.47, 2.2.1.48);

4) рассчитываются дождевая $H_{r(gr)}$ и снеговая $H_{sn(gr)}$ составляющие подземного стока:

если $(H'_r - Y_{gr, T \geq 0}) < 0$, то $H_{r(gr)} = H'_r$;

иначе $H_{r(gr)} = Y_{gr, T \geq 0}$;

$$H_{sn(gr)} = Y_{gr} - H_{r(gr)};$$

5) рассчитываются дождевая $H_{r(sf)}$ и снеговая $H_{sn(sf)}$ составляющие (условно) поверхностного стока:

$$H_{r(sf)} = H'_r - H_{r(gr)};$$

$$H_{sn(sf)} = H'_{sn} - H_{sn(gr)};$$

6) определяется вклад дождевой $f_{r(sfY)}$, снеготалой $f_{sn(sfY)}$, ледниковой f_{gl} и условно подземной f_{gl} составляющих поверхностного стока в формирование суммарного речного стока (в %):

$$f_{r(sfY)} = 100 \cdot \frac{H_{r(sf)}}{Y};$$

$$f_{sn(sfY)} = 100 \cdot \frac{H_{sn(sf)}}{Y};$$

$$f_{gl} = 100 \cdot \frac{P_{gl}}{Y};$$

$$f_{gr} = 100 \cdot \frac{Y_{gr}}{Y};$$

7) определяется общий вклад дождевых $f_{r(Y)}$, снеготалых $f_{sn(Y)}$ и талых вод ледников f_{gl} в формирование суммарного речного стока (в %):

$$f_{r(Y)} = 100 \cdot \frac{H_r}{Y};$$

$$f_{sn(Y)} = 100 \cdot \frac{H_{sn}}{Y};$$

$$f_{gl} = 100 \cdot \frac{P_{gl}}{Y};$$

8) определяется вклад дождевых $f_{r(sf)}$ и снеготалых $f_{sn(sf)}$ вод в формирование поверхностного (водного) стока (в %):

$$f_{r(sf)} = 100 \cdot \frac{H_{r(sf)}}{Y_{sf}};$$

$$f_{sn(sf)} = 100 \cdot \frac{H_{sn(sf)}}{Y_{sf}};$$

9) определяется вклад дождевых $f_{r(gr)}$ и снеготалых $f_{sn(gr)}$ вод в формирование подземного (водного) стока (в %):

$$f_{r(gr)} = 100 \cdot \frac{H_{r(gr)}}{Y_{gr}};$$

$$f_{sn(gr)} = 100 \cdot \frac{H_{sn(gr)}}{Y_{gr}}.$$

Результаты, полученные согласно п. 6, в целом соответствуют подходу, принятому М.И. Львовичем, но с учетом не формального, а фактического увлажнения. При этом следует отметить, что в соответствие с этим подходом (по М.И. Львовичу) оценивается вклад снегового и дождевого питания не в суммарный речной сток, а только в его поверхностную составляющую. По этой причине для получения более объективной картины требуются результаты расчетов согласно п. 7–9, причем в последнем случае (при оценке питания подземных вод суши) фактически речь идет только о метеорных (в основном – инфильтрационных) водах, помимо которых в той или иной мере в подземных (следовательно, и поверхностных) объектах присутствуют седиментационные и ювенильные, вовлеченные в климатический (метеорные воды), геологический и мантийный круговороты воды (табл. 2.2.1.2).

Таблица 2.2.2.1

Генетические типы подземных вод (приводится по [281])

Круговорот воды	Генетическая группа подземных вод	Генетический тип воды
климатический	метеорные	инфильтрационные
		конденсационные
геологический	седиментационные	погребенные
		элизионные
		возрожденные (синтезированные)
мантийный	Ювенильные	магматогенные
		интрателлурические
мантийно-океанический	талассогенные	литификационные
		рифтогенные
		субдукционные

На практике оценка их вклада сводится к анализу изотопного состава и соотношений содержаний ряда веществ на основе комплекса тех или иных допущений, возможность применения которых в общем случае не является бесспорной. Поэтому обычно в зоне активного водообмена можно ограничиться анализом преимущественно метеорных вод, в ряде случаев – метеорных и седиментационных.

В целом, оценка питания поверхностных водных объектов должна включать в себя выделение доли условно снеговых, дождевых, ледниковых и подземных вод, а оценка питания подземных вод – доли условно снеговых, дождевых вод и инфильтрации из поверхностных водных объектов. Критические значения, по которым выделяются категории «смешанное питание», «основной источник» и «преобладающий источник», можно назначить из следующих соображений:

1) согласно [124], погрешность инструментальной оценки элементов водохозяйственного (водного) баланса составляет 5 %, а погрешность расчетов по нормам – 20 %; с учетом этого минимальная погрешность определения (измерения) атмосферных осадков – 5 %, а погрешность расчета талых вод с ледника по средней летней температуре с пересчетом на площадь областей абляции – 20 %; при вкладе менее 5 % (то есть погрешности инструментального определения) источник, за исключением ледников, можно не учитывать;

2) в соответствии с [51, пп. 4, 6], ледник – это «движущееся естественное скопление льда и фирна на земной поверхности, возникающее в результате накопления и преобразования твердых атмосферных осадков при положительном многолетнем балансе», а ледниковый бассейн – «часть водосборного бассейна, в пределах которого имеются ледники и значительная доля влагооборота осуществляется через твердую фазу воды»; если принять, что указанная значительная доля должна превышать погрешность определения с учетом уровня значимости 5 %, то при наличии ледников в водосборе доля ледникового питания менее 20 % соответствует категории «смешанное питание» (при равномерном распределении других источников), а более 40 % ($1,96 \cdot 20 \approx 40$) – категории «преобладающий источник»;

3) смешанное питание соответствует относительно равномерному распределению долей снеговых, дождевых, подземных вод и доли ледникового питания менее 20 %, то есть менее $(100 - 20) / 3 \approx 27$ %;

4) преобладающим можно считать источник (за исключением ледников), вклад которого больше суммы погрешностей определения вкладов других источников, то есть более $100 - 5 \cdot 2 - 20 = 70$ %;

5) методом исключения категория «основной источник» для ледников соответствует интервалу 20–40 %, для дождевых, снеговых и подземных вод 27–70 % (табл. 2.2.2.2).

Таблица 2.2.2.2

Градации выделения классов водных объектов по водному питанию

Источник	Класс водных объектов по водному питанию, % от годового стока (% от годового объема воды)		
	Смешанное питание	Основной источник	Преобладающий источник
Дождевые воды	<27	27–70	>70
Снеговые воды	<27	27–70	>70
Ледниковые воды	<20	20–40	>40
Подземные воды в поверхностном водном объекте или поверхностные воды в подземном водном объекте	<27	27–70	>70

Второй этап классификации (после оценки источников водного питания) – оценка внутригодового распределения стока, в рамках которой, возможно, следует ограничиться выделением многоводных и маловодных сезонов календарного года, поскольку половодье – признак, характерный только для областей с наличием ледников и/или сезонных снегов, а во многих случаях достоверно выделить в максимальном стоке снеговую и дождевую составляющие невозможно. Календарный год включает в себя четыре сезона – весна, лето, осень, зима. Выбор именно календарного, а не гидрологического или водохозяйственного года, связан с его приближением к астрономическому (тропическому) году, что позволяет унифицировать методику классификации и анализ ее результатов для разных регионов мира.

С учетом погрешности расчетов 20 % теоретически возможны следующие случаи: 1) минимальный сезонный сток составляет от 0 до $0 + 20 = 20$ % годового стока; 2) максимальный сезонный сток – от $100 - 3 \cdot 20 = 40$ % до 100 %; 3) относительно равномерное распределение водного стока по сезонам в диапазоне от 20 до 40 %. Соответственно, маловодный сезон – это сезон с водным стоком менее 20 % от годового, многоводный – сезон с водным стоком более 40 %. Количество маловодных сезонов может быть от 0 при равномерном распределении стока до 2–3, количество многоводных сезонов – от 0 до 2.

Соответственно, водные объекты могут иметь равномерное (сток или объем в каждый сезон составляет 20–40 % годовых значений) или неравномерное распределение стока (объемов воды). Неравномерное распределение, в свою очередь, характеризуется 1 или 2 многоводными сезонами и 2 или 3 маловодными с указанием конкретных сезонов. Поскольку количество маловодных и многоводных сезонов взаимосвязано, то в качестве признака классификации достаточно использовать количество только многоводных сезонов (табл. 2.2.2.3).

Таблица 2.2.2.3

Градации выделения типов и подтипов водных объектов по внутригодовому распределению стока (объемов)

Тип распределения	Подтип распределения:		Доля водного стока реки (объема воды водоеме, болоте, подземном объекте) за многоводный сезон, % годового стока (% от суммы за 4 сезона)
	по количеству многоводных сезонов	по многоводному сезону (сезонам)	
Равномерное	0	–	20–40 во все сезоны
Неравномерное	1	весна	>40
		лето	>40
		осень	>40
		зима	>40
	2	весна – лето	>40 за каждый сезон
		лето – осень	>40 за каждый сезон
		осень – зима	>40 за каждый сезон
		зима – весна	>40 за каждый сезон
		весна – осень	>40 за каждый сезон
		зима – лето*	>40 за каждый сезон

*Примечание. Гипотетически возможный подтип.

Предложенные подходы не являются бесспорными с точки зрения выбора календарного, а не гидрологического года, выбора граничных значений таксономических элементов и способов количественной оценки элементов водного баланса, но все же позволяют построить общую классификацию всех водных объектов применительно ко всем фактически существующим и потенциально возможным природным зонам. В то же время, они, как и в других классификациях, основаны на использовании только одной составляющей определения водного объекта по [47, п. 6] – водного режима и не учитывают специфику другой составляющей – «сосредоточения природных вод из поверхности суши либо в горных породах». При этом очевидно, что характер «сосредоточения» определяет существенные отличия одних рек, озер, водохранилищ, болот, ледников и, особенно, подземных водных объектов от других. В случае подземных вод необходимость использования указанного признака особенно актуальна на фоне отсутствия общепризнанных классификаций подземных вод, несогласованности между классификационными признаками и выделяемыми таксономическими элементами, общей неоднозначности определения «подземные водные объекты».

Эта неоднозначность частично обсуждена выше (разд. 1.2). Здесь лишь дополнительно отметим следующее. Во-первых, свидетельством недостаточной проработанности используемых определений и класси-

фикации может служить тот факт, что в ряде случаев по результатам инженерно-геологических изысканий подземные воды не отмечены (причем при наличии развитой речной сети), а через некоторое время после ввода в эксплуатации инженерных объектов регистрируются факты подтопления территории.

Во-вторых, при выделении тех или иных групп подземных водных объектов обычно рассматривают условия залегания (верховодка, грунтовые, артезианские [9, 281]) и циркуляции (трещинно-карстовые, трещинные, поровые [66]) подземных вод, а также виды воды в горных породах (в составе кристаллической решетки или химически связанная с горными породами, включая конституционную, кристаллизационную, цеолитную; физически связанная с горными породами, включая прочно- и слабосвязанную; свободная, включая капиллярную и гравитационную; в твердом состоянии; в состоянии пара [281]).

С учетом этого и принимая во внимание определения действующих нормативных документов [29, 47, 66, 147], представляется целесообразным при решении инженерных задач рассматривать подземные водные объекты как сосредоточение свободных (гравитационных и капиллярных) вод и льда в горных породах, имеющее характерные черты режима и формы распространения, обусловленные размером водоупоров и наличием в них гидравлических «окон». Соответственно, локальная классификация подземных водных объектов должна включать в себя все указанные признаки. Например, тип подземных водных объектов (к типам относятся: водоносный горизонт – «относительно выдержанная и единая в гидравлическом отношении толща (слой, пласт и т. д.) водопроницаемых горных пород, поры, трещины или пустоты которых заполнены подземными водами»; бассейн подземных вод – совокупность водоносных горизонтов и слабопроницаемых (водоупорных) пластов, характеризующаяся замкнутым балансом подземных вод (то есть равенством в многолетнем разрезе величин питания и разгрузки подземных вод)» [133]), с учетом изложенных в [281] представлений, может быть охарактеризован в зависимости от структуры геосистемы как: 1) «простой» – отдельные водоносные горизонты верховодки, грунтовых и артезианских вод; 2) «сложные» – водоносные горизонты криолитозоны, районов активного вулканизма, районов распространения трещинных и карстовых вод, под морями и океанами и бассейны подземных вод.

Класс подземного водного объекта в рамках «простого» типа, с учетом классификаций А.М. Овчинникова, Е.В. Пиннекера и ряда других авторов, целесообразно выделять по условиям залегания, а именно: 1) временный водоносный горизонт, залегающий в зоне аэрации на водоупорах ограниченного распространения и характеризующийся нали-

чием верховодки; 2) постоянный водоносный горизонт, залегающий в зоне насыщения на водоупорах различного распространения и характеризующийся наличием безнапорных и слабонапорных грунтовых вод; 3) постоянный водоносный горизонт, залегающий между водоупорами и характеризующийся наличием напора.

Классы объектов в рамках «сложного» типа в случае водоносных горизонтов определяются, исходя из специфики условий залегания подземной вод (водоносный горизонт криолитозоны, районов активного вулканизма, районов распространения трещинных и карстовых вод, под морями и океанами), а в случае бассейнов подземных вод – по классу преобладающих по емкости «простых» водоносных горизонтов, например, горизонтов с емкостью $\frac{V_j \cdot n_{V,j}}{\sum V_i \cdot n_{V,i}} > 40\%$, где V_j и $n_{V,j}$ – объем и пористость от-

ложений j -го водоносного горизонта, 40 % – удвоенная погрешность расчетного определения одного из N -горизонтов ($i = 1, \dots, N$), включая j -й. Род подземного водного объекта определяется с учетом табл. 2.2.2.4 в зависимости от свойств водовмещающих пород, определяющих характер движения вод: поровые, трещинные, трещинно-поровые, трещинно-карстовые (условия циркуляции подземных вод по [66]).

Таблица 2.2.2.4

Классификация подземных вод по характеру водообмена согласно [66]

Характер залегания вод	Тип вод по условиям циркуляции	Соотношение области питания и области распространения	Гидравлическая связь с дренами	Гидродинамическая связь водоносных горизонтов	Водообмен
Открытый	Трещинно-карстовый	Совпадает	Постоянная	Явная	Активный
Наличие «гидрологических окон»	Трещинный	–	Периодическая	Неявная	Замедленный
Изолированный	Поровый	Частично совпадает	Отсутствует	Отсутствует	Сильно замедлен

Таким образом, выделяют «простые» и «сложные» типы, классы, роды и виды подземных водных объектов, причем типы, виды и, частично, роды соответствуют [66], а классы – условиям залегания с учетом классификаций А.М. Овчинникова и Е.В. Пиннекера. Особенно-

стью предложенной классификации является то, что при ее использовании в случаях, когда на момент проведения инженерных изысканий на водосборной территории в отложениях (которые нельзя отнести к водопорным) не обнаружены гравитационные подземные воды, должен быть сделан вывод о наличии временного водоносного горизонта, залегающего в зоне аэрации на водоупорах ограниченного распространения и характеризующегося наличием верховодки.

Признак «сосредоточие» (в формах рельефа) явно не звучит в существующих классификациях рек, озер, водохранилищ, ледников и болот, но так или иначе в них присутствует. Например, при изучении рек, особенно при проведении инженерных изысканий, большое внимание уделяется исследованию русловых процессов, под которыми, согласно [47, п. 162], понимаются «постоянно происходящие изменения морфологического строения русла водотока и поймы, обусловленные действием текущей воды». Ключевым этапом таких исследований является определение типа руслового процесса (определенной схемы деформации русла и поймы реки, возникающей в результате определенного сочетания особенностей водного режима, стока наносов, ограничивающих деформацию условий и отражающей форму транспорта наносов [47, п. 163]) в соответствии с какой-либо классификацией.

Эти классификации в общих чертах сводятся к выделению относительно прямолинейного, извилистого (меандрирующего) и разветвленного русла [32, 89, 264, 275, 295, 297]. На территории Российской Федерации наибольшее распространение получила классификация Государственного гидрологического института [32, 93, 264], в соответствии с которой для рек с руслами первой группы (относительно прямолинейных русел) выделяются лентогрядочный и побочневый, для рек второй группы – ограниченное, свободное и незавершенное меандрирование, для рек третьей группы – русловая и пойменная многорукавность. На участках русел горно-предгорных рек выделяются ленточно-грядочный, побочневый, осередковый, горная пойменная многорукавность (пойменное блуждание) и долинное блуждание [32, 264].

Ключевым признаком ряда классификаций озер является генезис котловин – по сути, комплексная характеристика «сосредоточения» вод в рельефе за весь период существования водоема. Так, согласно [10], выделяются следующие типы озерных котловин: 1) тектонические; 2) ледниковые, в том числе эрозионные и аккумулятивные; 3) водно-эрозионные и водно-аккумулятивные, включая старицы, плесовые, дельтовые, лагуны и лиманы, фиордовые; 4) провальные, в том числе карстовые, просадочные (суффозионные) и термокарстовые; 5) вулканические; 6) завальные; 7) эоловые; 8) вторичные (болотные). Проис-

хождение водохранилищ по определению связано с регулированием стока плотинами. Тем не менее их важной характеристикой является приуроченность к горной или равнинной местности, а также форма, в зависимости от которой различают водохранилища пойменные, долинные, озеровидные и сложной конфигурации [1].

Классификации торфяных болот основаны, прежде всего, на систематизации условий водно-минерального питания, в результате которой выделяют олиготрофные (верховые), мезотрофные (переходные) и евтрофные (низинные) болота и их части, пригодные для хозяйственного использования (торфяные месторождения), по степени преобладающего типа (верхового, переходного, низинного, смешанного) торфяной залежи (естественного напластования торфов от минерального дна до поверхности болота). В свою очередь, тип залежи определяется по преобладающему типу торфа (не менее половины общей толщины) с выделением подтипов лесного, лесотопяного и топяного [49, 269]. Также используется признак наличия многолетней или сезонной мерзлоты (либо отсутствия промерзания торфяной залежи), в соответствии с которым выделяются: многолетнемерзлые болота, включая полигональные и бугристые; болота с сезонным промерзанием, в том числе выпуклые олиготрофные, плоские евтрофные и мезотрофные, вогнутые евтрофные и засоленные [142]. Но также учитываются и геоморфологические условия, с учетом которых в самом общем виде можно выделить водораздельные и долинные болота [13, 87, 114]. В долинах рек и вблизи озер обычно расположены евтрофные болота, на высоких террасах – евтрофные и мезотрофные. На водораздельных пространствах, в зависимости от режима подземных вод, атмосферного увлажнения и дренированности, распространены болота всех типов, включая олиготрофные.

Геоморфологические условия являются важным признаком и в классификации ледников, среди которых выделяют покровные (ледниковые купола, ледниковые щиты, выводные, шельфовые) и горные (вершин, склонов и долинные) ледники [51, 135].

Если сравнить перечисленные классификации, то можно выделить следующие общие черты «сосредоточия» вод: 1) типы и виды водных объектов в целом связаны с тем, расположены ли они: 1.1) полностью в литосфере (подземные водные объекты, за исключением подземных вод под морями и океанами); 1.2) на границе литосферы и атмосферы (реки, водоемы, материковые ледники); 1.3) на границе литосферы и гидросферы (подземные воды под морями и океанами); 1.4) на границе гидросферы и атмосферы (морские ледники, относительно устойчивые океанические течения); 1.5) на границе литосферы, атмосферы и биосферы (болота, если их все же считать водными объектами); 2) границы вод-

ных объектов на пересечении геосфер могут быть: 2.1) относительно устойчивыми; 2.2) неустойчивыми; 3) форма водного объекта может быть: 3.1) линейной, характеризующейся преобладанием выноса вещества и энергии за пределы водного объекта и/или водосбора (стоковой); 3.2) нелинейной, характеризующейся преобладанием циркуляции вещества и энергии внутри водного объекта и/или водосбора (аккумулятивной). С учетом этого классификацию водных объектов целесообразно дополнить процедурой выделения еще одного таксономического элемента – рода, определяемого в зависимости от преобладания: 1) стоковых или аккумулятивных форм; 2) устойчивых или неустойчивых границ; 3) пересечения тех или иных геосфер.

Таким образом, автором предложена классификация водных объектов по водному режиму и характеру сосредоточения вод:

а) по внутригодовому распределению стока (объемов воды): 1) тип (равномерное или неравномерное); 2) подтип (количество многоводных сезонов календарного года с их перечислением);

б) по водному питанию – класс (смешанное; основной источник – дождевое, снеговое, ледниковое, подземное или «поверхностное» (из поверхностного водного объекта); преобладающий источник – дождевое, снеговое, ледниковое, подземное для поверхностных водных объектов или «поверхностное» (из поверхностного водного объекта) для подземных);

с) по характеру сосредоточения вод в формах рельефа или недрах – род: 1) стоковые формы с преобладанием жидкой фазы и с устойчивыми границами в литосфере (пример – водоносный горизонт с грунтовыми и артезианскими водами на наклонном водоупоре; грунтовые воды – при наличии хотя бы одной устойчивой границе); 2) стоковые формы с неустойчивыми границами в литосфере (водоносный горизонт с верховодкой на наклонном водоупоре); 3) стоковые формы с устойчивыми границами в области пересечения лито- и атмосферы (реки с относительно прямолинейным руслом); 4) стоковые формы со слабо устойчивыми границами в области пересечения лито- и атмосферы (реки с извилистыми руслами); 5) стоковые формы с неустойчивыми границами в области пересечения лито- и атмосферы (реки с разветвленным руслом); 6) стоковые формы с неустойчивыми границами в гидросфере (океанические течения); 7) стоковые формы с преобладанием твердой фазы и устойчивыми границами в области пересечения лито- и атмосферы (горные ледники); 8) аккумулятивные формы с преобладанием жидкой фазы и с устойчивыми границами в литосфере (пример – водоносный горизонт с грунтовыми и артезианскими водами на относительно горизонтальном водоупоре; грунтовые воды – при наличии хотя бы одной устойчивой

границе); 9) аккумулятивные формы с неустойчивыми границами в литосфере (водоносный горизонт с верховодкой на относительно горизонтальном водоупоре); 10) аккумулятивные формы с устойчивыми границами в области пересечения лито- и атмосферы (большая часть естественных водоемов); 11) аккумулятивные формы с неустойчивыми границами в области пересечения лито- и атмосферы (водоемы в криолитозоне и аридных районах); 12) аккумулятивные формы с устойчивыми и неустойчивыми границами в области пересечения лито- и гидросферы (подземные воды на дне морей и океанов); 13) аккумулятивные формы с преобладанием твердой фазы и устойчивыми границами в области пересечения лито- и атмосферы (материковые ледники относительно ровных поверхностей); 14) аккумулятивные формы с преобладанием твердой фазы и неустойчивыми границами в области пересечения лито-, гидро- и атмосферы (шельфовые ледники); 15) стоково-аккумулятивные формы с устойчивыми границами в литосфере (бассейны подземных вод, водоносные горизонты в специфических условиях – в криолитозоне, в областях вулканизма и т. д.); 16) стоково-аккумулятивные формы с устойчивыми и неустойчивыми границами в области пересечения лито- и атмосферы (водохранилища; степень устойчивости в значительной степени связана с соблюдением проектных требований при условии адекватных проектных решений); 17) стоково-аккумулятивные формы с устойчивыми и неустойчивыми границами в области пересечения лито-, атмосферы и биосферы (болота).

2.2.3. Геохимический баланс водосбора

В процессе круговорота воды происходит ее непрерывное взаимодействие с горными породами, почвами, атмосферным воздухом, объектами био- и ноосферы и перемещение веществ, часть которых находится под воздействием преимущественно физических законов и рассматривается в рамках динамики русловых потоков, геоморфологии и инженерной геологии, а часть вступает в химические реакции и рассматривается в рамках геохимии. Последняя группа веществ находится в водной среде во взвешенной (диаметр частиц более 100 нм [107]), коллоидной (~1–100 нм) и растворенной (менее 1 нм) формах. По степени присутствия, генезису и роли в функционировании водных экосистем они условно разделяют: 1) на макрокомпоненты (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-); 2) микроэлементы (неорганические вещества, содержащиеся в водах в микроколичествах, например, Cu , Hg , Cd и так далее); 3) железо и биогенные вещества (соединения азота, фосфора и кремния); 4) органические вещества; 5) растворенные газы (чаще всего – кислород и углекислый газ). Это деление весьма условно, но тем не менее доста-

точно удобно при описании химического состава вод и решении инженерных задач [2, 37, 260].

Кроме концентраций конкретных элементов или их соединений используются такие гидрохимические и физико-химические показатели, как минерализация («суммарная концентрация анионов, катионов и недиссоциированных растворенных в воде неорганических веществ, выражающаяся в мг/дм³» [53, п. 22]), сумма ионов или сумма главных ионов, водородный показатель рН (отрицательный логарифм активности ионов водорода), окислительно-восстановительный потенциал Eh, удельная электропроводность воды, жесткость, химическое потребление кислорода ХПК (обычно по бихроматной окисляемости), биохимическое потребление кислорода за период времени t (БПК _{t} , обычно за пять суток – БПК₅, реже – за двадцать – БПК₂₀, что близко к полному биохимическому потреблению кислорода БПК_{полн}). Показатели ХПК и БПК являются косвенными характеристиками содержания органических веществ в растворе. В ряде случаев также используется показатель «сухой остаток» (СО), получаемый при выпаривании пробы воды и являющийся косвенным показателем содержания растворенных солей (сумма концентраций Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, SO₄²⁻, Cl⁻ и примерно половины содержания HCO₃⁻) [37, 203].

Анализ состава и количества веществ, которые поступают в водосборную геосистему, трансформируются в ней и выносятся из нее (то есть анализ геохимического баланса) – одновременно: 1) ключевая составляющая исследования изменения климата и окружающей среды в геологическом и историческом масштабе времени; 2) важнейший этап планирования и осуществления хозяйственной деятельности. В обоих случаях обычно рассматриваются задачи оценки геохимического фона, выявления отклонений от этого фона (геохимических аномалий), факторов и условий формирования геохимического фона и аномалий, закономерностей их пространственно-временных изменений. Уравнения геохимического баланса составляются на основе уравнения водного баланса с целью оценки величины стока и аккумуляции вещества, определяющих их процессов, пространственно-временных закономерностей изменения в замыкающем створе и в пределах исследуемого водосбора [219].

Для расчета элементов геохимического баланса предварительно проводится районирование водосборной территории согласно [270] с выделением подсистем водосбора и определением: 1) типа (по растительности), класса (по преобладающим почвам) и рода (по геоморфологическим условиям; наиболее простой случай – водораздел и долина ландшафтов; 2) площади водосбора в истоках реки без выраженной русловой сети F_U ; 3) доли участков совмещения речной сети и тектонических нарушений [219, 304].

В пределах каждого ландшафта проводится опробование коренных отложений, почв, растительности, снежного покрова, жидких атмосферных осадков, подземных и поверхностных вод, донных отложений поверхностных водных объектов с учетом рекомендаций [42, 43, 57, 58, 88, 126, 127, 139–142, 175–178, 261, 270, 300, 314]. При этом пробы подземных и поверхностных вод, донных отложений также отбираются на перспективных с точки зрения выявления геохимических аномалий участках, в том числе на: 1) территории водосбора в истоках реки без выраженной русловой сети; 2) участках максимальной сопряженности речной сети и тектонических нарушений с оценкой показателя $\Psi = P(r \cdot f) - P(r) \cdot P(f)$, где $P(r)$ – густота речной сети – отношение суммарной длины водотоков к площади водосбора F_b , $P(f)$ – отношение суммарной длины тектонических нарушений в пределах водосбора к его площади, $P(r \cdot f)$ – отношение суммарной длины водотоков, совпадающих с тектоническими нарушениями (с учетом погрешности определения по карте) к площади водосбора; 3) малоприточных участках с относительно резким изменением уклонов водной поверхности (выходы рек с горных районов на предгорную равнину, обширные участки с русловой многорукавностью). При проведении поисковых работ оценка геохимического состояния компонентов окружающей среды может быть выполнена в основном на указанных выше перспективных участках, что позволяет сократить затраты, по сравнению с используемой в настоящее время методикой, примерно на 20 % [158, 220, 304].

Величина выноса веществ G (взвешенных или растворенных) рассчитывается путем умножения срочных значений концентрации вещества (в поверхностных водах – C_{Qs} , в подземных – C_{Qg}) на соответствующий расход воды (поверхностной составляющей – Q_s , подземной – Q_g) и последующего определения статистических параметров [180], при отсутствии данных сопряженных наблюдений – как произведение средних значений концентрации вещества и расхода воды (объема атмосферных осадков). При этом уравнение геохимического баланса имеет следующий вид (т/год):

$$G_{Pr} + G_{Ps} + G_{Pgl} + G_{AP} - G_{Qs} - G_{Qg} \pm A \approx \Delta G, \quad (2.2.3.1)$$

где $G_{Pr} \approx F_b \cdot C_r \cdot (P_r - E_{bw})$, $G_{Ps} \approx F_b \cdot C_{sn} \cdot (P_{sn} - E_{bc})$ – поступление исследуемого вещества с дождевыми и снеговыми осадками за вычетом испарения; G_{Pgl} – поступление вещества с ледниковым стоком; G_{AP} – поступление вещества из атмосферы за счет «сухого» осаждения; F_b – площадь водосбора; C_r , C_{sn} и C_{gl} – концентрации вещества в дождевых, снеготалых и ледниковых водах; G_{Qs} и G_{Qg} – эффективный вынос вещества с поверхностными и под-

земными водами (вынос из водосбора за вычетом привноса извне); A – антропогенное влияние за счет сосредоточенного (A_{wsr}) и диффузного (A_{wsd}) антропогенного поступления вод за вычетом их изъятия A_{wd} ; ΔG – разница между приходами и выносом вещества из водосбора с учетом невязки.

В ряде случаев используют как более детальные, так и упрощенные формы уравнения геохимического баланса [2, 40]. Например, при допущениях $Y \approx P - E$ и $C_P \approx C_E$ уравнение (2.2.3.1) принимает более простой вид:

$$C_Q \approx \frac{C_P \cdot F_b \cdot (P - E) + \Delta G}{F_b \cdot Y} \approx C_P + \frac{v_C \cdot k_{FC}}{Y} \approx C_P + k_C \cdot f(C) \cdot k_{FC} \cdot Y^{k_{YC}}, \quad (2.2.3.2)$$

где C_Q – средняя концентрация в общем потоке в замыкающем створе; C_P и C_E – средняя концентрация в атмосферных осадках и испаряющейся жидкости; v_C и k_C – фактическая и удельная скорости взаимодействия в системе «вода – порода – органическое вещество – газы»; $f(C)$ и k_{FC} – функция химического состава исследуемого раствора и коэффициент, учитывающий площадь взаимодействия воды с горными породами согласно; k_{YC} – коэффициент, учитывающий изменение энергии взаимодействующих компонентов в процессе формирования водного стока [80, 296, 315]. Пример расчета и анализа геохимического баланса водосбора малой реки Ушайка (элемент речной системы Ушайка – Томь – Обь – Карское море) приведен в [219], а малой реки Ильбокич (элемент речной системы Ильбокич – Чадобец – Ангара – Енисей – Карское море) – в [79].

2.2.4. Связи между элементами водного и геохимического баланса

В разд. 1.3 на примере системы уравнений водного баланса и баланса наносов был рассмотрен нелинейный характер взаимосвязей между их элементами. Подобные взаимосвязи существуют и между элементами водного и геохимического балансов. Их анализ может быть проведен при следующих допущениях, рассмотренных в [215, 219, 225, 311]. Во-первых, предположим, что изменение концентрации вещества C в воде в зависимости от расхода воды Q в первом приближении описывается уравнением:

$$\frac{dC}{dQ} = \frac{k_C}{k_Q} \cdot \frac{C}{Q}, \quad (2.2.4.1)$$

где k_C и k_Q – значения удельной скорости изменения концентрации вещества и расхода воды соответственно. Если предположить, что отношение k_C / k_Q представлено в виде нелинейной функции (2.2.4.2), то результат интегрирования (2.2.4.1) – уравнение (2.2.4.3):

$$\frac{k_C}{k_Q} = a_0 + a_1 \cdot \left(\frac{Q}{Q_a} \right)^{a_2}; \quad (2.2.4.2)$$

$$\frac{C}{C_a} = \left(\frac{Q}{Q_a} \right)^{a_0} \cdot \exp \left(\frac{a_1}{a_2} \cdot \left(\left(\frac{Q}{Q_a} \right)^{a_2} - 1 \right) \right), \quad (2.2.4.3)$$

где a_1, a_2, a_3 – эмпирические коэффициенты; C / C_a и Q / Q_a – модульные коэффициенты концентрации и расхода воды; C_a и Q_a – математическое ожидание концентрации вещества и расхода воды, причем величина C_a аппроксимируется средним геометрическим значением C_g и рассматривается как фоновое значение C_b (геохимический фон), которое отражает условно равновесное состояние системы «вода–порода» в статистически однородных условиях C_{Eq} .

Геохимический фон тем выше, чем: 1) меньше интенсивность водообмена; 2) больше относительная площадь водосбора без выраженной русловой сети (F_U / F_b); 3) теснее связь между размещением речной сети и тектонических нарушений (больше величина $P(r \cdot f) - P(r) \cdot P(f)$). Стандартное отклонение $\sigma(C)$ возрастает при увеличении геохимического фона C_a и коэффициента вариации расходов воды $Cv(Q)$:

$$\sigma(C) \approx |a_0 + a_1| \cdot C_a \cdot Cv(Q). \quad (2.2.4.4)$$

Соответственно, на основе анализа структуры уравнения (2.2.4.3) можно предположить, что основные особенности химического состава вод формируются на стадиях формирования склонового, подповерхностного и подземного стока (на стадии руслового стока изменения химического состава вод также происходят, но уже в меньшей степени). Кроме того, изменчивость химического состава вод и повышенные концентрации ряда веществ будут чаще наблюдаться в условиях более значительной многолетней и внутригодовой изменчивости стока [311]. В свою очередь, с учетом уравнения (2.2.1.11), водный сток нелинейно зависит от климатических условий.

Во-вторых, предположим, что для совместного описания сорбции, растворения и осаждения в водном объекте может быть использовано уравнение (2.2.4.5):

$$\begin{aligned} \frac{dC}{dt} = \varphi_{ds} + \varphi_{srb} &= k_{p0} \cdot (k_{p1} \cdot C_{Eq} - C) + k_s \cdot (S - k_c \cdot C) = \\ &= \varphi_0 - k_r \cdot C; \end{aligned} \quad (2.2.4.5)$$

$$k_r = k_{p0} + k_s \cdot k_m \cdot (S_m - S), \quad (2.2.4.6)$$

где t – координата времени; φ_{ds} и φ_{srb} – функции, описывающие процессы растворения–осаждения и сорбции–десорбции (вид функций принят с учетом [3, 113, 200, 296, 315]); φ_0 – функция, слабо зависящая от времени и расхода воды Q в момент времени t ; C и S – концентрация исследуемого вещества в речных (болотных, подземных) водах и донных отложениях (водовмещающих грунтах); S_m – максимальная сорбционная способность донных отложений; k_{p0}, k_{p1}, k_s, k_m – эмпирические коэффициенты; C_{Eq} – концентрация вещества в речных водах, соответствующая локальному равновесию в системе «вода–порода» и аппроксимируемая средним геометрическим C_g с учетом поправки на отклонение от равновесия из-за колебаний водности.

Последнее допущение ($C_{Eq} \approx C_g$) основано на предположении, что рассматриваемая система «вода–порода» сформировалась под влиянием природных и антропогенных факторов в течение статистически однородного периода. Состояние этой системы в целом не равновесно, но отдельные её компоненты квазиравновесны. Время изменения термодинамических параметров таких компонентов больше времени релаксации в них, но существенно меньше времени, за которое устанавливается равновесие во всей системе [3, 33, 91, 99, 291]. При этом в отдельном компоненте (или комплексе компонентов) протекает N_s химических реакций, которые можно объединить в одну суммарную реакцию в соответствии с выражением:

$$\Delta G_T = R \cdot T \cdot \left(\sum_{i=1}^{N_s} \Pi_i - \ln K_T^0 \right), \quad (2.2.4.7)$$

где ΔG_T и K_T^0 – общее изменение свободной энергии системы и суммарная константа равновесия при заданной температуре T ; Π_i – суммарное произведение активностей компонентов, участвующих в каждой из реакций (общее количество веществ – $N_s + 1$). При использовании уравнения Дебая–Хюккеля для описания связей между активностью иона и его концентрацией уравнение (2.2.4.7) для концентрации искомого вещества C_p может быть упрощено и приведено к виду [215]:

$$\ln C_p \approx b_0 - \sum_j^{N_s} b_j \cdot \ln C_j, \quad (2.2.4.8)$$

где b_0, b_j – константы. Концентрация C_x может рассматриваться как случайная величина, причём параметр N_s в общем случае принимает достаточно большие значения. С учётом этого можно предположить,

что имеет место нормальное распределение вероятностей $\ln C$ с математическим ожиданием $E(\ln C)$ и дисперсией $\sigma^2(\ln C)$, причём $E(\ln C)$ рассчитывается как среднее арифметическое для выборки из N_p значений $\ln C$ (N_p – количество фактически учитываемых веществ). Соответственно, распределение вероятностей концентраций C в изолированной системе «вода–порода» ориентировочно можно рассматривать как логнормальное с дисперсией $\sigma^2(C)$ и математическим ожиданием, равным среднему геометрическому C_g .

При условии $k_{rQ} = \frac{k_r}{k_Q} \approx \text{const}$ решением (2.2.4.5) является уравнение (2.2.4.9), описывающее отклонение некоторого устойчивого состояния при среднемноголетнем расходе воды Q_a :

$$C = C_e + (C_0 - C_e) \cdot \left(\frac{Q}{Q_a} \right)^{-k_{rQ}}; \quad (2.2.4.9)$$

$$C_e = \frac{k_s \cdot S + k_{p0} \cdot k_{p1} \cdot C_{Eq}}{k_r} = \frac{S + \frac{k_{p0}}{k_s} \cdot k_{p1} \cdot C_{Eq}}{\frac{k_{p0}}{k_s} + k_m \cdot (S_m - S)}; \quad (2.2.4.10)$$

$$S_e = \frac{k_s \cdot k_m \cdot S_m \cdot C + k_{p0} \cdot C - k_{p0} \cdot k_{p1} \cdot C_{Eq}}{k_s + k_s \cdot k_m \cdot C} = \frac{k_m \cdot S_m \cdot C + \frac{k_{p0}}{k_s} \cdot (C - k_{p1} \cdot C_{Eq})}{1 + k_m \cdot C}; \quad (2.2.4.11)$$

$$S_m = S_{m0} \cdot \text{pH}^{k_{pH}} \cdot \Pi(C_j^{k_j}), \quad (2.2.4.12)$$

где C_0 – концентрация вещества в начальный момент времени, принимаемая равной C_g ; C_j – концентрация j -го вещества, влияющего на величину максимальной сорбционной способности S_m ; S_{m0} , k_j , k_{pH} – эмпирические коэффициенты; вид функции (2.2.14.12) принят с учетом [298]; C_e и S_e – решения (2.2.4.5) при $\frac{dC}{dt} = 0$ [205]. Близкие по виду решения могут быть получены и при упрощении стационарного уравнения диффузии с источниками вещества вида (2.2.4.5).

В результате анализа структуры модели (2.2.4.6, 2.2.4.9–2.2.4.12) и результатов ее апробации можно сделать вывод о том, что в целом уровень содержания вещества в речных, подземных и болотных водах определяет-

ся наличием доступного для взаимодействия вещества, сорбционной способностью наносов, подстилающих и водовмещающих отложений, условно равновесной концентрацией вещества в водной среде, а также удельными скоростями растворения–осаждения и сорбции–десорбции в условиях рассматриваемого природно-территориального комплекса [205].

Следует отметить и обратное воздействие химического состава вод на водный режим через изменение геохимической обстановки [74, 100, 280], а также почвенно-растительных условий, которые, в свою очередь, определяют величину коэффициента шероховатости [208]. При этом происходит снижение интенсивности водообмена, увеличение уровней воды в водном объекте и подтопление прилегающих территорий вплоть до заболачивания. В последнем случае при определенных условиях может происходить кольматация пограничного слоя и формирование геохимических барьеров, усиливающих изоляцию торфяной залежи от минерального дна [307]. Меняется водно-минеральное питание болотной растительности, что вызывает смену фитоценоза в направлении эволюции болот от евтрофных до олиготрофных и формирования внутриболотной гидрографической сети [201, 202].

2.2.5. Классификация водных объектов по геохимическим показателям

Разнообразие химического состава природных и природно-антропогенных вод требует определенного упорядочивания. Для решения этой задачи разработано огромное количество классификаций, общим для которых является выделение: 1) показателей, характеризующих, с точки зрения наблюдателя (исследователя), наиболее важные черты объекта исследования; 2) некоторого множества допустимых значений показателя, а в нем ряда подмножеств, соответствующих характерным состояниям исследуемого объекта. Различия же связаны с тем, что исследуется (собственно водный раствор, процессы или продукты взаимодействия водного раствора с окружающей средой), какие выбраны состояния и показатели этих состояний.

В настоящее время большая часть классификаций предусматривает анализ общего содержания растворенных в воде солей и соотношения ионов, присутствующих в наибольших количествах. Например, по минерализации обычно выделяются пресные воды и воды, соленые в разной степени (табл. 2.2.5.1). Причем верхняя граница пресных вод определяется по вкусовым ощущениям и у разных авторов совпадает, а прочие категории выделяются, исходя из субъективных предпочтений.

Таблица 2.2.5.1

Некоторые классификации природных вод по минерализации

Автор классификации	Категория	Минерализация, г/дм ³
Вернадский В.И. (по [260])	Пресные	<1
	Солоноватые	1–10
	Соленые	10–50
	Рассолы	>50
Овчинников А.М. (по [260])	Ультрапресные	<0,2
	Пресные	0,2–0,5
	С повышенной минерализацией	0,5–1
	Солоноватые	1–3
	Соленые	3–10
	С повышенной соленостью	10–35
Алекин О.А. (по [260])	Пресные	(<1 г/кг)
	очень малой минерализации	<0,1
	малой минерализации	0,1–0,2
	средней минерализации	0,2–0,5
	повышенной минерализации	0,5–1
	Солоноватые	(1–25 г/кг)
	С морской соленостью	(25–50 г/кг)
	Рассолы	(>50 г/кг)
ГОСТ 27065-86 [53]	Пресные	<1
	Солоноватые	1–10
	Соленые	10–50
	Рассолы	>50

Среди классификаций по химическому составу вод одна из наиболее распространенных в Российской Федерации – классификация О.А. Алекина (табл. 2.2.5.2), в соответствии с которой выделяются четыре типа, классы и группы. К первому типу относятся воды, формирующиеся при взаимодействии растворов с изверженными породами, содержащими большое количество Na^+ и K^+ . В отдельных случаях эти воды могут образовываться и в результате ионного обмена (Ca^{2+} на Na^+). Воды второго типа формируются при взаимодействии с различными осадочными породами и продуктами выветривания коренных пород, воды третьего типа – в результате испарения воды и катионного обмена, четвертого типа – при выветривании и разработке сульфидных месторождений и угольных залежей, богатых сульфидами, при вулканической деятельности и активных сульфатредуцирующих процессах, в областях с суровым и влажным климатом [260].

Таблица 2.2.5.2

Классификация О.А. Алекина природных вод по химическому составу в зависимости от концентраций главных ионов в мг-экв. % [260]

Класс	Преобладающий анион	Группа	Преобладающий катион	Тип	Соотношение ионов
Гидрокарбонатные (С)	HCO_3^-	кальциевые	Ca^{2+}	I	$\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$
				II	$\text{HCO}_3^- < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} < \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$
				III	$\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ или $\text{Cl}^- > \text{Na}^+$
		магниевые	Mg^{2+}	I	$\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$
				II	$\text{HCO}_3^- < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} < \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$
				III	$\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ или $\text{Cl}^- > \text{Na}^+$
		натриевые	Na^+	I	$\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$
				II	$\text{HCO}_3^- < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} < \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$
				III	$\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ или $\text{Cl}^- > \text{Na}^+$
Сульфатные (S)	SO_4^{2-}	кальциевые	Ca^{2+}	IV	$\text{HCO}_3^- = 0$
				II	$\text{HCO}_3^- < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} < \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$
				III	$\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ или $\text{Cl}^- > \text{Na}^+$
		магниевые	Mg^{2+}	IV	$\text{HCO}_3^- = 0$
				II	$\text{HCO}_3^- < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} < \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$
				III	$\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ или $\text{Cl}^- > \text{Na}^+$
		натриевые	Na^+	I	$\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$
				II	$\text{HCO}_3^- < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} < \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$
				III	$\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ или $\text{Cl}^- > \text{Na}^+$
Хлоридные (Cl)	Cl^-	кальциевые	Ca^{2+}	IV	$\text{HCO}_3^- = 0$
				II	$\text{HCO}_3^- < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} < \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$
				III	$\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ или $\text{Cl}^- > \text{Na}^+$
		магниевые	Mg^{2+}	IV	$\text{HCO}_3^- = 0$
				II	$\text{HCO}_3^- < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} < \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$
				III	$\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ или $\text{Cl}^- > \text{Na}^+$
		натриевые	Na^+	I	$\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$
				II	$\text{HCO}_3^- < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} < \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$
				III	$\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ или $\text{Cl}^- > \text{Na}^+$

Из классификаций другого типа следует упомянуть предложения С.Л. Шварцева и ряда его учеников [74, 83, 96, 111, 280, 313], согласно которым выделяется тип гидрогенно-минерального комплекса (латеритный, каолинитовый, бисиллитный, содово-лессовый, гипсообразующий, галитообразующий, органогенный) в зависимости от времени взаимодействий в системе «вода – порода». Последнее, в свою очередь, определяется водообменом [281].

В целом все существующие гидрохимические классификации имеют свои преимущества и недостатки, достаточно подробно описанные в [260]. Здесь лишь отметим, что примерно одинаковые значения гидрохимических показателей могут быть связаны с действием разных факторов, а внешне незначительное различие в наборе или проявлении последних вследствие нелинейных эффектов может приводить к существенным различиям в минерализации и химическом составе. В качестве иллюстрации можно привести ситуацию, сложившуюся в Хакасии, где имеет ряд озер, расположенных относительно близко друг от друга, но имеющих минерализацию от 0,5–0,8 до 120–150 г/дм³ и более [97, 292].

С понятием «химический состав» («совокупность находящихся в воде веществ в различных химических и физических состояниях» [53, п. 20]) тесно связано понятие «качество воды» – «характеристика состава и свойств воды, определяющая ее пригодность для конкретных видов водопользования» [65, п. 70]. На практике оценка качества воды сводится к характеристике состояния, пригодного для использования воды, путем сравнения фактически наблюдаемых и предельно допустимых концентраций (ПДК) – максимальных содержаний вещества в среде, которые не оказывают негативного (прямого или косвенного) воздействия на здоровье человека или состояние ихтиофауны [37].

Обычно оценка качества воды на основе сравнения измеренных концентраций с ПДК проводится для группы из N веществ с одинаковым лимитирующим признаком вредности (ЛПВ). При этом должно соблюдаться условие [118, 233–235]:

$$\sum_i^N \frac{C_i}{\text{ПДК}_i} \leq 1. \quad (2.2.5.1)$$

Учитывая, что в группу с одним ЛПВ может попасть более 50 веществ, следует ожидать выполнение условий (2.2.5.1) при концентрациях веществ в 50 и более раз меньше соответствующих ПДК. Однако из-за погрешностей используемых методов химического анализа и природных особенностей формирования химического состава вод (например, повышенные концентрации железа в таежной зоне, ионов Na^+ – в аридных районах и т. д.) это практически не выполнимо [208, 211]. Другой способ сравнения фактических и нормативных значений заключается в определении класса качества воды по нескольким показателям и выборе наихудшего из них. В качестве примера можно привести классификацию, используемую при оценке качества воды объектов рыбохозяйственного назначения (табл. 2.2.5.3) или более сложную классификацию с использованием вероятностного подхода, принятую в Росгидромете [179].

Более рациональный подход к оценке качества компонентов окружающей среды рассмотрен в [270], в соответствии с которым рассчитывается показатель Z_C :

$$Z_C = \sum_{i=1}^{N_{bc}} \frac{C_i}{C_{bc,i}} - (N_{bc} - 1), \quad (2.2.5.2)$$

где C_i и C_{bc} – фактическая и фоновая концентрация i -го вещества; N_{bc} – количество веществ с концентрациями выше фоновых значений в два и более раз. В зависимости от величины Z_C определяется одна из пяти категорий: 1) при $Z_C < 8$ – «минимальный уровень воздействия»; 2) $Z_C = 8 \dots 16$ – «слабый»; 3) $Z_C = 16 \dots 32$ – «средний»; 4) $Z_C = 32 \dots 128$ – «сильный»; 5) $Z_C > 128$ – «максимальный» [270].

В рамках дальнейшего развития указанного выше способа (2.2.5.2) целесообразно выполнять общую оценку состояния поверхностных водных объектов выше и ниже по течению от источника загрязнения путем выбора одной из пяти категорий с максимальным значением Z_C , которой соответствует более 5 % всех проб за расчетный период.

Таблица 2.2.5.3
Классификация поверхностных вод согласно [41]

Показатель	Чистые воды		Загрязненные воды		Грязные воды	
	Класс сапробности					
	ксено-	олиго-	β-мезо-	α-мезо-	поли-	гипер-
Растворенный кислород, % насыщения	95–100	80–110	60–125	30–150	0–200	0
Прозрачность воды по диску Секки, м (не менее)	3,0	2,0	1,0	0,5	0,1	<0,1
БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³	0,0–0,5	0,6–1,0	1,1–2,0	2,1–3,0	3,1–10,0	>10
БПК ₂₀ , мгО ₂ /дм ³	0,0–1,0	1,1–2,0	2,1–3,0	3,1–4,0	4,1–15,0	>15
Перманганатная окисляемость, мгО/дм ³	0,0–7,0	7,1–10,0	10,1–20,0	20,1–40,0	40,1–80,0	>80
NH ₄ ⁺ , мг/дм ³	0,0–0,05	0,06–0,10	0,11–0,50	0,51–1,00	1,01–3,00	>3
Нитраты, мг/дм ³	0,05–5,0	5,1–10,0	10,1–40,0	40,1–80,00	80,1–150,0	>150
Нитриты, мг/дм ³	0,0–0,001	0,002–0,04	0,05–0,08	0,09–1,5	1,6–3,0	>3
Фосфаты, мг/дм ³	до 0,005	0,006–0,03	0,04–0,10	0,11–0,30	0,31–0,60	>0,6
H ₂ S, мг/дм ³	0,0	0,0	0,0	0,0	до 0,1	>0,1

Дополнительно может быть выполнена дифференциация веществ по генезису посредством расчета соотношения суммарного поступления вещества по сосредоточенным (A_{wsr}) и распределенным по водосбору источникам загрязнения (A_{wsd}) к гидрохимическому стоку G_Q в уравнении (2.2.31). Так, к категории «природных» целесообразно отнести вещества, для которых величина $(A_{wsr} + A_{wsd}) / G_Q$ меньше 5 %, к «преимущественно природным» – при $5 \% \leq (A_{wsr} + A_{wsd}) / G_Q \leq 20 \%$; к «природно-антропогенным» – в прочих случаях [208, 211].

3. ОПАСНЫЕ ВОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ

Согласно [256, п. 3.8], к опасным гидрометеорологическим процессам и явлениям относятся «сели, лавины, наводнения, ураганы, смерчи, интенсивные русловые и пойменные деформации и иные подобные процессы и явления, оказывающие негативные или разрушительные воздействия на здания и сооружения», а в [248, п. 3.11] под опасным геологическим процессом понимается «изменение состояния приповерхностной части литосферы (геологической среды), обусловленное естественными или техногенными причинами, которое может привести к негативным последствиям для человека, объектов хозяйства и окружающей среды». С учетом приведенных определений и представлений о неразрывной связи поверхностных и подземных вод в пределах водосборной геосистемы далее основное внимание уделено наиболее часто встречаемым процессам: 1) затопления прилегающих к поверхностным водным объектам территорий с обеспеченностью 10 % и менее; 2) подтопления и заболачивания; 3) сокращения водных ресурсов вплоть до истощения; 4) деформаций речных русел, берегов и дна водоемов; 5) загрязнения водных объектов.

3.1. Затопление территорий

В соответствии с [47], под наводнением понимается являющееся стихийным бедствием затопление территории водой, которое может происходить в результате подъема уровня воды во время половодья или паводка, при заторе, зажоре, вследствие нагона в устье реки, а также при прорыве гидротехнических сооружений. Согласно [247], выделяются четыре категории опасных природных процессов – чрезвычайно опасные (катастрофические), весьма опасные, опасные, умеренно опасные, причем к последней категории относятся затопление территорий (образование свободной поверхности воды в ее пределах в результате повышения уровня водотока, водоема или подземных вод [248]) с повторяемостью 0,05–0,010 ед./год (соответственно, обеспеченностью 5–10 %) с продолжительностью не менее 1–5 суток. Указанные значения обеспеченности обычно соответствуют IV классу гидротехнических сооружений, а их определение обычно является неотъемлемой частью инженерно-гидрометеорологических изысканий.

Основным признаком затопления является повышение уровней поверхностных вод, которые связаны не только с максимальным водным стоком, но и с условиями его формирования. Например, наводнения в южной

Сибири могут быть связаны с образованием ледовых заторов при незначительном водном стоке. Тем не менее, во многих случаях максимальный водный сток – один из важнейших факторов затопления и подтопления территорий, который может ослабевать при регулировании стока, либо резко возрастать в результате аварий на гидротехнических сооружениях.

3.1.1. Максимальный водный сток

В зависимости от наличия и достоверности исходной гидрологической информации для оценки водного стока, включая максимальный, используют методы расчета при наличии, недостаточности и отсутствия данных наблюдений [130, 252]. В первом случае определяется функция распределения вероятностей, в наибольшей степени соответствующая эмпирическому распределению, и ее параметры. На территории Российской Федерации и ряде других стран достаточно часто используют гамма-распределение и его модификации с заменой исходного значения модульного коэффициента x на его функцию $y = a_0 \cdot x^{a_1}$ (трехпараметрическое распределение Крицкого-Менкеля; параметры a_0 и a_1 подбираются так, чтобы среднее значение y_a было равно единице) или

$$y = \ln x - \xi \left(\xi = A_{ln} - \frac{2 \cdot \sigma_{ln}}{Cs_{ln}}, A_{ln}, \sigma_{ln}, Cs_{ln} - \text{математическое ожидание,} \right.$$

среднеквадратическое отклонение и коэффициент асимметрии натуральных логарифмов исходных величин) [12, 102, 120, 195, 252, 299, 302]. Правомерность этого подхода в целом подтверждается, с одной стороны, результатами статистического анализа данных гидрологических наблюдений на территории бывшего СССР, а с другой – возможностью получения гамма-распределения как стационарного решения стохастического дифференциального уравнения стока [12, 78, 138].

Во втором случае (при недостаточности данных) ряды наблюдений удлиняются по данным о реке-аналоге при выполнении условий (2.2.1.6), а в третьем (при отсутствии данных) используются формулы, которые в целом делятся на три основные группы: 1) редуccionные, отражающие уменьшение модуля стока с возрастанием площади водосбора (3.1.1.1); 2) предельной интенсивности, связывающие максимальный расход с наибольшей интенсивностью дождя или водоотдачи из снежного покрова за время добегаия (3.1.1.2); 3) объемные, предполагающие схематизацию гидрографа половодья или паводка [102, 154, 252]. Но фактически во всех трех случаях речь идет о зависимости вида (3.1.1.4):

$$Q_p = \frac{k_{V1} \cdot F_b \cdot h_p}{(F_b + F_0)^{bF}}; \quad (3.1.1.1)$$

$$Q_p = k_{V2} \cdot F_b \cdot \left(\frac{h_p}{\tau} \right) = k_{V2} \cdot F_b \cdot I_p; \quad (3.1.1.2)$$

$$Q_p = k_{V3} \cdot F_b \cdot f_H \cdot \frac{h_p}{t_{inc}}; \quad (3.1.1.3)$$

$$Q_p = \frac{V_p}{\tau}, \quad (3.1.1.4)$$

где Q_p и V_p – характерный (максимальный, средний, минимальный) расход воды заданной обеспеченностью p и соответствующий ему объем стока за характерное время, выраженный через слой стока h_p (3.1.1.1, 3.1.1.3), либо интенсивность дождя I_p или водоотдачи из снежного покрова (3.1.1.2); τ – время добегания, зависящее в редуционных формулах от площади водосбора ($\tau = (F_b + F_0)^{bF}$); t_{inc} – продолжительность подъема паводка или половодья; F_b – площадь водосбора; F_0 и bF – параметры зависимости времени добегания от площади водосбора; k_{V1}, k_{V2}, k_{V3} – коэффициенты, учитывающие влияние на сток лесистости, озерности, заболоченности водосбора и иных условий на распределение стока по водосбору и во времени; f_H – коэффициент формы гидрографа.

Редуционные формулы вида (3.1.1.1) получили широкое распространение при расчете максимальных расходов половодья и паводков [167, 252, 301]. Например, на территории Российской Федерации основной способ определения максимумов половодья малых и средних рек при отсутствии данных наблюдений заключается в использовании уравнения (3.1.1.5) и расчете его параметров по формулам (3.1.1.6–3.1.1.11):

$$Q_{\max, p} = \frac{K_0 \cdot \mu_p \cdot \delta \cdot \delta_1 \cdot \delta_2 \cdot F_b \cdot h_{\max, p}}{(F_b + F_0)^{bF}}; \quad (3.1.1.5)$$

$$\delta = \frac{1}{1 + k_L \cdot f_L^*}; \quad (3.1.1.6)$$

$$f_L^* = \sum_i \left(\frac{100 \cdot F_{L,i} \cdot F_{bL,i}}{F_b^2} \right); \quad (3.1.1.7)$$

при отсутствии сведений о $F_{bL,i}$ и $2\% \leq f_L \leq 50\%$:

$$f_L^* = \frac{f_L - 2}{2,8}, \quad (3.1.1.8)$$

при отсутствии сведений о $F_{bL,i}$ и $f_L > 50\%$:

$$f_L^* = \frac{f_L - 2}{0,92}; \quad (3.1.1.9)$$

$$\delta_1 = \frac{\alpha_L}{(f_F + 1)^{k_F}}; \quad (3.1.1.10)$$

$$\delta_2 = 1 - \beta_M \cdot \lg(0,1 \cdot f_M + 1), \quad (3.1.1.11)$$

где μ_p – коэффициент, учитывающий неравенство статистических параметров слоя суммарного весеннего слоя h_{\max} и максимального расхода воды Q_{\max} обеспеченностью p (для $p = 1\%$ во всех природных зонах $\mu_1 = 1$; в лесной зоне и зоне тундры: $\mu_{0,1} = 1,02$; $\mu_3 = 0,97$; $\mu_5 = 0,96$; $\mu_{10} = 0,93$; в лесостепной зоне: $\mu_{0,1} = 1,04$; $\mu_3 = 0,96$; $\mu_5 = 0,93$; $\mu_{10} = 0,89$; в степной зоне: $\mu_{0,1} = 1,04$; $\mu_3 = 0,97$; $\mu_5 = 0,96$; $\mu_{10} = 0,93$; в зонах засушливых степей и полупустынь: $\mu_{0,1} = 1,02$; $\mu_3 = 0,98$; $\mu_5 = 0,97$; $\mu_{10} = 0,96$); для равнинных территорий: в зоне тундры и лесной $F_0 = 1$; $bF = 0,17$; в лесостепной зоне $F_0 = 2$; $bF = 0,25$; в зонах степи и полупустынь $F_0 = 10$; $bF = 0,35$; для горных районов, согласно [239], $F_0 = 1$; $bF = 0,15$; $F_{L,i}$ и $F_{bL,i}$ – площадь акватории и водосбора i -го водоема; f_F – лесистость водосбора, %; f_M – заболоченность водосбора, %; f_L и f_L^* – формальная и средневзвешенная озерность водосбора, %; $\delta, \delta_1, \delta_2$ – коэффициенты, учитывающие влияние озерности (при наличии водоемов, гидравлически связанных с речной сетью, и $f_L > 2\%$), лесистости и заболоченности; K_0 – параметр «дружности половодья», определяемый, согласно [252], обратным расчетом по реке-аналогу при известных значениях остальных параметров уравнения (3.1.1.5); ранее в [198, 239], рекомендовалось определять K_0 и bF для равнинных районов в зависимости от степени расчлененности рельефа (табл. 3.1.1.1), а для горных – от средней высоты водосбора (табл. 3.1.1.2); β_M – коэффициент, учитывающий тип болот, их расположение в водосборе и состав подстилающих минеральных грунтов (для: низинных болот и заболоченных лугов на супесчаных и легкосуглинистых грунтах $\beta_M = 0,8$; болот разных типов на водосборе $\beta_M = 0,7$; верховых болотах на супесчаных и легкосуглинистых грунтах $\beta_M = 0,5$; верховых болотах на среднесуглинистых и глинистых грунтах $\beta_M = 0,3$); α_F и k_F – параметры, определяемые в зависимости от природной зоны и расположения лесов на водосборе

(при равномерном расположении леса в лесной зоне $\alpha_F = 1$; $k_F = 0,22$; в лесостепной $\alpha_F = 1$ на почвах: различного состава $k_F = 0,16$; супесчаных $k_F = 0,2$; суглинистых $0,10$; более подробная информация приведена в [167]); k_L – коэффициент, принимаемый равным $0,4$ для лесостепной зоны и $0,2$ для лесостепной и лесной зон, а согласно [167] при среднем значении слоя стока за половодье: ≥ 100 мм $k_L = 0,2$; $99-50$ мм $k_L = 0,2-0,3$; $49-20$ мм $k_L = 0,3-0,4$; < 20 мм $k_L = 0,4$.

Слой стока половодья h_p в общем случае определяется уравнением водного баланса для половодья без срезки подземной составляющей для той же обеспеченности p , что и для расчетного расхода воды (в горных районах часто используется зависимость от средней высоты водосбора $Z_{b,a}$ вида $h_p = a_1 \cdot Z_{b,a} - a_0$, где a_0, a_1 – эмпирические коэффициенты [187]). Но на практике возникает ряд вопросов в части определения соответствия между обеспеченностями слоя стока и расходом воды, обеспеченностями элементов уравнения водного баланса и процедуры выделения границ половодья, субъективизм которой дополнительно возрастает в случае разных исполнителей.

Таблица 3.1.1.1

Параметры bF и K_0 в формуле (3.1.1.5) для равнинных рек [239]

Природная зона (регион)	bF	K_0 при $\alpha_r = 0,04 \cdot J_{r,am} \cdot \sqrt{F_b}$:		
		>1	$0,5-1,0$	$<0,5$
1. Зона тундры и лесная зона:				
1.1. Европейская территория бывшего СССР и Восточная Сибирь	0,17	0,010	0,008	0,006
1.2. Западная Сибирь	0,25	0,015	0,013	0,010*
2. Лесостепная и степная зоны				
2.1. Европейская территория бывшего СССР без Северного Кавказа	0,25	0,030	0,017	0,012
2.2. Северный Кавказ	0,25	0,030	0,025	0,015
2.3. Западная Сибирь	0,25	0,030	0,020	0,015
3. Зона засушливых степей и полупустынь				
3.1. Западный и Центральный Казахстан	0,35	0,060	0,040	0,030

*Примечание. Для сильно заболоченных водосборов с площадью $F_b > 10000$ км²; $J_{r,am}$ – средневзвешенный уклон главного водотока, м/км; F_b в км²; категория (равнинного) рельефа: при $\alpha_r > 1,0$ – холмистые и платообразные возвышенности; $\alpha_r = 0,5-1,0$ – территории с чередованием холмистых возвышенностей и понижений между ними; $\alpha_r < 1,0$ – плоские низменности [198, 239].

Таблица 3.1.1.2

Параметры bF и K_0 в формуле (3.1.1.5) для горных рек с весенне-летним половодьем [239]

Регион	Средняя высота водосбора $Z_{b, a}$, м	bF	K_0
Урал	<500	0,15	0,0025
	≥ 500	0,15	0,0018
Карпаты	≥ 400	0,15	0,0045
Алтай	<1000	0,15	0,0025
	1000–2000	0,15	0,0015
	>2000	0,15	0,0010*
Северо-Восток бывшего СССР	≥ 200	0,15	0,0030
Камчатка	≥ 100	0,15	0,0010
Сахалин, северная часть	≥ 100	0,15	0,0014
Сахалин, южная часть	≥ 100	0,15	0,0020

По этой причине представляется целесообразным в регионах с относительно устойчивым сезонным снежным покровом дополнительно формализовать процедуру определения слоя половодья в пределах гидрологической весны, установленных в [129], что позволит снизить случайные ошибки при оценке границ половодья и существенно упростить процедуру расчета максимальных расходов воды половодья с удовлетворительной точностью (рис. 3.1.1.1).

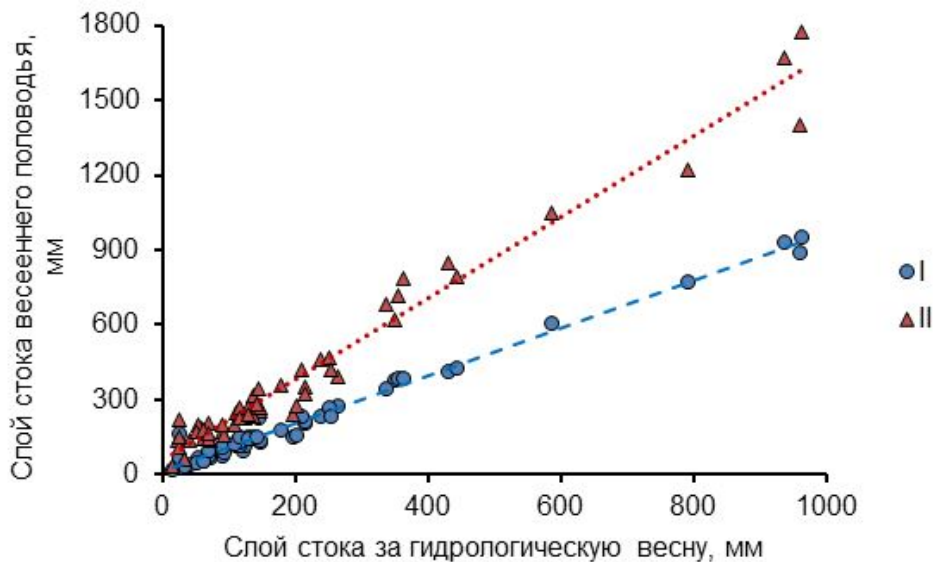


Рис. 3.1.1.1. Соотношение средних максимальных $h_{max(a)}$ (I) и максимальных обеспеченностью 1% $h_{max(1\%)}$ (II) значений слоя стока и слоя стока за весенний период h_{hsp} (в среднем за многолетний период) в границах согласно [129]: I) $h_{max(a)} = (15,539 \pm 4,939) + (0,956 \pm 0,016) \cdot h_{hsp}$; $R^2 = 0,98$;
II) $h_{max(1\%)} = (55,134 \pm 11,711) + (1,622 \pm 0,038) \cdot h_{hsp}$; $R^2 = 0,97$

При расчете дождевых паводков на реках с площадью водосбора более 200 км², согласно [252], рекомендуется использовать редуционные формулы: (3.1.1.12) – при наличии реки-аналога; (3.1.1.15) – при отсутствии реки-аналога:

$$Q_{\max,p} = \frac{Q_{\max a,p}}{F_{ba}} \cdot \varphi_M \cdot F_b \cdot \frac{\delta_r \cdot \delta_{2r}}{\delta_{ar} \cdot \delta_{a2r}} = q_{pa} \cdot \varphi_M \cdot F_b \cdot \frac{\delta_r \cdot \delta_{2r}}{\delta_{ar} \cdot \delta_{a2r}}; \quad (3.1.1.12)$$

$$\varphi_M = \begin{cases} \left(\frac{F_{ba}}{F_b}\right)^{n_\Phi}, & (L_r \cdot F_{ba}^{0,56}) / (L_{ra} \cdot F_b^{0,56}) < 1,5; \\ \left(\frac{\Phi_{ba}}{\Phi_b}\right)^{n_{\Phi\Phi}}, & (L_r \cdot F_{ba}^{0,56}) / (L_{ra} \cdot F_b^{0,56}) \geq 1,5; \end{cases} \quad (3.1.1.13)$$

$$\Phi = \frac{100 \cdot L_r}{m_p \cdot J_{r,am}^{mJ} \cdot F_b^{0,25}}; \quad (3.1.1.14)$$

$$Q_{\max,p} = q_{200} \cdot \delta_r \cdot \delta_{2r} \cdot \delta_{3r} \cdot \lambda_{r,p} \cdot F_b \cdot \left(\frac{200}{F_b}\right)^{n_{\Phi 1}}; \quad (3.1.1.15)$$

$$\delta_r = \frac{1}{1 + 0,11 \cdot f_L}; \quad (3.1.1.16)$$

$$\delta_{2r} = 1 - 0,5 \cdot \lg(0,1 \cdot f_M + 1); \quad (3.1.1.17)$$

$$q_{1\%} = F_b^n; \quad (3.1.1.18)$$

$$q_{1\%} = \tau_p^{n_{\Phi}}; \quad (3.1.1.19)$$

$$\tau_p = \frac{1000 \cdot L_r}{v} = \frac{1000 \cdot L_r}{m_p \cdot J_{r,am}^{mJ} \cdot Q_{1\%}^{0,25}}; \quad (3.1.1.20)$$

$$q_{200} = q_{1\%} \cdot \left(\frac{F_b}{200}\right)^{n_{\Phi 1}}, \quad (3.1.1.21)$$

где индекс «а» соответствует реке-аналогу, а его отсутствие – исследуемой реке; Φ – гидроморфологический показатель; F_b – площадь водосбора, км²; L_r – длина реки, км; $J_{r,am}$ – средневзвешенный уклон реки, м/км; φ_M – коэффициент редукиции максимального модуля дождевого стока q ; mJ и m_p – гидравлические параметры (табл. 3.1.1.3); n_Φ , $n_{\Phi\Phi}$, $n_{\Phi 1}$ – коэффициенты, определяемые по аналогам согласно [252]; d_{3r} – поправочный коэффициент на среднюю высоту водосбора в горных условиях; q_{200} – модуль максимального стока обеспеченностью 1 %, приведенный

к условной площади 200 км²; определяется по актуальным картам, а при их отсутствии – интерполяцией между ближайшими реками.

Таблица 3.1.1.3

Параметры mJ и m_p в формуле (3.1.1.14) [252]

Характеристика русла и поймы	mJ	m_p
Водотоки со средними уклонами $J_{ra} < 35$ м/км; чистые русла постоянных равнинных рек; русла периодически пересыхающих водотоков (сухих логов)	1/3	11
Извилистые, частично заросшие русла больших и средних рек; периодически пересыхающие водотоки с большим количеством наносов во время паводков	1/3	9
Сильно засоренные и извилистые русла периодически пересыхающих водотоков	1/3	7
Водотоки со средними уклонами $J_{ra} \geq 35$ м/км	1	10

Формулы предельной интенсивности вида (3.1.1.2) обычно используются для расчета максимальных расходов дождевых паводков малых водотоков. Один из наиболее ранних и простых способов такого расчета – «рациональный» метод [301]:

$$Q_{\max} = 0,278 \cdot C_r \cdot I_p \cdot F_b; \quad (3.1.1.22)$$

$$C_r = C_{rw} + (C_{rn} - C_{rw}) \cdot \frac{F_{bn}}{F_b}, \quad (3.1.1.23)$$

где Q_{\max} – максимальный расход воды, м³/с; C_r – коэффициент стока, определяемый соотношением (3.1.1.23), которое в ряде случаев может быть сведено к виду: $C_r = a_0 + a_1 \cdot \frac{F_{bn}}{F_b}$, где a_0, a_1 – эмпирические коэф-

фициенты, например, для 44 малых урбанизированных водосборов в США получено $a_0 = 0,05; a_1 = 0,9$ при $R^2 = 0,71$; C_{rw} и C_{rn} – коэффициенты стока с водопроницаемых и непроницаемых участков; F_b – площадь водосбора, км²; F_{bn} – площадь водонепроницаемых участков водосбора, км²; I_p – интенсивность дождя в мм/ч, определяемая в зависимости от расчетного периода повторяемости T и времени концентрации стока в водосборе t_c , которое, в свою очередь, определяется как сумма времени инфильтрации воды потока до входа в систему канализации (мелиоративную систему) t_b и времени прохождения через нее t_r ; верхняя граница экстремальных дождевых осадков P_{ex} (мм) может быть определена по зависимости: $P_{ex} = 422 \cdot t_{pr}^{0,475}$, где t_{pr} – продолжительность дождя, час [301].

Для определения интенсивности дождя I_p обычно используют зависимости от продолжительности дождя t следующего вида:

$$I_p = \frac{a_0}{(t + a_1)}; \quad (3.1.1.24)$$

$$I_p = \frac{a_0}{(t + a_1)^{a_2}}; \quad (3.1.1.25)$$

$$I_p = \frac{a_0 + a_1 \cdot \lg N_T}{(t + a_2)^{a_3}}, \quad (3.1.1.26)$$

где a_0, a_1, a_2, a_3 – региональные коэффициенты; N_T – характеристика повторяемости дождя [163, 262, 277, 301].

Последний способ оценки I_p (3.1.1.26) используется в одной из реализаций метода предельной интенсивности, рекомендуемой для проектирования систем канализации на территории Российской Федерации [251]:

$$Q_{\max, r, p} = \frac{F_{mid} \cdot A_{Ip}^{1,2} \cdot F_{b^*}}{1000 \cdot \tau_{rh}^{1,2 \cdot n_{JR} - 0,1}}; \quad (3.1.1.27)$$

$$A_{Ip} = M_{W, 20} \cdot 20^{n_{JR}} \cdot \left(1 + \frac{\lg P_{JR}}{\lg m_{JR}} \right)^{k_{JR}}; \quad (3.1.1.28)$$

$$\tau_{rh} = \tau_{con} + \tau_{can} + \tau_p, \quad (3.1.1.29)$$

где $Q_{\max, r, p}$ – расход дождевых вод (л/с); F_{b^*} – расчетная площадь стока, га, определяемая с учетом неравномерности выпадения дождя при площади от 500 га и более (умножением значения измеренной площади водосбора $F_{b^{**}}$ (в га) на коэффициент K_{Fb^*} : $K_{Fb^*} = 1$ при $F_{b^{**}} < 500$; $K_{Fb^*} = 0,95$ при $F_{b^{**}} = 500$; $K_{Fb^*} = 0,90$ при $F_{b^{**}} = 1000$; $K_{Fb^*} = 0,85$ при $F_{b^{**}} = 2000$; $K_{Fb^*} = 0,80$ при $F_{b^{**}} = 4000$; $K_{Fb^*} = 0,70$ при $F_{b^{**}} = 6000$; $K_{Fb^*} = 0,60$ при $F_{b^{**}} = 8000$; $K_{Fb^*} = 0,55$ при $F_{b^{**}} = 10000$); F_{mid} – среднее значение коэффициента, характеризующего поверхность бассейна стока; P_{JR} – период однократного превышения расчетной интенсивности дождя; A_{Ip} – параметр интенсивности дождя; n_{JR}, m_{JR}, k_{JR} – параметры продолжительности дождя; τ_{rh} – расчетная продолжительность дождя, равная продолжительности стекания поверхностных вод по поверхности и трубам до расчетного участка, мин; τ_{con} – продолжительность стекания дождевых вод до уличного лотка (время поверхностной концентрации; в населенных пунктах при отсутствии внутрикварталь-

ных закрытых дождевых сетей $\tau_{con} \approx 5-10$ мин, а при их наличии $\tau_{con} \approx 3-5$ мин; при расчете внутриквартальной канализационной сети ($\tau_{con} \approx 2-3$ мин), мин; τ_{can} – продолжительность стекания по уличным лоткам до дождеприемника; τ_p – продолжительность стекания по трубам до рассчитываемого сечения; τ_{can} и τ_p определяются делением расстояний на соответствующие расчетные скорости течения; $M_{W,20}$ – интенсивность дождя для данной местности продолжительностью 20 мин при периоде однократного превышения расчетной интенсивности дождя $P_{JR} = 1$ год, л/(с·га); параметры $M_{W,20}, F_{mid}, P_{JR}, n_{JR}, m_{JR}, k_{JR}$ определяются согласно рекомендациям, изложенным в [251].

Иной способ определения и учета интенсивности дождя предусмотрен при расчете максимальных расходов дождевых паводков $Q_{max,p}$ (м³/с) на реках с площадью водосбора менее 200 км² согласно [252]:

$$Q_{max,p} = M'_{W,1} \cdot \Phi_{rf,1} \cdot P_{WR,1} \cdot \delta_r \cdot \lambda_{r,p} \cdot A_B; \quad (3.1.1.30)$$

$$\Phi_{rf,1} = \frac{C_{rf}}{(F_b + 1)^{rc_1}} \cdot \Phi_{rf,0} \cdot \left(\frac{J_{bs}}{50} \right)^{rc_0}; \quad (3.1.1.31)$$

$$M'_{W,1} = \frac{M_{W,1}}{\Phi_{rf,1} \cdot P_{WR,1}}; \quad (3.1.1.32)$$

$$\Phi_{bp} = \frac{1000 \cdot L_r}{m_p \cdot J_{r,am}^m \cdot F_b^{0,25} \cdot (\Phi_{rf,1} \cdot P_{WR,1})^{0,25}}, \quad (3.1.1.33)$$

где $P_{WR,1}$ – максимальный суточный слой осадков обеспеченностью 1 %, определяемый по данным ближайших метеостанций, мм; $\Phi_{rf,1}$ – сборный коэффициент стока, оцениваемый при отсутствии реки-аналога по (3.1.1.31); если средний уклон склонов $J_{bs} > 150$ ‰, то принимается $J_{bs} = 150$ ‰; если же $J_{bs} < 15$ ‰, то $J_{bs} = 15$ ‰; при различной крутизне склонов или значительной пестроте почвогрунтов сборный коэффициент $\Phi_{rf,1}$ принимают как средневзвешенное значение; C_{rf} – эмпирический коэффициент, принимаемый для тундры и лесной зоны равным 1,2, а для остальных природных зон 1,3; $\Phi_{rf,0}$ и rc_0 – сборный коэффициент стока для условного водосбора с площадью 10 км² и коэффициент природных условий по табл. 3.1.1.4; rc_1 – коэффициент для лесной зоны и зоны лесотундры $rc_1 = 0,07$, а для остальных природных зон $rc_1 = 0,11$; $M'_{W,1}$ – относительный модуль максимального срочного расхода воды ежегодной

вероятности превышения $p = 1 \%$, определяемый согласно [167, 252] в зависимости от гидроморфометрической характеристики русла Φ_{br} (3.1.1.33) и продолжительности склонового добега τ_s , мин (для горных и полугорных районов и полупустынь $\tau_s = 10$; для степной зоны $\tau_s = 30$; для лесостепи $\tau_s = 60$; для лесной зоны и тундры при заболоченности f_M : $<20 \%$ $\tau_s = 60$; $20-40 \%$ $\tau_s = 100$; $>40 \%$ $\tau_s = 50$); $\lambda_{r,p}$ и δ_r – то же, что и в (3.1.1.15); площадь водосбора F_b в км².

Таблица 3.1.1.4

Параметры rc_2 и $\varphi_{rf,0}$ в уравнении (3.1.1.31) [167]

Природная зона	Тип почв	Механический состав почв					
		глинистые и тяжелосуглинистые		среднесуглинистые и суглинистые		супесчаные, песчаные, обнажения горных пород	
		$\varphi_{rf,0}$	rc_0	$\varphi_{rf,0}$	rc_0	$\varphi_{rf,0}$	rc_0
Лесотундра, лесная	Глеево-подзолистые на плотных породах (включая глеево-мерзлотно-таежные), глеево-болотные оглеенные	0,42	0,50	0,28	0,65	0,23	0,80
	Тундрово-глеевые, глеево-болотные, подзолистые, серые лесные	0,56	0,50	0,38	0,65	0,30	0,80
Лесостепная	Подзолистые, серые лесные, черноземы мощные, на плотных породах, светло и темно-серые оподзоленные	0,66	0,60	0,54	0,70	0,27	0,90
	Черноземы выщелоченные, типичные, обыкновенные, южные, темно-каштановые	0,59	0,70	0,22	0,85	0,14	1,00
Степная и засушливых степей	Черноземы выщелоченные, типичные, южные	0,18	0,80	0,10	0,90	0,05	1,00
	Каштановые, сероземы малокарбонатные, карбонатные	0,29	0,90	0,14	0,90	0,12	1,00
	Такыровидные почвы	0,30	1,00	0,20	1,00	–	–

Объемная формула вида (3.1.1.3) используется в способе, предложенном Д.Л. Соколовским (приводится по [94, 109, 277]):

$$Q_{\max,p} = \frac{0,28 \cdot P_{rT} \cdot \alpha_s \cdot F_b \cdot f_H \cdot \delta_c \cdot \lambda_F}{t_{inc}} + Q_{gr}; \quad (3.1.1.34)$$

$$t_{inc} = \frac{k_{inc} \cdot L_r}{3,6 \cdot v_{inc}}; \quad (3.1.1.35)$$

$$T_r = t_{inc} \cdot (t_{inc} + 1)^{-0,20}; \quad (3.1.1.36)$$

$$P_{rT} = \frac{T_r \cdot (a_0 + a_1 \cdot \lg P_{JR})}{(T_r + 1)^{0,67}}; \quad (3.1.1.37)$$

$$\delta_c = 1,0 - 0,7 \cdot \lg(1 + f_L + 0,20 \cdot f_M); \quad (3.1.1.38)$$

$$\lambda_F = 1 - \frac{h_{rF} \cdot F_{rF}}{1000 \cdot P_{rT} \cdot \alpha_s \cdot F_b}, \quad (3.1.1.39)$$

где $Q_{\max, p}$ – максимальный расход дождевого паводка обеспеченностью p , м³/с; P_{rT} – слой атмосферных осадков за время расчетного дождя, мм; T_r – расчетная продолжительность дождя, час; t_{inc} – продолжительность подъема паводка, час; P_{JR} – период превышения дождя, лет; a_0, a_1 – коэффициенты в формуле Г.А. Алексеева для оценки интенсивности дождя (информация по метеостанциям на территории бывшего СССР приведена в [109]); k_{inc} – коэффициент подъема паводка в размере 1,0–1,5 (1,0 для коротких ливней и 1,5 для обложных дождей продолжительностью более суток); L_r – длина реки, км; v_{inc} – скорость добега пика паводка ($v_{inc} \approx 0,7 \cdot v_{\max}$, где v_{\max} – максимальная скорость течения в расчетном створе, м/с), м/с; F_b – площадь водосбора, км²; f_H – коэффициент формы гидрографа (при отсутствии поймы $f_H = 1,2$; при поймах, пропускающих до 25 % расчетного расхода $f_H = 1,0$; при поймах, пропускающих до 50 % расчетного расхода $f_H = 0,75$); α_s – коэффициент стока (для обеспеченности максимального расхода воды 1 %: в северной лесной зоне – 0,20; в лесостепной зоне – 0,25; в степной зоне – 0,30; на Дальнем Востоке – 0,50–0,55; на Южном Урале – 0,20; на Северном и Среднем Урале – 0,30; в ливнеопасных предгорных районах Средней Азии – 0,45 [109]), один из способов его определения – обратным расчетом по уравнению (3.1.1.34) для измеренных значений расхода воды; δ_c – коэффициент учета озерности и заболоченности (приводится по [109]); f_L – озерность, %; f_M – заболоченность, %; λ_F – коэффициент руслового регулирования; h_{rF} и F_{rF} – глубина затопления и площадь поймы; Q_{gr} – подземное питание (м³/с), ориентировочно принимаемое по норме годового речного стока.

К объемному способу в целом можно отнести и способ расчета паводковых максимальных расходов, предложенный в Службе охраны

почв США [262, 301, 303]. В этом способе рассматривается треугольная схема гидрографа с оценкой потерь стока в виде системы уравнений:

$$Q_{\max,p} = \frac{0,208 \cdot F_b \cdot Y_{r,p}}{0,5 \cdot t_d + 0,6 \cdot t_c}; \quad (3.1.1.40)$$

$$Y_{r,p} = \frac{(P_{r,p} - 0,2 \cdot S_r)^2}{P_{r,p} + 0,8 \cdot S_r}; \quad (3.1.1.41)$$

$$S_r = \frac{25400}{CN} - 254; \quad (3.1.1.42)$$

$$t_{c*} = 0,0078 \cdot L_{r*}^{0,77} \cdot J_{b*}^{-0,385}, \quad (3.1.1.43)$$

где $Q_{\max,p}$ – максимальный расход дождевого паводка, м³/с (если $P_{r,p} < 0,2 \cdot S_r$, то $Q_{\max,p} = 0$); F_b – площадь водосбора, км²; t_d – продолжительность атмосферных осадков, час; t_c – время отклика водосбора на дождевые осадки, час; L_{r*} – длина реки, фут (1 фут = 0,305 м); J_{b*} – средний уклон водосбора, фут/фут; $Y_{r,p}$ – слой стока, мм; $P_{r,p}$ – слой атмосферных осадков, мм; S_r – потенциальные влагозапасы в почвогрунтах, мм; CN – индекс стока, определяемый в зависимости от типов почвогрунтов (А: с низким потенциалом стока и высокими скоростями инфильтрации, превышающими 7,60 мм/ч; почвогрунты – в основном смесь песков и гравия; В: со средними скоростями инфильтрации 3,80–7,60 мм/ч; состоят в основном из мелко- и крупнозернистых почв (например, лёсс и песчаный суглинок); С: маломощные, с низкими скоростями инфильтрации 1,27–3,80 мм/ч; состоят из глинистого суглинка, песчаного суглинка и глин; D: с высоким потенциалом стока и низкими скоростями инфильтрации (меньше 1,27 мм/ч); состоят преимущественно из глин с большим потенциалом набухания, а также почв с малопроницаемыми слоями вблизи поверхности) и доли водонепроницаемых участков по таблицам, приведенным в [262, 301, 303]. Выборочные значения CN приведены в табл. 3.1.1.5.

Помимо указанных, разработано большое количество других способов оценки дождевых максимумов [94, 108, 109, 120, 128, 163, 166, 277]. Но их общей чертой является неоднозначность выбора и количественной оценки входного сигнала, а также большое количество эмпирических поправок, обычно учитывающих специфику региона апробации методики, но не обязательно – региона исследований. Все это свидетельствует о необходимости дальнейших исследований в области разработки новых методов расчета максимального стока.

Таблица 3.1.1.5
Выборочные значения индекса стока *CN* (по [262])

Тип землепользования	Гидрологический тип почв			
	A	B	C	D
Пашня:				
с противоэрозионной обработкой	72	81	88	91
без противоэрозионной обработки	62	71	78	81
Пастбища культурные и естественные:				
низкопродуктивные	68	79	86	89
высокопродуктивные	39	61	74	80
Луга высокопродуктивные	30	58	71	78
Леса:				
редкие, чахлые, без подстилки	45	66	77	83
с мощным растительным покровом	25	55	70	77
Открытые пространства, газоны, парки в ухоженном состоянии с травяным покровом на 75 % площади	39	61	74	80
Открытые пространства в хорошем состоянии с травяным покровом на 50 % площади	49	69	79	84
Торговые и деловые районы с водопроницаемыми участками на 85 % площади	89	92	94	95
Промышленные районы с водопроницаемыми участками на 72 % площади	81	88	91	93
Жилые районы со средним размеров водонепроницаемых площадей, %:				
65	77	85	90	92
40	61	75	83	87
20	51	68	79	84
Асфальтированные автостоянки, крыши и т. д.	98	98	98	98
Дороги:				
асфальтированные с ливнестоками	98	98	98	98
гравийные или асфальт с выбоинами	76	85	89	91
грунтовые	72	82	87	89

Один из перспективных подходов в этом направлении – использование методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для идентификации параметров гидрологических моделей. Например, в [303] рассмотрена оценка индекса стока *CN* в рамках способа Службы охраны почв США, а в [92] – оценка степени обводненности водосборов (относительная площадь покрытия водой) по данным спутниковой альтиметрии с последующей привязкой полученных данных к параметрам полуэмпирической модели В.С. Мезенцева [121] и непосредственно к рядам гидрологических наблюдений. Также можно упомянуть разрабатывае-

мый в Томском политехническом университете способ оценки расхода воды Q_t в момент времени t на основе анализа статистической модели, структура которой аналогична уравнению Шези [226]:

$$Q_t = \frac{V_t}{\tau} = \frac{V_t \cdot v_{r,t}}{L_r} = k_{V4} \cdot B_b \cdot \frac{f(w_t) \cdot \sqrt{J_{ra}}}{n_{ra}}; \quad (3.1.1.44)$$

$$n_{ra} = \frac{\sum(n_{r,i} \cdot f_{bn,i})}{\sum f_{bn,i}}, \quad (3.1.1.45)$$

где L_r и B_b – длина реки и средняя ширина водосбора; J_{ra} – средний уклон реки; $n_{r,i}$ – средний коэффициент шероховатости на i -м участке водосбора площадью $f_{bn,i}$, занятом озерами, болотами, лесом, ледниками; k_{V4} – коэффициент, учитывающий влияние на сток лесистости, озерности, заболоченности водосбора и иных условий на распределение стока по водосбору и во времени; $f(w_t)$ – функция влажности почвогрунтов, идентифицируемая методами анализа ДЗЗ.

Другой подход – разработка детальных компьютерных моделей с рассредоточенными параметрами, изначально ориентированных на получение части исходной информации от систем ДЗЗ [21, 22, 25, 34, 73, 108, 137, 299]. Но в обоих случаях остаются нерешенными или недостаточно проработанными вопросы соотношения входных и выходных сигналов, идентификации и тех, и других, а также природно-антропогенных изменений границ поверхностных и подземных водосборов. Например, использование рекомендуемых в [252] зависимостей вида (3.1.1.11, 3.1.1.46), отражающих общее уменьшение максимального стока и увеличение минимального с ростом заболоченности водосбора f_M (%), в ряде случаев не совпадает с данными наблюдений в таежной зоне Западной Сибири [230]: 1) обратная зависимость между модулем максимального стока и общей лесистостью или заболоченности водосбора проявляется до площади соответствующих экосистем до 5000–6000 км²; свыше 6000 км² проявляется, прежде всего, общая географическая зональность распределения водного стока; 2) минимальный сток возрастает при увеличении общей заболоченности водосбора, но уменьшается при увеличении доли безлесных болот; учет влияния заболоченности на минимальный сток, согласно [252], выполняется по формуле:

$$\delta_2 = 1 + \beta_{M*} \cdot \lg(0,1 \cdot f_M + 1), \quad (3.1.1.46)$$

где β_{M*} – эмпирический коэффициент в зависимости от типа болот.

По этой причине для решения инженерных задач на современном этапе исследований, возможно, не следует использовать избыточно сложные модели гидрологических процессов с параметрами, которые трудно достоверно оценить. Определенный выход из этой ситуации видится в использовании (по крайней мере, на этапе предварительного инвестиционного обоснования проекта и/или составления программы инженерных изысканий) для расчета максимальных расходов $Q_{\max, p}$ половодий и паводков редуцированных зависимостей традиционного вида (3.1.1.47), но с заменой слоя стока за половодье или паводок на слой стока за фиксированные периоды времени:

$$Q_{\max, p} = \frac{k_{Qp} \cdot k_{V5} \cdot Y_{s, a} \cdot F_b}{(F_b + F_0)^{bF}}, \quad (3.1.1.47)$$

где k_{Qp} – модульный коэффициент заданной обеспеченности p ; k_{V5} – коэффициент, учитывающий влияние на сток лесистости, озерности, заболоченности водосбора и иных условий на распределение стока по водосбору и во времени; $Y_{s, a}$ – среднемноголетний слой стока за гидрологический сезон формирования максимального стока (на территории Российской Федерации – в границах, установленных в [129]): для половодья – весенний; для дождевых паводков – летне-осенний.

О возможности замены в формуле (3.1.1.5) слоя стока половодья на слой среднемноголетнего стока за гидрологический весенний сезон свидетельствуют данные на рис. 3.1.1.1. Остальные расчеты (включая оценку параметра дружности половодья по аналогу) проводятся по методике, изложенной в [252]. При расчете максимальных расходов дождевых паводков на средних реках вполне удовлетворительные результаты могут быть получены по зависимости (3.1.1.48), которую в дальнейшем целесообразно уточнить по более современным данным и с учетом поправок на заболоченность, озерность и лесистость:

$$Q_{\max, 1} = \exp(-3,742 \pm 0,788) \cdot Y_{sh, a}^{0,827 \pm 0,091} \cdot F_b^{0,754 \pm 0,085} \cdot J_{r, am}^{0,230 \pm 0,068}, \quad (3.1.1.48)$$

где $Y_{sh, a}$ – среднемноголетнее значение слоя стока (в мм/год) за летне-осенний сезон в границах, указанных в [129]; F_b – площадь водосбора, км²; $J_{r, am}$ – средневзвешенный уклон реки, м/км; оценка параметров (3.1.1.47) выполнена методом наименьших квадратов по данным о 58 средних рек (описание приведено в начале раздела 2.2.1) при $R^2 = 0,85$ (рис. 3.1.1.2).

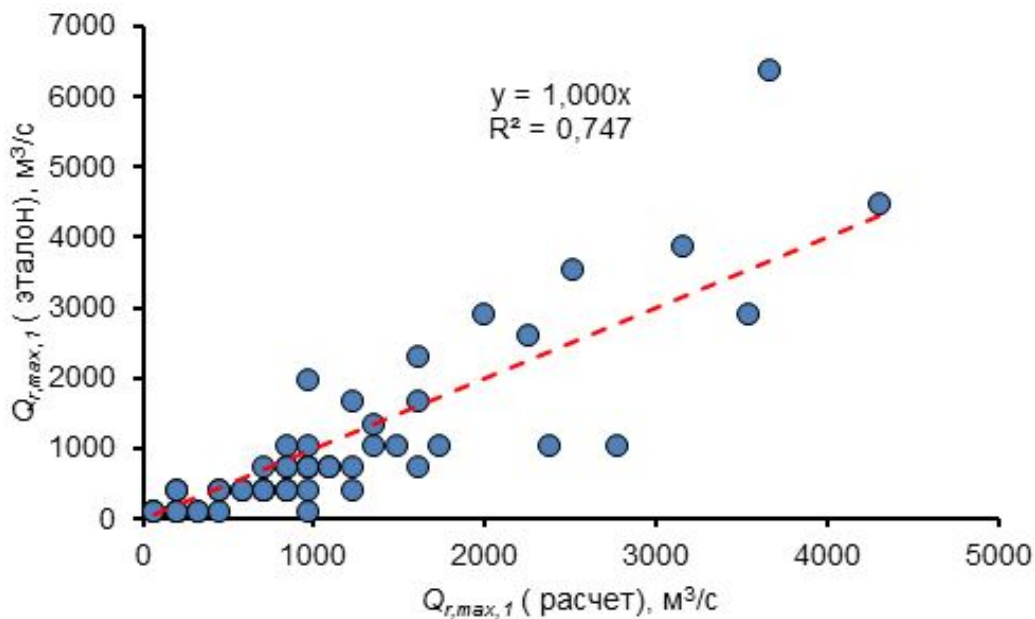


Рис. 3.1.1.2. Соотношение расчетных и эталонных значений максимального расхода воды дождевых паводков обеспеченностью 1 %

В целом, при использовании любых методов расчета максимального стока должен проводиться контроль параметров используемых моделей по результатам сопоставления расчетных максимальных уровней воды и результатов полевого обследования участка размещения проектируемого объекта.

3.1.2. Расчеты характерных уровней воды

Расчет максимальных уровней воды в поверхностных водных объектах, при которых происходит или может происходить затопление прилегающих территорий, проводится, согласно [252], как и в случае расходов воды, по трем вариантам:

- 1) при наличии данных наблюдений – путем подбора закона распределения вероятностей и определения его параметров с учетом экстремальных уровней, выявленных при проведении инженерных изысканий;
- 2) при недостаточности данных наблюдений – также путем подбора закона распределения вероятностей и определения его параметров, но при этом в качестве исходной информации используются не наблюдаемые, а восстановленные по аналогу значения уровней воды;
- 3) при отсутствии данных наблюдений – путем проведения следующих операций:

3.1) построение поперечного профиля долины реки или чаши озера (между гарантированно незатапливаемыми отметками на противоположных берегах);

3.2) для водотоков:

3.2.1) определение максимальных расчетных расходов воды $Q_{\max, p}$;

3.2.2) построение зависимости $Z = f(Q)$ между расходами Q и уровнями Z воды по уравнениям Шези и Маннинга:

$$Q = w_r \cdot h_{ra}^{\frac{2}{3}} \cdot n_{rs}^{-1} \cdot \sqrt{J}, \quad (3.1.2.1)$$

где w_r – площадь поперечного сечения потока при отметке Z , м²; h_{ra} – средняя глубина потока, м; n_{rs} – коэффициент шероховатости, с/м^{0,33}; J – уклон водной поверхности, м/м; значения n_{rs} и J определяют измерением (в составе инженерных изысканий) по высокой воде, а при отсутствии подобной информации – по таблицам (3.1.2.1, 3.1.2.2);

Таблица 3.1.2.1

Шкала шероховатости речных русел и пойм n_{rs} [252]

n_{rs}	Характеристика русел и пойм		
	Равнинные реки	Полугорные и горные реки	Поймы
0,020	Прямолинейные русла канализированных рек в плотных грунтах с тонким слоем илистых отложений	–	–
0,025	Естественные земляные русла в благоприятных условиях, чистые, прямые, со спокойным течением	Искусственные отводы русел, высеченные в скале	Ровная чистая пойма с низкой травой без сельскохозяйственного использования
0,030	Гравийно-галечные русла в тех же условиях	Гравийно-галечные русла в благоприятных условиях (чистые, прямые). $J = 0,8-1,0 \text{ ‰}$	Ровная пойма под пашней без посевов и пастбищем с низкой травой
0,040	Сравнительно чистые русла постоянных водотоков с некоторыми неправильностями в направлениях струй, неровностями дна и берегов и влечением донных наносов	Земляные русла периодических водотоков (сухих логов) в благоприятных условиях. Правильные хорошо разработанные галечные русла в нижнем течении. $J = 0,8-1,0 \text{ ‰}$	Ровная пойма, занятая зрелыми полевыми культурами, пастбищем с высокой травой и вырубками без побегов, небольшое количество староречий и мелких просек

n_{rs}	Характеристика русел и пойм		
	Равнинные реки	Полугорные и горные реки	Поймы
0,050	Значительно засоренные русла больших и средних рек, частично заросшие или каменистые, с беспокойным течением. Чистые русла периодических водотоков	Значительно засоренные каменистые русла с бурным течением. Периодические водотоки с крупногалечным покрытием ложа. $J = 7-15 \text{ ‰}$	Пойма, поросшая редким кустарником и деревьями (весной без листвы), изрезанная староречьями
0,065	Скалистые русла больших и средних рек. Русла периодических водотоков, засоренные и заросшие	Галечно-валунные русла с бурным течением. Засоренные периодические водотоки. $J = 15-20 \text{ ‰}$	Пойма под редким кустарником и деревьями с листвой или вырубками с развивающейся порослью
0,080	Речные русла, значительно заросшие, с промоинами и неровностями дна и берегов	Валунные русла в средней и верхней частях бассейна и периодические водотоки с бурным течением и взволнованной водной поверхностью. $J = 50-90 \text{ ‰}$	Поймы, покрытые кустарником средней и большой густоты (весной – без листвы)
0,100	Русла рек, сильно заросшие, загроможденные стволами деревьев и валунами	Русла водопадного типа, преимущественно в верховьях, с крупно-валунным ложем и бурным течением. $J = 90-200 \text{ ‰}$	Поймы, занятые лесом при уровне воды ниже ветвей и кустарником средней и большой густоты с листвой
0,140	Реки болотного типа (заросли, кочки, во многих местах почти стоячая вода)	Русла с завалами из валунов и обломков скал. $J = 90-200 \text{ ‰}$	Поймы, покрытые лесом при затоплении ветвей и густым ивняком
0,200	–	Русла с завалами из валунов и обломков скал	Глухие, сплошь заросшие, труднопроходимые поймы таежного типа

3.2.3) определение поправок в расчетный расход воды $Q_{\max, p}$ при наличии ледовых явлений:

$$Q'_{\max, p} = \frac{\eta_W}{k_Q} \cdot Q_{\max, p}, \quad (3.1.2.2)$$

где η_w – коэффициент, учитывающий соотношение расходов воды при подвижке льда и на пике весеннего половодья, а также временные несовпадения обеспеченности расходов воды; k_Q – коэффициент изменения гидравлических характеристик потока льдом; значения η_w и k_Q определяют методом аналогии;

Таблица 3.1.2.2

Примерное значение уклона водной поверхности реки вблизи створа в равнинных районах [252]

Площадь водосбора, км ²	Уклон водной поверхности реки, ‰, при рельефе местности			
	возвышенности	увалы	холмистые равнины	низменности
100	2,84	1,70	0,72	0,28
500	1,60	0,96	0,41	0,16
1000	1,28	0,76	0,32	0,13
5000	0,70	0,43	0,18	0,07
20000	0,44	0,27	0,11	0,04
50000	0,32	0,19	0,08	0,03
100000	0,25	0,15	0,06	0,03

Примечание. Характер рельефа оценивается согласно информации, приведенной в табл. 3.1.1.1.

3.3) для озер:

3.3.1) в случае проточных озер используется алгоритм, приведенный в разделе 2.1.2 и предусматривающий оценку высотной отметки порога стока Z_F и среднемноголетнего весенне-летнего подъема воды $\Delta Z_{L,m}$ в озере над порогом стока по уравнению (2.1.2.1), определение коэффициентов вариации Cv_a и асимметрии Cs_a уровней воды в озерах-аналогах, расчетного максимального уровня воды в озере $Z_{L,p}$ по кривой обеспеченности с параметрами $\Delta Z_{L,m}$, Cv_a и Cs_a по уравнению (2.1.2.2);

3.3.2) в случае бессточных озер проводится определение диапазона возможных изменений уровней воды, построение кривой связи уровней воды с объемами воды и площадью акватории, определение водного баланса для отметок водной поверхности в границах указанного выше диапазона, оценку уровней воды по кривой связи объемов и уровней воды в озере и расчетному притоку воды в озеро с учетом изменения других элементов водного баланса;

3.4) для торфяных болот можно воспользоваться методикой Государственного гидрологического института [35, 36, 188] с предварительным расчетом элементов теплового и водного балансов болота, но в общем слу-

чае максимальный уровень на верховых болотах не может превышать средней отметки поверхности болота по причине естественных ограничений существования олиготрофной растительности [13, 222]; на участках низинных болот возможно затопление на глубину 1 м и даже выше, но достаточно редко, поскольку частые затопления блокируют образование торфов.

В значения расчетных уровней воды $Z_{r,p}$ при необходимости вводят поправки на ветровой нагон Δh_{set} и высоту наката $h_{run,1\%}$, а также ряд других поправок, например, поправок на подпор уровней воды при ледовых заторах и зажорах ΔZ_{dj} :

$$Z_{r,p} = Z(Q_p) + \Delta h_{set} + h_{run,p} + \Delta Z_{dj} + \dots \quad (3.1.2.3)$$

Оценка значений Δh_{set} и $h_{run,p}$, согласно [253], проводится для условий расчетного шторма (шторм повторяемостью для сооружений класса: I – один раз в 100 лет; II – один раз в 50 лет; III и IV – один раз в 25 лет) при расчетных уровнях воды (обеспеченность не более: для сооружений I класса – 1 %, II и III классов – 5 %, IV класса – 10 %) с учетом деления водного объекта по соотношению средней глубины водного объекта h_{WL} и длины волны λ_{wa} на следующие зоны: 1) глубоководная (с глубиной участка $h_{WL} > 0,5 \cdot \lambda_{wa}$), где дно не влияет на основные характеристики волн; 2) мелководная (с глубиной $0,5 \cdot \lambda_{wa} \geq h_{WL} \geq h_{WL,k1}$; $h_{WL,k1}$ – критическая глубина, соответствующая первому обрушению волны), где дно оказывает влияние на развитие волн и на основные их характеристики; 3) прибойная (с глубиной от $h_{WL,k1}$ до $h_{WL,k2}$; $h_{WL,k2}$ – критическая глубина, соответствующая последнему обрушению волн), в пределах которой начинается и завершается разрушение волн; 4) приурезовой (с глубиной менее $h_{WL,k2}$), в пределах которой поток от разрушенных волн периодически накатывается на берег.

Параметры волнения при расчетном шторме принимаются по результатам статистической обработки результатов инженерно-гидрометеорологических наблюдений, а при недостаточности или отсутствии такой информации – расчетными методами [253] с учетом отраслевых нормативных документов. В соответствии с [253] расчетная обеспеченность высот волн принимают в зависимости от вида и класса проектируемых сооружений: 1) при определении защищенности портовых акваторий – 5 %; 2) при определении наката волн – 1 %; 3) при определении устойчивости и прочности гидротехнических сооружений и их элементов: 3.1) для сооружений вертикального профиля, ограждающих сооружения откосного профиля – 1 %; 3.2) для сквозных со-

оружений и обтекаемых преград класса: I класс – 1 %; II класс – 3 %; III–IV класс – 5 %; 3.3) для берегоукрепительных сооружений класса: I, II классы – 1 %; III, IV классы – 5 %.

Определение элементов ветровых волн базируется на использовании расчетной скорости ветра v_{w10} (м/с) на высоте 10 м над поверхностью водоема определяют как:

$$v_{w10} = k_{fl} \cdot k_l \cdot v_{w*}; \quad (3.1.2.4)$$

$$k_{fl} = \min \left(0,675 + \frac{4,5}{v_{w*}}; 1 \right), \quad (3.1.2.5)$$

где v_{w*} – скорость ветра на высоте 10 м над поверхностью земли (водоема), соответствующая 10-ти минутному интервалу осреднения и заданной обеспеченности ($v_{w*} = k_{zl} \cdot v_{w,z}$, где $v_{w,z}$ – скорость ветра, измеренная на метеостанции по флюгеру на высоте z : при 5 м $k_{zl} = 1,1$; при 10 м $k_{zl} = 1,0$; при 20 м и более $k_{zl} = 0,9$); k_{fl} – коэффициент пересчета данных по скоростям ветра, измеренным по флюгеру; k_l – коэффициент приведения скорости ветра к условиям водной поверхности для водоемов (в том числе проектируемых) с характерной протяженностью до 20 км, принимаемый: равным единице при измерении скорости ветра v_{w*} над водной поверхностью, над ровной песчаной (пляжи, дюны и прочее) или покрытой снегом местностью; по табл. 3.1.2.3 – при изменении скорости ветра над местностью типа А, В или С.

Таблица 3.1.2.3

Значения коэффициента k_l при типе местности [253]

Скорость ветра v_{w*} , м/с	Значения коэффициента k_l при типе местности*		
	А	В	С
10	1,1	1,3	1,47
15	1,1	1,28	1,44
20	1,09	1,26	1,42
25	1,09	1,25	1,39
30	1,09	1,24	1,38
35	1,09	1,22	1,36
40	1,08	1,21	1,34

Примечание. А – открытые местности (степи, лесостепи, пустыни, открытые побережья морей, озер и водохранилищ); В – территории малых и средних городов, больших и крупных городов, застроенных зданиями высотой до 20 м; С – территории больших, крупных и крупнейших городов, застроенных зданиями высотой свыше 20 м.

Определение разгона L_w (м) осуществляется по румбам с использованием картографического материала и последующим выбором волноопасного румба. В случае длинного и узкого водоема значение эквивалентного разгона определяют по формуле:

$$L_w = 0,27(L_{w,1} + 0,85(L_{w,2} + L_{w,-2}) + 0,5(L_{w,3} + L_{w,-3})), \quad (3.1.2.6)$$

где $L_{w,1}$ – разгон по выбранному направлению; $L_{w,2}$ и $L_{w,-2}$ – разгон по лучам, составляющим угол с выбранным направлением $22,5^\circ$; $L_{w,3}$ и $L_{w,-3}$ – разгон по лучам, составляющим угол 45° [166].

Расчетная глубина h_{WL} у гидротехнических сооружений вертикального профиля определяется, согласно [253], по уравнению (3.1.2.7), ориентировочно – как глубина на конце участков линии разгона [166]:

$$h_{WL} = h_{htb} + k_{br} \cdot (h_b - h_{htb}), \quad (3.1.2.7)$$

где h_{htb} – глубина над подошвой сооружения, м; h_b – глубина водного объекта перед сооружением, м; k_{br} – коэффициент, принимаемый по [253] в зависимости от соотношения h_{htb} / h_b .

Средняя высота h_{wva} (м) и средний период T_{wva} (с) волн определяются в зависимости от расчетных значений длины разгона, скорости ветра, расчетной глубины и безразмерных соотношений по номограммам [253], основанным на использовании зависимостей [103] для установившегося режима волнообразования:

$$\frac{g \cdot h_{wva}}{v_{w10}^2} = 0,16 \cdot \left(1 - \left(1 + 0,006 \cdot \left(\frac{g \cdot L_w}{v_{w10}^2} \right)^{0,5} \right)^{-2} \right) \times$$

$$\times th \left(0,625 \cdot \frac{\left(\frac{g \cdot h_{WL}}{v_{w10}^2} \right)^{0,8}}{\left(1 - \left(1 + 0,006 \cdot \left(\frac{g \cdot L_w}{v_{w10}^2} \right)^{0,5} \right)^{-2} \right)} \right); \quad (3.1.2.8)$$

$$\frac{g \cdot T_{wva}}{v_{w10}} = 3,1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{g \cdot h_{wva}}{v_{w10}^2} \right)^{0,625}, \quad (3.1.2.9)$$

где g – ускорение свободного падения. Если по номограммам безразмерный разгон получить нельзя, то средняя высота волны может быть ориентировочно определена по соотношению $h_{wva} = 0,24 \cdot h_{WL}$ [166].

Среднюю длину волн λ_{wa} (м) в глубоководной зоне при известном значении T_{wva} рассчитывают по формуле:

$$\lambda_{wa} = \frac{g \cdot T_{wva}^2}{2 \cdot \pi}. \quad (3.1.2.10)$$

В мелководной зоне средняя длина волны оценивается по [253] в зависимости от безразмерных соотношений расчетной глубины водного объекта и средней длины волны, высоты волны обеспеченностью 1 % и произведения ускорения свободного падения и квадрата среднего периода волны.

Высота волны i %-й обеспеченности $h_{wv,i}$ (м) находится умножением средней высоты волн на коэффициенты, определяемые отдельно для глубоководной и мелководной зон. Согласно [166], волна расчетной обеспеченности 1 и 5 % и для глубоководной, и для мелководной зон в первом приближении: $h_{wv,1} = 2,07 \cdot h_{wva}$ и $h_{wv,5} = 1,76 \cdot h_{wva}$.

Высота ветрового нагона Δh_{set} (м) определяется на основе данных натуральных наблюдений, а при их отсутствии (без учета конфигурации береговой линии и при постоянной глубине дна h_{WL}) – по уравнению:

$$\Delta h_{set} = k_{ww} \cdot \frac{L_w \cdot v_{w10}^2}{g \cdot (h_{WL} + 0,5 \cdot \Delta h_{set})} \cdot \cos \alpha_w, \quad (3.1.2.11)$$

где α_w – угол между продольной осью водоема и направлением ветра (°); k_{ww} – коэффициент, принимаемый по табл. 3.1.2.4.

Таблица 3.1.2.4

Значения коэффициента k_{ww} в зависимости от скорости ветра v_{w10} [253]

v_{w10} , м/с	20	30	40	50
$k_{ww} \cdot 10^6$	2,1	3	3,9	4,8

Высота наката $h_{run,1}$ (обеспеченность по накату 1 %) на откос заложением m_w фронтально подходящей волны с высотой $h_{wv,1}$ определяют по формуле:

$$h_{run,1} = k_{wr*} \cdot k_{wsp} \cdot k_{run} \cdot h_{wv,1}, \quad (3.1.2.12)$$

где k_{wr*} – коэффициент шероховатости и проницаемости откоса, принимаемый по табл. 3.1.2.5; k_{wsp} – коэффициент, принимаемый по табл. 3.1.2.6; k_{run} – коэффициент, принимаемый по табл. 3.1.2.7 в зависимости от пологости волны $\lambda_w / h_{wv,1}$. При подходе фронта волны к откосу под углом α_w высоту наката уменьшают умножением на k_{aw} (табл. 3.1.2.8).

Таблица 3.1.2.5

Значения коэффициента шероховатости и проницаемости склона k_{wr}^* [166]

Конструкция укрепления откоса	$D_{rm}/h_{wv}, 1\%$	k_{wr}^*
Бетонные плиты	–	0,9
Каменная наброска	$\leq 0,002$	0,9
	0,005–0,01	0,81
	0,02	0,72
	0,5	0,56
	0,1	0,45
	$\geq 0,2$	0,35

Примечание. D_{rm} принимают равным среднему диаметру частиц в материале наброски.

Таблица 3.1.2.6

Значения коэффициента k_{wsp} [166]

Скорость ветра v_{wv} , м/с	Коэффициент k_{wsp} при заложении откоса m_w		
	1–2	3–5	>5
≥ 20	1,4	1,5	1,6
10	1,1	1,1	1,2
<5	1,0	0,8	0,6

Таблица 3.1.2.7

Значения коэффициента k_{run} [166]

$\lambda/h_{wv}, 1$	k_{run} при заложении откоса m_w			
	2	3	5	20
7	1,6	1,0	0,65	0,17
10	1,8	1,2	0,77	0,20
15	2,4	1,5	0,88	0,23

Таблица 3.1.2.8

Значения коэффициента k_{cw} [166]

$\alpha_w(^{\circ})$	0	10	20	30	40	50	60
k_{cw}	1	0,98	0,96	0,92	0,87	0,82	0,76

Расчетный наивысший уровень воды $H_{w,dj,p}$, обусловленный забором или затором, согласно [252], вычисляют по формуле:

$$H_{w,dj,p} = (\mu_{dj} \cdot J_{Q(dj)}^{0,3} - 1) \cdot h_{w,Q(dj)} + H_{w,Q(dj)}, \quad (3.1.2.13)$$

$$\Delta Z_{dj} = H_{w,dj,p} - H_{w,Q(dj)}, \quad (3.1.2.14)$$

где μ_{dj} – коэффициент зажорности или заторности речного участка; определяется путем полевых исследований, по аналогии или ориентировочно по табл. 3.1.2.9; $J_{Q(dj)}$, $h_{w,Q(dj)}$ и $H_{w,Q(dj)}$ – уклон водной поверхно-

сти (‰), средняя глубина реки (м) и уровень воды в расчетном створе (м) при расходе Q_{dj} и свободном ото льда русле; Q_{dj} – расход воды в период зажоро- или заторообразования вероятности превышения P % (Q_{dj} рассчитывается через модуль стока, который может быть определен методом гидрологической аналогии [129]).

Таблица 3.1.2.9

Значения коэффициента μ_{dj} [252]

Вид ледового образования	Коэффициент μ_{dj} при $\Delta B_s/B_{s,O(dj)}$ равном					
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Зажор	27,1	22,2	18,2	14,9	12,2	10,0
Затор	17,3	14,2	11,6	9,5	7,8	6,4
Зажор + затор	22,2	18,2	14,9	12,2	10,0	8,2

Согласно [19, 129], для расчета максимальных заторных уровней воды может быть использовано еще два метода (М.А. Жуковой и В.А. Бузина). В методе М.А. Жуковой расчет максимальных заторных уровней воды основан на условии гидравлического подобия процесса образования заторов на реках, а в методе В.А. Бузина предлагается решение, в котором вклад местных факторов в формирование максимального заторного уровня оценивается путем выполнения специальных наблюдений в ходе полевых работ и расчетным методом. При этом интегральным количественным показателем местных факторов служит коэффициент заторности, а показателем наполнения русла является площадь поперечного сечения русла, связь которой с уровнем устанавливается нивелировкой берегов в расчетном створе.

Коэффициент μ_{dj} в уравнении (3.1.3.13) при наличии данных измерения расходов, уровней, уклонов воды, глубины потока определяют обратным расчётом по указанной выше формуле. При отсутствии указанных данных используют два способа: 1) величину μ_{dj} рассчитывают по данным наблюдений на реке-аналоге; 2) величину μ_{dj} определяют по зависимости от относительного приращения ширины реки при ледовом заторе (зажоре) по сравнению с открытым руслом. Такие измерения трудоёмки и в период ледохода не всегда могут быть проведены по требованиям безопасности. Поэтому измерения проводят обычно только на режимных гидрологических постах, количество которых ограничено, а время измерений не всегда совпадает со временем формирования ледовых заторов и зажоров. Использование рек-аналогов при определении характеристик ледовых заторов и зажоров методически обосновано не так полно, как подбор рек-аналогов при расчёте водного стока.

В целом, общим недостатком указанных выше и ряда других способов является значительная трудоёмкость и опасность определения используемых параметров по результатам наблюдений и существенная погрешность при определении параметров потока, ледовых явлений и подпора воды при ледовых заторах и зажорах. С учетом этого Савичевым О.Г. [212, 310] предложен подход к определению подпора воды при ледовых заторах и зажорах на основе схематизации профиля заторного участка реки при следующих допущениях:

1) подпор воды ΔZ_{dj} пропорционален изменению уклона воды при заторе по сравнению с открытым руслом:

$$\Delta Z_{dj} = k_Z \cdot L_J \cdot (J_F - J_J), \quad (3.1.2.15)$$

где k_Z – коэффициент пропорциональности (с учётом отклонений истинных значений от измеренных с той или иной случайной и систематической ошибкой); L_J – длина заторного участка; J_F и J_J – уклоны водной поверхности при открытом русле и заторе при одном и том же расходе воды;

2) уклон водной поверхности при открытом русле J_F :

$$J_F \approx J_{a,p} \cdot \left(\frac{Q_p}{Q_{ap}} \right)^{k_Q}, \quad (3.1.2.16)$$

где $J_{a,p}$ – средневзвешенный уклон реки, ‰ (м/км); Q_p – расход воды в момент формирования затора, м³/с; Q_{ap} – среднемноголетний расход воды, м³/с; k_Q – эмпирический коэффициент;

3) эффективный слой ледовых образований Λ пропорционален толщине ледяного покрова h_Λ (с учётом внутриводного льда и отклонений измеренных значений от истинных);

$$\Lambda \approx h_\Lambda^k, \quad (3.1.2.17)$$

где h_Λ – эмпирический коэффициент; $J_J \approx J_F$ при отсутствии льда (при толщине ледяного покрова $\Lambda = 0$); $S_J = 0$ при максимальной толщине ледяного покрова ($\Lambda = \Lambda_{\max} + \delta$); поправка к максимальной толщине льда δ пропорциональна среднему уклону реки ($\delta = k_S \cdot S_a$); максимально возможная толщина ледяного покрова Λ_{\max} пропорциональна глубине реки при открытом русле h_Q , то есть:

$$\Lambda_{\max} = k_h \cdot h_Q; \quad (3.1.2.18)$$

4) измерение толщины ледяного покрова непосредственно в момент вскрытия рек представляет собой технически сложную и опасную

задачу; поэтому целесообразно использовать косвенную оценку величины h_{Λ} в зависимости от температуры атмосферного воздуха на основе формулы Ф.В. Быдина [19, 212, 310]; тогда при указанных ограничениях:

$$J_J \approx J_F \cdot \left(\frac{h_{\Lambda}^{k_{\Lambda}}}{k_h \cdot h_Q + k_S \cdot J_{a,p}} \right). \quad (3.1.2.19)$$

С учётом (3.1.2.19) уравнение (3.1.2.15) принимает вид (3.1.2.20).

$$\Delta Z_p = k_Z \cdot \Delta Z_a \cdot \left(\frac{Q_p}{Q_{ap}} \right)^{k_Q} \cdot \left(\frac{\left(k_T \cdot \sqrt{|\sum T_{d,t}|} \right)^{k_{\Lambda}}}{k_h \cdot h_{Q,p} + k_S \cdot J_{a,p}} \right), \quad (3.1.2.20)$$

где ΔZ_p – подпор воды при ледовых заторах и зажорах обеспеченностью p , м; Q_p – расход воды на момент формирования ледового затора и зажора, м³/с; Q_{ap} – среднемноголетний расход воды, м³/с; $h_{Q,p}$ – глубина реки при открытом русле и расходе воды Q_p , м; $J_{a,p}$ – средневзвешенный уклон реки, ‰ (м/км); $\sum T_{d,t}$ – сумма среднесуточных температур атмосферного воздуха на ближайшей метеостанции с 1 октября предыдущего календарного года до момента формирования предполагаемого ледового затора и зажора, °С; k_T – коэффициент, определенный для рек-аналогов методом наименьших квадратов по толщине их ледяного покрова в конце ледостава и сумме среднесуточных температур атмосферного воздуха на ближайшей метеостанции в водосборе рек-аналогов с 1 октября предыдущего календарного года до момента измерения толщины их ледяного покрова; $k_Q, k_{\Lambda}, k_h, k_S$ – коэффициенты, определенные для рек-аналогов методом оптимизации по измеренным значениям их подпора воды при ледовом заторе и зажоре, их расхода воды, глубины реки, толщины ледяного покрова и средневзвешенного уклона реки; $k_Z \cdot \Delta Z_a$ – среднее значение подпора воды для исследуемого района и категории реки, определяемое для рек-аналогов методом наименьших квадратов [212, 310].

В предложенном способе подпор воды при ледовых заторах и зажорах рассматривается как характеристика изменения на участке реки баланса воды (в жидком и твёрдом состояниях), обусловленного соотношением термического и динамического факторов формирования ледовых явлений. При этом уравнение (3.1.2.20) представляет собой соотношение между фактически наблюдаемым подпором воды ΔZ_p и его средним значением $k_Z \cdot \Delta Z_a$, характерным для того или иного природного района. Выделение такого района выполняется согласно [270]. Исследуемая

река и река-аналог должны быть одной и той же категории по [47]. Отклонение ΔZ_p от $k_Z \cdot \Delta Z_a$ в формуле (3.1.2.20) определяется модульным коэффициентом Q_p / Q_{ap} , толщиной ледяного покрова к моменту ожидаемого формирования ледового затора и зажора, глубиной реки и уклоном реки в контрольном створе. Использование средневзвешенных уклонов реки, а не средних, как в прототипе, и коэффициентов k_Q, k_Λ, k_h, k_S является физически более обоснованным и позволяет повысить надежность и точность определения подпора воды в контрольном створе.

Методика определения подпора воды при ледовых заторах и зажорах на реках включает выбор контрольного створа на затороопасном и зажороопасном участке, оценку расхода воды на момент формирования ледового затора и зажора, среднемноголетнего расхода воды, глубины реки при открытом русле и расходе воды на момент формирования ледового затора и зажора, используя которые определяют подпор воды при ледовых заторах и зажорах. На затороопасном и зажороопасном участке определяют средневзвешенный уклон реки, сумму среднесуточных температур атмосферного воздуха на ближайшей метеостанции с 1 октября предыдущего календарного года до момента формирования ледового затора и зажора, а затем – подпор воды при ледовых заторах и зажорах по уравнению (3.1.2.20).

Заключительным этапом определения характеристик затопления является сопоставление результатов расчета максимальных расходов и уровней воды с рельефом и растительностью прилегающих к поверхностному водному объекту территорий. Ошибки в гидрологических расчетах с высокой вероятностью соответствуют случаям, когда в предполагаемой зоне затопления расположены сосны с возрастом более 50 лет или верховые болота. В целом, зона затопления по определению включает в себя пойму (периодически затапливаемую часть долины [47]), граница которой в равнинных районах обычно соответствуют максимальным уровням воды обеспеченностью от 5 (верхняя граница низкой поймы) до 1 % (верхняя граница высокой поймы).

3.2. Подтопление и заболачивание территорий

Речная сеть не может существовать при отсутствии подземных вод, поскольку сток формируется после насыщения водой некоторой условной емкости водосборной геосистемы (за исключением случаев наличия на локальных участках искусственных покрытий с незначительными фильтрационными свойствами или промерзшим поверхностным слоем). Соответственно, увеличение водного стока и уровней поверхностных вод почти всегда сопровождается увеличением уровней подземных вод вплоть

до отметок, превышающих принятые для данного вида застройки критические значения и нарушающих необходимые условия строительства и эксплуатации объектов, то есть приводящих к подтоплению (согласно [248, п. 3.15], подтопление – это «комплексный гидрогеологический и инженерно-геологический процесс, при котором в результате изменения водного режима и баланса территории происходят повышения уровней (напоров) подземных вод и/или влажности грунтов, превышающие принятые для данного вида застройки критические значения и нарушающие необходимые условия строительства и эксплуатации объектов»).

К подтоплению в ряде случаев может приводить также и хозяйственная деятельность [168, 170]. Происходящие при этом изменения водного режима территории при длительном проявлении и некоторых других условиях могут сопровождаться заболачиванием. По этой причине в разделе рассмотрены вместе процессы подтопления и заболачивания, являющиеся, по сути, результатом общего увеличения влагозапасов на какой-либо территории.

3.2.1. Оценка подтопления территорий

Согласно [170], на селитебных территориях основными причинами подтопления на стадии строительства являются изменение условий поверхностного стока при осуществлении вертикальной планировки и накопление воды в строительных выработках, а на стадии эксплуатации – инфильтрация утечек технологических вод, промышленных и хозяйственно-бытовых стоков, поливных вод, а также изменение водного и теплового режима участков геологической среды под зданиями, сооружениями и покрытиями, барражный эффект (задержка поверхностных и подземных вод зданиями и сооружениями). Таким образом, антропогенное подтопление во многих случаях сводится к избыточному поступлению в водоносные горизонты воды сверху. Природное подтопление, которое часто не рассматривается при проектировании инженерных объектов, но все же имеет место (например, болотные процессы в Западной Сибири в голоцене), связано с избыточным водопритоком как сверху, так и снизу, а также в плане (процессы заболачивания рассмотрены в разд. 3.2.2).

В любом случае обычно происходит изменение уровня режима грунтовых вод или/и формирование техногенной верховодки или техногенного водоносного горизонта, сопровождающиеся изменением химического состава подземных вод, влажности и поглощенного комплекса пород зоны аэрации, снижением несущей способности грунтов. Соответственно, оценка фактического подтопления и его прогноз включает в себя изучение следующих процессов: 1) образование техногенной верховодки на водонепроницаемых линзах в пределах зоны аэрации;

2) формирование техногенного водоносного горизонта со свободной поверхностью на региональном водоупоре в первоначально сухих водопроницаемых грунтах; 3) изменение уровня режима горизонта грунтовых вод в природных и прогнозных природных антропогенных условиях; 4) изменение химического состава подземных вод и грунтов под влиянием инфильтрующихся вод; 5) изменение температуры, влажности и иных физико-механических свойств грунтов при их увлажнении и обводнении в зоне аэрации и насыщенной зоне. Основные методы изучения и прогноза – аналогия, эксперимент и математическое моделирование с использованием аналитических и численных решений [170].

При использовании всех указанных методов первым этапом прогноза обычно является схематизация природных условий, по результатам которой в качестве расчетных условий принимаются: 1) однородный пласт неограниченной мощности; 2) двухслойный пласт при неограниченной мощности нижнего слоя; 3) однослойный пласт конечной мощности; 4) двухслойный пласт. Границы раздела между отдельными слоями заменяются горизонтальными плоскостями, проходящими через средние для каждой границы отметки, наклонные поверхности при уклонах не более 0,01 м/м – на горизонтальные, а при определенных соотношениях длины $2 \cdot L_{lgr}$ и ширины $2 \cdot B_{lgr}$ очаги подтопления в виде прямоугольников (и более сложной формы) – на эквивалентные круглые или полосообразные. В частности, если $L_{lgr} / B_{lgr} \geq 5$, то прямоугольный очаг рассматривается как полосообразный с шириной B_{lgr} , иначе – как круглый с приведенным радиусом R_{lgr} [170]:

$$R_{lgr} = \beta_{gr} \cdot \frac{(L_{lgr} + B_{lgr})}{2}, \quad (3.2.1.1)$$

где β_{gr} – коэффициент, определяемый по табл. 3.2.1.1.

Таблица 3.2.1.1

Значения коэффициента β_{gr} [170]

L_{lgr}/B_{lgr}	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
β_{gr}	1,12	1,16	1,18	1,18	1,18

Согласно [170], в случае формирования верховодки на водонепроницаемых линзах в зоне аэрации расчет предельного (стационарного) уровня воды (техногенной верховодки) рассматриваются варианты:

- на вытянутых в плане линзах ($L_{lgr} / B_{lgr} \geq 5$):

$$h_{gr(x), \max}^2 = \frac{I_{gr}}{k_f} \cdot (B_{lgr}^2 - x^2) + \left(\frac{I_{gr} \cdot B_{lgr}}{k_f} \right)^2, \quad (3.2.1.2)$$

- на округлых в плане линзах ($L_{lgr} / B_{lgr} < 5$):

$$h_{gr(r), \max}^2 = \frac{I_{gr}}{2 \cdot k_f} \cdot (R_{lgr}^2 - r^2) + \left(\frac{I_{gr} \cdot R_{lgr}}{2 \cdot k_f} \right)^2, \quad (3.2.1.3)$$

где $h_{gr(x), \max}$ и $h_{gr(r), \max}$ – максимальный уровень воды относительно поверхности водоупора на расстоянии x или r от центра очага, м; I_{gr} – модуль инфильтрации (инфильтрация на единицу площади), м/сут; k_f – коэффициент фильтрации, м/сут; x, r, B_{lgr}, R_{lgr} в м.

В случае формирования техногенного водоносного горизонта в первоначально сухих грунтах техногенные водоносные горизонты формируются на первом от поверхности земли региональном водоупоре в виде увеличивающегося во времени купола грунтовых вод в зоне действия дополнительной инфильтрации с последующим его растеканием. При этом в пределах очага подтопления выделяются две зоны со спецификой расчета уровней подземных вод $h_{gr(x)}$:

- в зоне I ($|x \leq B_{lgr}|$):

$$h_{gr(x)}^2 = \frac{I_{gr}}{k_f} \cdot (L_{lgr} \cdot B_{lgr} - x^2); \quad (3.2.1.4)$$

- в зоне II ($|x > B_{lgr}|$):

$$h_{gr(x)}^2 = \frac{I_{gr}}{k_f} \cdot \frac{B_{lgr}}{(L_{lgr} - B_{lgr})} \cdot (L_{lgr} - x)^2. \quad (3.2.1.5)$$

В целом, общий смысл оценки подтопления территорий становится очевидным при анализе известного уравнения Дюпюи для грунтовых вод при горизонтальном залегании водоупора в границах поперечного профиля водосбора от реки до водораздела:

$$\begin{aligned} Z_{gr(x)} &= \sqrt{Z_r^2 + \frac{2 \cdot L_{nr}}{k_f} \cdot \left(q_{gr} + I_{gr} \cdot \frac{k_f}{2 \cdot L_{nr}} \cdot \left(\frac{L_{nr}}{2} - x \right) \right)} = \\ &= \sqrt{Z_r^2 + \frac{M_{gr*} \cdot F_b}{1000 \cdot k_f}}, \end{aligned} \quad (3.2.1.6)$$

где Z_{gr} и Z_r – уровни подземных (грунтовых) и поверхностных (речных) вод, м; L_{nr} – расстояние от точек измерения уровней подземных и поверхностных вод, м; k_f – коэффициент фильтрации, м/с; q_{gr} – удель-

ный расход подземных вод (на единицу длины водотока с одной стороны водосбора), $\text{м}^2/\text{с}$; I_{gr} – удельная инфильтрация, $\text{м}/\text{с}$; M_{gr*} – модуль стока подземных вод с учетом антропогенной инфильтрации, $\text{л}/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$; F_b – площадь водосбора, км^2 .

В частности, если увеличиваются уровни поверхностных вод на величину ΔZ_r в результате регулирования речного стока или строительства линейных объектов (дорог, трубопроводов, линий электропередач), то увеличение уровней грунтовых вод обычно не может быть меньше ΔZ_r . Увеличение уровней подземных вод, вплоть до подтопления, также вероятно при наличии потерь воды из систем тепло- и водоснабжения, либо росте площади подземного водосбора в результате строительства дорог и иных сооружений, либо уменьшении среднезвешенного по водоносному горизонту значения коэффициента фильтрации (барражный эффект при строительстве зданий и сооружений). Соответственно, предотвратить указанные явления можно путем проведения противоположно направленных мероприятий: увеличением водоотбора; создание открытых водоотводящих каналов; обустройство горизонтального и вертикального дренажа.

3.2.2. Заболачивание территорий

Длительное подтопление является одним из факторов заболачивания, под которым обычно понимается увеличение отношения общей площади всех неосушенных торфяных месторождений, торфяных болот и заболоченных земель к общей площади рассматриваемой территории [49]. В общем случае современное заболачивание в условиях Северной Евразии происходит двумя путями: 1) вследствие формирования новых заболоченных площадей по схеме «евтрофный водоем – болото: евтрофное – мезотрофное – олиготрофное – ?»; 2) в результате расширения границ уже существующих торфяных болот непосредственно на прилегающие суходолы.

Данные процессы применительно к Западной Сибири достаточно подробно описаны в работах М.И. Нейштадта [145], К.Е. Иванова, С.М. Новикова и соавторов [13, 36, 87], О.Л. Лисс с соавторами [114] и ряда других исследователей. Однако до сих пор остаются не полностью раскрытыми вопросы взаимосвязи гидрологических и болотных процессов, что существенно затрудняет понимание общей картины болотообразования в регионе и резко снижает достоверность прогнозов дальнейшей эволюции болот, в частности, и окружающей среды, в целом. Так, возникает чрезмерно высокая степень неопределённости в оценке изменения состояния болотных систем и многолетнемёрзлых грунтов на фоне наблюдаемых изменений климата и расширения хозяйственной деятельности, связанной с добычей и транспортом углеводородов. С учетом это-

го на примере Западной Сибири по результатам, приведенным в [202, 206, 218, 227, 308], рассмотрены общие механизмы влияния климата на болотные процессы и взаимовлияния рек и болот – объектов, характеризующихся преобладанием противоположных по воздействию на окружающую среду процессов эрозии и аккумуляции вещества.

Хронология развития речной сети Западной Сибири в голоцене является весьма спорной с точки зрения различных авторов, предложивших в разное время гипотезы водного стока в: 1) Северный Ледовитый океан между несомкнувшимися языками уральских и сибирских ледников, либо при отсутствии наземного оледенения, либо между разновременными уральскими и сибирскими ледниками, либо через ледник (в том числе под ледником); 2) в Арало-Каспийский бассейн через Тургайский прогиб; 3) в бессточный Западно-Сибирский бассейн (море) [119]. Не затрагивая непосредственно этот важнейший вопрос, связанный с проблемой определения возраста существующих речных систем, отметим, что в любом случае одной из причин заболачивания Западно-Сибирской равнины могло быть постоянное переформирование речных русел в легко размываемых грунтах при отсутствии древесной растительности и избыточном увлажнении водосборов в результате таяния ледников, выпадения атмосферных осадков и затрудненности водного стока за пределы рассматриваемой территории [13, 114, 145, 209, 227].

В подобных условиях наличие многочисленных стариц в ряде случаев стало катализатором заболачивания региона, причём эвтрофикация пойменных водоёмов продолжается (хоть и не так интенсивно, как несколько тысяч лет назад) и в настоящее время. Следовательно, русловой процесс активизировал болотообразование, которое в последующем привело к некоторой стабилизации русловых деформаций, по крайней мере, на малых реках [209]. Более того, в настоящее время наблюдается захват болотами не только водосборных территорий, но и самих русел малых водотоков, вплоть до фактического исчезновения некоторых из них. Дальнейшей стадией болотного процесса стало формирование вторичной речной сети болотных водотоков и водоёмов в условиях избыточного или умеренного увлажнения и ухудшающихся условий стекания воды, причём в ряде случаев русла болотных водотоков формируется на водоразделах исчезнувших первичных рек.

В случаях, когда формирование даже внутриболотных водотоков затруднено из-за незначительных уклонов и существенной шероховатости поверхности стока, возможно возникновение внутриболотных водоёмов. Данный процесс при определённых обстоятельствах может быть проинтерпретирован как проявление глобального потепления, хотя и не имеет к нему прямого отношения. Определённое влияние изменений температуры атмосферного воздуха, конечно, присутствует, но имеет

нелинейный характер. Для иллюстрации этого тезиса в [308] была рассмотрена упрощённая математическая модель торфонакопления на основе рассмотрения болота как термодинамической системы, возникающей и существующей при избыточном увлажнении.

Предположим, что состояние болотной экосистемы в соответствии с первым законом термодинамики может быть описано с помощью уравнения:

$$m \cdot \varphi \cdot k_{sa} \cdot dT_a = k_U \cdot k_{sa} \cdot d(m \cdot T_a) + m \cdot g \cdot \delta \cdot dh_p, \quad (3.2.2.1)$$

где $d\Theta = m \cdot \varphi \cdot k_{sa} \cdot dT_a$ – подведённая к системе тепловая энергия; $dU = k_U \cdot k_{sa} \cdot d(m \cdot T_a)$ – изменение внутренней энергии системы; $A = m \cdot g \cdot \delta \cdot dh_p$ – совершённая системой работа; m и h_p – масса и средний вертикальный размер системы; k_{sa} – соотношение температуры атмосферного воздуха T_a и системы $T_s (T_a = k_{sa} \cdot T_s)$; P, Y, E – слой атмосферного увлажнения, стока и испарения; φ – (условная) удельная теплоёмкость болотной экосистемы; g – ускорение свободного падения;

$\delta = \begin{cases} 0, & P - Y - E \leq 0 \\ 1, & P - Y - E > 0 \end{cases}$. Предполагая, что $m = k_{p,1} \cdot h_p^b$, а средняя за рассматриваемый период температура атмосферного воздуха $T_{a,a} = k_{p,2} \cdot (T_0 + T_t)$,

получим, что в момент времени t :

$$\delta_a \cdot \int dh_p = \int k_{p,3} dT_a - k_{p,4} \cdot T_{a,a} \int \frac{dh_p}{h_p}; \quad (3.2.2.2)$$

$$h_{p,t} = h_{p,0} + k_{p,3} \cdot (T_{a,t} - T_{a,0}) - k_{p,4} \cdot b \cdot k_{p,2} \cdot (T_{a,t} + T_{a,0}) \cdot \ln \left(\frac{h_{p,t}}{h_{p,0}} \right), \quad (3.2.2.3)$$

где $k_{p,1}, k_{p,2}, k_{p,3}, k_{p,4}, b$ – эмпирические коэффициенты; δ_a – среднее за расчётный период значение дельта-функции водного баланса; $T_{a,t}$ и $T_{a,0}$ – среднегодовая температура атмосферного воздуха в конце и начале расчётного периода; $h_{p,t}$ и $h_{p,0}$ – толщина торфяной залежи в конце и начале расчётного периода [308].

Для Западно-Сибирской равнины уравнение (3.2.2.3) с учётом данных [5, 114, 116, 145, 161, 284] приобретает вид (рис. 3.2.2.1):

$$h_{p,t} - 0,10 = (-12,36 \pm 3,44) - (1,81 \pm 0,51) \cdot T_{a,t} - (0,73 \pm 0,16) \cdot T_{a,t} \cdot \ln \left(\frac{h_{p,t}}{0,10} \right) + (5,08 \pm 0,91) \cdot \ln \left(\frac{h_{p,t}}{0,10} \right); \quad (3.2.2.4)$$

квадрат корреляционного отношения $R^2 = 0,74$.

Анализ зависимости (3.2.2.4) позволил сделать выводы [308] о том, что, во-первых, максимальная расчётная глубина торфяной залежи в условиях таёжной зоны Западной Сибири (7,7 м, что близко к средней максимальной глубине торфяных болот региона) соответствует периоду с постоянной температурой минус 3 °С. Во-вторых, заметный рост торфяной залежи (свыше 0,1 м) начинается при среднегодовой температуре воздуха, превышающей минус 7 °С. При температурах воздуха около минус 7 °С и ниже торфяная залежь не формируется, но возможно её сохранение за счёт торфообразования в более тёплый предыдущий период. В-третьих, между приростом торфяной залежи существует нелинейная зависимость с максимумом прироста, соответствующим не максимальной, а оптимальной для рассматриваемой экосистемы температуры атмосферного воздуха (рис. 3.2.2.1).

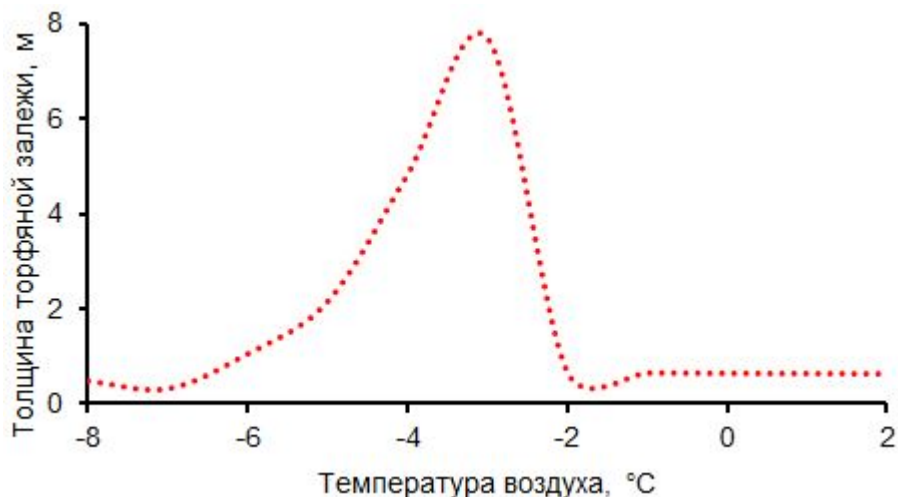


Рис. 3.2.2.1. Зависимость между температурой приземных слоёв атмосферного воздуха и толщиной торфяной залежи, рассчитанной по уравнению (3.2.2.4) [308]

Зависимости вида (3.2.2.4) между толщиной торфяной залежи и температуры атмосферного воздуха характеризуют, прежде всего, болотные процессы первого типа (эвтрофикация водоемов, появление и олиготрофизация болот). Для изучения процессов второго типа на примере водосбора реки Ключ (элемент системы реки Ключ – Бакчар – Чая – Обь – Карское море) в восточной части Васюганского болота рассмотрены модели: 1) водного баланса характерного участка болотной экосистемы; 2) миграционных потоков в плане и по вертикальному разрезу [202, 218, 307].

Методика исследования включала моделирование среднемноголетнего водного баланса водосбора реки Ключ при допущении незначительного изменения влагозапасов в среднем за многолетний период. Атмосферные осадки приняты по метеостанции Бакчар, суммарный

сток – по наблюдениям Росгидромета. Расчет внутриболотных изменений стока выполнен на основе анализа материалов дешифрирования космоснимков [201, 218] с использованием выводов К.И. Иванова [87] об относительном постоянстве проточности в пределах однородных внутриболотных экосистем. С учетом этого сток Y_{Ei} (мм/год) в пределах экосистемы Ei оценивается по уравнениям:

$$Y_{Ei} = \frac{t_p \cdot (q_{E, out} - q_{E, inp})}{B_E \cdot 10^6}; \quad (3.2.2.5)$$

$$B_E = \begin{cases} 0,5 \cdot \sqrt{\frac{F_E}{\pi}}, L_{E, inp} = 0; \\ \frac{2 \cdot F_E}{L_{E, out} + L_{E, inp}}, L_{E, inp} > 0, \end{cases} \quad (3.2.2.6)$$

где t_p – количество секунд в расчетном периоде; F_E – площадь экосистемы; $\pi \approx 3,14\dots$; $q_{e, out}$ и $q_{e, inp}$ – проточность через контуры стока и притока (по [87]); $L_{E, out}$ и $L_{E, inp}$ – длина контура стока и притока; B_E – эквивалентная ширина экосистемы. Более подробно методика моделирования и описание объекта исследования изложены в [206, 218, 307].

Для более ясного понимания влияния внутриболотных изменений стока были изучены механизмы формирования миграционных потоков на основе расчета переноса и аккумуляции растворенных веществ в болотных водах. При этом использовались численные и аналитические методы решения уравнений адвективно-диффузионного переноса с учетом и без учета сорбционных и микробиологических процессов [222, 224, 307]. Для подтверждения результатов моделирования использовались данные о составе минеральных включений в торфа и составе минеральных грунтов. Опробование проводилось по профилю, который расположен примерно перпендикулярно суходолу, покрытому заболоченным смешанным лесом, и включает участки мезотрофной окраины (примерно до 100–200 м от границы болота), олиготрофного сосново-кустарничково-сфагнового болота (региональный термин – «рям»; от 100–200 и до 750–950 м) и сочетания грядово-мочажинного (ГМК) и грядово-мочажинно-озеркового (ГМОК) комплексов (от 750–900 м до границ).

Анализ полученных результатов показал, что на границе ГМК и «ряма», с одной стороны, и «ряма» и мезотрофной окраины, с другой, наблюдается относительно резкое уменьшение слоя стока (рис. 3.2.2.2, 3.2.2.3). Это указывает на потенциальное переувлажнение пограничных участков между экосистемами, которое, в свою очередь, является фак-

тором расширения внутриболотной экосистемы с более высоким значением слоя стока. Лес на суходоле также характеризуется более высоким потенциальным стоком. С учетом того, что высота поверхности суходола на 1–2 м выше поверхности границы болота, это также способствует расширению болота.

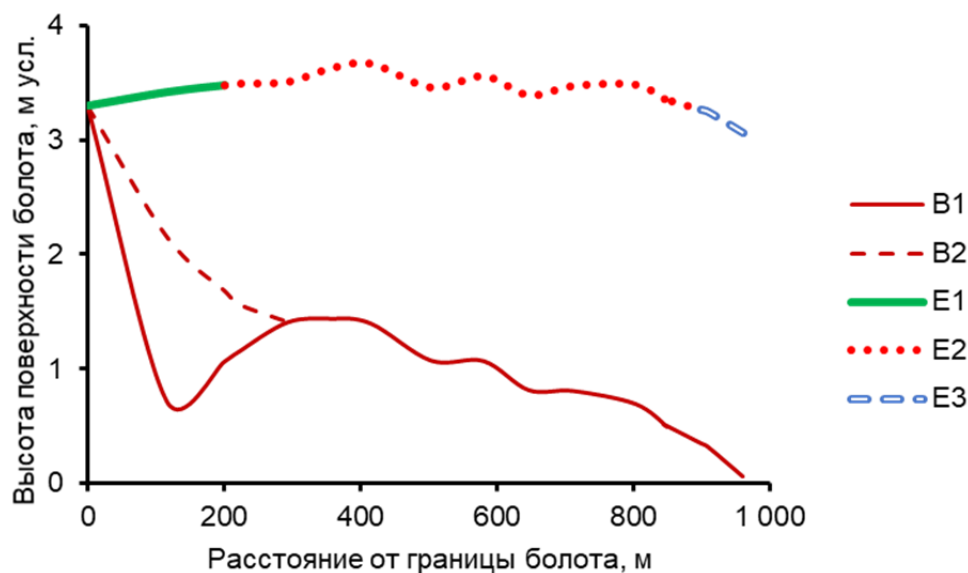


Рис. 3.2.2.2. Высотные отметки минеральных грунтов и поверхности болота на участке Васюганского болота; условные обозначения:

B1 и B2 – отметки минеральных грунтов в створах 92,5 и 93 км (Томск – Бакчар); E1 – мезотрофная окраина; E2 – «рям»; E3 – ГМК [202]

Следует отметить, что в пределах мезотрофной окраины (шириной 100–200 м) происходит существенная трансформация химического состава вод, поступающих с олиготрофных внутриболотных экосистем и суходола, за счет одновременно протекающих процессов трансформации органического вещества, взаимодействий глинистых минералов с раствором с высоким содержанием органических кислот, выведения из раствора малорастворимых соединений (например, гуматов кальция и магния), усвоения минеральных веществ болотной микро- и макрофлорой. Очень важную роль, судя по результатам изучения вертикального распределения миграционных потоков, играют геохимические барьеры, формирующиеся на границе деятельного и инертного горизонтов и в нижней части торфяной залежи при активном участии болотной микрофлоры [307].

Верхний барьер функционирует в условиях прироста торфяной залежи и достаточно сильных изменений уровней болотных вод (соответственно, окислительно-восстановительной обстановки). Поэтому его положение часто выглядит как диффузная граница, а иногда почти не прослеживается. Тем не менее, роль верхнего барьера в аккумуляции веществ в торфяной залежи путем выведения из раствора частиц гидроксидов

трехвалентного железа и соосаждения (сорбции) большого количества микроэлементов на их поверхности, судя по предварительным результатам [224], исключительна велика и часто недооценена, что иногда приводит к чрезмерному акцентированию роли антропогенного загрязнения.

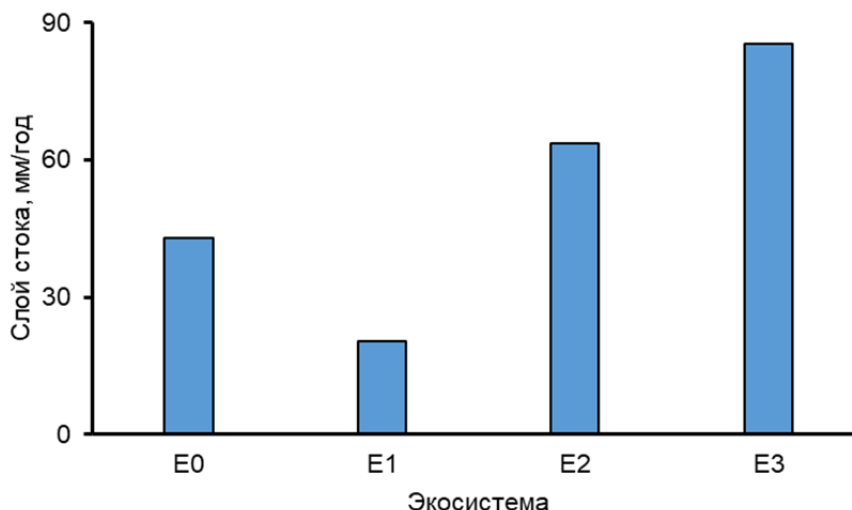


Рис. 3.2.2.3 Распределение слоя стока по экосистемам на границе водосбора реки Ключ в среднем за многолетний период в створе 93 км по трассе Томск – Бакчар; условные обозначения: E0 – заболоченный лес; E1 – мезотрофная окраина; E2 – «рям»; E3 – ГМК (рис. 3.2.2.2) [202, 218]

Нижний барьер также очень важен, причем его роль в трансформации болотных экосистем представляется исключительно важной. В частности, вероятность накопления в торфах малорастворимых соединений Са, Fe и микроэлементов возрастает по мере усиления анаэробных условий развития болотной микрофлоры, определяющих увеличение рН болотной среды до 7,8 и выше. Это приводит к смещению карбонатного равновесия и выпадению малорастворимых соединений Са, что способствует (наряду с выведением из раствора соединений железа) кольматации нижнего слоя торфяной залежи и изменению водно-минерального питания болотной растительности. В свою очередь, это приводит к смене болотной растительности, которая сопровождается изменением фильтрационных свойств.

В целом, в настоящее время в Западной Сибири отмечают весьма значительные скорости прироста торфяной залежи и расширения болот. Так, по данным М.И. Нейштадта [145], речь идёт о ежегодном приросте площади болот на десятки тысяч гектаров, причём интенсивность болотообразования увеличивается после лесных пожаров и строительства на болотах вследствие уменьшения эвактранспирации и замедления поверхностного и подповерхностного стока у линейных сооружений (дорог, трубопроводов) и объектов нефтегазодобычи.

3.3. Сокращение водных ресурсов

Сокращение водных ресурсов в явном виде обычно не рассматривается в качестве опасных гидрометеорологических процессов при проектировании и строительстве большинства жилых и производственных объектов, но является предметом изучения при разработке долгосрочных программ развития территорий, комплексного использования и охраны вод [174]. Оно может быть связано как с антропогенными факторами (непосредственный отбор воды из поверхностных и подземных источников, косвенное изменение влагозапасов в результате функционирования сельского хозяйства, горнодобывающей промышленности и т. д.), так и с природными.

Продолжительное по времени сокращение водных ресурсов приводит к истощению вод, под которым, согласно [29, ст. 1. п. 15], понимается постоянное «сокращение запасов и ухудшение качества поверхностных и подземных вод». При этом следует отметить, во-первых, некоторую неоднозначность использования терминов «ресурсы» и «запасы» в разных отраслях науки и техники. В рассматриваемой работе, с учетом традиционных представлений, принятых в отечественной гидрогеологии, под ресурсами понимаются воды в поверхностных и подземных объектах на какой-либо территории, а под запасами – часть этих ресурсов, фактически или потенциально доступная для использования. Во-вторых, при оценке запасов основной упор обычно делается на количество жидкой воды (в случае подземных источников – жидкой гравитационной воды). По этой причине оценка сокращения вод должна включать не только определение минимального стока в летне-осенний и зимний периоды, но и условия перемерзания поверхностных водных объектов и формирования многолетней мерзлоты как факторов, существенно усложняющих хозяйственное освоение северных регионов.

3.3.1. Оценка минимального стока

В гидрологии под минимальным стоком обычно понимается наименьший по величине речной сток [47], причем для его оценки используют минимальные среднесуточные, среднемесячные или 30-суточные расходы воды, наблюдавшиеся в зимний и/или летне-осенний сезоны (минимальные среднемесячные расходы используют, если они не превышают 30-суточные более чем на 10 %) [171, 252].

Согласно [252], оценка минимального стока, также как среднего и максимального, проводится по вариантам наличия, недостаточности и отсутствия данных наблюдений. В первом и втором случаях подбирается закон распределения вероятностей и оцениваются его параметры

(по исходным или восстановленным по аналогу наблюдениям). При наличии нулевых значений обеспеченности вычисляют по формуле:

$$P^* = \frac{N_1 \cdot P_1^*}{N_1 + N_2}, \quad (3.3.1.1)$$

где P_1^* – вероятность элемента в ряду ненулевых значений; N_1 и N_2 – объемы выборок с ненулевыми и нулевыми значениями. В третьем случае минимальные расходы воды $Q_{\min, p}$ (м³/с) на больших и средних реках определяют по интерполяции между пунктами наблюдений с учетом боковой приточности и данных гидрометеорологических изысканий, а на малых реках – по зависимостям вида:

- для равнинных рек

$$Q_{\min, p} = k_{Q_{\min}} \cdot (F_b \pm F_{b0})^{b_{Q_{\min}}} \cdot \delta_{lf1} \cdot \delta_{lf2} \cdot \lambda_{lf, p}; \quad (3.3.1.2)$$

$$\delta_{lf1} = \frac{1}{1 - k_{lm} \cdot f_L}; \quad (3.3.1.3)$$

- для горных рек

$$Q_{\min, p} = f(Z_b, F_b), \quad (3.3.1.4)$$

где δ_{lf1} – коэффициент, учитывающий увеличение минимальных расходов воды на озерных реках (3.3.1.3); δ_{lf2} – коэффициент, учитывающий увеличение минимальных расходов воды заболоченных водосборов (3.1.1.45); f_L^* – средневзвешенная озерность водосбора (3.1.1.7), %; k_{lm} – эмпирический коэффициент; $\lambda_{lf, p}$ – переходный коэффициент от минимального 30-суточного расхода воды 80%-й обеспеченности к расходу воды расчетной обеспеченности; $k_{Q_{\min}}$ и $b_{Q_{\min}}$ – районные параметры, определяемые по рекам-аналогам или как средние районные значения; F_b – площадь водосбора, км²; F_{b0} – дополнительная площадь водосбора; $f(Z_b, F_b)$ – функция средней высоты Z_b и площади F_b водосбора.

Необходимо отметить, что, во-первых, оценка влияния заболоченности и озерности на минимальный сток рекомендована в [252], а в предыдущих изданиях нормативных документов в области гидрологических расчетов [239, 240] их учет выполнялся косвенно, через региональные эмпирические параметры $k_{Q_{\min}}$ и $b_{Q_{\min}}$, значения которых приведены в [167]. Во-вторых, согласно [36], величина F_{b0} может быть интерпретирована как поправка на сокращение действующей площади водосбора на участках с многолетней мерзлотой или распространением бугристых болот.

Общим недостатком зависимостей вида (3.3.1.1, 3.3.1.3) является не всегда понятный физический смысл параметров с точки зрения их соответствия локальным и зональным гидрогеологическим условиям. Как следствие, очень сложно предусмотреть долгосрочные изменения этих параметров. С учетом этого представляется более продуктивным подход к оценке минимального стока как малых, так и средних рек на основе аналитического решения (3.3.1.5) уравнения водного баланса при отсутствии притока воды в водосбор (3.3.1.6):

$$Q_t = Q_0 \cdot \exp(-k_Q \cdot t) \approx f(F_b, Y_{lf,a}) \cdot \exp(-k_{Q^*} \cdot T_{lf}); \quad (3.3.1.5)$$

$$\frac{dQ}{dt} = -k_Q \cdot Q, \quad (3.3.1.6)$$

где Q_t и Q_0 – расходы воды в момент t и в начале периода T_{lf} с пренебрежительно малым поступлением в речную сеть дождевых и снеготалых вод, м³/с; $f(F_b, Y_{lf,a})$ – функция площади водосбора F_b и среднего слоя водного стока $Y_{lf,a}$ за период T_{lf} , k_Q, k_{Q^*} – удельная скорость изменения расхода воды, с⁻¹. В частности, для 58 средних рек Евразии (описание в разд. 2.2.1) получена зависимость:

$$Q_{\min w,m} = Q_{wa}^{1,222 \pm 0,082} \cdot \exp(-(0,324 \pm 0,058) \cdot T_{lf}), \quad (3.3.1.7)$$

где $Q_{\min w,m}$ – минимальный зимний 30-суточный расход воды обеспеченностью 80 %, м³/с; Q_{wa} – среднегодовое количество осадков за зимний период T_{lf} (в сутках) в границах, указанных в [129], м³/с; $R^2 = 0,93$.

Минимальный среднесуточный расход $Q_{\min,d,p}$ расчетной обеспеченности может быть определен в зависимости от расчетного 30-суточного расхода воды $Q_{\min,p}$ по формуле:

$$Q_{\min,d,p} = k_{md} \cdot Q_{\min,p}, \quad (3.3.1.8)$$

где k_{md} – коэффициент, определяемый как средний по гидрологическому району по связи суточных и 30-суточных расходов воды.

3.3.2. Оценка пересыхания, перемерзания и наледообразования

Кроме минимального расхода воды, согласно [252], в ряде случаев может определяться максимальная или средняя многолетняя продолжительность ежегодного пересыхания и перемерзания реки в расчетном створе $T_{Q,0}$ в зависимости от площади водосбора F_b :

$$T_{Q,0} = k_{Q\min,1} \cdot (F_b + 1)^{k_{Q\min,2}}; \quad (3.3.2.1)$$

либо (в зоне многолетней мерзлоты) в зависимости от длины водотока от истока до расчетного створа L_r :

$$T_{Q,0} = k_{Q\min,3} \cdot (L_r + 1)^{k_{Q\min,4}}, \quad (3.3.2.2)$$

где $k_{Q\min,1}$, $k_{Q\min,2}$, $k_{Q\min,3}$, $k_{Q\min,4}$ – районные параметры.

При проведении инженерных изысканий и проектировании гидротехнических сооружений в зоне распространения как многолетней, так и сезонной мерзлоты целесообразно выполнять прогноз образования наледей, под которыми, согласно [47, п. 147], понимается «наrost льда, возникающий при замерзании подземных вод, изливающихся на поверхность земли, или речных вод, выходящих на поверхность ледяного покрова». Расчёт наледи не регламентируется [252] и в общем случае требует проведения полевых работ в течение периода не менее 3–5 лет [166]. При отсутствии наблюдений прогноз наледи может быть выполнен согласно [199] с предварительной классификацией наледи (тип наледи: 1) подземных вод; 2) поверхностных вод; 3) смешанных вод).

3.4. Деформации дна и берегов водных объектов

Деформации дна и берегов поверхностных водных объектов и перемещение наносов являются составляющими единого водно-эрозионного процесса, структура которого подробно рассмотрена в работах Н.И. Макавеева, Р.С. Чалова и многих других исследователей [4, 6, 15, 274, 275, 288, 306]. Количественная оценка взаимного влияния твердого стока и русловых деформаций может быть получена на основе анализа уравнений русловых деформаций и неустановившегося движения водных масс:

$$\frac{\partial G}{\partial x} + m_0 \cdot B_r \cdot \frac{\partial z}{\partial t} = G_0, \quad (3.4.1)$$

где G – расход наносов в объеме беспустотной породы; согласно [47], под наносами понимаются твердые частицы, образованные в результате эрозии водосборов и русел, а также абразии берегов водоемов, переносимые водотоками, течениями в озерах, морях и водохранилищах, и формирующие их ложе; по характеру движения в потоке различают наносы взвешенные (переносимые в потоке во взвешенном состоянии) и влекломые (перемещаемые водным потоком в придонном слое и движущиеся путем скольжения, перекачивания или сальтации – перебрасывания на короткие расстояния в придонном слое); G_0 – расход взвешенных наносов, оседающих на дно или поднимающихся вверх; m_0 – относительная плотность грунтов и наносов; B_r – ширина реки, м; x – координата продольного перемещения; z – высотная отметка дна; t – координата времени [39, 90, 110, 274, 275, 288, 306].

При отсутствии данных наблюдений расходы взвешенных наносов G_s могут быть рассчитаны методом А.В. Караушева [90]:

$$G_{ss} = C_{tr} \cdot Q, \quad (3.4.2)$$

где C_{tr} – транспортирующая способность потока ($\text{г}/\text{м}^3$), оцениваемая по уравнениям:

$$C_{tr} = a_s \cdot \Gamma \cdot C_{sd}; \quad (3.4.3)$$

$$C_{sd} = 150 \cdot N_{Ch} \cdot \eta_v^2 \cdot \frac{v_{r,a}^2}{h_{r,a}}; \quad (3.4.4)$$

$$\eta_v^2 = \frac{0,53 \cdot C_{Ch} - 4,1}{C_{Ch} - 2}; \quad (3.4.5)$$

$$N_{Ch} = \frac{M_{Ch} \cdot C_{Ch}}{g}; \quad (3.4.6)$$

$$M_{Ch} = \begin{cases} 0,7 \cdot C_{Ch} + 6, & 10 \leq C_{Ch} \leq 60; \\ 48, & C_{Ch} > 60, \end{cases} \quad (3.4.7)$$

где a_s – поправочный коэффициент, определяемый из соотношения средней измеренной мутности C_m и расчетной транспортирующей способности потока C_{tr} ($a_s = C_m / C_{tr}$), при отсутствии данных наблюдений $a_s = 1$; Γ – гидромеханический параметр наносов, определяемый согласно [90]; C_m и C_{tr} в $\text{г}/\text{м}^3$; C_{sd} – мутность взмыва, $\text{г}/\text{м}^3$; где $h_{r,a}$ – средняя глубина водотока, м; $v_{r,a}$ – средняя скорость течения, м/с; g – ускорение свободного падения, $\text{м}^2/\text{с}^2$; η_v – коэффициент перехода от средней скорости потока к донной скорости; C_{Ch} – коэффициент Шези.

Удельный расход взвешенных наносов $G_{0,B}$, оседающих на дно или поднимающихся вверх, согласно [90], можно ориентировочно рассчитать по уравнению:

$$G_{0,B} = (u_r + k_u) C_{se} - k_u \cdot C_{sd}, \quad (3.4.8)$$

где C_{sd} – мутность взмыва, вычисленная для элемента транзитной струи, $\text{г}/\text{м}^3$; C_{se} – средняя мутность воды в конце элемента Δx , $\text{г}/\text{м}^3$; u_r – гидравлическая крупность, м/с; k_u – коэффициент, определяемый из условия равновесия русла:

$$k_u = \frac{u_r \cdot \Gamma}{1 - \Gamma}. \quad (3.4.9)$$

Средняя мутность воды C_{se} в конце элемента Δx определяется выражением:

$$C_{ce} = C_{tr} + (C_b - C_{tr}) \cdot \exp\left(-\frac{B_r \cdot (u_r + k_u)}{Q} \cdot \Delta x\right), \quad (3.4.10)$$

где C_b – средняя мутность воды в начале элемента Δx , г/м³; Q – расход воды, м³/с; B_r – ширина потока, м.

В российской гидрологической практике применяются и другие подходы. В частности, теоретические зависимости для расчета распределения мутности по вертикали были получены М.А. Великановым и В.М. Маккавеевым [4]. Одна из них – соотношение М.А. Великанова (3.4.11) для средней по глубине концентрации взвешенных частиц – используется достаточно часто [75]:

$$C_{tr} = k_{vl} \cdot \frac{v_{r,a}^3}{g \cdot h_{r,aw} \cdot u_{r,a}}, \quad (3.4.11)$$

где $v_{r,a}$, $h_{r,a}$, $u_{r,a}$ – средние значения скорости течения, глубины потока и гидравлической крупности взвешенных частиц в расчетном сечении; g – ускорение свободного падения; k_{vl} – эмпирический коэффициент (например, для ряда рек в бассейне Оби (Васюган, Кеть, Бердь, Кия, Чулым) $k_{vl} = 293,847$ при условии $u_{r,a} \approx 0,154 \cdot \sqrt{D_{ss}}$, где средний диаметр взвешенных частиц D_{ss} в мм; $D_{ss} = 0,011 \cdot J_a^{-0,217}$, J_a – средний уклон реки, м/км [228]).

Широкое распространение получили и эмпирические формулы, например формула Е.А. Замарина для среднего содержания взвешенных наносов в потоке $C_{z,a}$:

$$C_{z,a} = k_1 \cdot \left(\frac{v_{r,a}}{u_r}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{R_w \cdot J}, \quad 0,002 \text{ м/с} < u_r < 0,008 \text{ м/с}; \quad (3.4.12)$$

$$C_{z,a} = k_2 \cdot v_{r,a} \cdot \sqrt{\frac{R_w \cdot J \cdot v_{r,a}}{u_r}}, \quad 0,0004 \text{ м/с} < u_r < 0,002 \text{ м/с}; \quad (3.4.13)$$

где k_1, k_2 – эмпирические коэффициенты ($k_1 = 700$, $k_2 = 350$ [244]); R_w – гидравлический радиус, м; гидравлическая крупность наносов $u_{r,a}$ в м/с [110, 276].

Также следует отметить, что удельное содержание взвешенных частиц C_{ss} (г/м³), соответствующее транспортирующей способности пото-

ка $C_{tr,ss}$ (г/м^3), с учетом ряда допущений, сформулированных в [90], можно рассматривать как произведение средних значений их плотности ρ_{ss} (г/м^3), объема θ_{ss} (м^3) и количества N_{ss} (3.4.14), а фактическое содержание $C_{ss,t}$ (г/м^3) в момент времени t с учетом отклонения актуальной транспортирующей способности потока от номинальной в зависимости от соотношения актуального расхода воды Q_t ($\text{м}^3/\text{с}$) к его средне-многолетнему значению Q_a ($\text{м}^3/\text{с}$) – по соотношению (3.4.15):

$$C_{tr,ss} = \rho_{ss} \cdot \theta_{ss} \cdot N_{ss} = k_{ss} \cdot D_{ss,a}^{3-b_{ss}} = k_{s*} \cdot \left(\frac{v_{r,a}^2}{N_{ch}} \right)^{3-b_{ss}} ; \quad (3.4.14)$$

$$C_{ss,t} = C_{tr,ss} \cdot \left(1 + k_{s0} \cdot \left(\frac{Q_t}{Q_a} \right)^{k_{s1}} \right), \quad (3.4.15)$$

где $k_{ss}, k_{s*}, k_{s0}, k_{s1}, b_{ss}$ – эмпирические коэффициенты, отражающие гидрологические и геологические условия на участке формирования твердого стока; например, для р. Томи у г. Томска по данным за 2000-е гг. с использованием метода общего понижающего градиента получено при $S/\sigma = 0,44$: $k_{s*} = 3,566$; $3 - b_{ss} = 0,051$; $k_{s0} = 2,247$; $k_{s1} = 1,084$.

Для определения расходов влекомых наносов при отсутствии данных наблюдений разработано большое количество способов [4, 15, 31, 32, 39, 77, 110, 120, 166, 217, 264, 279, 286, 288, 295, 301], среди которых наибольшее распространение получили:

- 1) на территории Российской Федерации:
 - метод В.Н. Гончарова [39]:

$$G_{b,G}^* = 1,2 \cdot (1 + \varphi) \cdot D_{b,m} \cdot v_{0,G} \cdot \left(\frac{v_{rm}}{v_{0,G}} \right)^{4,33} ; \quad (3.4.16)$$

$$v_{0,G} = \lg \left(\frac{8,8 \cdot h_{rm}}{D_{b,5}} \right) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot (\rho_s - \rho) \cdot D_{b,m}}{3,5 \cdot \rho}}, \quad (3.4.17)$$

где $G_{b,G}^*$ – удельный расход влекомых наносов по методу В.Н. Гончарова, $\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м})$; φ – параметр турбулентности (отношение стандартной скорости турбулентного равномерного падения частиц в невозмущенной жидкости к действительной), определяемый в зависимости от диаметра наносов D (табл. 3.4.1); $D_{b,m}$ – средний диаметр частиц влекомых наносов, м; $D_{b,5}$ – диаметр частиц (наиболее крупных) влекомых наносов обеспе-

ченностью 5 %, м; v_{rm} – средняя (по вертикали) скорость течения, м/с; $v_{0,G}$ – несдвигающая скорость по методу В.Н. Гончарова, м/с; ρ, ρ_s – соответственно средняя плотность воды и наносов, кг/м³; h_{rm} – глубина по соответствующей вертикали, м; g – ускорение свободного падения, м/с²;

Таблица 3.4.1

Параметр турбулентности φ в формуле (3.4.16) (приводится по [31])

D_s , мм	0,06	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,5	>1,5
φ	15,8	7,3	3,25	2,09	1,67	1,42	1,25	1,15	1,0	1,0

- метод И.И. Леви [110]:

$$G_{b,L}^* = 2 \cdot \left(\frac{v_{rm}}{\sqrt{g \cdot D_{b,m}}} \right)^3 \cdot D_{b,m} \cdot (v_{rm} - v_{0,L}) \cdot \left(\frac{D_{b,m}}{h_{rm}} \right)^{0,25}; \quad (3.4.18)$$

$$v_{0,L} = 1,4 \cdot \sqrt{g \cdot D_{b,m}} \cdot \lg \left(\frac{12 \cdot h_{rm}}{D_{b,m}} \right), \quad (3.4.19)$$

где $G_{b,L}^*$ – удельный расход влекомых наносов по методу И.И. Леви, кг/(с·м); $v_{0,L}$ – начальная скорость движения влекомых наносов по методу И.И. Леви, м/с;

- метод Г.И. Шамова [279]:

$$G_{b,Sh}^* = 0,95 \cdot \sqrt{D_{b,m}} \cdot \left(\frac{v_m}{v_{0,Sh}} \right)^3 \cdot (v_m - v_{0,Sh}) \cdot \left(\frac{D_{b,m}}{h_m} \right)^{0,25}; \quad (3.4.20)$$

$$v_{0,Sh} = 4,6 \cdot D_{b,m}^{\frac{1}{3}} \cdot h_{rm}^{\frac{1}{6}}, \quad (3.4.21)$$

где $G_{b,Sh}^*$ – удельный расход влекомых наносов по методу Г.И. Шамова, кг/(с·м); $v_{0,Sh}$ – начальная скорость движения влекомых наносов по методу Г.И. Шамова, м/с;

- метод расчета расхода влекомых наносов в форме гряд (для случаев, когда формой движения влекомых наносов является смещение донных гряд) [4, 264]:

$$G_{b(rb)} = 0,6 \cdot \rho_s \cdot B_r \cdot v_{rb} \cdot h_{rb}; \quad (3.4.22)$$

$$v_{rb} = 0,019 \cdot v_{rm} \cdot \left(\frac{v_{rm}}{\sqrt{g \cdot \bar{h}_w}} \right)^3; \quad (3.4.23)$$

$$h_{rb} = h_{rb} = \begin{cases} 0,25 \cdot h_{rm}, & h_{rm} < 1; \\ 0,2 + 0,1 \cdot h_{rm}, & h_{rm} > 1, \end{cases} \quad (3.4.24)$$

где расход влекаемых наносов $G_{b(rb)}$ в кг/с;

2) за рубежом:

- метод Е. Мейера-Петера и Р. Мюллера (приводится по [286]):

$$G_{b,MPM}^* = 8 \cdot \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho} \cdot \sqrt{\frac{g}{\rho}} \cdot \left(\left(\frac{n'}{n''} \right)^{1,5} \cdot \rho \cdot J \cdot h_{rm} - 0,047 \cdot (\rho_s - \rho) \cdot D_{b,m} \right)^{1,5}; \quad (3.4.25)$$

$$n' = \frac{D_{b,10}^{\frac{1}{6}}}{26}; \quad (3.4.26)$$

$$n'' = \frac{\sqrt{J} \cdot R_w^{\frac{2}{3}}}{v_{rm}}, \quad (3.4.27)$$

где $G_{b,MPM}^*$ – удельный расход влекаемых наносов по методу Е. Мейера-Петера и Р. Мюллера, кг/(с·м); n' и n'' – коэффициенты шероховатости; J – уклон водной поверхности, м/м; $D_{b,10}$ – диаметр частиц (наиболее крупных) влекаемых наносов обеспеченностью 10 %, м; R_w – гидравлический радиус, м;

- метод Р.А. Багнольда (приводится по [286, 295]):

$$G_{b,B}^* = 0,1 \cdot \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho} \cdot \left(\frac{\eta - \eta_0}{0,5} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{h_{rm}}{0,1} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{D_{b,m}}{0,0011} \right)^{-0,5}; \quad (3.4.28)$$

$$\eta = \rho \cdot h_{rm} \cdot J \cdot v_{rm}; \quad (3.4.29)$$

$$\eta_0 = 5,75 \cdot \left(\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) \cdot \rho \cdot 0,04 \right)^{1,5} \cdot \sqrt{\frac{g}{\rho}} \cdot D_{b,m}^{1,5} \cdot \lg \left(\frac{12 \cdot h_{rm}}{D_{b,m}} \right), \quad (3.4.30)$$

где $G_{b,B}^*$ – удельный расход влекаемых наносов по методу Р.А. Багнольда, кг/(с·м);

- метод Энгелунда–Хансена (приводится по [288]):

$$\frac{G_{bs,EH}}{Q} = 0,05 \cdot \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho} \cdot \frac{v_{rm} \cdot J}{\sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) \cdot g \cdot D_{b,m}}} \cdot \sqrt{\frac{R_w \cdot J}{(\rho - 1) \cdot D_{b,m}}}, \quad (3.4.31)$$

где $G_{bs,EH}$ – расход наносов по методу Ф. Энгелунда – Е. Хансена, кг/с; Q – расход воды, м³/с.

Более подробное описание деформаций русла было предложено А.Ю. Сидорчуком, который ввел в уравнение (3.4.1) высоту берегов, а также дополнительно использовал уравнение баланса наносов, оседающих на расчетном участке и поступающих на него извне и в результате взмыва наносов со дна и берегов [274, 275]. Но все же проблема разработки математической модели русловых деформаций в настоящее время раскрыта не в полной мере, что определяет необходимость применения подходов, основанных на изучении морфологии речных русел [86, 89]. Недостаточно проработаны и вопросы расчета и долгосрочного прогноза деформаций дна и берегов водоемов.

Наиболее понятный способ оценки современного и прогнозного положения берегов поверхностных водных объектов заключается в сопоставлении картографического разновременного материала, если таковой имеется. При этом интервал между съемками, согласно [32], должен быть не менее пяти лет. Вертикальные деформации определяются на основе совмещения поперечных профилей русла с учетом погрешности вычислений δ_z :

$$\delta_z = \sqrt{\delta_g^2 + \delta_n^2 + \delta_{co}^2}, \quad (3.4.32)$$

где δ_g – погрешность измерения глубин при русловой съемке; δ_n – погрешность определения глубины на плане русловой съемки; δ_{co} – погрешность совмещения поперечных профилей. Средняя погрешность измерения глубины δ_g эхолотом принимается равной 0,3 м, а средняя погрешность определения глубины на плане русловой съемки δ_n – равной $0,5 \cdot \Delta\Theta$, где $\Delta\Theta$ – шаг изобат (м). Средняя погрешность совмещения поперечников δ_{co} (м) = $0,5 \cdot MB/1000$, где MB – вертикальный масштаб поперечного профиля.

Горизонтальные деформации определяются на основе сопоставления карт и топографических материалов с учетом случайных погрешностей, обусловленных погрешностями самих плановых съемок δ_c , погрешностями приведения сравниваемых съемок к одному масштабу δ_{np} , погрешностями совмещения съемок δ_{co} и погрешностями измерения смещения линии берега на совмещенных планах δ_{ob} . Общую среднюю погрешность δ_y определяют из выражения:

$$\delta_y = 0,001 \cdot M_B \cdot \sqrt{\delta_c^2 + \delta_{np}^2 + \delta_{co}^2 + \delta_{ob}^2}, \quad (3.4.33)$$

где M_B – масштабный коэффициент совмещаемых планов. Средние значения δ_c и δ_{ob} обычно принимаются 0,5 мм в масштабе плана. Сред-

ную погрешность приведения съемок к общему масштабу (в миллиметрах приведенного масштаба) следует принимать равной:

$$\delta_{np} = 0,5 \cdot \sqrt{(n_M^2 + 1)}, \quad (3.4.34)$$

где n_M – отношение большего масштабного коэффициента к меньшему; 0,5 (мм) – средняя погрешность характерного линейного размера, по которому съемки приводят к общему масштабу. Совмещенные съемки следует приводить к более крупному масштабу. Среднюю погрешность совмещения плановых съемок δ_{co} при наличии на них общих, неизменных во времени ориентиров принимают равной 1 мм в масштабе плана.

К недостаткам методики оценки деформаций русла [32] при наличии данных наблюдений относятся: высокая трудоемкость инженерно-гидрометеорологических изысканий и сложность или невозможность получения расчетных параметров в сжатые сроки, определяемые для изысканий и проектирования заказчиком работ; метод неприменим при отсутствии надежных русловых съемок, выполненных в разные годы с интервалом не менее пяти лет. Кроме того, даже при наличии разновременных русловых съемок процесс сравнения нескольких планов или схем сопряжен с дополнительными погрешностями и недостаточно четко формализован [157, 309].

При отсутствии данных наблюдений известна методика построения линии возможного вертикального размыва речного русла при условии деформаций за счет переформирования русловых микроформ (гряд) [32, 264]. Сущность методики заключается в оценке вертикальных деформаций по зависимостям между размерами русловых микроформ и глубиной потока [4, 32]:

$$z_{lim} = z_{min} - h_{rb} - \Delta_{rb} - \delta_g; \quad (3.4.35)$$

$$\Delta_{rb} = 0,1 \cdot 1,3 \cdot (h_{r,5} - h_r), \quad (3.4.36)$$

где z_{lim} – минимальная отметка профиля предельного размыва русла, м (в системе высот); z_{min} – минимальная отметка дна в пределах излучины, м (в системе высот); где $h_{r,5}$ – глубина реки при уровне воды обеспеченностью 5 %, м; согласно [32], величина h_r (м) – глубина реки по данным изысканий, однако с учетом перемерзания рек ее целесообразно принимать по кривой $h_r = f(Q)$ для расчетной нормы стока; h_{rb} – высота сползающих гряд, определяемая по уравнению (3.4.22), м; Δ_{rb} – дополнительные деформации дна, обусловленные переформированием микроформ. Указанная методика пригодна при наличии грядового движения наносов. По этой причине не позволяет получить достоверный

прогноз вертикальных деформаций торфяного русла или русла с незначительным перемещением наносов в виде гряд. Среди недостатков методики также следует указать необходимость измерения параметров потока и русловых форм в период открытого русла, поскольку многие малые водотоки в зимний период могут перемерзнуть до дна [157, 309].

Ориентировочная оценка предельных горизонтальных деформаций русла (длины профиля максимального размыва L_{lim}) может быть выполнена согласно [264] в зависимости от максимальной ширины пояса руслоформирования B_{lim} . Для каждого типа руслового процесса установлена связь между шириной пояса руслоформирования B_{lim} и шириной русла реки между пойменными бровками B_{fr} . Значения B_{lim} и B_{fr} , осредненные по многим генетически однородным участкам (типам руслового процесса) многих рек и отклонение B_{lim} от среднего значения в виде среднего квадратического отклонения σ_{B^*} приведены в табл. 3.4.2.

Максимальное значение B_{lim} устанавливается как средняя ширина пояса руслоформирования для данного типа руслового процесса плюс среднее квадратическое отклонение в соответствии с табл. 3.4.2:

$$L_{lim} = B_{fr} \cdot \left(\frac{B_{lim}}{B_{fr}} + \sigma_{B^*} \right). \quad (3.4.37)$$

Соотношение лево- и правобережных частей профиля максимального размыва принимается пропорционально соотношению лево- и правобережных частей долины [264]. Указанная методика позволяет получить в целом достоверные данные о предельно возможных горизонтальных деформациях, но без привязки ко времени (что ограничивает возможность долгосрочного прогноза).

Таблица 3.4.2

Соотношение ширины пояса руслоформирования B_{lim} и ширины русла реки между пойменными бровками B_{fr} при разных типах руслового процесса [264]

Тип руслового процесса	B_{lim}/B_{fr}	σ_{B^*}
Свободное меандрирование	8,86	2,53
Незавершенное меандрирование	5,67	1,35
Пойменная многорукавность	5,58	1,85
Ограниченное меандрирование	3,41	0,71
Побочневый тип	1,18	0,24
Русловая многорукавность	1,01	0,05

Известна также методика прогнозирования горизонтальных деформаций речных русел при отсутствии данных наблюдений на основе данных о деформациях русла реки-аналога [32, 264]. Она основана на пере-

носе данных, полученных по вышеназванным методам для реки-аналога на исследуемую реку с учетом погрешностей прогноза:

$$L_b = k_{dc} \cdot C_{\max} \cdot T_f \cdot \frac{h_{r,\max} - h_{r,a}}{h_{r,la} - h_{r,a}}, \quad (3.4.38)$$

где L_b – смещение бровки берега; k_{dc} – коэффициент, принимаемый в зависимости от угла разворота излучины; C_{\max} – наибольшая скорость плановых деформаций на реке-аналоге; T_f – период прогноза; $h_{r,\max}$, $h_{r,la}$, $h_{r,a}$ – максимальная глубина в створе и в пределах излучины, средняя глубина двух смежных перекатов. К недостаткам методики можно отнести отсутствие регламента подбора аналога. Могут также использоваться и другие подходы, в основу которых, как правило, положены критериальные соотношения диаметра наносов, глубины потока, уклона водной поверхности и иных параметров [157, 183, 207, 228].

В целом, общие недостатки существующих методов, имеющие отношение к задаче прогноза деформаций речных русел, следующие: 1) у большинства существующих способов необходима разновременная русловая съемка с интервалом не менее пяти лет на исследуемой реке или на реке-аналоге; 2) при проектировании объектов строительства на труднодоступных территориях таежной, лесотундровой и тундровой зон, а также горных районов данные русловых съемок в разные годы (особенно с интервалом не менее пяти лет) обычно отсутствуют или не удовлетворяют требованиям по точности, установленным в [32]; 3) трудоемкость инженерных изысканий и сложность или невозможность получения расчетных параметров в сжатые сроки, определяемые для изысканий и проектирования; 4) высокая степень неопределенности при измерении или расчете параметров, используемых в косвенных способах оценки и прогноза плановых (горизонтальных) деформаций речных русел; 5) существенные отклонения расчетных значений русловых деформаций от измеренных значений, если способ применяется в другом районе при условиях, отличающихся от тех, которые учитывались при разработке того или иного способа (например, при наличии торфяных берегов) [309].

С учетом этого в Томском политехническом университете разработан способ оценки русловых деформаций (и горизонтальных, и вертикальных), основанный на определении параметров потока, при которых наблюдаются наибольшие деформации русла (в рамках концепции руслоформирующих расходов [274]). Реализация способа заключается в выборе данных многолетних наблюдений, соответствующих фиксированному уровню воды H_i , задаваемому с каким-либо постоянным приращением от наблюденного (или расчётного) минимума H_{\min} ($H_i = H_{\min} + i \cdot DH, i = 1, \dots, m$) до соот-

ветствующего максимума. Для каждой выборки данных, сформированной при фиксированном уровне воды, определяется некоторая статистика для ширины и максимальной глубины потока, а потом среди всех выборок выбираются максимальные их значения (рис. 3.4.1). Эти статистики и рассматриваются как характеристики деформации русла: $S(B)$ – для ширины потока; $S(h)$ – для его максимальной глубины. Затем выполняется расчёт предельно возможного вертикального размыва русла Z_{lim} и максимально возможных горизонтальных русловых деформаций ΔB_T за T_f лет рек по формулам:

$$Z_{lim} = Z_{min} - S(h) - \delta_h; \quad (3.4.39)$$

$$\Delta B_T = T_f \cdot (S(B) + \delta_B), \quad (3.4.40)$$

где Z_{min} – минимальная отметка дна; δ_B и δ_h – погрешности измерения ширины и глубины потока. Для неизученных рек статистики $S(B)$ и $S(h)$ принимаются по данным рек-аналогов с примерно такими же условиями формирования водного стока, морфометрическими характеристиками и преобладающим типом руслового процесса согласно [207].

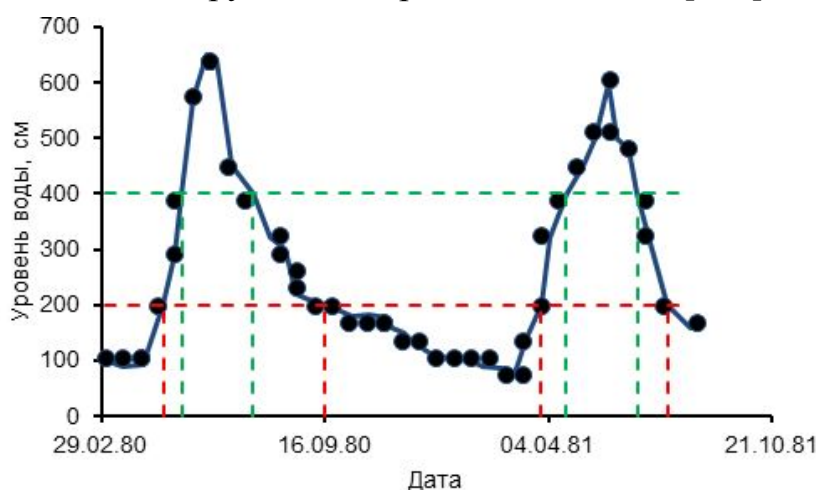


Рис. 3.4.1. Схема выделения данных: 1) каждому уровню соответствует ряд дат; 2) для каждой даты выбирается ширина и максимальная глубина потока; 3) для каждого уровня составляется выборка; 4) для каждой выборки определяется статистика [309]

Первоначально в качестве статистик использовалась максимальная амплитуда (разность между максимумом и минимумом) колебаний ширины B_r и максимальной глубины $h_{r, max}$ [157, 228, 309], что имеет очевидный физический смысл. Однако использование амплитуды сопряжено со значительными случайными колебаниями от выборки к выборке. Поэтому в качестве характеристик деформаций в [207] была рассмотрена не амплитуда, а стандартное отклонение случайных величин B_r ,

и $h_{r, \max}$ в предположении, что: 1) изменение отметок русла в заданном направлении при постоянном уровне воды можно рассматривать как одномерное случайное блуждание; 2) координата поверхности русла – как нормально распределённую случайную величину с дисперсией σ^2 , пропорциональной времени t ; 3) стандартное отклонение σ – как модуль скорости деформации русла $|v|$; 4) верхний предел интервальной оценки σ_{\max} – как максимальная скорость деформации v_{\max} – характеристика, имеющая наиболее важное значение для проектирования:

$$|v| = \sqrt{\sigma^2 + \varepsilon^2}, \quad (3.4.41)$$

где ε – случайная величина, связанная со случайными ошибками измерения, а также флуктуациями русловых микроформ и состояния грунтов дна и берегов.

Апробация методики была выполнена по данным русловых съёмок на участке реки Чулым – одного из крупных притоков реки Обь с площадью водосбора 134000 км² и нормой водного стока у с. Батурино (площадь водосбора 131000 км²) 782 м³/с. Русло реки у г. Асино сложено песчаными и глинисто-песчаными отложениями, подвержено горизонтальным (плановым) деформациям до 20 м/год и более. На исследуемом участке реки построены 29 профилей (через 100 м по фарватеру) и определены модули измеренных средних $|v_a|$ и максимальных $|v_{\max}|$ годовых скоростей смещения, амплитуды A и стандартные отклонения σ положения левого и правого берегов, а также отметок дна в двух створах [207]. Анализ полученных данных позволил сделать вывод о допустимости применения рассматриваемого подхода при уровне значимости 5 % (рис. 3.4.2).

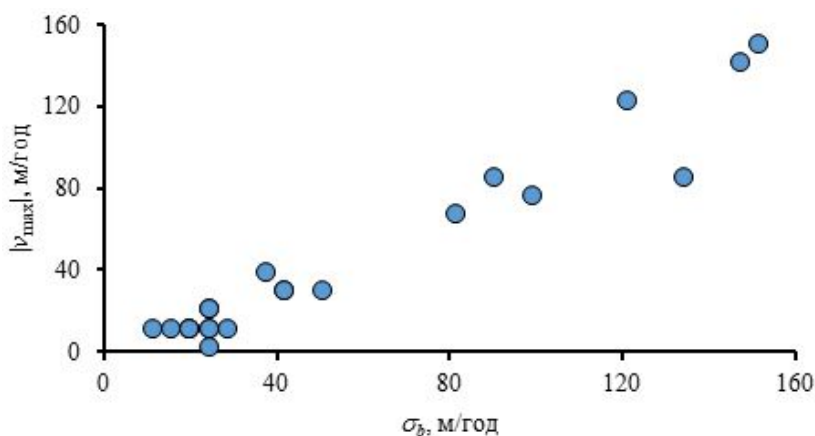


Рис. 3.4.2. Зависимость между верхним пределом стандартного отклонения σ_b (при уровне значимости 5 %) и модулем максимальной годовой скорости размыва $|v_{\max}|$ правого берега реки Чулым на расчетном участке; $|v_{\max}| = (0,95 \pm 0,02) \cdot \sigma_b$, квадрат корреляционного отношения $R^2 = 0,97$ [207]

Таким образом, предложенный способ анализа данных об измеренных расходах воды на постах режимных гидрологических наблюдений позволяет достоверно определить горизонтальные и вертикальные деформации речных русел.

3.5. Загрязнение водных объектов и определение допустимых сбросов загрязняющих веществ

Ключевой подход к оценке природно-антропогенных изменений эколого-геохимического состояния водных объектов заключается в составлении и анализе уравнений геохимического баланса как непосредственно исследуемых водного объектов, так и их водосборов. Основные положения этого анализа изложены в разд. 2.2. Здесь лишь отметим два момента. Во-первых, антропогенная трансформация гидрохимического стока и эколого-геохимического состояния водных объектов обычно проявляется, прежде всего, в поступлении в речную сеть высокотоксичных техногенных органических микропримесей, увеличении выноса углеводородов, легкоокисляемых органических веществ по БПК₅, неорганических соединений азота, микроорганизмов и связана, прежде всего, с загрязнением атмосферного воздуха и неорганизованным поступлением веществ с урбанизированных территорий. В то же время любое внешнее воздействие на химический состав вод средних и больших водных объектов, включая сбросы стоков, является нелинейным, а резкое и относительно долгосрочное увеличение концентрации какого-либо вещества в воде возможно только при существенном одновременном увеличении концентраций большинства основных компонентов химического состава вод, что, как правило, возможно только на локальных участках или в течение непродолжительного времени [201, 204].

Во-вторых, одним из основных методов прогноза природно-антропогенных изменений эколого-геохимического состояния водных объектов и определения допустимых воздействий на него является математическое моделирование, причем обычно с использованием уравнения:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{v} \cdot \text{grad } C = \text{div}(D \cdot \text{grad } C) + f(C), \quad (3.5.1)$$

где t – координата времени; C – концентрация вещества, D – коэффициент гидродисперсии, м²/с; \vec{v} – вектор скорости, м/с; $f(C)$ – функция источника вещества, г/(с·м³).

Решение (3.5.1) – задача исключительно сложная, в связи с чем в результате ряда упрощений базовой модели обычно рассматриваются четыре вида относительно более простых моделей [98, 99]: 1) транс-

портные (модели преимущественно переноса «консервативных» примесей с анализом преимущественно адвективной компоненты: $\vec{v} \cdot \text{grad } C = 0$); 2) геомиграционные (модели переноса и физико-химических взаимодействий вида (3.5.1) обычно с упрощенными функциями $f(C) = -k \cdot C$, $D \approx \text{const}$ и некоторых других допущениях; в ряде случаев игнорируется или адвективная, или диффузная компоненты); 3) термодинамические (рассматриваются, прежде всего, химические взаимодействия без учета времени в виде модели $f(C) = 0$ на основе закона действующих масс для обратимых реакций); 4) кинетические (модели химических взаимодействий с учетом времени и обычно в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений вида: $\frac{dC}{dt} = f(C)$).

Однако использование и таких моделей связано со значительными трудностями. Поэтому в практике гидрохимических расчетов на территории Российской Федерации для оценки антропогенных изменений (например, в результате сброса загрязняющих веществ) используют простейшие модели вида:

$$G_{lim} = C_{w,lim} \cdot q_w = (C_b + n_s \cdot (\text{ПДК} - C_b)) \cdot q_w; \quad (3.5.2)$$

$$n_s = n_m \cdot n_0, \quad (3.5.3)$$

где G_{lim} – допустимый расход сточных вод, содержащих загрязняющее вещество, г/с; q_w – расход сточных вод, м³/с; n_s , n_m , n_0 – кратность общего, основного и начального разбавления, соответственно; C_b – фоновая концентрация (мг/дм³), оцениваемая согласно [178]; C_{lim} – допустимая концентрация ЗВ в воде водного объекта, мг/дм³; ПДК – предельно допустимая концентрация вещества, мг/дм³. Очевидно, что при ПДК < C_b возникает необходимость модификации уравнения (3.5.1) и обоснования действий по доказательству природного происхождения вещества в водном объекте. С учетом этого в ТПУ был выполнен анализ многочисленных публикаций в области гидрохимического моделирования [16, 82, 84, 125, 267, 271, 287, 299] и опыта исследований рек Российской Федерации, Вьетнама и Китая [231, 305].

По результатам этого анализа сформулированы основные черты и допущения модели трансформации химического состава речных вод с учетом их взаимодействия с донными отложениями [205, 219, 231]: 1) основа модели – стационарное уравнение (3.5.4), описывающее гидродисперсию и адвективный перенос, отклонения от равновесия, обусловленные преимущественно внутриводными процессами, и взаимодействия с донными отложениями, связанные с процессами осаждения – растворе-

ния и сорбции–десорбции; 2) стационарность уравнения (3.5.4) определяется целесообразностью анализа трансформации химического состава вод при наилучших гидрологических условиях, наблюдаемых во многих случаях при минимальном водном стоке в течение относительно продолжительного времени; 3) изменение концентрации вещества в речных водах пропорционально отклонению фактической концентрации C от равновесной C_p , причем это отклонение пропорционально флуктуациям модуля водного стока $M = Q / F_b$, где Q – расход воды, м³/с; F_b – площадь водосбора, км²; 4) концентрация вещества C_x в створе x с учетом разбавления сточных вод с концентрацией C_w речными водами с концентрацией C_b соответствует аналитическому решению (3.5.5) с удельной скоростью изменения концентрации вещества в речных водах k_r (2.2.4.6); 5) максимально возможная концентрация вещества в донных отложениях S_m зависит от гранулометрического, минерального и химического состава донных отложений (через величину S_{m0}) и pH речных вод (2.4.12); 6) решением (2.2.4.5) при отсутствии внешних воздействий является уравнение (2.2.4.10), которое при ряде допущений сводится к уравнению сорбции Лэнгмюра; 7) итоговое уравнение для оценки допустимой концентрации загрязняющего вещества в сточных водах $C_{w, lim}$ с учетом (3.5.5) приобретает вид (3.5.6):

$$v \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \approx k_r \cdot (C_e - C); \quad (3.5.4)$$

$$C_x = C_e + \left(C_b + \frac{C_w - C_b}{n_s} - C_e \right) \cdot \exp(-k_r \cdot \tau_r); \quad (3.5.5)$$

$$C_{w, lim} = ((\text{ПДК} - C_e) \cdot \exp(k_r \cdot \tau_r) + C_e - C_b) \cdot n_s + C_b, \quad (3.5.6)$$

где v – скорость переноса вдоль оси x , м/с; τ_r – время добегаания водных масс на участке от источника воздействия до контрольного створа, с⁻¹; k_r – коэффициент, определяемый по уравнению (2.2.4.6); C_e – концентрация, определяемая по уравнению (2.2.4.10), г/м³; C_b – фоновая концентрация, г/м³; C_x – концентрация исследуемого вещества в воде водного объекта на расстоянии x от источника загрязнения, г/м³; $C_{w, lim}$ – допустимая концентрация вещества в контрольном створе, г/м³ [205, 231].

Подобный подход к расчету допустимых сбросов загрязняющих веществ с учетом взаимодействия вод с горными породами может быть применен не только для рек, но и озер и болот. Вопросы теории оценки химического воздействия на подземные воды детально рассмотрены в

работах С.Р. Крайнова, А.В. Лехова, В.А. Мироненко, В.Г. Румынина, Б.Н. Рыжденко, В.М. Швеца, В.М. Шестакова и ряда других авторов [17, 100, 113, 156, 200, 282], а способы учета загрязнения при различных видах хозяйственной деятельности – в [127, 133, 168, 170, 182, 254, 261].

Контроль достоверности математического моделирования геохимических процессов в водных объектах осуществляется путем анализа макрокомпонентного состава, суть которого в следующем: 1) большинство используемых водных объектов – с пресными водами (минерализация до 1 г/дм³); 2) для незагрязненных пресных вод содержание ионов СГ обычно не превышает 30 мг/дм³, а сами воды – часто гидрокарбонатные кальциевые; 3) изменение химического типа используемых вод и увеличение относительного и абсолютного содержания ионов СГ обычно свидетельствует о существенном загрязнении водного объекта [201, 223].

4. СОДЕРЖАНИЕ ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РЕШЕНИЙ

4.1. Основные принципы и подходы

Как было указано во введении, гидроэкологическое обоснование водохозяйственных решений в рамках градостроительной деятельности – это комплекс действий по созданию системы взаимосвязанных и взаимосогласованных документов по территориальному планированию, градостроительному зонированию, планировке территорий, архитектурно-строительному проектированию, строительству, эксплуатации, реконструкции и сносу зданий и сооружений в пределах водосбора и водных объектов, направленных на сопряжение оценки жизненного цикла водосборных геосистем и жизненных циклов зданий и сооружений на их территории с целью *обеспечения прав человека на благоприятные окружающую среду и условия жизнедеятельности* – базового принципа природоохранного законодательства. Соответственно, этот принцип может и должен рассматриваться как первый принцип гидроэкологического обоснования водохозяйственных решений.

Осуществление указанного выше принципа предполагает комплекс действий, направленных, согласно [70], на *обеспечение комплексного и устойчивого развития территории* (второй принцип гидроэкологического обоснования градостроительной деятельности), вплоть до всей планеты, и *обеспечение сбалансированного учета экологических, экономических, социальных и иных факторов при осуществлении градостроительной деятельности* (третий принцип).

В целом, реализация изложенных выше принципов должна предусматривать максимально возможное в конкретных социально-экономических условиях: а) сохранение природных объектов (естественных экологических систем, природных ландшафтов и составляющих их элементов, сохранивших свои природные свойства [150]); б) трансформацию антропогенных объектов (созданных человеком для обеспечения его социальных потребностей и не обладающих свойствами природных объектов [150]) в природно-антропогенные (природные объекты, измененные в результате хозяйственной и иной деятельности или объекты, созданные человеком, но обладающие свойствами природного объекта и имеющие рекреационное и защитное значение), подчиняющиеся общим природным закономерностям, и, как правило, более устойчивые к внешним воздействиям и требующие значительно меньшего внимания для поддержания в требуемом состоянии [214].

Оба аспекта формируют единый (*первый*) подход к гидроэкологическому обоснованию градостроительной деятельности, которая должна осуществляться в направлении трансформации антропогенных объектов в природно-антропогенные, а природно-антропогенных – в природные. При этом сущность охраны природной среды сводится не к фиксации некоего неподвижного состояния, а к обеспечению динамического равновесия с учётом свойств геосистем. Кроме того, нельзя забывать, что свойства природных объектов не обязательно обладают наивысшим качеством по сравнению с природно-антропогенными и антропогенными [214].

Также следует отметить, что методы реализации первого подхода, в частности, и охраны окружающей среды и использования природных ресурсов, в целом, по соотношению времени воздействия и ожидаемых результатов можно условно разделить на [214]:

- 1) методы предупреждения экологических проблем, в том числе:
 - 1.1) внедрение ресурсосберегающих технологий (реализация стратегии использования наилучших доступных технологий);
 - 1.2) управление инвестиционным проектом в области использования и охраны водных ресурсов со стороны (а) природопользователя, имеющего права и обязанности в части охраны окружающей среды, и (б) государства как института, разрабатывающего при участии граждан требования к охране окружающей среды и контролирующего их выполнение;
 - 1.3) экологическое просвещение;
 - 1.4) инженерные методы создания пограничных и охранных систем, включая:
 - 1.4.1) водоохранные зоны и прибрежные защитные полосы вокруг поверхностных водных объектов;
 - 1.4.2) санитарно-защитные зоны источников водоснабжения;
 - 1.4.3) особо охраняемые природные территории;
- 2) методы ликвидации или смягчения последствия экологических проблем, включая:
 - 2.1) мелиорацию;
 - 2.2) рекультивацию;
 - 2.3) комплексные геоэкологические работы на водных объектах;
 - 2.4) очистку сточных вод;
 - 2.5) уменьшение выбросов веществ в атмосферу;
 - 2.6) обращение отходов.

Второй подход вытекает из свойств геосистем и заключается в том, что *в общем случае водосбор и водный объект в его составе – открытые динамические системы со многими входами и многими выходами, а гидрологические и геохимические процессы – стохастические нестаци-*

онарные. Водосбор с одним выходом (замыкающий створ реки) – часто встречаемый, но все же частный случай.

Третий подход [214] является следствием всей совокупности нормативно-правовых норм в области комплексного использования природных ресурсов и охраны окружающей среды ([29, 70, 85, 112, 146–150]) и *заключается в сборе и анализе информации о состоянии водосборов, водных объектов в их составе, включая оценивание входных и выходных потоков, потоков между компонентами водосборов, а также потенциальных воздействий на окружающую среду со стороны производственной системы на всех стадиях жизненного цикла объектов градостроительной деятельности.*

Практическая реализация указанных подходов в градостроительной деятельности на территории Российской Федерации до последнего времени в общих чертах сводилась к проведению инженерных изысканий (основных и специальных видов), на основе которых разрабатывалась проектная документация, ее государственная и общественная экспертиза, выполнялось строительство, сопровождающееся мониторингом окружающей среды и объекта капитального строительства. По завершению строительства начинался этап эксплуатации, включающий в себя мониторинг, проведение при необходимости ремонта (по результатам мониторинга), ежегодную отчетность о сбросах и выбросах загрязняющих веществ и обращении с отходами, платежи за использование природных ресурсов и воздействие на окружающую среду, обновление нормативов допустимого воздействия на окружающую среду и принятие решений о продолжении эксплуатации, ликвидации или реконструкции объектов.

Со второй половины 2010-х гг. в Российской Федерации началось внедрение в экономику концепции использования наилучших доступных технологий (НДТ), в рамках которых предполагается уточнение указанной выше схемы и выполнение следующих мероприятий [150]:

1) на этапе, предшествующем архитектурно-строительному проектированию со стороны государственных и муниципальных органов (1.1) подготавливается стратегия и тактика использования территорий в виде документов по территориальному планированию, градостроительному зонированию, планировке территорий [70], обеспечивается подготовка и утверждение информационных технических справочников (ИТС) НДТ [169], а со стороны природопользователя проводятся: 1.2) формулирование концепции планируемой деятельности на основе предварительного анализа НДТ и определения (предварительного) категории объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду (НВОС); 1.3) согласование концепции планируемой деятельности с указанными

документами с учетом схем комплексного использования и охраны водных ресурсов и экологических программ;

2) на этапе инженерных изысканий и архитектурно-строительного проектирования осуществляется получение необходимой информации в соответствии с требованиями [245–248, 252, 254–256, 258, 259, 265] и определение категории объектов (I – объекты, оказывающие значительное НВОС и относящиеся к областям применения НДТ; II – объекты, оказывающие умеренное НВОС; III – объекты, оказывающие незначительное НВОС; IV – объекты, оказывающие минимальное НВОС [101]); в случае фиксации фактического и возможного негативного воздействия на окружающую среду, согласно [61], проектирование и последующие строительство и реконструкция зданий и сооружений должны осуществляться с использованием ИТС по НДТ с целью оценки необходимости модернизации (для действующих объектов), определения основных требований к новому объекту и оценки возможного влияния на окружающую среду; при разработке проектной и рабочей документации учитывается, что в зависимости от категории НВОС необходима подготовка следующих документов: для I категории – комплексного экологического решения (КЭР) – документа, который выдается уполномоченным федеральным органом исполнительной власти природопользователю и содержит обязательные для выполнения природоохранные требования, нормативы допустимых выбросов (НДВ) и сбросов (НДС) загрязняющих веществ (ЗВ), нормативы размещения отходов и лимитов на их размещение, технологические нормативы, программу повышения экологической эффективности, программу производственного экологического контроля (ПЭК), обоснование санитарно-защитной зоны (СЗО), расчет платы за НВОС; для II категория – КЭР (возможно при применении НДТ), декларации о воздействии на окружающую среду, НДВ и НДС, нормативов размещения отходов и лимитов на их размещение, плана мероприятий по охране окружающей среды, программы ПЭК, обоснования СЗО, расчета платы за НВОС; для III категории – НДВ и НДС (при наличии ЗВ I и II классов опасности), плана мероприятий по охране окружающей среды, отчетности о выбросах ЗВ в атмосферный воздух, отчетности об образовании, использовании, обезвреживании и размещении отходов, программы ПЭК, обоснования СЗО, расчета платы за НВОС; для IV категории – обоснования СЗО; этап завершается прохождением государственной строительной и экологической экспертизы с учетом категории НВОС;

3) на этапе строительства проводится производственный экологический контроль, включающий в себя производственный экологический мониторинг (ПЭМ), и продолжается подготовка КЭР для объектов I ка-

тегории НВОС (а также II категории при наличии ИТС НДТ), включающего в себя: технологические нормативы; НДС и НДС высокотоксичных веществ, нормативы допустимых физических воздействий; нормативы образования отходов и лимиты на их размещение; требования к обращению с отходами производства и потребления; согласованную программу ПЭК (включая создание системы автоматического контроля); срок действия КЭР; этап строительства завершается приемом объекта в эксплуатацию, причем заявка на получение КЭР подается не позднее чем за два месяца до ввода в эксплуатацию нового или реконструированного объекта, оказывающего НВОС;

4) на этапе эксплуатации проводится комплекс мероприятий по поддержанию состояния эксплуатируемого объекта в соответствии с проектной документацией и действующим законодательством, включая получение декларации о безопасности гидротехнических сооружений (при их наличии) и КЭР, которое выдается на семь лет и продлевается на тот же срок при условии: а) соблюдения установленных технологических нормативов, НДС и НДС высокотоксичных веществ, лимитов на размещение отходов производства и потребления; б) отсутствия задолженности по плате за негативное воздействие на окружающую среду; в) своевременного представления отчетности о выполнении программы ПЭК и уведомлений об авариях; выполнения программы повышения экологической эффективности; при этом информация о состоянии эксплуатируемого объекта является результатом ПЭК и инвентаризации источников НВОС; на основе результатов ПЭК и с учетом материалов государственного контроля и надзора, государственного экологического мониторинга проводится эколого-экономический анализ деятельности эксплуатируемого объекта (в части водоохранных мероприятий – согласно [64]) и принимается решение о его дальнейшей эксплуатации, модернизации, реконструкции или ликвидации (в последних двух случаях речь идет о возврате на этап 1 рассматриваемого процесса).

Рассмотренный алгоритм содержит перечень мероприятий по обеспечению благоприятной окружающей среды, более взаимосвязанных по сравнению с аналогичными мероприятиями в 2000-е гг. и предыдущий период. Тем не менее, сохраняется актуальность более тесного сопряжения жизненных циклов водосборных геосистем и расположенных на их территории инженерных объектов на основе изложенных выше принципов и подходов с учетом специфики природных условий и хозяйственной деятельности.

4.2. Алгоритм гидроэкологического обоснования

В соответствии с указанными в разд. 4.1 подходами, на стадии инженерных изысканий должна быть получена необходимая для разработки проекта информация о состоянии водных объектов и их водосборов, которая затем обновляется и дополняется на стадиях строительства, эксплуатации и реконструкции, либо ликвидации. Эта информация почти всегда включает в себя сведения об опасных гидрометеорологических и геологических процессах, методика получения которых частично изложена в главе 3, а также результаты расчета водохозяйственного баланса (разд. 2.1), причем при разработке как проектной документации (для строительства напорных гидротехнических сооружений, водозаборных и очистных сооружений), так и нормативов допустимого воздействия на водные объекты. Реже используются результаты расчетов геохимического баланса (разд. 2.3). Точнее, при составлении ежегодной статистической отчетности предприятий-водопользователей и обновлении нормативов допустимых сбросов загрязняющих веществ проводится накопление и анализ части сведений о некоторых элементах геохимического баланса без анализа всей совокупности геохимических данных.

Даже при наличии соответствующей информации очень часто не учитываются следующие обстоятельства:

1) гидрометеорологические и инженерно-геологические процессы в общем случае – нестационарные, а методы оценки параметров этих процессов основаны на допущении их стационарности, причем со временем меняется не только водный сток, но и границы водосборов;

2) оценка предельных состояний (состояний, при превышении параметров которого эксплуатация объекта недопустима, затруднена или нецелесообразна [55, 237]), принятая в настоящее время в градостроительной деятельности, не всегда соотносится с физическим смыслом исследуемых процессов с учетом п. 1; пример – расход воды реки Катунь (Горный Алтай, река Обь формируется при слиянии рек Катунь и Бия) обеспеченностью 0,01 % формально может наблюдаться в последние 10000 лет, однако в конце последнего оледенения расходы воды были существенно больше современных [196] даже с учетом разных точек зрения о характере таяния ледников [156];

3) изменяющиеся во времени границы водных объектов и их водосборов в общем случае представляют собой не поверхности, а пространства (на карте – не линия, а полоса); с точки зрения оценки предельных состояний необходимо учитывать такие значения границ, при которых возможно наиболее негативное проявление опасных процессов, иными словами – нужно определить два значения площади водосбора и ис-

пользовать для расчета максимальных расходов воды большее значение, а для расчета минимальных расходов – меньшее;

4) при нарушении однородности гидрологических рядов в результате хозяйственной деятельности (например, вследствие регулирования стока) определение расчетной обеспеченности как средневзвешенного значения – не самая безопасная стратегия, поскольку рано или поздно встанет вопрос о ликвидации или реконструкции гидротехнических сооружений, причем чем позже – тем тяжелее возможные негативные последствия;

5) хозяйственная деятельность во многих случаях усиливает опасные природные процессы – либо абсолютные значения их характеристик, либо их дисперсию; например, строительство дорог на заболоченных территориях вследствие недостаточной количества водопропускных сооружений, их засорения и образования наледей может приводить к дополнительному накоплению влаги вплоть до заболачивания; соответственно, если на исследуемой территории отмечен опасный природный процесс, то при проектировании целесообразно учитывать усиление негативных проявлений;

6) объективно оценить опасные природные и антропогенные процессы и предусмотреть эффективные решения по предотвращению их негативного влияния можно только при многоуровневом рассмотрении проблемы (в пространстве – не менее чем в масштабе региона, во времени – в геологическом масштабе);

7) все стадии жизненного цикла инженерных объектов должны включать сравнительный анализ изменений структуры (границ) водных объектов и их водосборов и геобаланса при четком понимании «идеальных» и требуемых параметров на данный момент времени; решения о начале проектирования и строительства, вводе в эксплуатацию, реконструкции или ликвидации инженерных объектов принимаются с учетом прогноза изменения структуры (границ) водных объектов и их водосборов, элементов геобаланса и результатов классификации водных объектов;

8) любая хозяйственная деятельность и все природные процессы сопряжены как с положительными, так и негативными последствиями; значение имеет, прежде всего, адекватная реакция на эти последствия; как правило, целесообразны не мероприятия в рамках преобладания концепций либо безусловного изменения природы для человека (цели таких действий все время меняются, иногда в противоположном направлении), либо приоритета сохранения окружающей среды в неизменном состоянии (так не бывает – все всегда изменяется), а некие компромиссные решения, которые должны быть разработаны в процессе гидроэкологического обоснования и реализованы в рамках всех видов градостроительной деятельности.

С учетом приведенных выше обстоятельств и требований [159, 160, 255] целесообразно придерживаться следующего алгоритма гидроэкологического обоснования градостроительной деятельности:

1) стадии жизненного цикла инженерных объектов до их строительства (оценочные работы при технико-экономическом обосновании идеи и инженерные изыскания для территориального планирования, градостроительного зонирования, планировки территорий и архитектурно-строительного проектирования):

1.1) определение контура региона исследований, который должен включать исследуемый водосбор в максимально возможных его границах и, как минимум, контуры всех прилегающих водосборов;

1.2) выявление природных зон и крупных природно-территориальных комплексов (ПТК) в регионе исследования; выполняется определение характерных границ гидрологических сезонов в регионе исследований;

1.3) выявление закономерностей и особенностей природных процессов на исследуемой территории на основе:

1.3.1) анализа геобаланса в прошлом, настоящем и будущем (не менее сроков планируемой эксплуатации инженерных объектов);

1.3.2) классификаций водных объектов (гидрологических, геохимических и т. д.); выявленные характерные и специфические природные процессы целесообразно добавить к перечню исследуемых опасных процессов;

1.4) выявление специфики существующей хозяйственной деятельности (с точки зрения ожидаемых изменений элементов геобаланса водосбора) и характерных загрязняющих веществ в районе исследования;

1.5) анализ требований к проектируемому объекту, включая анализ НДТ и возможных последствий ее внедрения с учетом требований КЭР, СЗО, ВЗ и ПЗП и т. д.; определение перечня параметров, необходимых для оценки нагрузок и воздействий на проектируемый объект [250, 257] с учетом обеспечения надежности и безопасности (надежность в общем случае – это способность выполнять требуемые функции в течение периода эксплуатации [55]), а надежность гидротехнического сооружения (ГТС) – интегральное свойство гидротехнического сооружения, характеризующее его способность выполнять требуемые функции при установленных режимах и условиях эксплуатации, технического обслуживания и ремонта в течение заданного периода времени, сохраняя при этом в установленных пределах значения всех параметров, определяющих эти функции; безопасность ГТС – свойство сооружения, определяющее его защищенность от внутренних и внешних угроз или опасностей и препятствующее возникновению на объекте источника

техногенной опасности для жизни, здоровья и законных интересов людей, состояния окружающей среды, хозяйственных объектов и собственности [243]); сопоставление требований на период проектирования и завершения стандартных сроков эксплуатации с последующим уточнением класса ответственности проектируемых сооружений; составление или уточнение «идеального» уравнения геобаланса водосбора;

1.6) оценка изученности района исследования; принятие решения о возможных методах расчета, характере и масштабах проведения полевых работ;

1.7) выбор аналогов (даже при достаточной изученности); при выборе аналогов используются предварительные результаты классификации по гидрологическому режиму, источникам водного питания и характеру сосредоточения воды в рельефе или недрах, например, классификации, изложенные в разделе 2.2; оценка характеристик исследуемого водного объекта, его водосбора и аналогов; площадь и границы водосбора, ширина речных долин, пойм и иные параметры в общем случае определяются не как точечные, а интервальные оценки (из измеренных или расчетных значений с учетом погрешности определения при заданном уровне значимости); для расчетов характеристик опасных процессов целесообразно использовать такие значения параметров, при которых наблюдаются наибольшие негативные последствия;

1.8) полевые работы по уточнению первоначально принятых характеристик водного объекта и его водосбора, выявлению опасных процессов, получению данных о гидравлических характеристиках потоков, химическом составе вод и донных отложений и т. д.;

1.9) схематизация гидрогеологических условий и оценка фильтрационных свойств грунтов;

1.10) количественная оценка опасных процессов, которая, помимо обязательных нормативных требований по нагрузкам и воздействиям, должна включать расчет (даже в случае отсутствия таких требований в техническом задании и нормативных документах): максимальных уровней и расходов (объемов) воды обеспеченностью 1, 5, 10 %; среднемноголетнего годового водного стока, годового водного стока обеспеченностью 95 % и соответствующих им уровней воды; среднего уровня воды за безледоставный период; минимальных 30-суточных и срочных расходов воды и соответствующих им уровней воды обеспеченностью 99, 95 и 90 %; внутригодового распределения водного стока в много-, средне- и мало-водный периоды; обоснование типа руслового процесса на реках; кривую гранулометрического состава наносов, донных и береговых отложений; уровней подземных вод, соответствующих максимальным, средним и минимальным расчетным уровням поверхностных вод;

1.11) расчет месячного (сезонного) водохозяйственного (водного) баланса для условий нормы стока, годового стока обеспеченностью 5 и 95%; классификация исследуемого водного объекта по гидрологическому режиму, источникам водного питания, характеру сосредоточения в формах рельефа и недрах;

1.12) расчет месячного (сезонного) геохимического баланса для условий нормы стока, годового стока обеспеченностью 5 и 95%; классификация исследуемого водного объекта по минерализации, рН, химическому составу вод; выделение природной, антропогенной и природно-антропогенной составляющих веществ; уточнение перечня исследуемых веществ;

1.13) оценка гидравлических условий водного объекта и коэффициентов гидродисперсии исследуемых веществ в водной среде для условий минимального среднемесячного расхода воды в год со средним стоком, стоком обеспеченностью 5 и 95%;

1.14) расчет разбавления сточных вод и оценка допустимого сброса исследуемых загрязняющих веществ;

1.15) определение границ водных объектов, водоохраных зон, прибрежных защитных полос, санитарно-защитных зон, зон затопления и подтопления с учетом результатов полевых работ;

1.16) уточнение классификации водных объектов;

1.17) оценка (участие в оценке или предварительная оценка в составе инженерных изысканий) предельных состояний проектируемого инженерного объекта;

1.18) оценка соответствия характеристик проектируемой хозяйственной деятельности требованиям природоохранного законодательства и требованиям безопасности в чрезвычайных ситуациях;

1.19) сравнительный анализ элементов «идеального» (с учетом проектных функций инженерных объектов и хозяйственной деятельности в районе исследования), фактического и ожидаемого геобаланса по каждому из альтернативных вариантов решений о планируемой хозяйственной деятельности; сравнительный анализ результатов классификации водного объекта до и после строительства;

1.20) на основе результатов оценки опасных процессов, включая негативное антропогенное воздействие на водные объекты, сравнительного анализа элементов геобаланса и результатов классификации водных объектов намечаются мероприятия по ликвидации или смягчения последствий экологических проблем (мелиорация, рекультивация, комплексные геоэкологические работы на водных объектах, очистка сточных вод и т. д.); например, решение о целесообразности рекультивации нарушенных земель принимается, если в результате ее проведения ожи-

дается значимое восстановление элементов геохимического баланса водосбора или его участка [Савичев, Гусева, 2020];

1.21) подготовка проектной документации (в том числе: декларацию безопасности гидротехнических сооружений; проекты допустимых воздействий на водные объекты; программы мониторинга инженерных объектов и компонентов окружающей среды), проведение ее экспертизы и доработка по замечаниям, включая проведение при необходимости инженерных изысканий; проектируемые инженерные объекты должны максимально приближаться к свойствам природных объектов (с учетом закономерностей эволюции последних) без потери надежности и безопасности; критерием такого приближения являются результаты сравнительного анализа элементов геобаланса, классификации водных объектов до и после строительства инженерных объектов с учетом решения поставленных задач по снижению последствий или предотвращению опасных природных процессов или негативного антропогенного воздействия на водные объекты; например, решение о целесообразности строительства очистных сооружений принимается, если доля подверженных очистке стоков являются статистически значимой в геохимическом балансе водного объекта и его водосбора [219];

2) стадии жизненного цикла инженерных объектов от строительства до принятий решения о реконструкции или сносе:

2.1) мониторинг инженерных объектов с количественной оценкой параметров, характеризующих надежность и безопасность инженерных объектов с учетом проектной документации;

2.2) мониторинг компонентов окружающей среды (включая водные объекты) и гидротехнических сооружений с количественной оценкой параметров, характеризующих:

2.2.1) нагрузки и воздействия на инженерные объекты, предусмотренные проектом;

2.2.2) негативное воздействие вод на инженерные объекты, не предусмотренное проектом (положение границ водных объектов, затопление, подтопление, деформации берегов и дна водных объектов и иные процессы, возникающие или усиливающиеся при социально-экономическом развитии региона исследования);

2.2.3) негативное воздействие хозяйственной деятельности на водные объекты (оценка загрязнения и засорения водных объектов, истощение водных ресурсов);

2.3) сопряжение результатов мониторинга по пп. 2.1 и 2.2 с системой государственного экологического мониторинга; получение информации о хозяйственной деятельности и опасных гидрометеорологи-

ческих и геологических процессах в водосборе, в пределах которого расположены инженерные объекты;

2.4) выявление или переоценка пространственно-временных изменений состояния окружающей среды в пределах водосбора (границы водных объектов и водосборов, элементы геобаланса; классификация водных объектов) и долгосрочный прогноз его изменений;

2.5) переоценка природно-антропогенного фона, обновление нормативов допустимого воздействия на водные объекты и корректировка программ мониторинга;

2.6) расчет платы за использование водных ресурсов и воздействие на водные объекты;

2.7) переоценка (участие в переоценке) предельных состояний эксплуатируемого инженерного объекта; оценка соответствия характеристик осуществляемой хозяйственной деятельности актуальным НДТ, требованиям природоохранного законодательства и безопасности в чрезвычайных ситуациях; обновление деклараций безопасности гидротехнических сооружений и проведение их экспертизы;

2.8) сравнительный анализ элементов «идеального» (с учетом проектных функций инженерных объектов и хозяйственной деятельности в районе исследования), предыдущего, фактического и ожидаемого геобаланса и результатов классификации водных объектов;

2.9) принятие, согласование и утверждение решений по результатам мероприятий 2.4–2.8 о продолжении эксплуатации (включая ремонт), реконструкции или сносе инженерных объектов с учетом соотношения экономического эффекта функционирования инженерных объектов, затрат на обеспечение надежной и безопасной их эксплуатации и платежей за использование водных ресурсов и негативное воздействие на водные объекты;

2.10) информирование государственных органов и населения о принятых решениях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Градостроительная деятельность сопряжена с необходимостью решения существующих или предупреждения возможных водных проблем. Разнообразие и сложность этих проблем обуславливают целесообразность получения объективной картины функционирования водосборных геосистем как части более крупных природно-территориальных комплексов, в рамках которой оцениваются желательные (нейтральные) и нежелательные параметры «идеального» и фактического состояний водного объекта и его водосбора (структура, включая границы, и элементы геобаланса). В общем случае желательные параметры соответствуют природному состоянию геосистемы за исключением случаев проявления опасных природных процессов.

Проверка «идеального» и фактического состояний водосборных геосистем проводится на всех стадиях жизненного цикла инженерных объектов, расположенных в их пределах, – от прединвестиционного обоснования до ликвидации. Эффективность мероприятий в первом приближении можно считать удовлетворительной, если существенно снижается вероятность опасных процессов, происходит значимое изменение элементов геобаланса водосбора и результатов классификации водных объектов в требуемом направлении. Степень изменения вероятности опасных процессов регламентируется нормативными документами в зависимости от типа и вида инженерных объектов, а элементов геобаланса – средней погрешностью их инструментального и расчетного определения.

Все существующие классификации и методы определения элементов геобаланса имеют те или иные преимущества и недостатки, которые нужно учитывать при проведении гидроэкологического обоснования конкретных видов градостроительной деятельности в определенных природных и социально-экономических условиях. Обновление нормативно-методической базы в области инженерных изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации позволяет в определенной мере «облегчить» жизнь соответствующих специалистов, но не решает полностью эту проблему, что обуславливает необходимость непрерывных научных исследований состояния окружающей среды, ее изменений и функционирования природно-техногенных комплексов как компонентов ноосферы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-55-80015.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авакян А.Б. Водохранилища / А.Б. Авакян, В.П. Салтанкин, В.А. Шарапов. – Москва : Мысль, 1987. – 325 с.
2. Алекин О.А. Основы гидрохимии: учебное пособие / О.А. Алекин. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1970. – 444 с.
3. Алексеев В.А. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода – порода. В 2 томах. Том 1. Система вода – порода в земной коре: взаимодействие, кинетика, равновесие, моделирование / В.А. Алексеев, Б.Н. Рыженко, С.Л. Шварцев и др. ; отв. ред. С.Л. Шварцев. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2005. – 244 с.
4. Алексеевский Н.И. Гидрофизика / Н.И. Алексеевский. – Москва : Академия, 2006. – 176 с.
5. Безрукова Е.В. Растительность и климат высокогорной зоны Восточного Саяна в позднем голоцене / Е.В. Безрукова, К.Е. Вершинин, Л.А. Орлова, П.П. Летунова, С.М. Крапивина, В.В. Чепинога, А.В. Верховзина, Н.В. Дударева, А.А. Абзаева // Геология и геофизика. – 2003. – Т. 44, № 4. – С. 380–384.
6. Беркович К.М. Расчет стабильности речных русел в условиях антропогенной нагрузки / К.М. Беркович, Л.В. Злотина // География и природные ресурсы. – 2003. – № 2. – С. 117–123.
7. Беручашвили Н.Л. Геофизика ландшафта: учебное пособие. – Москва : Высшая школа, 1990. – 287 с.
8. Бефани Н.Ф. Упражнения и методические разработки по гидрологическим прогнозам : учебное пособие / Н.Ф. Бефани, Г.П. Калинин. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1983. – 390 с.
9. Богомолов Г.В. Гидрогеология с основами инженерной геологии: учебное пособие / Г.В. Богомолов. – Москва : Высшая школа, 1975. – 319 с.
10. Богословский Б.Б. Озероведение / Б.Б. Богословский. – Москва : Изд-во МГУ, 1960. – 335 с.
11. Богословский Б.Б. Основы гидрологии суши. Реки, озера, водохранилища : учебное пособие / Б.Б. Богословский. – Минск : Изд-во БГУ, 1974. – 214 с.
12. Болгов М.В. Современные проблемы оценки водных ресурсов и водообеспечения / М.В. Болгов, В.М. Мишон, Н.И. Сенцова. – Москва : Наука, 2005. – 318 с.
13. Болота Западной Сибири. Их строение и гидрологический режим / под ред. К.Е. Иванова и С.М. Новикова. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1976. – 447 с.

14. Боревский Б.В. Является ли меженный расход рек мерой питания подземных вод или общего подземного стока? / Б.В. Боревский, М.Л. Марков // Разведка и охрана недр. – 2014. – № 5. – С. 10–16.
15. Ботвинков В.М. Гидроэкология на внутренних водных путях : учебник / В.М. Ботвинков, В.В. Дегтярев, В.А. Седых. – Новосибирск: Сибирское соглашение, 2002. – 356 с.
16. Боценюк К.Л. О перспективах развития методов математического моделирования в исследованиях гидрохимических процессов / К.Л. Боценюк, В.Л. Павелко // Гидрохимические материалы. – 1984. – Т. 92. – С. 46–52.
17. Бочеввер, Ф.М. Основы гидрогеологических расчетов / Ф.М. Бочеввер, И.В. Гармонов, А.В. Лебедев, В.М. Шестаков. – Москва : Недра, 1965. – 306 с.
18. Будыко М.И. Тепловой баланс земной поверхности. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1956. – 256 с.
19. Бузин В.А. Ледовые процессы и явления на реках и водохранилищах. Методы математического моделирования и опыт их реализации для практических целей (обзор современного состояния проблемы) / В.А.Бузин, А.Т. Зиновьев. – Барнаул : Изд-во ООО «Пять плюс», 2009. – 168 с.
20. Бураков Д.А. Кривые добегания и расчет гидрографа весеннего половодья / Д.А. Бураков. – Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та, 1978. – 130 с.
21. Бураков Д.А. Технология оперативных прогнозов ежедневных расходов (уровней) воды на основе спутниковой информации о заснеженности (на примере р. Нижний Тунгуске) / Д.А. Бураков, Ю.В. Авдеева // Метеорология и гидрология. – 1996. – № 10. – С. 75–87.
22. Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование в гидрологии : учебное пособие / Ю.Б. Виноградов, Т.А. Виноградова. – Москва : Академия, 2010. – 304 с.
23. Виссмен мл. У. Введение в гидрологию / У. Виссмен мл., Т.И. Харбаф, Д.У. Кнэпп ; пер. под ред. А.Н. Бефани. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1979. – 470 с.
24. Владимирова О.Н. Взаимосвязи между речными и подземными водами в нижнем течении реки Томь (Томская область, Российская Федерация) / О.Н. Владимирова, О.Г. Савичев // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2021. – № 4. – С. 41–52. DOI : 10.31857/S0869780921040111.
25. Вода России. Математическое моделирование в управлении водопользованием / под ред. А.М. Черняева. – Екатеринбург : Изд-во «Аква-пресс», 2001. – 520 с.

26. Водные ресурсы и водный баланс территории Советского Союза. Water resources and water budget of the U.S.S.R. area. – Ленинград : Гидрометеорологическое издательство, 1967. – 199 с.
27. Водные ресурсы СССР и их использование. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1987. – 302 с.
28. Водный кадастр. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество. 2017 год. – Санкт-Петербург : Росгидромет, 2018. – 153 с.
29. Водный кодекс Российской Федерации [Электронный ресурс] : федеральный закон от 03.06.2006 № 74-ФЗ. С изменениями на 02.07.2021 г. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_60683/
30. Воды России (состояние, использование, охрана). 1996–2000 гг. – Екатеринбург : Изд-во РосНИИВХ, 2002. – 254 с.
31. ВСН 01-73. Ведомственные строительные нормы. Указания по расчету стока наносов. – Москва : Главгидрометслужба, 1974. – 29 с.
32. ВСН 163-83. Ведомственные строительные нормы. Учет деформаций речных русел и берегов водоемов в зоне переходов магистральных трубопроводов (нефтегазопроводов). – Москва : Госкомгидромет, 1985. – 142 с.
33. Гаррелс Р.М. Растворы, минералы, равновесия / Р.М. Гаррелс, Ч.Л. Крайст ; пер. И.В. Витовской. – Москва : Мир, 1968. – 368 с.
34. Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока / А.Н. Гельфан. – Москва : Наука, 2007. – 279 с.
35. Гидрологические расчеты при осушении болот и заболоченных земель / под ред. К.Е. Иванова. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1963. – 447 с.
36. Гидрология заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири / под ред. С.М. Новикова. – Санкт-Петербург : ВВМ, 2009. – 536 с.
37. Гидрохимические показатели состояния окружающей среды / под ред. Т.В. Гусевой. – Москва : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2007. – 192 с.
38. Голованов А.И. Ландшафтоведение / А.И. Голованов, Е.С. Кожанов, Ю.И. Сухарев. – Москва : КолосС, 2007. – 216 с.
39. Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков : учебник / В.Н. Гончаров. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1962. – 374 с.
40. Горев Л.Н. Региональная гидрохимия / Л.Н. Горев, А.М. Никаноров, В.Л. Пелешенко. – Киев: Выща шк., 1989. – 280 с.
41. ГОСТ 17.1.2.04–77. Показатели состояния и правила таксации рыбохозяйственных водных объектов. – Москва : Госкомстандарт СССР, 1977. – 17 с.

42. ГОСТ 17.1.5.01–80. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязнение. – Москва : Изд-во стандартов, 1984. – 7 с.
43. ГОСТ 17.1.5.05–85. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб поверхностных и морских вод, льда и атмосферных осадков. – Москва : ИПК «Издательство стандартов», 2000. – 11 с.
44. ГОСТ 17.8.1.01–86. Охрана природы. Ландшафты. Термины и определения. Nature protection. Landscapes. Terms and definitions. Дата введения 1987-07-01. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2002. – 6 с.
45. ГОСТ 17.8.1.02–88. Охрана природы. Ландшафты. Классификация. Nature protection. Landscapes. Classification. Дата введения 1989-07-01. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2002. – 5 с.
46. ГОСТ 17713–89. Сельскохозяйственная метеорология. Термины и определения. General agricultural meteorology. Terms and definitions. Дата введения 1990-01-01. – Москва : Издательство стандартов, 1989. – 18 с.
47. ГОСТ 19179–73. Гидрология суши. Термины и определения. Дата введения 01.01.1975. Переиздание август 1988 г. – Москва : Госстандарт СССР, 1988. – 47 с.
48. ГОСТ 19185–73. Гидротехника. Основные понятия. Термины и определения. – Москва : Изд-во стандартов, 1974. – 30 с.
49. ГОСТ 21123–85. Торф. Термины и определения. Peat. Terms and definitions. Дата введения 1986-07-01. – Москва : Издательство стандартов, 1985. – 85 с.
50. ГОСТ 25645.103–84. Условия физические космического пространства. Термины и определения. Physical conditions in the space. Terms and definitions. Дата введения 1985-01-01. – Москва : Издательство стандартов, 1984. – 6 с.
51. ГОСТ 26463–85. Ледники. Термины и определения. Glaciers. Terms and definitions. Дата введения 1986-07-01. – Москва : Издательство стандартов, 1985. – 18 с.
52. ГОСТ 26640–85. Земли. Термины и определения. Lands. Terms and definitions. Дата введения 1987-01-01. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2002. – 8 с.
53. ГОСТ 27065–86. Качество вод. Термины и определения. Water quality. Terms and definitions. – Москва : Изд-во стандартов, 2003. – 9 с.
54. ГОСТ 27593–88. Почвы. Термины и определения. Soils. Terms and definitions. Дата введения 1988-07-01. – Москва : Стандартиформ, 2008. – 12 с.
55. ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. Reliability for constructions and founda-

tions. General principles. Дата введения 2015-07-01. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 17 с.

56. ГОСТ 30813–2002. Вода и водоподготовка. Термины и определения. Water and water-preparation. Дата введения 2004-01-01. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2002. – 32 с.

57. ГОСТ 31862–2012. Вода питьевая. Отбор проб. – Москва : Стандартинформ, 2013. – 10 с.

58. ГОСТ Р 51232–98. Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества. – Москва : ФГУП «Стандартинформ», 2010. – 30 с.

59. ГОСТ Р 54084–2010. Модели атмосферы в пограничном слое на высотах от 0 до 3000 м для аэрокосмической практики. Параметры. Models of the atmosphere in the boundary layer at altitudes from 0 to 3000 m for aerospace practice. Parameters. Дата введения 2012-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2013. – 40 с.

60. ГОСТ Р 56728–2015. Здания и сооружения. Методика определения ветровых нагрузок на ограждающие конструкции. Buildings and constructions. Method for determining wind loads on the building envelope. Дата введения 2016-05-01. – Москва: МГУ. Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 19 ноября 2015 г. № 1892-ст. – 14 с.

61. ГОСТ Р 56828.5–2015. Наилучшие доступные технологии. Методические рекомендации по порядку применения информационно-технического справочника по наилучшим доступным технологиям при оценке воздействия проектируемых предприятий на окружающую среду. Best available techniques. Methodical recommendation for application order of the information and technical reference book on the best available techniques in environmental impact assessment of projecting company. Дата введения 2016-09-01. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 6 с.

62. ГОСТ Р 57007–2016. Наилучшие доступные технологии. Биологическое разнообразие. Термины и определения. Best available techniques. Biodiversity. Terms and definitions. Дата введения 2017-02-01. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 34 с.

63. ГОСТ Р 57938–2017. Лесное хозяйство. Термины и определения. Forestry. Terms and definitions. Дата введения 2018-06-01. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 11 с.

64. ГОСТ Р 58557–2019. Обоснование эколого-экономической целесообразности внедрения водоохраных мероприятий. Substantiation of ecological and economic expedience of introduction of water protection measures. Дата введения 2020-05-01. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 19 с.

65. ГОСТ Р 59053–2020. Охрана окружающей среды. Охрана и рациональное использование вод. Термины и определения. Environmental protection. Protection and rational use of water. Terms and definitions. Дата введения 2021-04-01. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 22 с.

66. ГОСТ Р 59054–2020. Охрана окружающей среды. Поверхностные и подземные воды. Классификация водных объектов. Environmental protection. Surface and underground water. Classification of water bodies. Дата введения 2021-04-01. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 21 с.

67. ГОСТ Р 8.645–2008. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение работ по геологическому изучению, использованию и охране недр в Российской Федерации. Основные положения. State system for ensuring the uniformity of measurements. Metrological support of geological study, use and protection of natural underground resources of the Russian Federation. General provisions. Дата введения 2009-03-01. – Москва : Стандартинформ, 2008. – 12 с.

68. ГОСТ Р ИСО 14040–99. Управление окружающей средой. Оценка жизненного цикла. Принципы и структура. Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework. Дата введения 1999-07-01. – Москва : Госстандарт России, 1999. – 10 с.

69. Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2018 году». – Москва : НИИ-Природа, 2019. – 290 с.

70. Градостроительный кодекс Российской Федерации [Электронный ресурс] : федеральный закон от 29.12.2004 N 190-ФЗ. С изменениями на 02.07.2021 г. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/

71. Грацианский М.Н. Инженерная гидрология и гидрометрия: учебное пособие / М.Н. Грацианский. – Москва : Высшая школа, 1966. – 216 с.

72. Грушевский М.С. О математическом моделировании процесса формирования речного стока / М.С. Грушевский // Вопросы математического моделирования гидрологических процессов : труды Государственного гидрологического института. Вып. 211. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1973. – С. 3–59.

73. Гусев Е.М. Моделирование тепло- и массообмена поверхности суши с атмосферой / Е.М. Гусев, О.Н. Насонова. – Москва : Наука, 2010. – 327 с.

74. Гусева Н.В. Механизмы формирования химического состава природных вод в различных ландшафтно-климатических зонах горно-

складчатых областей центральной Евразии: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск : Томск. политехн. ун-т, 2018. – 43 с.

75. Дебольский В.К. Задачи прогноза распределения взвешенных наносов в русловых и приливных потоках / В.К. Дебольский, С.М. Анцыферов, Т.М. Акивис ; отв. ред. М.Г. Хубларян // Водные проблемы на рубеже веков. – Москва : Наука, 1999. – С. 107–124.

76. Денисенков В.П. Основы болотоведения: учебное пособие / В.П. Денисенков. – Санкт-Петербург : Изд-во Санкт-Петербург. ун-та, 2000. – 224 с.

77. Добыча нерудных строительных материалов в водных объектах. Учет руслового процесса и рекомендации по проектированию и эксплуатации русловых карьеров / под ред. З.Д. Копалиани и В.М. Католикова. – Санкт-Петербург : Изд-во «Глобус», 2012. – 140 с.

78. Долгоносов Б.М. Нелинейная динамика экологических и гидрологических процессов / Б.М. Долгоносов. – Москва : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 440 с.

79. Домаренко В.А. Геохимический баланс водосбора малой реки Ильбокич (бассейн Ангары, Средняя Сибирь) / В.А. Домаренко, О.Г. Савичев, С.С. Улаева // Разведка и охрана недр. – 2019. – № 7. – С. 35–42.

80. Драйвер Дж. Геохимия природных вод / Дж. Драйвер ; перевод с англ. Л.Н. Барабанова и Г.А. Соломина. – Москва : Мир, 1985. – 440 с.

81. Дроздов О.А. Данные по влагообороту европейской части СССР и Средней Азии / О.А. Дроздов // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. Вып. 45 (107). Вопросы общей и сельскохозяйственной климатологии. – Ленинград : Гидрометеорологическое издательство, 1954. – С. 3–16.

82. Дружинин Н.И. Математическое моделирование и прогнозирование загрязнения поверхностных вод суши / Н.И. Дружинин, А.И. Шишкин. – Ленинград : Гидрометеоздат, 1989. – 390 с.

83. Дутова Е.М. Гидрогеохимия зоны гипергенеза Алтае-Саянской складчатой области: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск : Томск. политехн. ун-т, 2005. – 46 с.

84. Жуков А.И. Методы очистки производственных сточных вод / А.И. Жуков, И.Л. Монгайт, И.Д. Родзиллер. – Москва : Стройиздат, 1977. – 204 с.

85. Земельный кодекс Российской Федерации [Электронный ресурс] : Федеральный закон от 25.10.2001 № 136-ФЗ. С изменениями на 02.07.2021 г. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_33773/

86. Земцов В.А. Русловые и пойменные процессы рек Сибири : учебное пособие / В.А. Земцов, Д.А. Вершинин, А.О. Крутовский и др. – Томск : Изд во ТГУ, 2007. – 182 с.
87. Иванов К.Е. Водообмен в болотных ландшафтах / К.Е. Иванов. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1975. – 280 с.
88. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений / Мингео СССР. – Москва : Недра, 1983. – 191 с.
89. Каменсков Ю.И. Русловые и пойменные процессы : учебное пособие / Ю.И. Каменсков. – Томск : Изд-во ТГУ, 1987. – 171 с.
90. Караушев А.В. Речная гидравлика : учебное пособие / А.В. Караушев. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1969. – 416 с.
91. Карпов И.К. Моделирование природного минералообразования на ЭВМ / И.К. Карпов, А.И. Киселев, Ф.А. Летников. – Москва : Недра, 1976. – 256 с.
92. Колмакова М.В. Гидролого-климатическая изменчивость в речных бассейнах Западно-Сибирской равнины (по данным метеорологических станций, модельного реанализа и спутниковой альтиметрии): автореф. дис. ... канд. географ. наук. – Томск : Томск. гос. ун-т, 2012. – 22 с.
93. Кондратьев Н.Е. Основы гидроморфологической теории руслового процесса / Н.Е. Кондратьев, И.В. Попов, Б.Ф. Смищенко. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1982. – 272 с.
94. Константинов Н.М. Гидравлика, гидрология, гидрометрия. Ч. 2. Специальные вопросы : учебник / Н.М. Константинов, Н.А. Петров, Л.И. Высоцкий. – Москва : Высшая школа, 1987. – 432 с.
95. Концепция государственного мониторинга геологической среды России. Утверждено Приказом Роскомнедра от 11 июля 1994 года № 117. – Москва : Комитет Российской Федерации по геологии и использованию недр, 1994. – 14 с.
96. Копылова Ю.Г. Гидрогеохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых : учебное пособие / Ю.Г. Копылова, Н.В. Гусева. – Томск : Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2014. – 184 с.
97. Копылова Ю.Г. Путеводитель по озерам Хакасии / Ю.Г. Копылова, Н.В. Гусева, А.А. Хващевская, И.В. Сметанина. – Томск : Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2014. – 108 с.
98. Крайнов С.Р. Анализ разрешающих возможностей прогнозных моделей изменений химического состава подземных вод, их оптимальное геохимическое содержание / С.Р. Крайнов, Б.Н. Рыженко // Геохимия. – 2000. – № 7. – С. 691–703.
99. Крайнов С.Р. Методы гидрогеохимического моделирования и прогнозирования в гидрогеологии / С.Р. Крайнов, Ю.В. Шваров, Д.В. Гричук и др. – Москва : Недра, 1988. – 254 с.

100. Крайнов С.Р. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты / С.Р. Крайнов, Б.Н. Рыженко, В.М. Швец. – Москва : Наука, 2004. – 677 с.

101. Критерии категорирования объектов, накопленный вред окружающей среде на которых подлежит ликвидации в первоочередном порядке. Утверждены приказом Минприроды России от 4 августа 2017 года № 435. – Москва : Минприроды России, 2017. – 4 с.

102. Крицкий С.Н. Гидрологические основы управления водохозяйственными системами / С.Н. Крицкий, М.Ф. Менкель. – Москва : Наука, 1982. – 270 с.

103. Крылов Ю.М. Ветровые волны и их воздействие на сооружения / Ю.М. Крылов, С.С. Стрекалов, В.Ф. Цыплухин. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1976. – 256 с.

104. Куделин Б.И. Принципы региональной оценки природных ресурсов подземных вод / Б.И. Куделин. – Москва : Изд-во МГУ, 1960. – 343 с.

105. Кузин П.С. Географические закономерности гидрологического режима рек / П.С.Кузин, В.И. Бабкин. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1979. – 200 с.

106. Кузьмин П.П. Процесс таяния снежного покрова / П.П. Кузьмин. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1961. – 345 с.

107. Кухлинг Х. Справочник по физике / Х. Кухлинг. – Москва : Мир, 1982. – 520 с.

108. Кучмент Л.С. Модели процессов формирования речного стока / Л.С. Кучмент. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1980. – 143 с.

109. Лебедев В.В. Гидрология и гидрометрия в задачах: учебное пособие / В.В. Лебедев. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1955. – 551 с.

110. Леви И.И. Динамика русловых процессов / И.И. Леви. – Ленинград : Госэнергоиздат, 1957. – 252 с.

111. Лепокурова О.Е. Содовые подземные воды юго-востока Западной Сибири: геохимия и условия формирования: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск: Томск. политехн. ун-т, 2018. – 43 с.

112. Лесной кодекс Российской Федерации [Электронный ресурс]. Фкедеральный закон от 04.12.2006 № 200-ФЗ. С изменениями на 02.07.2021 г. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/

113. Лехов А.В. Физико-химическая гидрогеодинамика: учебник / А.В. Лехов. – Москва : КДУ, 2010. – 500 с.

114. Лисс О.Л. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение / О.Л. Лисс, Л.И. Абрамова, Н.А. Аветов, Н.А. Бере-

зина, Л.И. Инишева, Т.В. Курнишкова, З.А. Слука, Т.Ю. Толпышева, Н.К. Шведчикова. – Тула : Гриф и К°, 2001. – 584 с.

115. Лучшева А.А. Практическая гидрология : учебное пособие / А.А. Лучшева. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1976. – 440 с.

116. Львов, Ю.А. Болотные ресурсы / Ю.А. Львов // Природные ресурсы Томской области / под ред. И.М. Гаджиева и А.А. Земцова. – Новосибирск : Наука, 1991. – С. 67–83.

117. Льготин В.А. Проблемы определения границ водоохранных зон водных объектов / В.А. Льготин, О.Г.Савичев // Вода: химия и экология. – 2008. – № 9. – С. 3–6.

118. Мазаев В.Т. Руководство по гигиене питьевой воды и питьевого водоснабжения / В.Т. Мазаев, А.П. Ильиницкий, Т.Г. Шлепнина. – Москва : ООО «Медицинское информационное агентство», 2008. – 320 с.

119. Малолетко А.М. Эволюция речных систем Западной Сибири в мезозое и кайнозое / А.М. Малолетко. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 2008. – 288 с.

120. Международное руководство по методам расчета основных гидрологических характеристик / под ред. А.В. Рождественского и А.Г. Лобановой. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1984. – 248 с.

121. Мезенцев В.С. Гидрологические расчеты в мелиоративных целях : учебное пособие / В.С. Мезенцев. – Омск : Изд-во Омского СХИ, 1982. – 84 с.

122. Мелиорация и водное хозяйство. В 5 томах. Том 5. Водное хозяйство : справочник / под ред. И.И. Бородавченко. – Москва : Агропромиздат, 1988. – 400 с.

123. Методика разработки нормативов допустимых сбросов загрязняющих веществ в водные объекты для водопользователей. Утверждена приказом Минприроды России от 29 декабря 2020 года № 1118. – Москва: Минприроды России, 2020. – 26 с.

124. Методика расчета водохозяйственных балансов водных объектов. Утв. Приказом МПР РФ от 30.11.2007 г. № 314. Зарегистрир. в Минюсте РФ 29.12.2007 г. № 10861. – Москва : МПР России, 2008. – 135 с.

125. Методические основы оценки антропогенного влияния на качество поверхностных вод / под ред. А.В. Караушева. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1981. – 175 с.

126. Методические рекомендации по гидрогеохимическим работам масштабов 1:1 000 000 и 1: 200 000, проводимым при многоцелевом геохимическом картировании / Б.А. Колотов, С.Г. Мелькановицкая, Д.Е. Кулагин и др. – Москва : ИМГРЭ, 2001. – 94 с.

127. Методические рекомендации по изучению и прогнозу режима химического состава подземных вод в естественных и нарушенных условиях. – Москва : ВСЕГИНГЕО, 1974. – 117 с.

128. Методические рекомендации по определению расходов воды при проектировании переходов через водотоки в зоне воздействия некапитальных плотин. – Москва : ВНИИТС, 1981. – 17 с.

129. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. – Санкт-Петербург : Нестор-История, 2009. – 193 с.

130. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным. – Санкт-Петербург : Нестор-История, 2010. – 162 с.

131. Методические рекомендации по учету влияния хозяйственной деятельности на сток малых рек при гидрологических расчетах для водохозяйственного проектирования. – Ленинград : Госкомгидромет, 1986. – 168 с.

132. Методические рекомендации по учету влияния хозяйственной деятельности на сток средних и больших рек и восстановлению его характеристик. – Ленинград : Госкомгидромет, 1986. – 78 с.

133. Методические указания по разработке нормативов предельно допустимых вредных воздействий на подземные водные объекты и предельно допустимых сбросов вредных веществ в подземные водные объекты (уточненная редакция). – Москва : Министерство природных ресурсов России, 1999. – 36 с.

134. Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе. Утверждены приказом Минприроды России от 6 июня 2017 года № 273. – Москва : Минприроды России, 2017. – 95 с.

135. Михайлов В.Н. Гидрология : учебник / В.Н. Михайлов, А.Д. Добровольский, С.А. Добролюбов. – Москва : Высшая школа, 2005. – 463 с.

136. Михайлов В.Н. Кафедре гидрологии суши географического факультета МГУ – 55 лет / В.Н. Михайлов, В.А. Скорняков, К.Г. Тихоцкий // Проблемы гидрологии и гидроэкологии. – Москва : Географический факультет МГУ, 1999, С. 6–32.

137. Мотовилов Ю.Г. Система физико-математических моделей формирования речного стока и ее применение в задачах гидрологических расчетов и прогнозов: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Москва : ИВП РАН, 2019. – 42 с.

138. Найденов В.И. Нелинейная динамика поверхностных вод суши / В.И. Найденов. – Москва : Наука, 2004. – 318 с.

139. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 2. Часть II. Гидрологические наблюдения на постах. – Ленинград : Гидрометеоиздат, 1975. – 373 с.

140. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 6. Часть I. Гидрологические наблюдения и работы на больших и средних реках. – Ленинград : Гидрометеоиздат, 1978. – 477 с.

141. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 6. Часть II. Гидрологические наблюдения и работы на малых реках. – Ленинград : Гидрометеоиздат, 1972. – 624 с.

142. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 8. Гидрометеорологические наблюдения на болотах. – 3-е изд. – Ленинград : Гидрометеоиздат, 1990. – 360 с.

143. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Части 1–6. Вып. 20. Томская, Новосибирская, Кемеровская области, Алтайский край. – Санкт-Петербург : Гидрометеоиздат, 1993. – 718 с.

144. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Части 1–6. Вып. 17. Тюменская и Омская области. – Санкт-Петербург : Гидрометеоиздат, 1998. – 702 с.

145. Нейштадт М.И. Болота Обь-Иртышского междуречья / М.И. Нейштадт // Природные условия освоения междуречья Обь-Иртышья / отв. ред. М.И. Нейштадт и Г.Д. Рихтер. – Москва : ИГ АН СССР, 1972. – С. 322–346.

146. О животном мире [Электронный ресурс] : федеральный закон от 24.04.1995 N 52-ФЗ. С изменениями на 11.06.2021 г. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_6542/

147. О недрах [Электронный ресурс] : федеральный закон от 21.02.1992 г. N 2395-1. С изменениями на 11.06.2021 г. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_343/

148. Об отходах производства и потребления [Электронный ресурс] : федеральный закон от 24.06.1998 № 89-ФЗ. С изменениями на 02.07.2021 г. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19109/

149. Об охране атмосферного воздуха [Электронный ресурс] : федеральный закон от 04.05.1999 № 96-ФЗ. С изменениями на 11.06.2021 г. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_22971/

150. Об охране окружающей среды [Электронный ресурс] : федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ. С изменениями на 02.07.2021 г. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/

151. Об утверждении Правил определения местоположения береговой линии (границы водного объекта), случаев и периодичности ее определения и о внесении изменений в Правила установления на местности границ водоохранных зон и границ прибрежных защитных полос водных объектов [Электронный ресурс] : постановление Правительства РФ от 29.04.2016 № 377. С изменениями на 30 ноября 2019 г. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_197594/

152. Об утверждении Правил установления границ водоохранных зон и границ прибрежных защитных полос водных объектов [Электронный ресурс] : постановление Правительства РФ от 10.01.2009 № 17. С изменениями на 30.11.2019 г. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_83795/

153. Окишев П.А. Рельеф и оледенение Русского Алтая / П.А. Окишев. – Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та, 2011. – 382 с.

154. Орлов В.Г. Основы инженерной гидрологии: учебное пособие / В.Г. Орлов, А.В. Сикан. – Ростов-на-Дону : Феникс ; Санкт-Петербург : Северо-Запад, 2009. – 192 с.

155. Орлова В.В. Климат СССР. Вып. 4. Западная Сибирь / В.В. Орлова. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1962. – 360 с.

156. Основы гидрогеологии. Гидрогеодинамика / под ред. И.С. Зекцера. – Новосибирск : Наука, 1983. – 241 с.

157. Пат. 2468337 Российская Федерация, G01С. Способ измерения и долгосрочного прогноза деформаций речных русел при отсутствии русловых съёмки / Савичев О.Г., Решетько М.В.; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет (RU). – № 2468337; заявл. 06.12.2011; опубл. 27.11.2012, Бюл. № 33. – 3 с.

158. Пат. 2548608 Российская Федерация, С2. Способ выделения геохимических аномалий на основе анализа химического состава речных отложений / Савичев О.Г., Домаренко В.А., Решетько М.В.; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет (RU). – № 2548608; заявл. 26.07.2013 ; опубл. 20.04.2015, Бюл. № 11. – 8 с.

159. Перечень видов инженерных изысканий [Электронный ресурс] : постановление Правительства Российской Федерации от 19.01.2006 г. № 20. С изменениями на 15.09.2020 г. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_57871/

160. Перечень видов работ по инженерным изысканиям, по подготовке проектной документации, по строительству, реконструкции, капитальному ремонту объектов капитального строительства, которые оказывают влияние на безопасность объектов капитального строительства [Электронный ресурс] : приказ Минрегиона России от 30.12.2009 № 624.

С изменениями на 14.11.2011 г. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_97156/

161. Пологова Н.Н. Накопление углерода в торфяных залежах Большого Васюганского болота / Н.Н. Пологова, Е.Д. Лапшина // Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития / под ред. М.В. Кабанова. – Томск : Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2002. – С. 174–179.

162. Положение о зонах затопления, подтопления [Электронный ресурс] : постановление Правительства Российской Федерации от 18.04.2014 г. N 360. С изменениями на 07.09.2019 г. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_162041/

163. Поляков Б.В. Гидрологический анализ и расчеты : учебник / Б.В. Поляков. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1946. – 480 с.

164. Попов Е.Г. Вопросы теории и практики прогнозов речного стока. – Москва : Гидрометеиздат, 1963. – 395 с.

165. Попов О.В. Подземное питание рек / О.В. Попов. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1968. – 291 с.

166. Пособие к СНиП 2.05.03–84 «Мосты и трубы» по изысканиям и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки (ПМП–91). – Москва : ГУПиКС, 1992. – 374 с.

167. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик / под ред. А.В. Рождественского и А.Г. Лобановой. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1984. – 448 с.

168. Пособие по проектированию защиты горных выработок от подземных и поверхностных вод и водопонижения при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений (к СНиП 2.06.14-85 и СНиП 2.02.01-83). Утверждено приказом ГПИ Фундаментпроект Госстроя СССР от 11.08.1988 г. № 228. – Москва : ГПИ Фундаментпроект Госстроя СССР, 1988. – 251 с.

169. Правила определения технологии в качестве наилучшей доступной технологии, а также разработки, актуализации и опубликования информационно-технических справочников по наилучшим доступным технологиям [Электронный ресурс] : постановление Правительства РФ от 23.12.2014 г. N 1458. С изменениями на 03.03.2021 г. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_172796/

170. Прогнозы подтопления и расчет дренажных систем на застраиваемых и застроенных территориях : справочное пособие к СНиП 2.06.15-85. Разделы 1–4. – Москва : ВНИИ ВОДГЕО, 1991. – 111 с.

171. Проектирование сооружений для забора поверхностных вод : справочное пособие к СНиП 2.04.02–84 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения». ВНИИ ВОДГЕО. – Москва : Стройиздат, 1990. – 223 с.

172. Р 52.08.872-2018. Оперативный учет стока на водотоках. Методы обработки наблюдений за уровнями и расходами воды. – Санкт-Петербург : ФГБУ «ГГИ», 2018. – 107 с.
173. Р 52.08.874-2018. Определение гидрографических характеристик картографическим способом. – Санкт-Петербург : МПР РФ, Росгидромет, ГГИ, 2018. – 178 с.
174. Раткович Д.Я. Актуальные проблемы водообеспечения / Д.Я. Раткович. – Москва : Наука, 2003. – 352 с.
175. РД 52.24.309–92. Методические указания. Организация и проведение режимных наблюдений за загрязнением поверхностных вод суши на сети Росгидромета. – Санкт-Петербург : Роскомгидромет, 1992. – 67 с.
176. Р 52.24.353-2012. Отбор проб поверхностных вод суши и очищенных сточных вод. Дата введения 2012-04-02. Минприроды России; Росгидромет. – Ростов-на-Дону : Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 2012. – 28 с.
177. РД 52.24.609-2013. Организация и проведение наблюдений за содержанием загрязняющих веществ в донных отложениях водных объектов. Дата введения 2013-09-02. Минприроды России; Росгидромет. – Ростов-на-Дону : Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 2013. – 30 с.
178. РД 52.24.622-2017. Порядок проведения расчета условных фоновых концентраций химических веществ в воде водных объектов для установления нормативов сбросов сточных вод. Дата введения 14.06.2017 г. – Москва : Ростов-на-Дону: Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 2017. – 96 с.
179. РД 52.24.643–2002. Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. – Москва : Росгидромет, 2002. – 34 с.
180. РД 52.24.748-2010. Усовершенствованная методика определения выноса (переноса) загрязняющих веществ с речным стоком. Росгидромет. – Ростов-на-Дону : ГУ «ГХИ», 2010. – 65 с.
181. Реймерс Н.Ф. Природопользование: словарь-справочник / Н.Ф. Реймерс. – Москва : Мысль, 1990. – 639 с.
182. Рекомендации по гидрогеологическим расчётам для определения границ 2 и 3 поясов зон санитарной охраны подземных источников хозяйственно-питьевого водоснабжения. – Москва : ВНИИ «ВОДГЕО», 1983. – 84 с.
183. Рекомендации по оценке и прогнозу размыва берегов равнинных рек и водохранилищ для строительства. – Москва : Стройиздат, 1987. – 72 с.

184. Рекомендации по расчету испарения с поверхности суши / под ред. П.П. Кузьмина и С.М. Алпатьева. – Ленинград : Гидрометеоздат, 1976. – 95 с.
185. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 11. Средний Урал и Приуралье / под ред. Н.М. Алюшинской. – Ленинград : Гидрометеоздат, 1973. – 848 с.
186. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 13. Центральный и Южный Казахстан. Вып. 2. Бассейн оз. Балхаш / под ред. В.А. Семенова и Р.Д. Курдина. – Ленинград : Гидрометеоздат, 1970. – 644 с.
187. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 15. Алтай и Западная Сибирь. Вып. 1. Горный Алтай и верхний Иртыш / под ред. В.А. Семенова. – Ленинград : Гидрометеоздат, 1969. – 318 с.
188. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 15. Алтай и Западная Сибирь. Вып. 2. Средняя Обь / под ред. Н.А. Паниной. – Ленинград : Гидрометеоздат, 1972. – 408 с.
189. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 15. Алтай и Западная Сибирь. Вып. 3. Нижний Иртыш и Нижняя Обь / под ред. В.Е. Водогрецкого. – Ленинград : Гидрометеоздат, 1973. – 424 с.
190. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 16. Ангаро-Енисейский район. Вып. 1. Енисей / под ред. А.П. Муранова. – Ленинград : Гидрометеоздат, 1973. – 373 с.
191. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 16. Ангаро-Енисейский район. Вып. 2. Ангара / под ред. В.Г. Симова. – Ленинград : Гидрометеоздат, 1972. – 595 с.
192. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 16. Ангаро-Енисейский район. Вып. 3. Бассейн оз. Байкал (Забайкалье) / под ред. М.Г. Васьковского. – Ленинград : Гидрометеоздат, 1973. – 399 с.
193. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 3. Северный край / под ред. И.М. Жила и Н.М. Алюшинской. – Ленинград : Гидрометеоздат, 1972. – 663 с.
194. Ржаницын Н.А. Морфологические и гидрологические закономерности строения речной сети / Н.А. Ржаницын. – Ленинград : Гидрометеоздат, 1960. – 238 с.
195. Рождественский А.В. Статистические методы в гидрологии / А.В. Рождественский, А.И. Чеботарев. – Ленинград : Гидрометеоздат, 1974. – 424 с.
196. Рудой А.Н. Гигантская рябь течения / А.Н. Рудой. – Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та, 2005. – 224 с.
197. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ. – Ленинград : Гидрометеоздат, 1989. – 358 с.

198. Руководство по определению расчетных гидрологических характеристик. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1973. – 111 с.
199. Руководство по проектированию, строительству и эксплуатации искусственных сооружений автомобильных дорог на водотоках с наледями. – Москва : Транспорт, 1989. – 164 с.
200. Румынин В.Г. Теория и методы изучения загрязнения подземных вод: учебник / В.Г. Румынин. – Санкт-Петербург : Наука, 2020. – 559 с.
201. Савичев О.Г. Водные ресурсы Томской области / О.Г. Савичев. – Томск : Изд-во ТПУ, 2010. – 248 с.
202. Савичев О.Г. Гидрологические аспекты трансформации болотных микроландшафтов в восточной части Васюганского болота / О.Г. Савичев // Геоморфология и физическая география Сибири в XXI веке: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения А.А. Земцова / отв. ред. В.С. Хромых. – Томск : Томск. гос. ун-т, 2020. – С. 134–137.
203. Савичев О.Г. Гидрология, метеорология и климатология: гидрологические расчеты: учебное пособие / О.Г. Савичев. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 224 с.
204. Савичев О.Г. Гидрохимический сток рек бассейна Средней Оби и его природно-антропогенная трансформация: автореф. дис. ... д-ра географ. наук. – Барнаул, Томск: Томск. политехн. ун-т, 2005. – 46 с.
205. Савичев О.Г. Исследование взаимосвязей между химическим составом вод и донных отложений рек Сибири / О.Г. Савичев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330, №. 5. – С. 178–188. DOI : 10.18799/24131830/2019/5/280.
206. Савичев О.Г. Математическое моделирование формирования водного стока рек Западной Сибири / О.Г. Савичев // Инженерные изыскания. – 2012. – № 8. – С. 42-48.
207. Савичев О.Г. Методика оценки русловых деформаций рек Западной Сибири / О.Г. Савичев // Геосферные исследования. – 2016. – № 1. – С. 140–151.
208. Савичев О.Г. Методология оценки фактического и допустимого влияния хозяйственной деятельности на химический состав и качество пресных природных вод / О.Г. Савичев // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 8 (3). – С. 704–708.
209. Савичев О.Г. Оценка русловых деформаций в бассейнах рек Васюган и Парабель (Западная Сибирь) / О.Г. Савичев // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313, № 1. – С. 82–87.

210. Савичев О.Г. Подземная составляющая стока рек бассейна Средней Оби / О.Г. Савичев // Мелиорация и водное хозяйство. – 2010. – № 1. – С. 36–39.

211. Савичев О.Г. Проблемы нормирования сбросов загрязняющих веществ в поверхностные водные объекты / О.Г. Савичев // Вода: химия и экология. – 2010. – № 9. – С. 35–39.

212. Савичев О.Г. Расчёт заторных уровней речных вод на юге Западной Сибири / О.Г. Савичев // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320, № 1. – С. 152–155.

213. Савичев О.Г. Региональные особенности химического состава речных вод Сибири и их учёт при нормировании сбросов сточных вод // Вода: химия и экология. – 2014. – № 1 (66). – С. 41–46.

214. Савичев О.Г. Теоретические основы охраны окружающей среды: учебное пособие / О.Г. Савичев. – Томск : Изд-во ТПУ, 2012. – 126 с.

215. Савичев О.Г. Фоновые концентрации веществ в речных водах таежной зоны Западной Сибири / О.Г. Савичев // Вестник Томского государственного университета. – 2010. – № 334. – С. 169–175.

216. Савичев О.Г. О влиянии заболоченности и лесистости водосборов на водный сток рек таёжной зоны Западной Сибири / О.Г. Савичев, В.А. Базанов, А.А. Скугарев // Вестник Томского государственного университета. – 2011. – № 344. – С. 200–203.

217. Савичев О.Г. Сравнительный анализ методов оценки стока влекомых наносов равнинных рек (на примере Оби и её притоков) / О.Г. Савичев, Ю.С. Березикова // Инженерные изыскания. – 2014. – № 13–14. – С. 84–87.

218. Савичев О.Г. Гидрологическое обоснование хозяйственного освоения торфяных болот (на примере водосбора реки Ключ, Западная Сибирь) / О.Г. Савичев, П.В. Бернатонис, В.К. Бернатонис // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320, № 1. – С. 155–162.

219. Савичев О.Г. Методология управления геохимическим балансом водосборов на территории Западной Сибири / О.Г. Савичев, Н.В. Гусева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331, № 5. – С. 28–45. DOI : 10.18799/24131830/2020/5/2634.

220. Савичев О.Г. Закономерности изменения химического состава речных отложений и их использование в поисках полезных ископаемых / О.Г. Савичев, В.А. Домаренко // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 6 (3). – С. 520–525.

221. Савичев О.Г. Условия изменения уровней подземных вод верхней гидродинамической зоны на территории томской области / О.Г. Савичев, В.А. Льготин, Ю.А. Моисеева // Геозкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2018. – № 6. – С. 31–40. DOI : 10.1134/S0869780318060054.

222. Савичев О.Г. Гидрогеохимические условия формирования олиготрофных болотных экосистем / О.Г. Савичев, А.К. Мазуров, И.П. Семилетов, В.А. Базанов, Н.В. Гусева, А.А. Хващевская, Н.Г. Наливайко // Известия РАН. Серия географическая. – 2016. – № 5. – С. 60–69. DOI : 10.15356/0373-2444-2016-5-60-69.

223. Савичев О.Г. Эколого-геохимическое состояние поверхностных водных объектов в таежной зоне западной Сибири и некоторые вопросы нормирования антропогенной нагрузки / О.Г. Савичев, М.Л. Марков, Т.М. Потапова, О.В. Задонская // Труды III Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития». – Санкт-Петербург : ХИМИЗДАТ, 2019. – С. 754–757.

224. Савичев О.Г. Микробиологические условия распределения химических элементов по глубине торфяной залежи в экосистемах восточной части Васюганского болота (Западная Сибирь) / О.Г. Савичев, Н.Г. Наливайко, М.А. Рудмин, А.К. Мазуров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330, № 9. – С. 184–194. DOI : 10.18799/24131830/2019/9/2272.

225. Савичев О.Г. О методике определения фоновых и аномальных значениях гидрохимических показателей // Известия Томского политехнического университета / О.Г. Савичев, В.Л. Нгуен. – 2015. – Т. 326, № 9. – С. 133–142.

226. Савичев О.Г. Метод определения характерных расходов воды рек гумидных областей Западной Сибири при отсутствии данных наблюдений / О.Г. Савичев, В.В. Паромов // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10 (14). – С. 3157–3160.

227. Савичев О.Г. Гидрологические аспекты образования болот в таёжной зоне Западной Сибири / О.Г. Савичев, С.В. Паромов // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324, № 1. – С. 154–161.

228. Савичев О.Г. Методы ориентировочной количественной оценки твёрдого стока и русловых деформаций для равнинных рек таёжной зоны Западной Сибири / О.Г. Савичев, М.В. Решетько // Инженерные изыскания. – 2012. – № 1. – С. 52–56.

229. Савичев О.Г. Методика реконструкции зонального водного стока в Западной Сибири в голоцене / О.Г. Савичев, М.В. Решетько,

Ю.А. Моисеева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327, № 5. – С. 87–96.

230. Савичев О.Г., Скугарев А.А., Базанов В.А., Харанжевская Ю.А. Водный баланс заболоченных водосборных территорий Западной Сибири (на примере малой реки Ключ, Томская область) / О.Г. Савичев, А.А. Скугарев, В.А. Базанов, Ю.А. Харанжевская // Геоинформатика. – 2011. – № 3. – С. 39–46.

231. Савичев О.Г. Способ оценки допустимых концентраций загрязняющих веществ с учетом состояния донных отложений // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов / О.Г. Савичев, Чжоу Дань // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332, № 6. – С. 107–117. DOI : 10.18799/24131830/2021/06/3241.

232. Савичев О.Г. Гидрогеологические и гидрологические условия функционирования Обского и Баксинского болот (юго-восток Западно-Сибирской равнины) / О.Г.Савичев, Ян Хэнь // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332, № 4. – С. 43-56. DOI : 10.18799/24131830/2021/4/3147.

233. СанПиН 2.1.4.1074–01. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. – Москва : Минздрав РФ, 2001. – 16 с.

234. СанПиН 2.1.4.1110-02. Санитарные правила и нормы. Зоны санитарной охраны источников водоснабжения и водопроводов питьевого назначения. Питьевая вода и водоснабжение населенных мест. Дата введения 01.06.2002 г. – Москва : Роспотребнадзор, 2002. – 12 с.

235. СанПиН 2.1.5.980-00. Санитарные правила и нормы. Гигиенические требования к охране поверхностных вод. – Москва : Минздрав РФ, 2000. – 23 с.

236. Севастьянов В.В. Эколого-климатические ресурсы Алтае-Саянской горной страны / В.В. Севастьянов. – Томск : ТГУ, 2008. – 307 с.

237. Сетков В.И. Строительные конструкции. Расчет и проектирование / В.И. Сетков, Е.П. Сербин. – Москва : ИНФРА-М. 2017. – 444 с.

238. Системный анализ и принятие решений / под ред. В.Н. Волковой и В.Н. Козлова. – Москва : Высшая школа, 2014. – 616 с.

239. СН 435-72. Указания по определению расчетных гидрологических характеристик. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1972. – 19 с.

240. СНиП 2.01.14-83. Определение расчетных гидрологических характеристик. Дата введения 1984-07-01. – Москва : Стройиздат, 1985. – 57 с.

241. СНиП 23-01-99*. Строительная климатология. Building climatology. Дата введения 2000-01-01. – Москва : Госстрой России, ГУП ЦПП, 2003. – 162 с.

242. СНиП II-А.6-72. Строительная климатология и геофизика. Глава 6. – Москва : Госстрой СССР1972. – 320 с.

243. СО 34.21.308-2005. Гидротехника. Основные понятия, термины и определения. Дата введения 2006-01-01 / РАО «ЕЭС России». – Москва : ЦПТИиТО ОРГРЭС, 2006. – 58 с.

244. СП 100.13330.2016. Мелиоративные системы и сооружения. The reclamation systems and construction. Актуализированная редакция СНиП 2.06.03-85. Дата введения 2017-06-17. – Москва : Минстрой России, 2016. – 155 с.

245. СП 104.13330.2016. Инженерная защита территории от затопления и подтопления. Актуализированная редакция СНиП 2.06.15-85. – Москва : Стандартиформ, 2017. – 31 с.

246. СП 11-108-98. Изыскания источников водоснабжения на базе подземных вод. Water supply prospecting on the base of groundwater. Дата введения 1999-01-01. – Москва : ПНИИИС Госстроя России, 1998. – 33 с.

247. СП 115.13330.2016. Геофизика опасных природных воздействий. Geophysics of hazardous natural processes. Актуализированная редакция СНиП 22-01-95. Дата введения 2017-06-17. – Москва : Стандартиформ, 2018. – 48 с.

248. СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. Engineering protection of territories, buildings and structures from dangerous geological processes. Basic principles. Актуализированная редакция СНиП 22-02-2003. Дата введения 2013-01-01. – Москва : Минрегион России, 2012. – 54 с.

249. СП 131.13330.2020. Строительная климатология. Building climatology. – Москва : Минстрой России, 2021. – 178 с.

250. СП 20.13330.2011. Свод правил. Нагрузки и воздействия. Loads&actions. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. – Москва : Госстрой России, 2011. – 109 с.

251. СП 32.13330.2018. Свод правил. Канализация. наружные сети и сооружения. Sewerage. Pipelines and wastewater treatment plants. Дата введения 2019-06-26. Применяется с 26.06.2019 взамен СП 32.13330.2012. – Москва : Минстрой России, 2018. – 86 с.

252. СП 33-101–2003. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – Москва : Госстрой России, 2004. – 72 с.

253. СП 38.13330.2012. Свод правил. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Loads and impacts on Hydraulic structures (from wave, ice and ships). Актуализированная редакция СНиП 2.06.04–82*. – Москва : Минрегион России, 2014. – 145 с.

254. СП 446.1325800.2019. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. Engineering geological survey for construction. General regulations for execution of work. Дата введения 2019-12-06. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 85 с.

255. СП 47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Engineering survey for construction. Basic principles. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 104 с.

256. СП 482.1325800.2020. Инженерно-гидрометеорологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. Engineering hydrometeorological survey for construction. General regulations for execution of work. Дата введения 2020-07-30. – Москва : Минстрой России, 2020. – 49 с.

257. СП 58.13330.2012. Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003. – Москва : Минрегион России, 2012. – 40 с.

258. Справочник базовых цен на инженерно-геологические и инженерно-экологические изыскания для строительства (цены приведены к базисному уровню на 01.01.1991 года). – Москва : Госстрой России, 1999. – 187 с.

259. Справочник базовых цен на инженерные изыскания для строительства. Инженерно-гидрографические работы. Инженерно-гидрометеорологические изыскания на реках. – Москва : Госстрой России, 2001. – 70 с.

260. Справочник по гидрохимии / под ред. А.В. Никанорова. – Ленинград : Гидрометеоздат, 1989. – 391 с.

261. Справочное руководство гидрогеолога. Т. II. – Ленинград : Недра, 1967. – 360 с.

262. Стефенсон Д. Гидрология и дренаж ливневых вод / Д. Стефенсон ; пер. с англ. З.Д. Копалиани. – Ленинград : Гидрометеоздат, 1986. – 263 с.

263. СТО ГГИ 52.08.37-2015. Влагозапасы и промерзание почв, испарение с почвы и водной поверхности при региональном изменении климата. Рекомендации по расчету и прогнозу средних многолетних изменений. – Санкт-Петербург : ART-XPRESS, 2015. – 40 с.

264. СТО ГУ ГГИ 08.29–2009. Учет руслового процесса на участках подводных переходов трубопроводов через реки. – Санкт-Петербург : Нестор-История, 2009. – 184 с.
265. СТО НОПРИЗ И-006-2017. Инженерно-экологические изыскания. Исследования загрязнения почв и грунтов. – Москва : Национальное объединение изыскателей и проектировщиков, 2018. – 56 с.
266. Тарасенко Ф.П. Прикладной системный анализ : учебное пособие / Ф.П. Тарасенко. – Москва : КНОРУС, 2010. – 224 с.
267. Тарасов, М.Н. Прогнозирование и регулирование химического состава поверхностных вод в условиях антропогенной деятельности / М.Н. Тарасов // Гидрохимические материалы. – 1984. – Т. 92. – С. 16–26.
268. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений [Электронный ресурс] : федеральный закон от 30.12.2009 г. № 384-ФЗ. С изменениями на 02.07.2013 г. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/
269. Торфяные месторождения и их разведка / под ред. И.Ф. Ларгина. – Москва : Недра, 1977. – 264 с.
270. Требования к производству и результатам многоцелевого геохимического картирования масштаба 1: 200000 / А.А. Головин, Н.Н. Москаленко, А.И. Ачкасов и др. – Москва : Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов РАН, 2002. – 92 с.
271. Трофимов В.В. Имитационная модель, описывающая миграцию химических веществ в системе «вода – донные отложения» и пути ее численной реализации / В.В. Трофимов, В.И. Манихин // Гидрохимические материалы. – Том ХСII. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1984. – С. 65–72.
272. Фролова Н.Л. Классификация и районирование рек по водному режиму: история, методология, перспективы / Н.Л. Фролова, Е.С. Повалишникова, М.Б. Киреева // Водные ресурсы. – 2021. – Т. 48, № 2. – С. 121–134. DOI : 10.31857/S032105962102005X.
273. Хромов С.П. Метеорология и климатология : учебник / С.П. Хромов, М.А. Петросянц. – Москва : Изд-во МГУ, 1994. – 520 с.
274. Чалов Р.С. Основные положения теории общего и географического русловедения / Р.С. Чалов // Вестник Московского государственного университета. Сер. 5. География. – 2005. – № 6. – С. 10–15.
275. Чалов Р.С. Русловые процессы (русловедение) : учебник / Р.С. Чалов. – Москва : ИНФРА-М, 2017. – 569 с.
276. Чеботарев А.И. Гидрологический словарь / А.И. Чеботарев. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1964. – 222 с.
277. Чеботарев Н.П. Учение о стоке / Н.П. Чеботарев. – Москва : Изд-во МГУ, 1962. – 406 с.

278. Челпанова О.М. Климат СССР, Вып. 3. Средняя Азия / О.М. Челпанова. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1963. – 447 с.
279. Шамо́в Г.И. Речные наносы. Режим, расчеты и методы измерений / Г.И. Шамо́в. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1954. – 345 с.
280. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза / С.Л. Шварцев. – Москва : Недра, 1998. – 366 с.
281. Шварцев С.Л. Общая гидрогеология : учебник / С.Л. Шварцев. – Москва : Альянс, 2012. – 601 с.
282. Шестаков В.М. Гидрогеодинамика : учебник / В.М. Шестаков. – Москва : КДУ, 2009. – 334 с.
283. Шмаков А.В. Гидрогеохимический режим заболоченных территорий в подтаежной зоне Западной Сибири (на примере Тимирязевского болота у г. Томска): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2016. – 21 с.
284. Ямских Г.Ю. Реконструкция сукцессий растительности и палеогидрологического режима болот (на примере торфяника в долине реки Кас) / Г.Ю. Ямских, Л.В. Карпенко, А.В. Гренадерова // География и природные ресурсы. – 2004. – № 4. – С. 128–134.
285. Allen R.G. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements / Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. – FAO Irrigation and drainage. Water Resources, Development and Management Service FAO. – 1998. – No. 56. – P. 1–276.
286. Barry J.J. A general power equation for predicting bed load transport rates in gravel bed rivers / J.J. Barry, J.M. Buffington, J.G. King // Water resources research. – 2004. – Vol. 40. – 22 p.
287. Benedini M. Water Quality Modelling for Rivers and Streams / M. Benedini, G. Tsakiris. – Springer : Dordrecht, 2013. – 288 p.
288. Chang H.H. Fluvial processes in river engineering / H.H. Chang. – Malabar, Florida : Kriger Publishing Company, 2008. – 432 p.
289. Coldewey W.G. Hydrogeologische Gelände- und Kartieremethoden / W.G. Coldewey, P. Gobel. – Berlin, Deutschland: Springer Spektrum (printed by Printforce, the Netherlands), 2015. – 221 p.
290. Feller W. An introduction to probability theory and its applications. V. 2 / W. Feller. – New York – London – Toronto : John Wiley&Sons, Inc., 1971. – 738 p.
291. Grenthe I. Symbols, standards and conventions / I. Grenthe, I. Puigdomenech // in: Modelling in aquatic chemistry. – Paris : Nuclear energy agency, 1997. – P. 35–68.
292. Guseva N.V. Hydrochemical Balance of Itkul–Shira Lake System (Khakassia, Russian Federation) / Guseva N.V., Savichev O.G. // Contempo-

rary Problems of Ecology. – 2016. – Vol. 9, No. 5. – P. 590–599. DOI : 10.1134/S1995425516050061.

293. Handbook of applicable mathematics / ed. by E. Lloyd and W. Lederman. V. VI. Part A. Chichester. – New York – Brisbane – Toronto – Singapore : John Wiley&Sons, Inc., 1984. – 510 p.

294. Hendriks M.R. Introduction to physical hydrology / M.R. Hendriks. – Oxford, New York : Oxford University Press, 2010. – 331 p.

295. Krasnoshchekov S.Y. Determining Lateral River Channel Activity with Respect to Safety of Pipeline Crossings. Thesis for the degree of PhD / S.Y. Krasnoshchekov. – Southampton : University of South-ampton. Faculty of engineering, science & mathematics. School of Geography, 2008. – 197 p.

296. Lasaga A.C. Fundamental approaches in describing mineral dissolution and precipitation rates / A.C. Lasaga // Reviews in Mineralogy. Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals / Mineralogical Society of America. – 1995. – Vol. 31. – P. 23–86.

297. Leopold L.B. River channel patterns: braided, meandering and straight / L.B. Leopold, M.G. Wolman. – US Geological Survey Professional Paper, 1957. – P. 85.

298. Levy J. Simulation of atrazine and metabolite transport and fate in a sandy-till aquifer / J. Levy, G. Chesters // Journal of contaminant hydrology. – 1995. – № 20. – P. 67–88.

299. Loucks D.P. Water resources systems planning and management. An introduction to methods, models and applications / D.P. Loucks, E. Van Beek. – Turin : Unesco Publishing, 2005. – 680 p.

300. Manual on Stream Gauging. Vol. I. Fieldwork. – WMO-No. 1044. Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization, 2010. – 252 p.

301. Manual on Stream Gauging. Vol. II. Computation of Discharge. – WMO-No. 1044. Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization, 2010. – 198 p.

302. Martin H. Technische Hydromechanik. 4. Hydraulische und numerische Modelle / H. Martin, R. Pohl, D. Aigner, G. Bollrich, D. Carstensen, H.-J.G. Diersch, H.-B. Horlacher. – Berlin, Germany : Beuth Verlag GmbH, 2015. – 406 p.

303. Mujumdar P.P. Floods in a Changing Climate / P.P. Mujumdar, Kumar D. Nagesh. – New York ; USA : Cambridge University Press, 2012. – 177 p.

304. Nguyen Van Luyen. Improved method for hydrochemical exploration of mineral resources / Nguyen Van Luyen, O.G. Savichev, V.A. Domarenko, Quach Duc Tin // Vietnam Journal of Earth Sciences. – 2017. – Vol. 39(2). – P. 167–180. DOI : 10.15625/0866-7187/39/2/9703.

305. Nguyen Van Luyen Assessing the Influence of the Mining Operations on the State of Streams in the Northern Part of the Red River Basin

(Viet Nam) / Nguyen Van Luyen, O.G. Savichev // Geography and Natural Resources. – 2018. – Vol. 39, No. 2. – P. 182–188. DOI : 10.1134/S1875372818020129.

306. Rivers – Physical, Fluvial and Environmental Processes / Editors: P. Rowinski, A. Radecki-Pawlik. – Switzerland : Springer, 2015. – 613 p.

307. Savichev O. Geochemical barriers in oligotrophic peat bog (Western Siberia) / O. Savichev, E. Soldatova, M. Rudmin, A. Mazurov // Applied Geochemistry. – 2020. – Vol. 113 (104519). – P. 1–11. DOI : 10.1016/j.apgeochem.2019.104519.

308. Savichev O.G. The nonlinear effects based on peat chronology data in paleoclimatic reconstructions / O.G. Savichev, M.V. Reshetko, Yu.A. Moiseeva // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – Vol. 43 (012034). – P. 1–5. DOI :10.1088/1755-1315/43/1/012034.

309. Savichev O.G. Evaluation of plain river channel deformation in the absence of observation data / O.G. Savichev, M.V. Reshetko, I.A. Matveenko, Ye.V. Ivanova // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – Vol. 24 (012027). – P. 1–6. DOI :10.1088/1755-1315/24/1/012027.

310. Savichev O.G. Assessment methodology for the backwater levels caused by ice jams: a case study of the rivers of Tom and Chulym (the Ob River drainage basin, Western Siberia, Russia) / O.G. Savichev, A.S. Tarasov, V.A. Zemtsov // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 400 (012005). – P. 1–7. DOI : 10.1088/1755-1315/400/1/012005.

311. Savichev O.G. Hydrologic conditions for chemical composition of the Siberian river waters / O.G. Savichev, V.A. Zemtsov, E.Y. Pasechnik // Aktru: IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 232. – P. 1–6. DOI : 10.1088/1755-1315/232/1/012012.

312. Schreiber P. Über die Beziehungen zwischen dem Niederschlag und der Wasserführung der Flüsse in Mitteleuropa (German) / P. Schreiber // Meteorol. Zs. – 1904. – № 21. – P. 441–452.

313. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the Earth / S.L. Shvartsev // Geochemistry International. – 2008. – V. 46, № 13. – P. 1285–1398.

314. Weight W.D. Hydrtologology Field Manual / W.D. Weight. – New York, USA : McGraw-Hill, 2008. – 751 p.

315. White Ar.F. Chemical weathering rates of silicate minerals in soils / Ar. F. White // Reviews in Mineralogy. Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals / Mineralogical Society of America. – 1995. – Vol. 31. – P. 405–462.

316. Zmarsly E. Meteorologisch-klimatologisches Grundwissen / E. Zmarsly, W. Kuttler, H. Pethe. – Stuttgart (Germany) : Eugen Ulmer KG, 2007. – 182 p.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	1
1. ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ КАК ЧАСТЬ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.....	5
1.1. Водосбор как геосистема. Свойства водосбора.....	5
1.2. Водные объекты. Типы, виды и границы водных объектов.....	7
1.3. Геосток и геобаланс	10
2. СТРУКТУРА, ГРАНИЦЫ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ И ИХ ВОДОСБОРОВ	14
2.1. Структура и границы водных объектов и их водосборов.....	14
2.1.1. Структура и границы водосбора.....	14
2.1.2. Структура и границы водного объекта.....	20
2.2. Внешние и внутренние связи водосборной геосистемы.....	25
2.2.1. Водный баланс водосбора.....	26
2.2.2. Классификация водных объектов по геофизическим показателям	42
2.2.3. Геохимический баланс водосбора.....	56
2.2.4. Связи между элементами водного и геохимического баланса	59
2.2.5. Классификация водных объектов по геохимическим показателям	63
3. ОПАСНЫЕ ВОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ.....	69
3.1. Затопление территорий	69
3.1.1. Максимальный водный сток	70
3.1.2. Расчеты характерных уровней воды	85
3.2. Подтопление и заболачивание территорий.....	97
3.2.1. Оценка подтопления территорий	98
3.2.2. Заболачивание территорий.....	101
3.3. Сокращение водных ресурсов	108
3.3.1. Оценка минимального стока.....	108
3.3.2. Оценка пересыхания, замерзания и наледеобразования	110
3.4. Деформации дна и берегов водных объектов	111
3.5. Загрязнение водных объектов и определение допустимых сбросов загрязняющих веществ.....	123
4. СОДЕРЖАНИЕ ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РЕШЕНИЙ.....	127
4.1. Основные принципы и подходы.....	127
4.2. Алгоритм гидроэкологического обоснования	132
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	139
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	140

Научное издание

САВИЧЕВ Олег Геннадьевич

ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РЕШЕНИЙ

Монография

Издано в авторской редакции

Научный редактор
доктор геолого-минералогических наук, профессор
Н.В. Гусева

Компьютерная верстка *Д.В. Сотникова*
Дизайн обложки *А.И. Сидоренко*

Подписано к печати 29.10.2021. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать CANON. Усл. печ. л. 9,71. Уч.-изд. л. 8,78.
Заказ 210-21. Тираж 300 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ