

Т. В. Векшина      В. А. Большаков  
Е. М. Коринец

**ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РУСЕЛ  
СУДОХОДНЫХ РЕК**

*Учебное пособие*

Санкт-Петербург  
Медиапапир  
2022

УДК 627.15  
ББК 26.222.5  
В26

**Векшина Т. В., Большаков В. А., Коринец Е. М. Экологические проблемы русел судоходных рек: Учебное пособие. – СПб.: Медиапайр, 2022. – 132 с.**

В пособии изложен материал, охватывающий разделы дисциплин «Антропогенное воздействие на русловые процессы», «Экономические и экологические аспекты водопользования», «Экологические проблемы русловых процессов» и др. Приводятся теоретические материалы и описываются методы решения основных типов прикладных задач. Изложение основано на большом количестве примеров, которые моделируют ситуации, часто встречающиеся в повседневной профессиональной деятельности, а также при обеспечении безопасности судоходства на внутреннем водном транспорте. Учебное пособие составлено в соответствии с паспортом специальности 2.9.7 «Эксплуатация водного транспорта, водные пути сообщения и гидрография», в части методов и средств гидрологического изучения внутренних водных путей, предназначено в помощь студентам очной и заочной форм обучения.

Направления подготовки:

05.04.05 - «Прикладная гидрометеорология»

17.03.01 – «Корабельное вооружение»

ISBN 978-5-00110-311-0

© Векшина Т. В., Большаков В. А.,  
Коринец Е. М., 2022  
© Медиапайр, 2022

## Введение

Учение о русловых процессах как отрасль знаний сформировалось в конце XIX - первой половине XX века на грани гидрологии суши и геоморфологии, инженерной гидрологии, гидравлики и грунтоведения. При этом в течение длительного времени (почти столетия) оно развивалось, главным образом, как часть гидрологии рек и объединялось в одну научную дисциплину с динамикой русловых потоков, чаще всего составляя ее раздел; вместе с тем русла рек как формы рельефа, поймы и аллювиальные отложения рассматривались геоморфологией. В этом отношении показательно высказывание Н.Е. Кондратьева: «Русловой процесс..., взятый в целом, имеет своей первопричиной... гидрологические факторы, и в своем конечном проявлении имеет геоморфологический характер» [25].

К концу XX столетия глубина проработки проблем, связанных с русловыми процессами, теоретические обобщения и выделение при решении прикладных задач специфических, собственно русловых, вопросов привели к обособлению этой отрасли знаний, причем ряд вопросов динамики русловых потоков стал рассматриваться как часть теории русловых процессов. Наличие объекта (предмета) изучения, целей, задач и методов исследований [5, 7] позволило не только сформироваться самостоятельному научному направлению, но и предложить ему название - русловедение [32]. При этом как отрасль знания, занимающаяся изучением природного явления и его связей с природными и социально-экономическими условиями, русловедение является географической наукой. Решение прикладных аспектов, связанных с регулированием русел и учетом русловых процессов при водохозяйственном строительстве и проектировании относится к области инженерного русловедения, входящего в цикл технических дисциплин. К этому следует добавить, что русловедение как наука имеет систему законов, совокупность которых в наиболее общем виде описывает изучаемые ею явления. Важнейшие из них были сформулированы М.И. Маккавеевым [27], М.А. Великановым [13] и Н.Е. Кондратьевым [25] и уже стали общенаучным достоянием.

Таким образом, русловедение - отрасль знаний, изучающая условия и процессы формирования речных русел и разрабатывающая приемы и методы их регулирования. Последняя часть этого определения относится к инженерному русловедению, первая - к общему русловедению, предметом которого является речное русло и процессы, происходящие в нем при взаимодействии потока с грунтами, его слагающими, - эрозия, транспорт и аккумуляция наносов. Оба эти раздела русловедения взаимно дополняют друг друга. Их взаимодействие обеспечивает установление связей речного русла с окружающей человека средой, разработку прогнозов его изменений под влиянием антропогенной (хозяйственной) деятельности, выявление необратимых изменений в развитии русловых процессов и их

неблагоприятных последствий для жизни и деятельности человека, обоснование путей оптимизации мероприятий по регулированию русел. Это создает предпосылки для становления и развития экологического русловедения, которое рассматривает экологические аспекты русловых процессов - в их естественном развитии, при изменении направленности и характера в результате хозяйственной деятельности, а также в случае таких трансформаций речного русла (естественных и антропогенных), которые приводят к неблагоприятному состоянию самих рек и прилегающих к ним территорий, составляющих вместе речные экосистемы. Таким образом, экологические проблемы русловых процессов решает экологическое русловедение.

Если принять положение о том, что содержание науки всегда шире содержания исследуемого ею объекта, становится понятным, что русловедение не ограничивается изучением только речного русла. Включая в себя знания не только о своем объекте, но и его связях с объектами других наук, частично поглощая их, русловедение занимается изучением тех разделов гидравлики, гидрологии, геоморфологии, грунтоведения, гидротехники, инженерной геологии, которые позволяют раскрыть механизм русловых процессов, физические основы русловых деформаций, природу явлений, протекающих при взаимодействии потока и русла, эрозии, транспорте и аккумуляции наносов.

Поскольку же русла рек входят в состав окружающей человека среды, а русловые процессы в естественном состоянии и при их антропогенной трансформации непосредственно определяют условия жизни и деятельности людей, обитания живых организмов в реках и на приречных территориях, от которых, в свою очередь, зависит здоровье и жизнеобеспеченность человека, то экологическое русловедение включает в себя соответствующие разделы экологии - экологии человека и экологии природных ресурсов, а также разделы смежных дисциплин - гидроэкологии и экологической геоморфологии.

Решением основных экологических проблем русловых процессов является установление связей речного русла с окружающей человека средой, разработка прогнозов его изменений под влиянием хозяйственной деятельности, выявление необратимых изменений в развитии русловых процессов и их неблагоприятных последствий для жизни и деятельности человека, обоснование путей оптимизации мероприятий по регулированию и использованию русел, с точки зрения создания таких условий, при которых они сохраняются как природные объекты и обеспечивается функционирование речных экосистем.

Таким образом, экологическое русловедение - это прикладная научная дисциплина, которая занимается изучением влияния русловых процессов в их естественном развитии и при антропогенной трансформации на речные экосистемы, здоровье, жизнедеятельность и жизнеобеспечение человека; при этом объектом исследований является не только сама река (речное русло), но и прилегающие территории (пойма, берега рек), в пределах которых сказывается влияние русловых процессов.

# 1. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ НАПРЯЖЕННОСТЬ И КРИЗИСНЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ СИТУАЦИИ

## 1.1 Понятие «экология», «экологическое русловедение», общие задачи экологического русловедения.

По Н.Ф. Реймерсу: «Экология – комплексная наука, исследующая обитание живых существ, в том числе и человека в совокупности природных и отчасти социальных явлений и предметов» [7]. Экологию можно условно подразделить на три отрасли знания:

1. Биоэкологию – экология в первоначальном значении этого термина, т.е. жизнедеятельность и среда обитания.
2. Геоэкологию – изучающую процессы, явления и объекты природной среды и биосферы, определяющие условия жизнедеятельности и жизнеобеспечения человека и других живых организмов, в том числе, а часто и в первую очередь возникающие в результате антропогенного воздействия на природу.
3. Прикладная экология – изучает влияние на природу конкретных отраслей экономики, разрабатывает меры сохранения и нормы использования природных ресурсов.

В свою очередь, русловедение – отрасль знаний, изучающая условия и процессы формирования речных русел и разрабатывающая приемы и методы их регулирования.

Экологическое русловедение – это прикладная научная дисциплина, которая занимается изучением влияния русловых процессов в их естественном развитии и при антропогенной трансформации речных экосистем, при этом объектом исследований является не только сама река, но и прилегающие территории (пойма, водосбор).

Общими задачами экологического русловедения являются:

1. Выявление природных и антропогенных факторов русловых процессов, влияющих на возникновение экологической напряженности на реках.
2. Определение стадий развития экологической напряженности на реках и приречных территориях, связанных с русловыми процессами, вплоть до возникновения кризисных ситуаций.
3. Оценка уязвимости речных русел при антропогенных изменениях природной среды и непосредственных техногенных воздействий.
4. Обоснование пороговых значений изменений русловых процессов, определяющих необратимые трансформации речных русел.
5. Определение времени релаксации речного русла при прекращении воздействия (до перехода через пороговые значения), его стабилизации при необратимых изменениях и их экологических последствий.

6. Установление природных предпосылок возникновения экологической напряженности на реках, связанной с опасными проявлениями русловых процессов (естественные плановые деформации русел, аккумуляция или размывы на поверхности поймы, интенсивные вертикальные деформации т.д.) и разработка методов их учета на стадии проектирования или пред проектных изысканий.

## **1.2. Экологическая напряженность. Экологическая ситуация. Кризисная экологическая ситуация.**

Экологическая напряженность – это состояния природной среды, определяемые хозяйственной деятельностью, вследствие чего происходят изменения экосистемы в целом, утрата ею свойств, обеспечивающих нормальную жизнедеятельность и жизнеобеспеченность человека и природные условия или развитие природных процессов и явлений, неблагоприятных для здоровья, проживания и хозяйствования человека.

Под экосистемой понимается – любое сообщество живых существ (в том числе и человека) и его среда обитания, объединенные в единое функциональное целое, возникающее на основе взаимозависимости и причинно-следственных связей, существующих между отдельными экологическими компонентами.

Экологическая напряженность на реках (обусловленная русловыми процессами) – это изменение речных русел вследствие антропогенных воздействий, которые приводят к нарушению речной экосистемы. Экологическая напряженность на реках является следствием опасных проявлений русловых процессов, связанных с плановыми и вертикальными деформациями, приводящими к разрушению жилых, инженерных, хозяйственных объектов и т.д., вызывающие аварии или нарушение их функционирования, что обуславливает необходимость принятия защитных мер, и, в конечном счете, отражается на жизнедеятельности людей.

Степень экологической напряженности определяется сочетанием параметров, характеризующих изменчивость русел, скорость проявления и распространения неблагоприятных и опасных процессов и явлений.

Кризисная экологическая ситуация – это предельная экологическая напряженность. Применительно к речным руслам кризисная экологическая ситуация – это изменения русла под влиянием антропогенного воздействия, приводящие к уничтожению или деградации речной экосистемы.

Экологическая ситуация – это совокупность природных и социальных явлений и предметов, определяющих условия жизни, жизнедеятельности, здоровья и жизнеобеспеченности человека. Экологическая ситуация может быть благоприятной или неблагоприятной, и та и другая возникают:

1. как следствие естественных условий окружающей среды;
2. как следствие антропогенного воздействия.

При экологической оценке естественных проявлений русловых процессов задача исследований заключается в учете и прогнозе русловых деформаций с целью:

- предотвращения неблагоприятного развития процесса
- использования выявленных закономерностей их режима при разработке проектов.

При антропогенном воздействии задачей экологического русловедения является оценка пороговых значений вмешательства, после которых начинаются необратимые изменения морфологии русла, направленности и интенсивности русловых деформаций, обуславливающие деградацию речной экосистемы и создание экологической напряженности.

Учет доли каждого природного фактора и вида антропогенного воздействия в создании экологически неблагоприятной ситуации в руслах и на поймах рек дает возможность проводить их комплексную оценку, осуществлять районирование территорий (страны в целом, регионов, бассейнов рек, административных районов) по степени экологической напряженности, связанной как с антропогенными изменениями русловых процессов, так и с опасностью их естественных проявлений при водопользовании, а также, позволяет оказать направленное воздействие на усиление положительной роли естественных процессов, т.е. управлять русловыми процессами для получения желаемого эффекта и в наибольшей мере предотвращать возможные неблагоприятные экологические последствия. Одновременно правильный прогноз русловых деформаций и учет их направленности обеспечивают экономическую эффективность проводимых мероприятий. Такой подход, по существу, соответствует рациональному использованию природных ресурсов применительно к речным руслам.

В реализации этого принципа давние положительные традиции заложены работами основоположников теории русловых процессов – В.М. Лохтиным и Н.С. Леявским. Максимальное использование закономерностей руслоформирующей деятельности самого потока при трассировании дноуглубительных прорезей и строительстве выправительных сооружений позволило в основном сохранить реки как природные системы, обеспечить оптимизацию работ по регулированию русел и экономическую эффективность выполняемых мероприятий при снижении необходимости повторных искусственных воздействий на русло. Это же в известной мере относится к мостостроению, в рамках которого возникли свои направления исследований русловых процессов. Поэтому, как правило, здесь ниже аварийность, связанная с естественными деформациями русел, чем в других отраслях хозяйственной деятельности.

Если дноуглубление и выправление ведется только с инженерных позиций, без учета естественного развития русла, то в конечном счете происходит превращение его в самотечный канал с речным водным режимом, но лишенный перекатов, как естественного регулятора стока донных наносов, уровненного и скоростного режима реки. Это сопровождается на всем протяжении сплошного выправления русла не только «посадкой» уровней, которая достигает десятков сантиметров и продолжает расти при расчистке фарватера от поступающих в русло наносов, но и сказывается в изменении всей речной экосистемы, которая приходит в состояние, близкое к ее полной деградации (даже при выполнении компенсационных мероприятий, снижающих или прекращающих "посадку" уровней).

Более сложна и вместе с тем актуальна задача экологической оценки изменений направленности и характера проявлений русловых процессов в результате хозяйственной деятельности. В современных условиях трудно найти реку, в той или иной мере не испытывающую на себе антропогенное воздействие. При этом изменены не только гидрологический режим и качество воды, но и характер русловых процессов, которые, приобретая иные, чем в естественном состоянии, направленность и интенсивность, обуславливают трансформацию речных русел. В свою очередь, это сказывается на характере потока, условиях водообмена, уровненном режиме, развитии водной растительности, а также на прилегающих к реке пойме, склонах речной долины и, наконец, на состоянии всей речной экосистемы, причем русловые процессы могут быть как непосредственной причиной изменений состояния экосистемы, так и дополнительным фактором, накладывающимся на те ее изменения, которые произошли в результате прямого воздействия на нее.

Степень и формы воздействия хозяйственной деятельности на русловые процессы весьма различны по своим масштабам и их последствия неодинаковы в разных природных условиях, в зависимости от того, подвергаются изменению факторы русловых процессов или происходит непосредственное вмешательство в речное русло, на реках разных размеров, при наличии одного или одновременно нескольких воздействующих антропогенных факторов.

Формы проявления русловых процессов в каждом конкретном случае антропогенных изменений их факторов или непосредственного воздействия на русла достаточно хорошо известны. Меньшее внимание обычно обращается на экологические последствия происходящих в русле изменений, и они нередко учитываются лишь по факту свершившегося [32]. Исключение составляет, по-видимому, только проблема малых рек, массовая деградация русел которых из-за пересыхания или заиления вследствие избыточного поступления наносов с водосбора, развития водной растительности, а иногда и непосредственного техногенного воздействия поставило эти реки во многих регионах на грань исчезновения.

Как известно, сущность русловых процессов заключается во взаимодействии потока и русла, эрозии, транспорте (перемещении) и аккумуляции (в том числе образовании

аккумулятивных форм руслового рельефа) наносов. Сток воды является активным действующим фактором в системе «поток - русло». Будучи наиболее подверженным антропогенным воздействиям, он определяет соответствующие изменения в процессе руслоформирования. Сток наносов как фактор русловых процессов проявляется через закон автоматического выравнивания транспортирующей способности потока [27], по существу описываемый уравнениями деформаций и баланса наносов по длине участка реки. Изменения стока воды и наносов обуславливают развитие направленных деформаций русла. В обоих случаях происходит саморегулирование системы «поток - русло», имеющей двойственную природу [13]: поток управляет руслом, русло управляет потоком. Однако в реальных условиях ведущей становится та или другая составляющая взаимодействия и, соответственно, системы. В одном случае процессы протекают быстро, русло постоянно видоизменяется потоком под влиянием его скоростной структуры; в другом - процесс чрезвычайно медленный. Например, врезание реки, вызванное дефицитом наносов в потоке, при отсутствии искусственного вмешательства в жизнь реки проявляется в естественных руслах за геологические отрезки времени, и ими на практике, как правило, можно пренебрегать. Лишь в исключительных случаях эти процессы оказываются столь интенсивными, что их недоучет приводит к тяжелым последствиям - разрушению мостов, водозаборов и т.д. [1].

Антропогенные изменения природных условий, напротив, быстро (на протяжении первых годов - первых десятков лет) и нередко, катастрофически сказываются на состоянии русел рек. Следствия их разнообразны. Врезание рек, например, в нижних бьефах ГЭС и при массовом спрямлении русла для целей мелиорации, понижение отметок дна при разработке русловых карьеров стройматериалов (песчано-гравийной смеси - ПГС) и последующее развитие глубинной эрозии приводят к «посадке» уровней и фактически к превращению поймы в надпойменную террасу за первые несколько десятков лет. В нижних бьефах на «посадку» уровней, связанную с размывом дна, накладываются аналогичные процессы и искусственное углубление русла при разработке здесь русловых карьеров, вследствие чего процессы врезания приобретают незатухающий характер.

Во всех случаях «посадки» уровней, происходящие вследствие как размывов дна русла, так и искусственного понижения его отметок (в прорезях, в карьерах), возможно прогрессирующее остепнение пойменных лугов и почв, снижение их продуктивности. В нижних бьефах ГЭС сезонное регулирование стока способствует снижению обводненности поймы и трансформации пойменных ландшафтов. Известны неблагоприятные последствия глубинной эрозии и регулирования стока на состоянии поймы нижнего Дона, где ее иссушение привело к необходимости проведения оросительных мелиорации, на нижней Волге, где во многом были утрачены уникальные качества Волго-Ахтубинской поймы и т.д. С этим же

связано понижение уровня грунтовых вод и обезвоживание колодцев, отмирание боковых рукавов, которые являлись местами обитания и нереста рыбы.

Неблагоприятное, в том числе с точки зрения влияния на окружающую среду, развитие русловых процессов происходит, если регулирование стока таково, что уменьшается доля стока в межень и полностью срезаются водохранилищем летне-осенние паводки. На Вилуе [7] это приводит к ежегодному летнему обмелению реки, прекращению естественного размыва гребней перекатов в межень, вследствие чего по реке прекращается судоходство уже с середины навигации, создаются условия перемерзания при последующем наступлении ледостава. В результате зимой возникают наледи, нарушается кислородный режим, что пагубно влияет на развитие ихтиофауны. На нижнем Днестре такой режим регулирования стока усугубляется загрязнением воды продуктами эрозии почв, сельскохозяйственными и бытовыми стоками. При прекращении меженного размыва перекатов плесы при низких уровнях (расход снижается до  $60 \text{ м}^3/\text{с}$  против минимальной нормы  $100 \text{ м}^3/\text{с}$ ) превращаются в полупроточные водоемы, в которых происходит цветение воды, развитие волной растительности и т.д. В таких условиях дноуглубительные работы на перекатах играют положительную роль, способствуя размыву их гребней и улучшая водообмен в обмелевшей реке.

Дамбы обвалования, сооружаемые для борьбы с наводнениями и использования пойменных земель для выращивания садово-огородных и зерновых культур, приводят к сосредоточению потока половодья в русле, что способствует его размыву, не только глубинному, но и боковому, разрушению берегов, вплоть до уничтожения самих дамб. Подобные явления известны в нижнем течении р. Риони [32] и на нижнем Днестре; на последнем в тех местах, где река проходит вдоль коренного берега, активизируются оползневые процессы, наносящие ущерб населенным пунктам и сельскохозяйственным угодьям.

Аккумуляция наносов как следствие антропогенной эрозии почв создает условия для заиления и деградации русел малых рек, превращению их в балки. К такому же эффекту нередко приводят осушительные мелиорации заболоченных территорий. Развитие эрозии ранее не эродированных почв (до распашки земель) и повышенный транспорт наносов в дренажных каналах вызывают нарушения баланса наносов (их избыток) в малых и, отчасти, в средних реках, которые начинают интенсивно мелеть (например, на верхнем Немане к 70-м годам после проведения мелиоративных работ средние отметки дна и уровни воды при равно обеспеченных расходах повысились почти на 1 м). Аналогичные явления выше водохранилищ, имея другую природу, приводят к усилению опесачивания лугов в прирусловой зоне, заболачивания поймы; в пойменных почвах увеличивается содержание карбонатов [7]. В низовьях рек регулирование стока и сокращение стока наносов вызывает

прекращение выдвигания дельт и даже их частичный размыв. Это же, как и искусственное спрямление русла, обуславливает иногда смену естественной аккумуляции глубинной эрозией до тех пор, пока гидрологические характеристики (уклон, транспортирующая способность потока) не придут в соответствие с новым состоянием водного потока.

### **1.3 Необходимость комплексного подхода к оценке результатов антропогенного воздействия**

Процессы и явления, вызванные антропогенным воздействием, распространяются по реке трансгрессивно или регрессивно, причем неодинаково и неодновременно в разных звеньях русловой сети. В этом одно из проявлений закона факторной относительности М.И. Маккавеева - одного из ведущих законов русловедения. Саморегулирование русла при антропогенном воздействии на природные факторы обуславливает также изменения в развитии форм русла. Их параметры связаны с размерами потока: например, радиусы кривизны русла определяются расходом воды и т.д. Изменение водности реки приводит, как предельный случай, к трансформации русла из одного морфодинамического типа в другой (например, разветвление сменяется меандрированием); более распространено уменьшение размеров излучин и островов, развитие новых островов, отмирание рукавов, активизация на определенном этапе размыва берегов. Изменения в русле и тем более смена типа его деформаций сопровождаются соответствующей трансформацией процессов «самообразования». Наряду с чисто русловым эффектом все это имеет экологические последствия, поскольку нарушается сложившееся равновесие во всей природно-антропогенной системе. Непосредственное вмешательство в русло (дноуглубительные прорезы, карьеры инертных материалов, выправительные и инженерные сооружения и пр.), изменяя его морфологию и морфометрию, приводит к обратному воздействию на поток и, в конечном счете, через саморегулирование системы к размыву русла. При этом происходит распространение направленных изменений русловых деформаций вверх (регрессивно) и вниз (трансгрессивно) по течению. При многочисленности мероприятий влияние каждого из них складывается или перекрывается, вследствие чего трансформации русла наблюдаются на участках большой протяженности. Эти процессы в равной мере проявляются в широкопойменных песчаных и врезанных галечных руслах.

Актуальной задачей экологического русловедения является определение природных «резервов» речных русел в отношении техногенных воздействий, оценка пороговых значений вмешательства, после которых начинаются необратимые изменения морфологии русла, направленности и интенсивности русловых деформаций, сказывающиеся в деградации речной экосистемы и создании экологической напряженности для жизни и деятельности людей. Решение этой задачи возможно на основе выделения трех уровней проявления русловых процессов и соответствующих им главных видов деформаций русел [7]: река в целом или ее

участки большой протяженности (не менее морфологически однородных) -форма русла - форма руслового рельефа, с одной стороны, направленные деформации продольного профиля реки - периодические горизонтальные деформации форм русла (излучин, узлов разветвления) - текущие деформации грядовых форм руслового рельефа, с другой. Все виды русловых деформаций проявляются одновременно. Степень нарушения естественного режима переформирования зависит от сложности природной системы (в частности, от размера реки) и от того, к какому уровню приложена нагрузка. Вместе с тем при одной и той же степени нарушения природных связей, крупные реки выдерживают более длительное воздействие, чем реки низких порядков (малые реки), так как обладают большими возможностями саморегулирования. Однако очевидно, что это различие должно по-разному проявляться в различных природных условиях.

Наименьшие изменения естественных деформаций происходят при вмешательстве в текущие деформации грядового рельефа русла. Длительность проявления этих нарушений зависит от степени подвижности руслового аллювия. В песчаных руслах, которые способны регулировать гидравлические сопротивления посредством развития грядового рельефа, последствия такого вмешательства быстро ликвидируются [17]. В галечных руслах они сохраняются длительное время, а влияние измененной динамики потока распространяется выше и ниже участков вмешательства.

Воздействия на уровне форм русла или горизонтальных деформаций распространяются одновременно и на формы руслового грядового рельефа. В то же время некоторые виды вмешательства в русловый рельеф проявляются на уровне горизонтальных деформаций, изменяя форму русла, а многие вмешательства в горизонтальные деформации способствуют не только интенсификации размывов берегов, но и приводят к местной трансформации продольного профиля. Воздействие на формы русла и горизонтальные деформации со стороны инженерных сооружений и мероприятий может привести к смене типа руслового процесса, хотя река, как природный объект, сохраняется. После разрушения сооружений или прекращения действия мероприятий последствия вмешательства ликвидируются потоком спустя большее или меньшее время, если не произошли необратимые изменения вплоть до смены морфодинамического типа русла. Очевидно, наибольшей инерцией при вмешательстве в горизонтальные деформации отличаются реки, поток которых гидравлически неоднороден [22]; напротив, реки, поток которых однороден, подвержены при этом интенсивным деформациям, особенно при резкой разнице между крупностью руслового аллювия и грунтов, слагающих берега рек.

Наибольшие изменения русел рек происходят при вмешательстве на уровне продольного профиля. Они охватывают все уровни форм проявления русловых процессов. Во многих случаях внутренние связи русловых процессов нарушаются настолько, что

естественный русловой режим рек либо не восстанавливается, либо период восстановления занимает очень длительное время; при этом после восстановления русло приобретает иные, чем при бытовом режиме, характеристики. При создании водохранилищ на равнинных реках восстановления естественного режима не происходит. На горных реках после занесения водохранилищ возникает русло с новыми характеристиками на более высоких отметках дна. Длительность периода восстановления зависит от величины стока наносов и крупности руслового аллювия, определяющего его подвижность, так как механизм восстановления определяется процессом выравнивания транспортирующей способности потока по длине реки нередко в измененных гидрологических условиях.

Можно выделить ряд последствий для речных русел от техногенного вмешательства, по-разному влияющих на экологию человека: 1) сохранение или быстрое восстановление естественного состояния - широкопойменные реки с песчаным аллювием при кратковременном (разовом) воздействии на грядовый рельеф русла; 2) сохранение реки как природного объекта, но с изменением характера русловых деформаций и типа русла - широкопойменные реки с песчаным аллювием при воздействии на формы русла и продольный профиль, галечно-валунные русла; 3) деградация рек - малые реки, каскады гидроузлов (водохранилищ и прудов) на реках.

Деградация малых рек имеет особое значение при экологической оценке антропогенного изменения речных русел. При всех видах хозяйственного воздействия на малые реки и их русла происходит быстрое изменение русловых процессов, сопровождающееся адекватным изменением всей речной экосистемы. Именно поэтому распашка земель и развитие ускоренной эрозии почв, проведение мелиорации, а также вынос в реки загрязняющих веществ, приводят к заилению, зарастанию и, наконец, деградации именно малых рек. Чем крупнее река, тем больше сопротивляемость ее русла антропогенным воздействиям, что связано с ростом удельной транспортирующей способности и удельной энергии потока при увеличении водоносности реки. Вследствие этого эрозия почв может сказываться на состоянии русел рек, по-видимому, не превышающих по размерам среднего Дона или верхней Оки. Обмеление Дона было зафиксировано еще Б.В. Поляковым в 1930 г. и связывалось с интенсификацией в начале XX века эрозии почв и овражной эрозии в речном бассейне. Уже для нижнего Дона подобные явления не характерны.

Заиление и деградация малых рек, помимо исчезновения самого природного объекта - реки, сопровождается нарушением многих природных связей, вызывая неблагоприятные, преимущественно необратимые изменения в ландшафтной обстановке в целом. Отсюда проблема малых рек выходит за рамки собственно русловедения, включая в себя экологические аспекты гидрологии, гидрогеологии, почвоведения, геоботаники. Особое значение при этом имеет связь экологического русловедения с эрозиоведением - наукой,

занимающейся изучением эрозии почв, в первую очередь, на сельскохозяйственных землях. Это определяет экологическую сущность самого эрозиведения, поскольку следствием эрозии почв является снижение почвенного плодородия и производственного потенциала сельскохозяйственных земель. С другой стороны, продукты смыва почв (в том числе биогенные вещества) поступают в малые реки, вызывая их заиление, зарастание и, в конечном итоге, деградацию.

Последнее, таким образом, представляет собой пример интеграционных связей русловедения с другими науками при решении экологических задач. Действительно, изменения речных русел, происходящие в связи с антропогенным вмешательством непосредственно в их морфологию, сопровождаются определенными изменениями других компонентов природной среды, влияя, в результате, на общее состояние речной экосистемы, а через нее – на окружающую человека среду, т.е. на условия его жизнедеятельности. Вместе с тем трансформация под влиянием хозяйственной деятельности речной экосистемы приводит к весьма существенным изменениям в механизме функционирования всей системы «поток - русло». Особенно существенно это сказывается на реках, протекающих по урбанизированным или промышленно освоенным территориям, где в их руслах под влиянием сточных вод возникает принципиально новый тип грунтов, слагающих русло, в том числе руслообразующих наносов – техногенные илы. В заиляющихся руслах происходит не только загрязнение формирующихся осадков, но и их физико-химическое преобразование [9], причем, чем меньше реки, тем в большей степени эти процессы проявляются. Вследствие этого для понимания процессов взаимодействия потока и русла, что составляет сущность русловых процессов, и прогнозирования в подобных условиях русловых деформаций необходимо знание механики грунтов и физической химии.

Другая сторона накопления загрязняющих веществ, поступающих в реки со сточными водами и физико-химического преобразования донных отложений - возможное вторичное загрязнение речной воды при размыве русла или механическом воздействии на него. С этим явлением приходится сталкиваться при выполнении дноуглубительных работ, разработке карьеров инертных материалов, прокладке через реки различных коммуникаций, т.е. проведении мероприятий, которые нарушают защитный поверхностный слой отложений и в той или иной мере способствуют активизации процессов размыва.

Таким образом, русловые процессы и антропогенные изменения речных русел являются важными факторами возникновения и развития экологической напряженности в регионах и на конкретных реках, вызывая трансформацию и деградацию экосистем и создавая неблагоприятные условия для жизни и деятельности человека. Следуя схеме структуры современной экологии, предложенной Н.Ф. Реймерсом [7], можно считать, что в рамках геоэкологии - отрасли знаний, изучающей процессы, явления и объекты природной среды и

биосферы, которые определяют условия жизнедеятельности и жизнеобеспечения человека и других живых организмов, возникающие в том числе и в первую очередь в результате антропогенного воздействия, - в разделе экологии сред (говорят также об экологии природных ресурсов) сформировалось новое прикладное направление - экология речных русел. С другой стороны, установление связей речного русла с окружающей человека средой, разработка прогнозов его изменений под влиянием хозяйственной деятельности, выявление необратимых изменений русловых процессов и их неблагоприятных последствий для жизни и деятельности человека, обоснование путей оптимизации мероприятий по регулированию и использованию русел рек, с точки зрения создания таких условий, при которых они сохраняются как природные объекты и обеспечивается функционирование речных экосистем, являются предметом исследования экологического русловедения [32]. Последнее может рассматриваться одновременно и как раздел общего русловедения, и как раздел гидроэкологии.

Экологическое русловедение при решении своих задач, таким образом, должно опираться на достижения общего (и его природоведческой ветви - географического) русловедения, одновременно быть тесно связанным с инженерным русловедением и использовать наработки в смежных науках. При этом оно рассматривает как экологические аспекты естественного развития речных русел, в том числе преобразованных в результате хозяйственной деятельности, так и экологические последствия любого вмешательства в развитие русловых процессов.

Для оценки экологического состояния регионов, речных бассейнов, природных территориальных комплексов, отдельных компонентов природной среды и объектов используются понятия «экологическая напряженность» и «кризисная экологическая ситуация». Эти термины являются взаимодополняющими, и их одновременное применение усиливает значимость оценок неблагоприятных для человека изменений, происходящих в природе в результате его хозяйственной деятельности, а также вследствие естественного развития природы и ее компонентов. Термин «экологическая напряженность» означает как различные состояния природной среды, определяемые хозяйственной деятельностью, вследствие чего реален риск изменения экосистемы в целом, утрата ею свойств, обеспечивающих нормальную жизнедеятельность и жизнеобеспеченность человека, так и природные условия или развитие природных процессов и явлений, неблагоприятных для здоровья, проживания и хозяйствования людей (по В.И. Далю - "напряженность - состояние напряженного" с добавлением в другом месте - "сторонними или своими силами") [Белоцерковский, Белякова и др., 1993].

При таком подходе экологическая напряженность на реках, обусловленная русловыми процессами, представляет собой: во-первых, такие изменения речных русел, вследствие антропогенных воздействий на них, которые могут привести к нарушению речной экосистемы

и нормальных условий жизнедеятельности и жизнеобеспечения людей; во-вторых, она является следствием опасных проявлений русловых процессов, связанных с плановыми и вертикальными деформациями, способными привести к разрушению жилых, инженерных, хозяйственных объектов и коммуникаций, создающими риск аварий, что обуславливает необходимость принятия защитных мер. Степень экологической напряженности определяется в этом случае сочетанием параметров, характеризующих направленность изменения русел, скорость проявления и распространения неблагоприятных процессов.

Предельная экологическая напряженность соответствует кризисной экологической ситуации КЭС. Применительно к речным руслам под КЭС понимаются их необратимые изменения под влиянием антропогенных воздействий, приводящие к уничтожению или деградации речной экосистемы, а, с точки зрения природных предпосылок, - такие проявления русловых процессов, которые составляют реальную угрозу функционированию инженерных сооружений или даже приводят к разрушению береговых и русловых объектов. Рост степени экологической напряженности поэтому можно рассматривать сначала как появление первичных признаков КЭС, а затем - предкризисное состояние речного русла.

Экологическое состояние речных русел формируется при освоении рек и прибрежных территорий не только вследствие непосредственного воздействия антропогенного фактора, но и при развитии природных предпосылок, связанных с естественным проявлением русловых процессов. Подобно самим рекам, представляющим собой нижние звенья в системе водных потоков, и их русловому режиму, определяемому природными условиями на всей территории речных бассейнов, экологическая напряженность на них зависит в том числе от состояния эрозионно-русловых систем в целом, т.е. являются производной изменений и процессов, происходящих в пределах речных бассейнов. Однако характер связей в системе очень сложен и неоднозначен, что объясняется различной реакцией каждого ее звена на антропогенные воздействия, природные процессы и, соответственно, на ту или иную степень экологической напряженности.

## **2. РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ**

Под русловым процессом понимают – изменения морфологического строения речного русла и поймы, происходящие под действием текущей воды.

Формирование русла является саморегулирующимся процессом – регулирование осуществляется через транспортирующую способность.

Транспортирующая способность потока – это предельная концентрация наносов, при которой он еще может поддерживать их во взвешенном состоянии, без качественного перехода одного типа руслового процесса в другой.

Если количество поступающих на участок реки наносов меньше, чем его транспортирующая способность, неизбежен размыв дна. Если количество наносов больше, чем транспортирующая способность потока, то наблюдается их аккумуляция.

Основными факторами руслового процесса являются:

1. Сток воды
2. Сток наносов
3. Ограничивающие условия

Под стоком воды в данном случае понимается – объем годового стока, особенности его внутригодового распределения и величина так называемых руслоформирующих расходов воды.

Поступая в реку со всей площади водосбора, наносы транспортируются потоком в разных формах. Каждый поток должен транспортировать заданный ему природными условиями водосбора сток наносов. Реки обладают широкой способностью приспосабливаться к стоку поступающих в них наносов путем изменения типов деформаций русла и поймы.

Под ограничивающими факторами понимаются геологические особенности строения речных долин и русел, вечная мерзлота, а также сооружения, препятствующие свободному развитию деформаций. Особый случай – скульптурные русла водных потоков.

В зависимости от сочетания этих факторов реализуются те или иные схемы деформаций речных русел и появляются специфические для этих комбинаций морфологические образования в руслах рек и на их поймах, то есть возникают различные типы руслового процесса.

При анализе переформирований русла выделяют следующие типы русловых процессов – типизация ГГИ [25]:

1. ленточнорядовый
2. побочный
3. ограниченное меандрирование
4. свободное меандрирование
5. незавершенное меандрирование
6. пойменная многорукавность
7. осередковый тип или русловая многорукавность

Учитывая, что типизация ГГИ включена в нормативные документы, рассмотрим ее более детально. Как указывалось, в типизации ГГИ выделено семь типов деформаций речных русел, т.е. семь способов перераспределения наносов (рис.2.1). Опишем кратко основные особенности каждого из типов.

*Ленточногрядовый тип руслового процесса.* Представляет собой простейшую форму транспорта наносов, осуществляющуюся путем сползания по руслу одиночных ленточных гряд. Общие очертания русла - прямолинейные или слабоизвилистые. Отсутствие распластанности русла свидетельствует о соответствии расходов наносов и воды определенному уклону реки. Движение донных наносов осуществляется в виде перемещения цепи ленточных гряд, являющихся мезоформами.

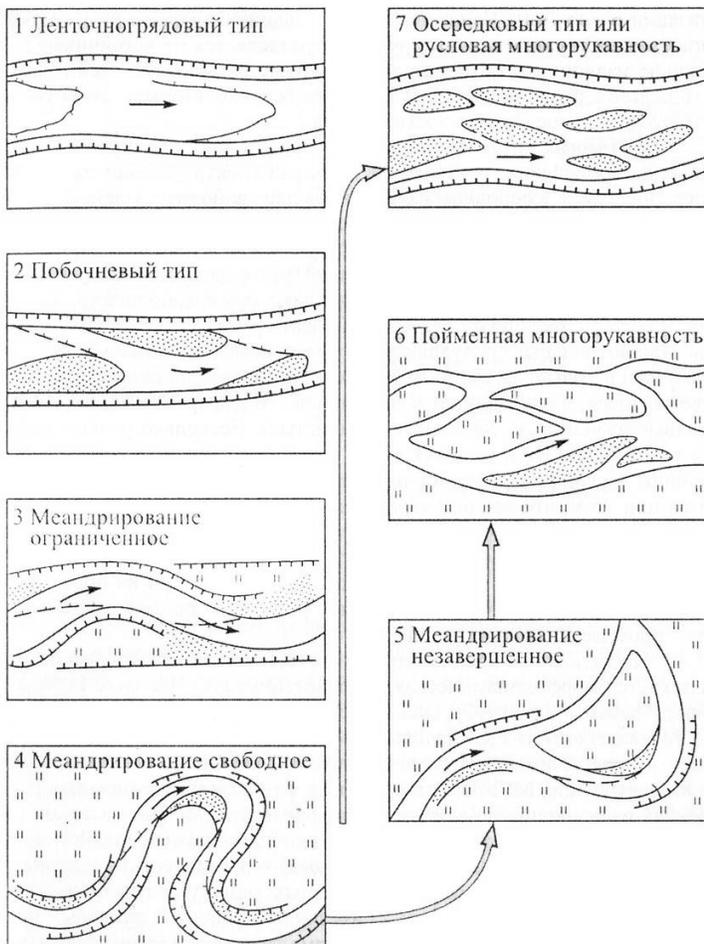


Рис. 2.1 Типизация русловых процессов (классификация русел рек) ГГИ

*Побочневый тип.* Транспорт донных наносов осуществляется в виде сползания крупных гряд с перекошенным в плане положением их гребней. Выступающие вперед

наиболее возвышенные части этих гряд располагаются попеременно, то у левого, то у правого берега реки. В межень они обсыхают, образуя побочни, расположенные вдоль по течению как бы в шахматном порядке. Гребень затопленной части гряды образует перекаат, а ее подвалье – плес.

Побочневый режим движения наносов часто возникает не только в условиях ухудшения условий транспорта наносов, но и при естественном или искусственном ограничении плановых деформаций реки.

*Ограниченное меандрирование.* Избыток предельного уклона (уклона дна долины) для переноса донных наносов приводит к образованию относительно слабобразвитых излучин. Деформации излучин осуществляются путем сползания вниз по течению реки с сохранением их форм и размеров. Размываемой оказывается часть вогнутого берега ниже вершины излучины, а намываемым – участок выпуклого берега также ниже этой вершины. При образовании излучин создается пляж – образование, подобное побочню. Последний закономерно сползает, в то время как пляж может смещаться только вместе со сползанием всей излучины. Участок берега, огибаемый излучиной, представляет собой пойменный массив, поверхность которого наклонена, обычно вниз по течению реки и от прирусловой части к притеррасной (присклоновой). На поверхности пойменного массива часто наблюдаются гривы (следы прежних береговых валов); в плане они огибают нижнюю часть выпуклого берега излучины. В разрезе пойменный массив сложен наносами той же крупности, что и донные наносы в русле, а верхние слои представлены отложениями взвешенных наносов, обычно слоистых (толщина слоев определяется величиной руслоформирующих расходов воды). В период половодья поток спрямляется, пересекая пойменные массивы, в межень он извилистый. Коэффициент извилистости при ограниченном меандрировании примерно равен 1,2, а угол разворота излучин не превышает  $90^{\circ}$ .

*Свободное меандрирование.* Процесс характерен тем, что излучины русла проходят замкнутые циклы переформирований, при которых русло из прямого участка достигает состояния петли, постепенно увеличивая свою кривизну и асимметричность. Затем происходит прорыв ее перешейка, после чего весь цикл деформаций повторяется. В начале меандрирования до углов разворота порядка  $75^{\circ}$  наблюдается сползание, впоследствии при углах  $120-150^{\circ}$  оно полностью прекращается. В дальнейшем происходит разворот излучин вокруг фиксированных точек в перегибах русла. В результате угол разворота достигает  $240-270^{\circ}$ . Основная излучина в результате прорыва перешейка петли русла превращается в старицу, отчлняясь от реки, и в межень становится пойменным озером серповидной в плане формы.

Беспрепятственное свободное меандрирование происходит в условиях отсутствия ограничивающего влияния склонов долины, т.е. при наличии ее широкого дна. В этом случае пояс меандрирования неоднократно переходит от одного склона долины к противоположному, образуя пойменные массивы, огибаемые не одной излучиной, как при ограниченном меандрировании, а целой серией излучин, которые, обладая общими признаками, свойственными одиночной излучине, позволяют их рассматривать как целостное морфологическое образование – более крупное, чем пойменный массив, огибаемый одной излучиной. Для массивов, огибаемых серией излучин, характерен наклон их поверхности вниз по течению реки и в направлении от русла к подножию склонов долины.

*Незавершенное меандрирование.* В условиях регулярно затопляемых пойм при резком различии крупности донных и взвешенных наносов, а также пойменной и русловой частей аллювия, циклы, развивающиеся по схеме свободного меандрирования, могут оказаться прерванными образованием спрямляющего потока. Он может возникать даже на ранних стадиях меандрирования, если глубина затопления поймы велика. Иногда отторгаются только пляжи – не заросшие участки выпуклых берегов. Обычно образование потока, спрямляющего излучину, происходит постепенно. Первоначально он действует только в высокое половодье, но, постепенно с увеличением вреза, принимает в себя и меженные расходы. Первоначальное главное русло со временем отмирает, спрямляющий же поток начинает повторять весь цикл развития. Таким образом, в случае незавершенного меандрирования происходит раздвоение русла. Полная смена цикла развития в этих условиях обычно продолжается несколько десятилетий. Спрямление русла ведет к перестройке транспорта наносов потоком.

*Пойменная многорукость.* Это есть дальнейшее развитие незавершенного меандрирования. Образуется серия спрямляющих протоков и сеть протоков вторичного происхождения, соединяющая эти спрямляющие протоки. Образование длинных протоков в притеррасной пойме, омывающих целые пойменные массивы чаще всего встречается в низовьях больших рек. Каждый проток способен развиваться самостоятельно и в нем могут появляться ленточные гряды и побочни. Перекрытие отдельных протоков надвигающимися скоплениями наносов в руслах, из которых они начинаются или в которые впадают, ведет к процессам возобновления нового цикла деформаций.

*Русловая многорукость.* Это случай, когда река столь перегружена наносами, что для их транспорта предельный уклон оказывается недостаточным. Для обеспечения перемещения наносов река вынуждена расширять свое русло, т. е. увеличивать фронт перемещения наносов. Разделение потока на рукава происходит в результате обсыхания незатопленных вершин ленточных гряд, движущихся в распластанном русле не цепочкой,

а разбросано по ширине реки. Если вершины песчаных гряд – не заросшие, то тип русловой многорукавности может быть назван осередковым. Часто осередки в результате отложения на них наносов и благодаря зарастанию их поверхности превращаются в острова. В этом случае это островная русловая многорукавность. В случаях, если вершины части ленточных гряд не обсыхают, такой тип процесса может быть назван блуждающим руслом (русло часто меняет свое положение, но всегда имеются действующие протоки). Таким образом, в случае русловой многорукавности различаются три основные разновидности: блуждающие русла, осередковая и островная многорукавность.

Всякая классификация должна содержать общий для различных типов признак. В приведенной выше типизации ГГИ такими признаками являются мера использования потоком уклонов дна долины и способность потока, транспортировать донные наносы. С этой точки зрения, отмечается:

а) все меньшее использование потоком уклона дна долины – при переходе от ленточногрядового типа к пойменной многорукавности;

б) перегруженность потока наносами (взвешенными и влекомыми).

При этом высокая транспортирующая способность русловой многорукавности определяется не уклоном, а расширением русла, возрастанием площади живого сечения, увеличивающего фронт перемещения наносов.

Заметим также, что, если тип руслового процесса при ленточных грядах, побочных и осередках определяется движением мезоформ речного русла, то во всех остальных случаях он обусловлен разными макроформ. По этой же причине исследование ленточных гряд и побочной должно в основном производиться гидравлическими методами, в остальных случаях необходимо привлекать характеристики всего бассейна, т.е. превалярующие факторы, каковыми являются водный режим, сток наносов и ограничивающие условия.

Типизация МГУ более детальна, в ней рассмотрены формы отдельных излучин.

В свою очередь, рассматривая более или менее значительные участки потока, Караушев А.В. различает следующие основные типы речных русел: устойчивые, размываемые, заиляемые, равновесные. Приведенная динамическая классификация речных русел может рассматриваться как предпосылка их морфологического исследования.

## **2.1 Формирование стока наносов**

Наносы формируются из продуктов эрозии почвогрунтов в бассейне реки, дискретно поступающих в ее русло в основном в периоды паводков и половодий. В русле реки этот материал в зависимости от его крупности и скорости потока может перемещаться в виде взвешенных или влекомых наносов.

Переход неаллювиальных пород в аллювий имеет место по всей поверхности водосборов, а также на участках, где реки подмывают склоны речных долин, сложенных коренными породами. Образование аллювия ведет к появлению на поверхности водосбора эрозионных образований, формирующих так называемые верхние звенья гидрографической сети: ложбины, лощины, суходолы.

Самым верхним звеном гидрографической сети являются ложбины стока – эрозионные образования, впоследствии занесенные толщей покровной породы. В настоящее время они представляют собой слабовыраженные вытянутые впадины с пологими, обычно задернованными склонами, невыраженным дном и прямолинейным профилем. Площади их водосбора невелики, как правило, не превышают  $0,05\text{км}^2$ . По ложбинам происходит сток атмосферных осадков и плоскостной смыв частиц почвы, характеризующийся отсутствием сосредоточенного размыва [15, 3].

Слияние ложбин приводит к образованию следующего звена гидрографической сети – лощин, которые являются более выраженным эрозионным образованием. Лощины по сравнению с ложбинами имеют вследствие более сосредоточенного размыва высокие и крутые склоны. Как на дне лощины, так и на ее склонах могут образовываться промоины, рвы и овраги, т.е. проявления берегового и донного размыва. Площади водосборов лощин обычно превышают  $0,05\text{км}^2$ .

Суходолы являются переходным звеном от лощин к речным долинам и обычно имеют асимметричное поперечное сечение. У суходолов хорошо выражены, в отличие от лощин, береговой и донный размыв, вызывающий проявление извилистости русла. Площади водосборов суходолов, как правило превышают  $1,0-1,5\text{км}^2$ .

Слияние суходолов приводит к образованию речных долин, являющихся завершающимся звеном развития эрозионных процессов. Здесь происходит непрерывное чередование размывов и намывов русла соответственно особенностям процесса транспорта наносов.

Таким образом, верхние звенья гидрографической сети – ложбины, лощины и суходолы, занимающие 90% ее длины, являются областями формирования жидкого и твердого стока постоянных и временных водотоков. На поверхности водосбора, занятого этими звеньями гидрографической сети, происходят необратимые процессы плоскостного смыва, склонового и донного размыва почв и коренных пород, вынос твердого материала текучими водами. Нижние звенья гидрографической сети – различные типы долин рек – в основном являются путями транспорта этих наносов, поступивших с верхних звеньев гидрографической сети.

В свою очередь, водный поток в процессе русловой эрозии производит работу по преобразованию самого русла, разновидностью которой является размыв ложа. Продукты

разрушения совместно с материалом, поступившим со склонов водосбора, перемещаются вниз по течению.

Для решения задач расчета русловых деформаций, исторически сложилось два принципиально разных подхода:

1. Гидродинамический, который основан на применении системы уравнений сохранения энергии и массы движущейся воды и наносов.

2. Гидроморфологический – основан на типизации морфологически однородных русловых форм и образований и на определении средних скоростей их перемещения при разработке фоновых прогнозов (на основе крупномасштабных планово-высотных картографических и аэрофотосъемочных материалов)

Одним из важнейших свойств руслового процесса является дискретность. Она проявляется в том, что морфология русла расчленяется на структурные элементы, а процесс перемещения наносов – на отдельные элементарные процессы.

В гидроморфологической теории выделены следующие структурные уровни:

1. Уровень отдельной твердой частицы. На этом уровне рассматриваются вопросы гидравлической крупности, устойчивости донной частицы, поведение взвешенной частицы в поле пульсирующих скоростей.
2. Уровень микроформ – небольшие песчаные гряды массового распространения в русле. Размеры микроформ соизмеримы с глубиной русла.
3. Мезоформы – крупные грядообразования, (скопления наносов), крупные формы, соизмеримые с шириной русла. Мезоформы определяют морфологическое строение русла.
4. Уровень макроформ. Макроформа – комплекс взаимосвязанных элементов русла разного порядка, в целом определяющий внешний вид реки.

### **2.3 Основные положения гидроморфологической теории. Необратимые и обратимые деформации**

В русловом процессе четко выделяются две категории деформаций речного русла и поймы - необратимые и обратимые. Действительно, по материалам наблюдений за русловыми и пойменными деформациями в естественных условиях удается выделить случаи, когда эти деформации длительное время оказываются однонаправленными (необратимыми). В них выражается многовековое развитие реки, в том числе и ее приспособление к текущим изменениям природной среды. В этом случае русловой процесс является преимущественно рельефообразующим фактором и его изучение должно являться предметом геоморфологии. Однако в условиях регулирования стока воды и наносов как одних из главных факторов руслообразования однонаправленные, т. е. необратимые

деформации, могут приобретать значительные скорости развития. Например, так происходят деформации в зонах влияния водохранилищ (верхнего и нижнего бьефов). Скорости этих деформаций становятся сопоставимыми со скоростями так называемых обратимых деформаций.

Под обратимыми деформациями следует понимать такие переформирования речного русла и поймы, которые происходят в результате переотложения наносов в ходе их транспорта (чередование размывов и намывов русловых форм). Именно факт переотложения наносов и обуславливает появление морфологических образований в руслах и на поймах рек. Таким образом, транспорт наносов следует рассматривать как содержание руслового процесса, а морфологические образования — как его внешнее выражение, его форму [4].

Одним из важных признаков обратимых деформаций является отсутствие изменений по длине реки и во времени типа морфологических образований речных русел и их размеров в их осредненной статистической оценке. Состояние реки, при котором русловые и пойменные деформации находятся в полном соответствии с расходом наносов, называется состоянием динамического равновесия. В нем находится подавляющее большинство рек бывшего СССР, не подвергавшихся антропогенному воздействию.

Необратимые деформации могут выражаться как в виде транзитного выноса наносов, так и в виде их длительного накопления, т. е. являются однонаправленным процессом. Вынос наносов может приводить к снижению (сработке) продольного профиля реки, а также к переходу от типов руслового процесса, свойственных интенсивному транспорту наносов, к менее интенсивному (в связи с уменьшением общих уклонов дна речной долины). Аккумуляция наносов может иметь место на участках выше общего и местного базисов эрозии. В этом случае образуются такие аккумулятивные формы, как речные дельты общие и внутренние (у местных базисов эрозии, например, при впадении реки в проточное озеро).

Формирование речных пойм – это тоже аккумулятивный процесс, так как они создаются в результате отложения наносов в ходе деформаций русла реки в плане, т. е. в ходе его перемещения по дну речной долины. Однако, поскольку это перемещение связано с возвращением в поток части ранее отложенных рекой наносов в результате подмыва пойменных берегов, т. е. имеет место постоянно идущий обмен наносами между поймой и руслом, общие деформации поймы могут рассматриваться как условно необратимые. При этом, хотя скорости деформаций поймы в несколько раз больше, чем скорости необратимых процессов, например, формирования дельт, все же сроки формирования поймы сопоставимы с продолжительностью необратимых процессов и во много раз длительнее периодов обратимых деформаций.

Поскольку необратимые, условно необратимые и обратимые деформации происходят на реке одновременно и выражаются в несопоставимых между собой величинах, оценка обычно незначительных темпов необратимых и условно необратимых деформаций затруднительна. Действительно, сработка продольного профиля (необратимая деформация) измеряется в миллиметрах и реже в сантиметрах за столетие. В то же время внутригодовые изменения отметок дна на перекатах выражаются в метрах за сезон. Смещения в плане бровок речных долин измеряются в сантиметрах за год, а плановые смещения речных излучин могут достигать десятков и сотен метров за год.

Часто считают, что русло реки врезалось в дно долины, основываясь на увеличении высоты его берегов. Однако для использования этого признака надо обязательно знать геологическое строение всей толщи аллювия и в том числе границы древних и современных грунтов (сформировавшихся в условиях современной водоносности реки). Это объясняется тем, что скорость нарастания пойм в высоту вследствие отложения на их поверхности наносов (наилка) во много раз превышает значение снижения отметок дна, вызванные общим врезанием русла. Е. В. Шанцер — основоположник учения о современном аллювии — отмечает: «Никогда река не бывает врезана в пойму, пойма выросла, а не река углубилась». Так как необратимые деформации развиваются на фоне четко выраженных обратимых, то обнаружение первых требует изучения участков большого протяжения. На коротких участках можно десятки лет наблюдать достаточно длительную тенденцию к однонаправленным изменениям отметок дна русла, однако она может быть обусловлена прохождением по реке большого скопления наносов. При его подходе будут наблюдаться тенденции к повышению отметок дна, которые затем сменятся их уменьшением. Это обычно бывает обусловлено тем, что подобные скопления наносов часто бывают оформлены в виде сползающей гряды, с хорошо выраженным подвалем, гребнем и пологим верховым скатом.

Из количественных оценок необратимых деформаций, по-видимому, наибольший интерес представляет применение и разработка способов, основанных на балансе наносов. Однако и в этом случае более или менее обоснованной является только оценка знака деформаций (намыв, размыв) за счет осаждения наносов или размыва отложений.

Обратимые деформации представляют наибольший практический интерес и наиболее доступны для исследований. Исключение, как уже упоминалось, представляют случаи, когда необратимые деформации возникают в результате искусственного воздействия на факторы руслообразования, например, на водный режим реки путем регулирования стока воды водохранилищами. Известны случаи, когда общее снижение отметок дна — врезание русла превышало несколько метров за один пропуск половодья.

Так, например, после пропуска первого половодья, для построенного водохранилища Волжской ГЭС, русло р. Волги ниже плотины, на участке длиной 6 км, углубилось на 14 м.

Случаи врезания русла могут и не наблюдаться, если в толще аллювия, подстилающего нижний бьеф ГЭС, находится базальный горизонт - слой не размываемых отложений. В этих случаях дефицит наносов, задерживаемых в водохранилище, может привести не к углублению, а к расширению русла, как, например, это имело место на р. Дон ниже Цимлянского водохранилища. Быстро развиваясь, обратимые деформации могут и быстро стабилизироваться, как только на участке нижнего бьефа сооружения восстановится прежний баланс наносов. В геоморфологии воздействие воды на поверхность Земли признается основным рельефообразующим фактором. Такими же, по сути дела, являются и выделенные нами необратимые деформации [2, 3].

Все это говорит о том, что, исследуя необратимые деформации, необходимо в каждом случае восстанавливать весь ход истории изучаемой речной долины и обязательно разграничивать, какие морфологические образования в ней являются продуктом деятельности современных гидрологических и геоморфологических условий, а какие являются унаследованными от прошлой деятельности реки.

Необратимые деформации возникают не только в речных руслах, но и в верхних звеньях гидрографической сети в процессе эрозии. Верхние звенья гидрографической сети являются основными источниками поступления наносов в речные русла и поймы. Хотя каждое звено гидрографической сети поставляет относительно малое количество наносов, в сумме они дают такую их массу, которая определяет формы транспорта наносов в речных руслах и особенности формирования речных пойм. Это дает основание считать поверхность речных водосборов основной областью питания рек наносами. При изучении движения наносов в верхних звеньях гидрографической сети наглядно, проявляется связь между стоком наносов и морфологическими особенностями этих звеньев.

Как указывалось, обратимые деформации представляют собой переотложение наносов, которое является способом их транспортирования в тех случаях, когда поток не способен выносить транзитом, поступающий в него твердый материал. В таких условиях он вынужден откладывать часть его, образуя аккумулятивные образования. При последующих, более благоприятных условиях их выноса (прохождение половодий, высокие паводки в межень, спрямление излучин и т. п.) эти скопления подвергаются размыву. Затем в неблагоприятных условиях транспорта вновь начинается отложение наносов на тех же участках русла, на которых и ранее это явление наблюдалось.

Таким образом, деформации приобретают обратимый и компенсирующийся характер. Размеры переформирований речного русла вследствие образования аккумулятивных форм и размывов, в случае обратимых деформаций, более значимы, по

сравнению с необратимыми. Смена знака обратимых деформаций также происходит в несопоставимо малые сроки: обычно 2 раза в год с наступлением половодья и на его спаде. При паводочном режиме смена знака деформаций может быть еще чаще — несколько раз в год. Деформации русла в плане в среднем по России составляют 10 - 15 м/год, а иногда достигают 100 м в год и более [4]. Высотные деформации, например, на перекатах, составляют в среднем 2—3 м. После прохождения катастрофических половодий отметки дна перекатов иногда изменяются на 10 м и более. Размеры высотных деформаций русла, связанные со сползанием по реке крупных аккумулятивных образований, могут вызвать повышение и понижение отметок дна до 10—15 м. Следовательно, обратимые деформации представляют наибольший практический интерес и их учет является первостепенной задачей при проектировании всевозможных сооружений на реках, так как именно они оказывают определяющее влияние на выбор оптимальных мест расположения и конструкций сооружений, а также на определение средств защиты от неблагоприятного воздействия русловых и пойменных переформирований.

#### **2.4. Гидрохимическая эрозия глинистых грунтов**

Размывающее действие потока и диффузионное выщелачивание водорастворимых соединений в совокупности представляют собой процесс гидрохимической эрозии — один из определяющих факторов деформации русла и качества воды.

Грунты, омываемые потоком, испытывают не только гидродинамическое, но и химическое воздействие воды. Если для одних грунтов гидрохимическое воздействие не имеет сколько-нибудь существенного значения, то для других, менее стойких в химическом отношении, оно становится важнейшим фактором эрозии русла. Прежде всего, это относится к глинистым породам, которые обладают высокой химической активностью. На участке р. Большого Егорлыка в нижнем бьефе Новотроицкого гидроузла скорости течения отвечали значению не размывающих, но эрозия происходила и здесь [22, 23]. Она совершалась с интенсивностью всего лишь вдвое меньшей, чем на верхнем участке, где скорости течения были больше размывающих.

В песчаных грунтах главным породообразующим минералом является кварц, отличающийся большой химической стойкостью. Связные грунты в той или иной степени обогащены глинистым материалом, представляющим собой алюмо-ферросиликаты, окислы кремния и алюминия. В составе глинистого грунта непременно присутствуют растворимые водой соли. Различают три группы растворимых солей в грунтах: легкорастворимые, среднерастворимые и труднорастворимые. К группе легкорастворимых относятся хлористые, серноокислые и карбонатные соли натрия и

калия. Среднерастворимы сульфаты кальция. Незначительно растворяются в воде карбонаты кальция и магния.

По степени засоления в зависимости от содержания водорастворимых солей в сухой породе грунты делятся на незасоленные — менее 0,2%, слабозасоленные — 0,2-0,5% — и засоленные — более 0,5%.

Воздействие воды с течением времени может привести к ослаблению связей агрегатов и к распаду грунтовой массы. Возникающие при этом явления внешне не будут отличаться от размыва, хотя они связаны не с одним только гидродинамическим воздействием и должны быть отнесены к проявлениям гидрохимической эрозии. Водонепроницаемые породы, находясь под водой, выщелачиваются в основном диффузионным путем. Диффузионное перемещение растворенных солей из пор грунта происходит при наличии достаточного градиента концентрации раствора в порах и окружающей воде. Скорость течения над выщелачиваемой поверхностью при этом может быть очень малой: лишь бы она обеспечивала унос выступающего из пор раствора и отпадающих от грунта частиц. Так, по данным М.И. Маккавеева [27], облицовка лотка из плотно утрамбованной глины была смыта за 85 дней на 8—12 мм при скорости течения всего 1 см/с.

Если при инженерно-геологической оценке песчаных грунтов достаточно изучить их физические характеристики, то в случае глинистых пород важно составить представление об их химических свойствах, которые определяются содержанием водорастворимых соединений. В этом отношении представляют интерес результаты натуральных наблюдений на р. Большом Егорлыке (1948—1962 гг., Управление Невинномысского канала) и Правоегорлыкском канале (1962 г., ЮЖНИГиМ, Кириенко И.И.). Почти на всем участке наблюдений протяженностью 200 км обводненное русло р. Большого Егорлыка, принявшее кубанские воды из Невинномысского канала, находилось в состоянии активной эрозии, хотя скорости течения, составляющие 0,80—1,20 м/с, и не достигали размывающих значений для глинистых грунтов, из которых сложено русло.

Засоленность грунта в долине реки Большого Егорлыка была очень высокой: по данным трехминутных вытяжек, она равнялась 1,6—2,5% массы абсолютно сухого грунта. Обращает на себя внимание высокое содержание соединений натрия и калия в грунтах, извлеченных из русловых скважин. В то же время, в образцах с трассы канала содержание этих ионов резко уменьшается, а сухой остаток водорастворимых соединений сокращается в 2,5 раза. Это различие в степени засоления грунтов вполне объяснимо. Русло Большого Егорлыка занимает наиболее пониженную часть речной

долины, а трасса канала проложена выше по ее склону на несколько десятков метров. В долине реки с течением времени происходило накопление легкорастворимых солей, которые вымывались из толщи грунтов на склонах, где создавался относительный дефицит этих соединений. На общий фон засоленности среды указывала минерализация вод р. Большого Егорлыка в естественном состоянии: сухой остаток солей в 1 л воды местами достигал 50 г.

При обводнении русла произошло общее опреснение речной воды: в верхнем течении сухой остаток солей не превышал 165 мг/л. Однако, по длине реки наблюдалось значительное возрастание минерализации воды (почти в два раза на протяжении 120 км). В Правоегорлыкском канале минерализация воды по длине потока почти не изменялась (некоторые колебания солевого состава находились в пределах точности измерений). Главным источником дополнительной минерализации воды в русле Большого Егорлыка следует назвать диффузионное выщелачивание водорастворимых солей в процессе эрозии русла. И если в Правоегорлыкском канале минерализация воды не увеличивается, то это объясняется большей химической стойкостью пород в его русле.

Качественный состав солей в грунтах Большого Егорлыка и канала один и тот же, но имеются существенные различия в их количественных соотношениях. В грунтах канала содержание ионов натрия и калия в пять раз ниже, чем в русле Большого Егорлыка, а относительное содержание плотного остатка этих ионов в породе на канале составляет лишь 0,1%, в то время как грунты речного русла содержат их 0,5% (четверть сухого остатка). Решающая роль химического состава грунтовой среды: в процессах ее диффузионного выщелачивания подчеркивается еще и тем, что постоянство минерализации воды в Правоегорлыкском канале наблюдалось и на участках, где происходил рост мутности потока, т.е. была налицо эрозия русла. Хотя в минеральном составе егорлыкской воды вниз по течению наблюдается рост содержания всех катионов, особенно высокое увеличение концентрации все же получает комплекс  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ . Следовательно, соединения натрия и калия проявляют наибольшую активность в процессе диффузионного выщелачивания. Содержание этих элементов характеризует пониженную устойчивость грунтов против химического воздействия воды.

Выщелачивается и открывается течением прежде всего рыхлое заполнение структурного скелета глинистого грунта, и смоченная поверхность становится губчатозноздревой. Ее повсюду можно видеть, когда глинистое русло освобождается от воды. Местами грунт покрывает сплошная пористая корка толщиной 2—5 см.

В тех случаях, когда грунт содержит достаточное количество легкорастворимых солей, минерализация воды зависит от мутности потока и наличия

донных отложений. Русло Большого Егорлыка в рассматриваемый период находилось в состоянии глубинного размыва. Позднейшие наблюдения показывают, что после 1962 г. наблюдалось некоторое снижение транспортирующей способности потока, а вместе с ней и диффузионного выщелачивания солей. Затем к 1970 г. минерализация воды заметно увеличилась в связи с начавшимся снижением уровня оз. Маныч-Гудило, которое играет роль базиса эрозии для впадающего в него Большого Егорлыка.

В каналах, как правило, мутность достаточно велика по гидравлическим условиям и русло перекрыто чехлом илистых отложений. Они предотвращают выщелачивание солей, и минерализация воды по длине канала почти не растет. Например, воды Донского магистрального канала отличались повышенной минерализацией (сумма ионов до 512 мг/л) по сравнению с водой источника (Цимлянского водохранилища) лишь в первые месяцы эксплуатации [22]. В дальнейшем содержание солей определялось минерализацией воды из Цимлянского водохранилища и составляло не более 350 мг/л. При этом по длине канала не происходила разгрузка минерализованных грунтовых вод. Положение может оказаться иным, когда имеет место такая разгрузка. В низовье Дона расположен Азовский магистральный канал, в котором наблюдается повышенная минерализация воды — 1200—1500 мг/л. Ее оросительные качества находятся на пределе допустимых для орошения. Эта минерализация имеет не русловое происхождение. Источником накопления солей являются грунтовые воды зоны активного водообмена, находящегося поблизости Веселовского водохранилища.

Насыщение потока солями в процессе движения по руслу следует учитывать при оценке рассоления орошаемых земель на основе гидрохимических наблюдений в замыкающих створах дренажных каналов. По данным М. Н. Тарасова и др., на той же Правоегорлыкской системе в конце коллектора Кевсалинского участка минерализация потока оказалась в 10—20 раз выше, чем в начале, где производится сброс излишних поливных вод. Поскольку именно эти воды образуют расходы, пропускаемые коллектором, дополнительная минерализация должна быть отнесена за счет руслового выщелачивания, а не разгрузки грунтового потока.

Минерализация воды, обусловленная диффузионным выщелачиванием солей, не остается постоянной в течение года. Указанное можно объяснить миграцией веществ порового раствора при промерзании грунта. Зимой, когда наполнение канала невелико, промерзает значительная часть свободного от воды ложа (на реках с крутыми берегами, таких, как Большой Егорлык, обнажается меньшая поверхность). Известно, что внутригрунтовая влага в глинистых породах подтягивается к фронту промерзания, вместе с ней происходит перемещение и растворенных веществ. Накопившиеся в поверхностном слое соли образуют налет белого цвета. При

увеличении расходов воды в канале этот налет растворяется и дает тот избыток минерализации, который наблюдается весной.

Содержание солей в водах канала может повышаться также при поступлении в него ливневого и талого стока. В зависимости от скорости насыщения верхнего слоя почвы и длины пути стекания эти воды могут иметь минерализацию от 60 до 300 мг/л. Если же они стекают по рытвинам, глубоко врезанным в засоленные суглинки, то даже на коротком пути насыщение солями достигает 6000 мг/л и более.

Гидрохимическое действие воды на растворимые компоненты горных пород объясняет поистине всепроникающее распространение эрозии, которая развивается и в тех случаях, когда скорости течения совершенно недостаточны для механического разрушения грунта.

## **2.5 Фоновые и локальные прогнозы русловых процессов**

Гидроморфологический анализ лежит в основе многочисленных заключений по оценке влияния руслового процесса при проектировании и строительстве разнообразных сооружений на реках.

Проектирование любых сооружений на местности требует наличия топографической основы. Она служит для привязки сооружения на местности, то есть учета ее основных особенностей. Применительно к задаче учета руслового процесса топографическая основа тем более необходима, так как с ее помощью выбираются оптимальные места расположения сооружения, тип сооружения и защитные меры по обеспечению его бесперебойной работы.

При обеспечении проектирования, строительства и эксплуатации сооружений на реках возникают многочисленные и разнообразные задачи, зависящие от природных факторов, от особенностей конструкции и вида сооружений, а также от экономических условий. Определим основные из этих задач:

1. выбор оптимальных мест размещения сооружения;
2. основные требования к его конструкции;
3. меры защиты;
4. экономическая обоснованность.

Для решения этих и других задач необходимо составить прогноз руслового процесса. Прогноз руслового процесса для участков большого протяжения и тем более для целой гидрографической сети называют фоновым, то есть характеризующими общие тенденции развития руслового процесса на длительные сроки вперед [19].

Прогнозы деформаций для коротких участков называются локальными, их главная задача – оценка образования и перемещения мезо- и макроформ в руслах рек и на их

поймах. Однако, производится эта оценка с учетом фоновых прогнозов. Следует отметить, что русловые процессы наиболее быстро и остро реагируют на антропогенное воздействие, поэтому при разработке прогнозов русловых процессов необходимо учитывать многолетние изменения экологических характеристик.

## **2.6 Современное состояние исследований гидравлических сопротивлений при зарастании русел**

Последовательный подход к изучению закономерностей руслоформирования, его взаимосвязи с физико-географической средой был организован М.И. Маковеевым «...русловые процессы, в том числе и гидравлические сопротивления нельзя рассматривать как цепи явлений, развитие которых происходит изолировано от географической среды, без учета конкретных особенностей, характеризующих ландшафт водосбора. Потоки и их водосборы необходимо рассматривать в тесной взаимосвязи и взаимообусловленности» [27, с.3], и получил дальнейшее развитие у геоморфологов и гидрологов МГУ во главе с Р.С. Чаловым [32]. Особое значение имеет учет зависимости русловых процессов от положения рек в географических зонах и ландшафтно-климатических условий. Если относительно русловых процессов этот подход стал общепринятым, то вполне естественно принять подобные предпосылки при изучении гидравлических сопротивлений зарастающих русел. Между тем зарастание это, в сущности, - отражение климатических и литологических факторов (компонентов географической среды). Учет литологического строения речных долин и гидрологического режима рек составляет одну из основ гидроморфологической теории русловых процессов, разработанной в ГГИ трудами Н.Е. Кондратьева, И.В. Попова, Б.Ф. Смищенко, В.И. Антроповским и др.

Ежегодно с наступлением лета десятки тысяч водотоков, протекающих на территории России, зарастают водной растительностью. Развитие водной растительности нередко приводит к вредным последствиям: быстрому заилению и обмелению рек, каналов и водохранилищ, заболачиванию речных пойм, ухудшению качества воды, затруднению водоснабжения [11].

Значительный ущерб зарастание наносит водному хозяйству и мелиорации, вследствие уменьшения пропускной способности каналов. Зарастание рек сопровождается подпором уровня воды, который нередко достигает по данным различных авторов 0,4-0,8 м, а иногда и 1,5 м, что в естественных условиях равнинных рек ведет к заболачиванию пойменных земель.

В этих условиях одной из важнейших предпосылок оценки влияния зарастания рек на экологическое состояние природных территорий, биоценоз ландшафтной и водной

среды является определение пропускной способности зарастающих русел или, конкретно, характеристик их гидравлических сопротивлений.

Наряду с этим, осложняется и гидрометрический учет стока. В результате зарастания русел уменьшаются скорости течения, появляются «мертвые зоны», косоструйность потока, искажаются эпюры скоростей по глубине и ширине потока. В результате, зарастание приводит к нарушению однозначной устойчивой зависимости расхода воды от уровня, что вынуждает производить более частые измерения расходов воды, и в конечном счете, увеличивает стоимость наблюдений.

Современная практика гидрометрического учета стока основана на методических руководствах, разработанных почти полвека назад. Согласно содержащихся в них рекомендациях, для получения сколько-нибудь надежных данных, необходимо выполнять большое количество трудоемких измерений, что находится в явном несоответствии с экономическими требованиями настоящего времени. Потребность же в повышении надежности учета стока зарастающих рек приобретает особую актуальность в связи с возрастающими масштабами контроля экологии ландшафтов и реализацией системы мониторинга водных объектов, а также для проектных и водохозяйственных нужд [12].

Зарастание рек – сложный процесс, развитие которого обусловлено совместным влиянием естественных и антропогенных факторов. Растительное сообщество в ходе своего развития и жизнедеятельности меняет условия своего существования, подчиняясь естественным закономерностям [8].

Видовая совокупность водных растений очень многообразна, и природа нам оставляет максимум неопределенности в этом вопросе. Однако можно выделить четыре основные группы водной растительности:

- 1) водноболотная группа,
- 2) воздушно-водная, сюда относится тростник, рогоз,
- 3) прикрепленные растения с плавающими листьями – это такие, как кувшинка, кубышка,
- 4) погруженная растительность – рдест, роголистник.

Первые две группы образуют – гидрофиты, а третья и четвертая группы образуют – гидатофиты. Флора только цветковых водных растений (это высшие водные растения) на территории России насчитывает свыше 250 видов, принадлежащим к 40 семействам [18].

Несмотря на то, что растительный мир водных объектов достаточно разнообразен, видовой состав водных растений интразональная, т.е. одни и те же виды встречаются в разных географических зонах, с той лишь разницей, что в зонах более теплых водные растения того же вида будут крупнее, чем в более холодных зонах. Будет различаться так же и время вегетации, в более теплых районах это время будет более длительным.

Выделено три зоны зарастания рек ЕТР по признаку сроков наступления и продолжительности вегетационного периода. Для всех трех зон обнаружена закономерность, степень зарастания пропорциональна площади водосбора реки. Чем меньше площадь водосбора реки, тем больше ее зарастание и наоборот, с увеличением площади водосбора – зарастание уменьшается, а на реках с площадями водосборов более 25000 км<sup>2</sup> зарастание теряет свое влияние на пропускную способность русла.

Вместе с тем, нельзя утверждать однозначно, что если физико-географические условия бассейнов рек примерно одинаковы, то они одинаково подвержены зарастанию, так как на зарастание реки помимо географического положения и размеров водотока влияют очень многие факторы (температура, освещенность, скорости течения, устойчивость грунтов дна и берегов, наличие растворенных в воде веществ и т.д.). В этом заключается сложность проблемы, связанной с оценкой влияния водных растений на гидравлические сопротивления русла [10].

Растительность оказывает значительное дополнительное сопротивление движению руслового потока, являясь особым и очень сложным видом шероховатости.

Речные русла отличаются от инженерных сооружений тем, что они деформируются. При этом наблюдаются не только деформации русел, особенно в периоды паводков и половодий, но иногда и обрушение берегов. К тому же потоки в таких руслах перемещают наносы как во взвешенной, так и в донной фазе. Особые сложности при разработке расчетных методов создают донные наносы, так как режимы их перемещения могут существенно изменяться. Это зависит от мощности паводков и половодий, соотношения расходов донных наносов и транспортирующей способности потоков, крупности наносов и других факторов. Как известно [24], величина гидравлических сопротивлений при изменении фазы перемещения наносов от их влечения к донным грядам может изменяться в несколько раз (от 2 до 7). Помимо этого, донные наносы могут перемещаться в виде различных русловых образований.

Большое количество факторов, определяющих величину гидравлических сопротивлений, привело к необходимости введения некоторой интегральной характеристики, учитывающей различные составляющие гидравлических сопротивлений. В качестве таковой в середине XIX века был предложен коэффициент шероховатости  $n$ , величина которого определялась по описательной характеристике и одной из многочисленных таблиц [21].

Коэффициент шероховатости до сих пор негативно воспринимается некоторыми исследователями, например, К.В. Гришаниным [17], и для этого имеются довольно веские основания. Действительно, для его расчетов имеется большое количество эмпирических формул. В настоящее время их более 200 [29]. При расчетах по некоторым из них, размерность

коэффициента шероховатости изменяется, что недопустимо для любой физической величины. Однако, несмотря на этот и другие недостатки, в настоящее время коэффициент шероховатости широко используется в гидравлических расчетах.

Для определения коэффициентов шероховатости созданы специальные таблицы, в которых приведены описания русел и пойм и соответствующие им значения коэффициентов шероховатости (одного или двух- трех). Таких таблиц в настоящее время насчитывается свыше 20. Однако широкое распространение в СССР, а затем и в России получили только таблицы М.Ф. Срибного и более поздние таблицы И.Ф. Карасева. Соответственно за рубежом особенно в США широкое распространение получили таблицы В.Т. Чоу и Дж. Бредли. Следует отметить, что для снижения субъективизма таблицы Чоу сопровождаются альбомом цветных фотографий [32].

Сопrotивление однородной наземной растительности широко изучалось в метеорологии [28]. Теоретическое описание профиля скоростей над сельскохозяйственными полями и над лесными массивами приводится, в частности, в работе А.С. Монина и А.М. Яглома. Полученные результаты теоретических исследований приземного слоя атмосферы получили достаточно надежное подтверждение натурными данными. Значительно сложнее обстоит проблема расчета гидравлических сопротивлений в зарастающих руслах. Это обусловлено весьма сложной структурой потоков в заросших руслах, трудно поддающейся схематизации и анализу.

Зарастание русел проявляется в двух аспектах; гидравлический, как фактор, создающий дополнительные сопротивления движению потока, и – гидрометрический, как фактор, проявляющийся в неоднозначности связи расходов и уровней воды.

Первый аспект получил в последнее время достаточно широкое развитие. Водная растительность в русле, как фактор гидравлических сопротивлений может быть представлена (рис.2.2):

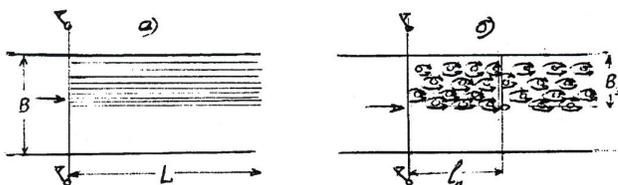


Рисунок 2.2 Схема представления водной растительности в русле:

- а) в виде системы введенных в поток продольных тормозящих поверхностей, многократно увеличивающих смоченный периметр русла.

б) в виде совокупности препятствий, создающих очаги местных сопротивлений [10].

Первая схема наиболее полно рассмотрена В.Н. Гончаровым [16]. Им были получены формулы, позволяющие оценить коэффициенты шероховатости зарастающих русел  $n$ . При этом в зависимости от густоты и относительной высоты стеблей водных растений, отношение коэффициента заросшего русла к коэффициенту шероховатости свободного русла могло составлять от 3 до 7,5, а в пределе достигает 30.

Механизм взаимодействия потока и водных растений, их отдельных элементов и целых массивов крайне сложен, поэтому более реальна вторая схема – совокупность препятствий, оказывающих сопротивление движению потока.

Наряду с увеличением шероховатости, появление растений в русле ведет к стеснению его живого сечения. При значительной плотности водной растительности в русле именно на нее приходится основная доля сопротивлений движению потока, а трением о дно, как правило, пренебрегают. В этом случае баланс сил потока можно представить в виде:

$$\rho ghI = \rho \frac{V_p^2}{2} s_m C_s k_a \frac{1}{M_p^2}, \quad (2.1)$$

где:  $\rho$  - плотность воды,

$g$  – ускорение свободного падения,

$h$  – глубина потока,

$I$  - гидравлический уклон,

$V_p$  - средняя скорость в пределах растительного слоя,

$s_m = f(h_p, d_p)$  – площадь миделя растительного элемента высотой  $h_p$  и характерным диаметром  $d_p$ ,

$C_s$  - коэффициент гидравлического трения одного элемента,

$k_a$  – коэффициент взаимного влияния растительных элементов, учитывающий степень гидродинамического затенения одних элементов другими.

Из (2.1) В.С. Боровков [9] получает следующее выражение для коэффициента гидравлического сопротивления:

$$\lambda = 4 \frac{V_p^2}{V^2} s_m C_s k_a \frac{1}{M_p^2} \quad (2.2)$$

При этом  $\lambda$  на практике определяется из выражения:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 0.4 \left( \frac{h}{h_p} \right)^{\frac{1}{2}\sqrt{\lambda}} j, \quad (2.3)$$

где:  $j = \frac{M_p}{\sqrt{s_m C_p k_e}}$  коэффициент, зависящий от биометрических показателей растительности.

Одну из расчетных схем для оценки гидравлических сопротивлений в зарастающих руслах предложил А.Найт [10], представляя движение потока в заросшем русле, как обтекание системы стеблей набегающими струями. При этом рассматриваются отдельно потери энергии на трение по дну и вихревые потери на обтекание препятствий.

Выражая потери энергии потока на участке заросшего русла  $L$  как потерянный скоростной напор и приравнивая их к результатам действия сил сопротивления водных растений и торможения дна на свободной от них части, Найт получает:

$$\frac{2g \wedge h}{V^2} = \frac{\lambda_0 L (1 - \sqrt{a \alpha_z})}{h} + \frac{k_n \sum a}{\omega}, \quad (2.4)$$

$\sum a$  - суммарная площадь сечения препятствий ( $m^2$ ),

$\omega$  - площадь поперечного сечения потока ( $m^2$ ),

$a_r$  - оптимальная густота водных растений ( $1/m^2$ ),

$k_n$  - коэффициент лобового сопротивления обтекаемых препятствий.

Используя схему Найта, И.Ф.Карасев и Е.Б.Сунцова внесли в нее две принципиально важные предпосылки;

1. Коэффициент сопротивления  $k_n$  не является постоянным и зависит от числа Рейнольдса и формы обтекаемых препятствий.
2. В качестве этих препятствий должны рассматриваться не отдельные стебли, а непроницаемые для течения их пучки, так называемые куртины.

Такой подход позволил получить расчетное выражение коэффициента сопротивления заросшего русла:

$$\lambda_z = \lambda_0 \left( 1 - d_p \sqrt{a_z} \right) + \frac{182 a_z d_p h_p}{(\text{Re} \cdot 10^{-3})^{1.2}} \quad (2.5)$$

Этот, во многом теоретический результат оказался в достаточном соответствии с эмпирическими данными Е.А.Леонова и В.Т.Чоу [33]. Зависимость (2.5) соответствует оценке тормозящего действия стоящих растений. Но при достаточно больших скоростях течения наблюдается полегание стеблей и значительное снижение гидравлических сопротивлений. Этот эффект был оценен в экспериментах А.Лудова, описанных В.С.Боровковм [9]. Экспериментальные данные позволяют учесть снижение коэффициентов шероховатости от  $n_{pc}$  при стоящих растениях до  $n_{пр}$  при их полегании, посредством следующей функции от уклона свободной поверхности I (рис. 2.3):

$$\frac{n_{пр}}{n_{pc}} = \frac{0,14}{I^{0,24}} \quad (2.6)$$

Полегающая водная растительность экранирует (застилает) свободную от них часть дна, следовательно, в этом случае коэффициент шероховатости стоящих растений определяет второй член выражения (2.6). При этом условии находим:

$$n_{pc} = 0,089 \left( \frac{a_c d_p h_p}{gh^{2/3} I^{0,6}} \right)^{1,25} \quad (2.7)$$

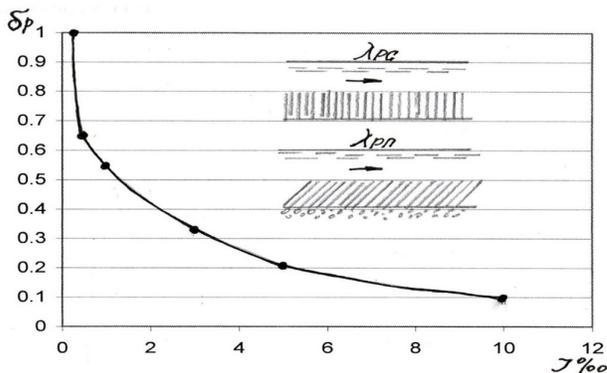


Рисунок 2.3 Зависимость  $\delta_p=f(I)$  по данным В.Лудова, где  $\delta_p= n_{пр}/n_{pc}$

Проверочные расчеты по приведенным формулам указывают на возможность снижения  $n_{пр}$  по сравнению с  $n_{pc}$  в 1,5-2 раза.

Широкий цикл лабораторных исследований движения потока в условиях зарастающих русел выполнен Х.Наги и К.Ватанабе. В лотке размерами 12,0x0,4x0,4м воспроизводилась водная растительность в виде стержней бамбука диаметром  $D=0,31$ см при песчаном дне из частиц средним диаметром  $d=0,07, 0,1$  и  $0,13$ см. В результате экспериментов получено следующее выражение:

$$\frac{\varphi_c}{\varphi} = \ln \left[ 0.66 \frac{\text{Re}_* (D/d_{50})^{0.31}}{(h/d_{50})^{0.11} k^{0.043}} \right] \quad (2.8)$$

Относительная густота растений оценивались по соотношению:

$$k = \frac{\pi D^2}{4l^2} \quad (2.9)$$

$l$  – расстояние между стержнями, имитирующими растительность; оно составляло 2,12, 3,11 и 4,24см).

Несмотря на сложность эмпирических соотношений, оказалось возможным рассчитать коэффициенты шероховатости зарастающего русла при некоторых характерных значениях, входящих в них параметров. Так при числе Рейнольдса  $\text{Re} = 150$ , диаметре стеблей  $d_{50}=0,31$  и расстоянию между ними  $l=2,12$ см (относительная густота водных растений  $a=1100$ ) получаем значение коэффициента шероховатости зарастающего русла  $p_3=0,13$ . Обращаясь к гидравлической зависимости И.Ф.Карасева получим  $p_3=0,11$ . Расхождение составляет всего 15%, что указывает на несомненную достоверность рассматриваемых решений [10].

Приведенные расчетные схемы относятся к элементу потока единичной ширины, но в реальных условиях при зарастании русла в нем возникают обособленные зоны поперечного сечения, занятые растениями и свободные от нее, что приводит к формированию сложной структуры течений. Поток расчленяется на обособленные струи с большими градиентами скоростей течения. Можно понять тех исследователей, которые отвлекаются от рассмотрения схем обтекания препятствий и выделяют обособленные части сечения, заросшие и свободные. При этом, кроме сил трения по дну, учитываются касательные напряжения на границах внутреннего расчленения потока [10]. Одну из таких схем рассмотрел Э.Л.Беновицкий [6]. Полученные зависимости для коэффициента

сопротивления заросшего русла  $\lambda_3$  им в конечном счете представлены в виде простого соотношения:

$$\lambda_p = 0,69 \left( \frac{\omega_p}{\omega} \right)^{0,62} \quad (2.10)$$

из которого можно получить, воспользовавшись формулой Шези-Маннинга:

$$n_3 = \frac{0,3h^{1/6}}{\sqrt{g}} \left( \frac{\omega_p}{\omega} \right)^{0,31}, \quad \left( \frac{\omega_p}{\omega} \right) \leq 0,49 \quad (2.11)$$

где:  $\omega$  - площадь поперечного сечения,

$\omega_p$  - площадь заросшей части поперечного сечения.

И так мы видели: гидравлика дает возможность конструировать многообразные расчетные схемы и механизмы движения потока в заросшем русле, но они не отражают самого процесса зарастания, а ведь, как известно, характеристики заросшего русла непрерывно изменяются в течении вегетационного периода, охватывающего начало появления, развитие и отмирание водных растений.

При практическом использовании гидравлических зависимостей необходимо располагать различными биометрическими характеристиками водных растений, которые можно получить лишь по данным специальных рекогносцировочных обследований зарастающих русел. В связи с этим становится понятен интерес к интегрально-статистическим (регрессионным) оценкам гидравлических сопротивлений, зарастающих русел при различных определяющих факторах [12].

Словацкий исследователь Фратрич коэффициент шероховатости русла ставит в зависимость от времени с начала вегетационного периода и суммы температур воды:

$$n_s = 0,35Th^{0,5} I^{0,22} \quad (2.12)$$

Эта формула относится к ирригационным каналам острова Житный на Дунае. Автор не делает какой-либо попытки ее обобщения на другие объекты.

Исследования закономерностей движения потока при зарастании русла проведены в Голландии в период 50-70 годов с целью установить связи между гидравлическими сопротивлениями и водной растительностью в различные периоды вегетации. Итоговый график зависимости коэффициента шероховатости  $n_3$  от отношения площади, занятой

водной растительностью  $\omega_p$ , к общей площади поперечного сечения русла  $\omega$  приведен на рис.2.4. На этом же графике представлены результаты расчетов  $n_3$  по формуле Беновицкого (2.11).

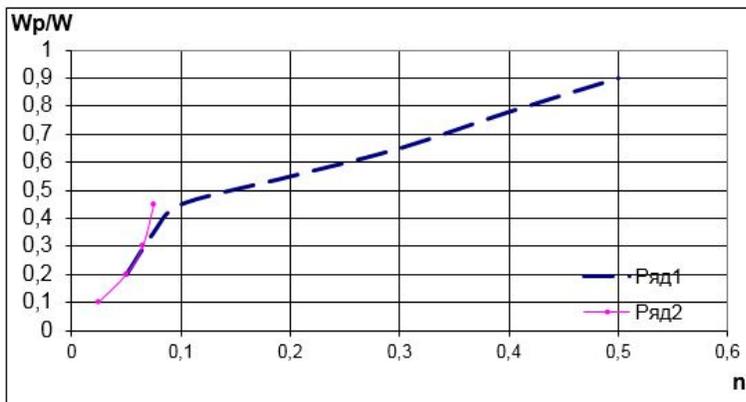


Рисунок 2.4 Зависимости коэффициента шероховатости  $n_3$  от отношения площади, занятой водной растительностью  $\omega_p$ , к общей площади поперечного сечения русла  $\omega$ , ряд 1 – расчет зависимости по Квернеру, ряд 2 – расчет зависимости по Беновицкому.

Можно констатировать полное совпадение определяемых величин, что указывает на адекватность анализируемых зависимостей. Однако линейное возрастание  $n_3$  по графику Квернера при  $(\omega_p/\omega) > 0,49$  до значения 0,5 представляется сомнительным и не подтверждается данными других исследователей [10].

Величина  $(\omega_p/\omega)$  в сущности является геометрической характеристикой поперечного сечения заросшего русла, не учитывающей фактора времени. Величина  $n_3$  зависит от фазы развития водной растительности. Шероховатость русла с одной стороны, увеличивается с ростом массы растений, а с другой – уменьшается по мере их старения, полегания и срыва более ранних побегов. Эти процессы происходят хронологически закономерно, так что изменение  $n_3$  может быть представлено в виде некоторой функции времени [8]. Как оказывается, она сохраняет достаточно однородную аналитическую структуру в разные годы и для различных рек, если время от начала вегетации  $\tau$  выражено в долях от общей продолжительности вегетационного периода  $T_b$

$$n_3 = \frac{n_0}{\left(1 + k_1 \tau + k_2 \tau^{4/3}\right)} \quad (2.13)$$

Таким образом для изучения гидравлических сопротивлений зарастающих русел необходимо проследивать их изменение в течение всего вегетационного периода. Этому требованию отвечают стандартные наблюдения на постах основной гидрологической сети Росгидромета. Каждый измеренный расход дает возможность определить коэффициент шероховатости.

$$n_3 = \frac{\omega^{5/3} \sqrt{J}}{QB^{2/3}} \quad (2.14)$$

Но, к сожалению, на гидрологических постах зарастающих рек, как правило, не выполняются измерения уклонов водной поверхности. В этих условиях вместо коэффициента шероховатости  $n_3$  мы можем определить другую характеристику:

$$m_3 = \frac{\sqrt{I}}{n} = \frac{\sqrt{I}}{n_0(1 + k_1 \tau + k_2 \tau^{4/3})} = \frac{QB^{2/3}}{\omega^{5/3}} \quad (2.15)$$

Этот параметр, называемый параметром М.А. Великанова, имеет особое значение в речной гидравлике и гидрометрии [10]. Параметр Великанова выступает как системная характеристика гидравлических сопротивлений руслового потока, т.е. является одной из основных характеристик пропускной способности русла.

Параметр  $m$  положен в основу метода построения плана течений, предложенного М.А.Великановым [13]. Для решения методических задач речной гидрометрии этот параметр использовал И.Ф.Карасев [23] при разработке усовершенствованных моделей расходов воды. В каждом из этих прецедентов величины  $m$  определялись непосредственно по гидрометрическим данным. Для свободных русел параметр Великанова имеет вид:

$$m_0 = \frac{\sqrt{I}}{n_0} \quad (2.16)$$

Параметр Великанова может быть получен на основе гидролого-морфологических характеристик речных систем. В их структуре каждая отдельно взятая река рассматривается как звено – поток фиксированного порядка  $N$ . Система этих порядков для рек ЕТР разработана Н.А.Ржаницыным [30]. В качестве определяющего фактора для системных

характеристик потоков им приняты средние многолетние  $Q_{\text{ср}}$  и среднемаксимальные расходы воды  $Q_{\text{макс}}$ . Мы же, имея в виду использование выводимых в дальнейшем зависимостей применительно к неизученным рекам будем ставить эти характеристики в соответствие площади водосбора  $A$  в  $\text{км}^2$ , которая всегда может быть получена картографическими методами.

Непосредственная аппроксимация данных, приведенных Ржаницыным дает выражение для порядка потока:

$$N = 4,4A^{0,09}; \quad (2.17)$$

Для общего уклона свободной поверхности (дна) в предположении квазиравномерного движения потока:

$$I = 0,012 / A^{0,44} \quad (2.18)$$

В качестве естественной характеристики шероховатости речных русел служит средний диаметр частиц  $d$  грунтов дна. Общее признание в прошлом веке получила зависимость, предложенная Штриклером для коэффициента шероховатости:

$$n_0 = \kappa_{ш} d^{1/6} \quad (2.19)$$

Анализ, выполненный в последнее время Раудкиви, выявил достаточно широкие пределы изменения коэффициента  $\kappa_{ш} = 0,015-0,07$ . Более определенным является значение  $\kappa_{ш}$ , установленное В.М. Маккаевым для русловых потоков, формирующих собственную шероховатость:  $a_{ш} = 0,03$ , мы примем это значение в нашем дальнейшем рассмотрении задачи [10].

Таким образом для определения  $n_0$  достаточно знать величину  $d$ . Однако данные о крупности грунтов ложа рек крайне противоречивы и недостаточны. Зато имеются сведения о коэффициенте Лохтина  $l$ , систематизированные М.И. Маккаевым на основе натуральных исследований изыскательских партий речного флота. Эти уникальные данные приводит Н.А.Ржаницин.

Как известно, число Лохтина представляет собой отношение диаметра частиц  $d$  в мм к падению водной поверхности  $\Delta z$  в м на км:

$$l = \frac{d}{\Delta z} \quad (2.20)$$

Приведем некоторые значения этой характеристики, поставленные в соответствие порядкам речных потоков (табл. 2.1):

Таблица 2.1 Уклон, диаметр частиц и число Лохтина в зависимости от порядка потока

N	I, в ‰	d, в мм	л
VI	2,35	5,6	2,4
VIII	0,69	1,47	2,1
XI	0,14	0,42	3,0

Логарифмическая аппроксимация данных таблицы позволяет получить зависимость:

$$d = 1426I^{0,92} \quad (2.21)$$

что соответствует выражению:

$$n_0 = 0,1I^{0,153} \quad (2.22)$$

Выражение (2.22) устанавливается непосредственно из формулы (2.19) при  $k_{ш}=0,03$ . После подстановки I по (2.18) получаем:

$$n_0 = \frac{0,11}{A^{0,067}} \quad (2.23)$$

Это именно тот результат, который позволил в дальнейшем оценивать коэффициенты шероховатости и параметр Великанова русел неизученных рек [10]. В результате перехода от собственно гидравлических характеристик зарастающих русел к соответствующим ландшафтно-климатическим факторам, получили их обобщенные оценки для разных рек и климатических зон, так же расчеты выполнялись для разных фаз развития водных растений, которым поставлено в соответствие три характерных периода:

1. весенне-летний:  $0 \leq \tau \leq 0,33$ ;
2. летний:  $0,33 \leq \tau \leq 0,66$ ;

3. летне-осенний:  $0,66 \leq \tau \leq 1$ .

Для каждого периода может быть определено характерное значение коэффициента шероховатости.

Практическое значение полученных соотношений заключается в том, что они позволяют оценивать гидравлические сопротивления русла в различные фазы вегетации водных растений. На этой основе нами рассчитана шкала характерных значений максимальных и средних коэффициентов шероховатости в зависимости от порядка реки и средней за период вегетации температуры воды  $t_b$ , результаты расчетов представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Зонально-сезонные значения коэффициентов шероховатости зарастающих русел.

А, км <sup>2</sup>	$t_b = 12^\circ\text{C}$			$t_b = 15^\circ\text{C}$			$t_b = 18^\circ\text{C}$		
	$n_{\max}$		$n_{\text{ср}}$	$n_{\max}$		$n_{\text{ср}}$	$n_{\max}$		$n_{\text{ср}}$
	$n_{\text{вл.}}$	$n_{\text{л.}}$	$n_{\text{ло.}}$	$n_{\text{вл.}}$	$n_{\text{л.}}$	$n_{\text{ло.}}$	$n_{\text{вл.}}$	$n_{\text{л.}}$	$n_{\text{ло.}}$
300	0,065		0,049	0,097		0,061	0,130		0,069
VII	0,048	0,059	0,045	0,057	0,084	0,052	0,064	0,107	0,057
1000	0,062		0,046	0,093		0,057	0,124		0,064
VIII	0,045	0,056	0,042	0,054	0,080	0,049	0,059	0,101	0,053
3500	0,056		0,042	0,084		0,052	0,112		0,058
IX	0,041	0,050	0,038	0,048	0,071	0,044	0,054	0,090	0,048
8000	0,043		0,035	0,064		0,044	0,085		0,050
X	0,034	0,039	0,033	0,042	0,056	0,039	0,047	0,072	0,043
22500	0,016		0,017	0,024		0,023	0,031		0,028
XI	0,017	0,018	0,015	0,023	0,024	0,022	0,028	0,029	0,027

Таблица 2.2 в полной мере отражает широкий диапазон изменений коэффициентов шероховатости зарастающих русел как по температурному режиму, так и по порядкам рек. Чем меньше порядок реки, тем больше зональная изменчивость коэффициента шероховатости. Гидравлические сопротивления русел больших рек менее чувствительны к зарастанию и, соответственно, отличаются меньшим диапазоном изменения коэффициентов шероховатости.

Несомненно, полученные системно-зональные зависимости подлежат дальнейшему уточнению, но уже и в первом приближении они обеспечивают

объективность и единство подхода к оценке гидравлических сопротивлений зарастающих речных русел [10].

### 3. ПРИРОДНЫЕ И АНТРОПОГЕННЫЕ ФАКТОРЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ

#### 3.1. Природные факторы экологической напряженности

Экологическое состояние рек и приречных территорий определяется комплексом условий проживания человека на их берегах, эксплуатацией рек и использованием водных ресурсов. При этом полный комплекс условий включает в себя как природные, так и антропогенные факторы [14]. К естественным, природным факторам экологической напряженности, относятся – селевые потоки, дейгиши, паводки, горизонтальные и вертикальные деформации речных русел и др. Рассмотрим некоторые из них.

##### *Селевые потоки.*

Сель – стремительный поток большой разрушительной силы, состоящий из смеси воды и рыхлообломочных пород, внезапно возникающих в бассейнах, как правило, небольших горных рек в результате интенсивных дождей или бурного таяния.

Качественное отличие селевого потока от обычного дождевого паводка состоит в содержании твердого материала в смеси. Дождевой паводок содержит не более 10% твердого материала, для селевого потока характерно 60-70% содержания твердого материала в смеси.

Основные параметры селевого потока, определяющие его динамическое воздействие на русло и любые препятствия – это: плотность, то есть насыщенность твердым материалом; скорость движения, которые составляют от 2 до 10 м/сек.; объем выноса (миллионы м<sup>3</sup>, а масса отдельных камней достигает 10т); гранулометрический состав; расход, максимальные расходы селевых потоков достигают нескольких тысяч м<sup>3</sup>/сек.

Если плотность селевого потока достигает значения выше 2000кг/ м<sup>3</sup>, то селевой поток трансформируется в так называемую «оплывину» – густую вязкую массу,двигающуюся как одно сплошное целое с ламинарным характером режима.

По соотношению жидкой и твердой составляющих, а также по гранулометрическому составу твердой части селевые потоки делятся (классифицируются) на три категории: грязевые; грязе-каменистые; водно-каменистые.

Важную роль в ослаблении активности селевых явлений играют горно-мелиоративные работы – террасирование, облесение склонов селевых бассейнов.

$$V_{cp} = 1,4\sqrt{H_{cp}}\sqrt[3]{I\omega_{от}}; Q = V_{cp}W \quad (3.1)$$

где  $V_{cp}$  – средняя скорость (м/с);

$H_{cp}$  – средняя глубина потока (м);

$I$  – продольный уклон поверхности потока;

$\omega_{от}$  – коэффициент текучести селевой массы (это отношение объемной концентрации твердого материала в потоке к предельной концентрации, при которой селевая масса теряет свойство текучести);

$w$  – площадь сечения потока (м<sup>2</sup>).

*Дейгиши* – внезапное сильное разрушение берегов сразу на расстоянии по длине реки в сотни метров. Дейгиши развиваются на реках, относящихся к типу русловой многоорукавности, протекающих в легкоразмываемых грунтах.

Возникновение дейгиша происходит в тех случаях, когда наблюдается значительное несоответствие структуры рельефа дна скоростному полю потока. Это происходит в условиях резких изменений стока воды и наносов.

Пример – р.Амударья, смещение в среднем 100 м/год за 60 лет, но в 1938 году – 30 метров за 40 минут, на участке р.Туркуль, при высоте берега 6 метров. Р. Амударья протекает по чередующимся сужениям и расширениям русла, соответственно происходит закономерные изменения знаков деформаций русла.

*Паводки* – представляют собой сравнительно кратковременное, но интенсивное увеличение расходов и уровней воды. Паводки характеризуются: начало и конец паводка, максимальный расход и объем, продолжительность, продолжительность подъема, продолжительность спада, их соотношение (на малых реках – 2,0; на средних – от 3,0 до 4,0; на больших – от 4,0 до 7,0), форма паводочной волны.

В последние годы гидрология суши, как наука, из-за сложности и многообразия процессов разделилась на несколько самостоятельных направлений, к сожалению, недостаточно связанных между собой. Самостоятельное развитие каждого из них привело к некоторым положительным результатам и даже к отдельным достижениям. Однако, несмотря на это, основная проблема гидрологии, заключающаяся в разработке надежных методов прогнозов (особенно долгосрочных) различных гидрологических элементов, остается нерешенной. Об этом, в частности, свидетельствуют мощные наводнения, наблюдающиеся на различных континентах нашей планеты. Как показывает анализ последствий этих наводнений, приносящих многочисленные человеческие жертвы (например, в Индии и Китае) и наносящих большие материальные ущербы в таких развитых странах как США, Германия, Франция и другие, заблаговременные прогнозы их прохождения, как правило, отсутствовали. Методы же защиты от таких наводнений, как правило, недостаточно эффективны.

Положение осложняется еще и тем, что в последние годы резко возросло и продолжает увеличиваться антропогенное воздействие на природу в целом и составляющие

ее речные системы, в частности. И во многих случаях природные факторы экологической напряженности возникают под действием антропогенной нагрузки, как ответная реакция природных систем. В данном случае очень сложно выявить и разграничить антропогенную и природную составляющие. Таким образом, современное состояние гидрологии свидетельствует о необходимости разработки принципиально новых подходов к исследованию этих закономерностей. Одним из них является системный подход к оценке гидрологических явлений и процессов. Именно с позиций этого подхода возможна комплексная оценка достижений отдельных направлений в гидрологии. Основы этого подхода заложены в работах как отечественных (М.А. Великанов, К.В. Гришанин, Н.С. Знаменская, Н.Б. Барышников и другие), так и зарубежных исследователей (Д. Гор, Х. Эйнштейн и другие).

### **3.2 Наводнения в Санкт-Петербурге**

Согласно современным воззрениям, картина возникновения наводнений рисуется следующим образом. В силу законов циркуляции земной атмосферы циклоны, гигантские атмосферные вихри с пониженным давлением в центре, перемещаются с запада на восток. Ветровые потоки в циклоне направлены против часовой стрелки и к его центру. Обычно в южной части циклона находится сектор с относительно тёплым воздухом. Линия раздела между тёплым и холодным воздухом в циклоне называется атмосферным фронтом, или просто фронтом. Ветер в циклоне достигает наибольшей силы в полосе фронта.

Циклоны, пересекающие Балтийское море, выводят из равновесия его водные массы. В частности, они формируют особого рода длинную волну. Высота такой волны невелика (в центральных районах моря не более 30–40 см), а её длина сравнима с длиной всего моря. Созданию длинной волны способствует как статический эффект (пониженное атмосферное давление в центре циклона), так и динамический (дующие к центру циклона ветры).

Циклоны перемещаются по морю по разным траекториям. Особое значение в формировании наводнений имеют те из них, которые пересекают море с юго-запада на северо-восток, т. е. в том направлении в котором вытянуто само море. В этом случае циклон увлекает длинную волну к горлу финского залива. А если при этом ещё имеется система из основного, или выводящего, циклона и движущегося по его южной периферии углубляющегося частного циклона, то синоптическая ситуация для возникновения длинной волны складывается самая благоприятная. У горла залива профиль длинной волны становится довольно чётко выраженным. Здесь как бы возникает вспученность за счёт воды, согнанной из открытых районов Балтики подошедшим сюда циклоном, и отчасти за счёт воды из центральных районов Финского залива, поскольку над заливом в это время дуют восточные ветры.

Обычно высота длинной волны в горле Финского залива первоначально равна 30-50 см, а скорость распространения её гребня составляет 40-60-км/час. При продвижении по широкой и глубокой части залива высота и скорость волны мало меняется. С подходом же к вершине залива высота волны возрастает, так как залив делается уже и мельче, в особенности в районе так называемой Нарвской стенки (вблизи устья реки Нарвы), где резко уменьшается площадь поперечного сечения залива. По пути движения форма волны видоизменяется и усложняется из-за неровностей берегов и дна, сложения прямой волны и отражённой от Нарвской стенки обратной волны и пр. Длинная волна пробегает залив за 7-9 часов. Если в течение этого времени нет ветра или ветер очень слабый, то волна распространяется только лишь под действием силы тяжести – в этом случае, в устье Невы возможны подьёмы до 200-250 см.

Свободная длинная волна бывает крайне редко, её продвижению почти всегда способствует ветер. Северный и южный ветер никак не влияют на высоту волны. Встречный восточный ветер уменьшает высоту волны. Западный попутный ветер – а он является преобладающим – способствует увеличению высоты волны. В последнем случае возрастания высоты волны бывает особенно значительным, если атмосферный фронт: перпендикулярен оси залива, совпадает с гребнем волны, перемещается вместе с ним примерно с одинаковой скоростью (40-60 км/час). Фронт как бы подхлестывает волну, появляется эффект резонанса. Подобные ситуации складываются тогда, когда углубляющийся циклон, дойдя до горла Финского залива, поворачивает на восток, а его центр перемещается вдоль залива, находясь, всё время несколько севернее залива. Эффект подхлестывания, помимо прочего, создаётся и за счёт ветрового раздела в полосе холодного фронта, точнее из-за смены ветров южных румбов впереди фронта на западные в его тылу, а также за счёт перехода от понижения давления перед фронтом к повышенному позади фронта. Таким образом, длинная волна почти всегда бывает вынужденной, т. е. такой, на которую воздействует ветер. Постепенное возрастание вынужденной длиной волны из-за ветра и сужения залива хорошо прослеживается на примере наводнения 1973 г.

Довольно значительный подьём воды в устье Невы (до 130 – 150 см) может иметь место и без длинной волны, а только лишь за счёт сильного и устойчивого западного ветра на Финском заливе. Однако случаев, когда бы очень сильный западный ветер наблюдался длительное время на всей акватории Финского залива, почти не бывает. Сравнительно не широкая зона западных штормовых ветров, перемещается вместе с циклоном и одновременно охватывает лишь какую – то часть залива.

Ветровая и волновая форма денивеляции, т. е. нарушение горизонтального положения поверхности моря, после прекращения действия вынужденных сил трансформируется в постепенно затухающее сейшеобразное (колебательное) движение

воздушных масс около одного или нескольких центров (узлов). В Финском заливе известны два основных вида сейш, а именно:

- двухузловая сейша в направлении остров Готланд – Аландские острова с периодом колебания 8 часов, средней высотой 30-50 см и максимальной – 80-100 см;

- одноузловая сейша в направлении юг Балтийского моря – Финский залив с периодом колебания 24 часа, средней высотой 20-30 см и максимальной – 140-150 см.

Роль сейшов в образовании Невских наводнений особенно велика, когда циклоны движутся «семейством» с интервалом около 24-28 часов. В этом случае, на предыдущее колебание накладываются последующие. Волновые массы моря как бы раскачиваются циклонами.

В конечном счете, длинная волна, ветровой нагон и сейша имеют одну и ту же причину – изменение во времени и в пространстве атмосферного давления. Поэтому ни одна из названных форм денivelяции почти некогда не встречается в чистом виде. Можно лишь говорить о преобладании той или иной в данном конкретном случае. Тем не менее, выделение составляющих процесса важно для его познания и поиска методов предсказания.

Для полноты картины учёные отмечают, что в формировании наводнений участвуют громадные водные массы. Подсчитано, например, что при катастрофическом наводнении, подобным наводнению 1924 года, за шестичасовой период подъёма уровня через створ Таллин – Хельсинки вдоль Финского залива с запада на восток перемещается  $27 \text{ км}^3$  воды. Такое количество воды река Дон выносит в Азовское море за полтора года. Максимальный расход воды в упомянутом створе достигает  $700000 \text{ м}^3/\text{с}$ , а в створе Кронштадта –  $100000 \text{ м}^3/\text{с}$ . Для сравнения, в низовьях Енисея, самой многоводной реке страны, зафиксирован максимальный расход  $160000 \text{ м}^3/\text{с}$  (1973 г.).

Легко понять, что очень большое наводнение бывает в тех случаях, когда причины, вызывающие подъём воды, а именно: длинная волна, ветровой нагон, сейша – действуют одновременно, причём, каждая составляющая достаточно велика.

Однако наблюдаются наводнения и в безветренную погоду. Подобные случаи не раз приводили в изумление жителей Петербурга, и на них следует остановиться подробнее. Так, 8 ноября 1752 г., при полном штиле вода в Неве поднялась на 193 см выше ординара и затопила берега; высокая вода стояла около суток. Другой случай отмечался 29 ноября 1764 года, когда уровень воды достиг 233 см над ординаром при весьма слабом западном ветре. Наконец, известны даже случаи значительных подъёмов при встречном по отношению к длинной волне, или восточном, ветре (5-7 декабря 1765 г., 2 ноября 1969 г. и т. д.) причина простая: подъём воды был вызван длинной волной или сейшей, сформировавшимися накануне где-то на просторах Балтики.

Роль, особенно невских вод в формировании наводнений пренебрежимо мала. Наводнения в Санкт – Петербурге имели бы место даже в том случае, если бы Неву отнесли

в сторону и сбросили бы воды Ладоги в Финский залив по северу Карельского перешейка. Ведь наш город затапливается в основном водами Финского залива.

Наводнение – сложный природный процесс. Многие важные моменты всё ещё остаются неясными и продолжают изучаться. Например, как атмосферный фронт в циклоне воздействует на гребень, продвигающийся длинной волны, как складывается прямая волна с отражённой от неровностей берега обратной волной и т.д.

### **3.2.1 Прогнозы наводнений.**

С первых же лет существования города начала действовать система оповещения населения об угрозе наводнения. Единственным объективным критерием служил фактический уровень воды в реке. Тревожный вопрос – а что следует ждать дальше? – оставался без ответа.

В 19 веке действовали, например, такие правила. При подъёме воды на 3 фута (92 см) над ординаром производилось три пушечных выстрела, при подъёме на 5 футов (152 см) пушка стреляла каждые полчаса, на 6 футов (183 см) – каждые четверть часа. Последние пушечные выстрелы прогремели во время наводнения 1924 г., затем оповещение уже действовало по радио.

Нынешняя система предупреждения невыхских наводнений возникла в конце позапрошлого века при Главной физической обсерватории (теперь Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова), когда по телеграфным данным стали регулярно составлять карты погоды. Долгое время – более полувека – метеорологи не располагали количественным методом прогнозов. Поначалу служба давала лишь предупреждение об опасности. Потом стали указывать и величину предполагаемого подъёма по аналогии с уже известными случаями. И только в 1952-1955 гг. появился количественный метод прогнозов, связанный с именем советского синоптика Н.И. Бельского.

Имея под руками текущие карты погоды (по ограниченной территории они составляются каждые 3 часа). Синоптик обратил внимание на углубляющиеся циклоны, пересекающие район Балтийского моря с юго-запада на северо-восток. С приближением циклона к горлу Финского залива уже можно в общем виде оценить предстоящий подъём воды. Далее при подходе атмосферного фронта к Таллину становится известна высота распространяющиеся вдоль Финского залива длинной волны.

По мере развития явления имеется возможность уточнить прогноз – например, в момент подхода гребня к Усть-Нарве или к Кронштадту. При этом, коэффициент нарастания высоты длинной волны от случая к случаю изменяется. В частности, зимой его величина определяется тем, как далеко на запад ушла кромка льда. Если ледяной покров простирается до маяка Толхубин, то коэффициент нарастания от Таллина к Санкт-

Петербургу составляет 2,2 (вместо 2,5 летом), если до Шелепово, то – 1,9; до острова Мощный – 1,7.

В сущности, прогноз наводнения состоит из двух частей – прогноз поля ветра и прогноза воздействия ветра на водные массы моря. Главная трудность заключается в том, чтобы предсказать путь движения циклона, определить судьбу атмосферного фронта, оценить изменение поля давления – в общем, в том, чтобы дать точный прогноз погоды. При этом много полезных и необходимых сведений специалист черпает из каталога синоптических карт и других материалов за прошлые наводнения. По каталогу часто удаётся найти сходную ситуацию в прошлом.

Наряду с описанным выше синоптическим методом применяется и гидродинамический метод. Он основывается на системе так называемых дифференциальных уравнений мелкой воды, которые позволяют в строгой и сжатой математической форме выразить главнейшие законы движения водных масс, а именно: закон сохранения материи и закон сохранения энергии. Для реализации метода в оперативных условиях разработана автоматизированная система прогноза на компьютере. Основные вводимые в машину исходные данные – это уровни воды в различных пунктах Балтийского моря и атмосферное давление на севере Европы.

Служба прогнозов невыхских наводнений накопила уже большой практический опыт. Однако точность выпускаемых прогнозов оставляет желать лучшего. Положение с оправдываемостью прогнозов, в общем, таково: в 50 % случаев прогноз оправдывается полностью, в 35 % случаев ошибка прогноза составляет от 1 до 30 см, в 15% случаев ошибка превышает 30 см. Хуже всего удаются прогнозы тех наводнений, которые в основном порождены сейшами и ветровыми нагонами.

### **3.2.2 Затопы льда на реке Неве.**

Ещё одной причиной наводнений в Санкт – Петербурге являются заторно–зачорные явления. В основном их возникновение приурочено к мостам и мостовым переходам, коих в нашем городе более 300, правда, далеко не возле каждого из них можно наблюдать подобные явления.

Заторы льда свойственны крупным рекам с бурным весенним ледоходом и множеством разнообразных препятствий в виде островов, мелей, крутых поворотов и пр. На Неве, где движению льда почти ничто не препятствует, весенний ледоход спокойный и, казалось бы, заторов не должно быть. И всё же, заторы льда случаются.

Один вид заторов связан с характерной для Невы последовательностью вскрытия от истока к устью. Приносимые течением льдины, останавливаются у верхней границы ещё не вскрывшегося участка реки, начинается торошение, русло реки забивается льдом. Заторы эти, как правило, небольшие, кратковременные. За последние 100 лет наиболее

значительный из них наблюдался в апреле 1901 г. в районе, где сейчас находится Володарский мост. Выше места затора вода поднималась на 1,7 м, достигнув уровня 313 см БС. Ещё один подобный случай был весной 1956 г. в районе посёлка Павлова.

Другой вид заторов льда на Неве связан со взломом ледяного покрова в Шлиссельбургской губе сильным северо-восточным ветром и сгоном этого льда на песчано-каменистую отмель перед истоком реки. Подобные заторы бывают сравнительно редко. Единственное их следствие – уменьшение расхода воды в Неве и падения уровня вблизи истока на 0,4 – 0,6 м. Приведу описание двух наиболее выдающихся случая такого рода заторов.

В 1858 г. сильным северо-восточным ветром нагнало льда столько, что затор образовал плотину и заградил течение реки. Вода около Шлиссельбурга, при истоке Невы, поднялась весьма высоко, такого подъёма не помнили и старожилы; ниже же местности Красных сосен вода упала до удивительно низкого уровня. Жители по осушённому ложу реки находили много якорей, цепных канатов и свободно вывозили на лошадях железо, утонувшее с барок, около порогов в 1824 г. В самих же порогах русло реки так сузилось, что похоже было на маленькую речку.

В начале зимы 1972 - 73 г. несколько ниже города Петрокрепость образовался зажор льда, и исток реки оказался в подпоре. В дальнейшем замерзание Шлиссельбургской губы происходило при северо-восточном ветре, и ледяной покров в губе был сильно торосистым. В довершения всего в середине января грянули морозы до -15, -20 °С. Из-за возникновения комбинированного затора – зажора льда расход воды в Неве сократился до 540 м<sup>3</sup>/с – это самый маленький расход почти за 150 лет.

### **3.3 Естественные русловые деформации как фактор экологической напряженности (опасные проявления русловых процессов)**

Среди природных процессов и явлений, вызывающих разрушение инженерных сооружений, коммуникаций, жилых зданий, сельскохозяйственных угодий, затрудняющих или делающих невозможным нормальное функционирование хозяйственных объектов, создающих угрозу вывода их эксплуатационного состояния, т.е., в конечном счете, создающих опасность для жизни и деятельности людей, видное место принадлежит русловым процессам. При этом, с точки зрения оценки условий жизни и деятельности людей, опасность процесса представляет собой форму проявления экологической напряженности, а ее степень определяет уровень последствий или стадию развития кризисной экологической ситуации.

В.И.Даль в "Толковом словаре" слову "опасный" дает следующее пояснение: "чего должно опасаться, угрожающий или могущий вредить"; и далее приводит конкретные примеры: "переправа, река, лед опасен, ненадежен, можно утонуть"; "опасное море, полное подводных камней". Аналогичное толкование приводится в "Словаре русского языка" А.П.Евгеньева:

"Опасность - возможность, угроза бедствия, катастрофы". К истокам слов-терминов приходится обращаться, так как под влиянием разных причин в научную литературу вводится много новых понятий и определений, в том числе характеризующих отношение природных явлений к условиям жизни и деятельности людей и, в обратной связи, к антропогенным изменениям компонентов природы: напряженность, риск, устойчивость или уязвимость, опасность и т.д. Одни из них применяются при оценке экологического состояния природной среды, другие - для оценки возможности вывода из строя инженерных сооружений [26].

Жизнь человека и его хозяйственная деятельность в значительной мере связана с реками. Однако реки, будучи сами источниками жизни и объектами хозяйственной деятельности людей, в то же время оказывают неблагоприятные воздействия на приречные территории, инженерные сооружения и населенные пункты на берегах, вызывая определенную экологическую напряженность. Это может быть связано с естественным развитием речных русел (главным образом, вследствие размыва берегов, но также обмеления водозаборов, акваторий портов и водных подходов к нефтебазам, элеваторам и т.д.), вызывая необходимость защиты от разрушения населенных пунктов, инженерных сооружений и коммуникаций и проведения мероприятий по борьбе с обмелением эксплуатируемых участков реки. В обоих случаях осуществляется искусственное воздействие на реку, которое в той или иной мере, но неизбежно воздействует на русловые процессы.

Размывы берегов и другие опасные проявления русловых процессов, при достаточном знании руслового режима реки, сравнительно просто и надежно прогнозируются. Тем не менее любое освоение приречных территорий, строительство на берегах рек, прошедших через них коммуникации, сооружение водозаборов связаны с известным риском разрушений (или обмеления) вследствие возможного размыва (намыва) берегов и дна русла. Этому способствует, во-первых, практически полное отсутствие наблюдений (мониторинга) за деформациями русел, из-за чего создавшаяся угроза разрушения или вывода из эксплуатационного состояния почти всегда представляется стихийным разрушительным явлением. Во-вторых, коммунальное, коммуникационное, "промышленное, градостроительное освоение приречных территорий осуществляется или при полном игнорировании жизни речного русла, или русловые процессы оцениваются и прогнозируются на коротких отрезках, непосредственно примыкающих к району проектируемого сооружения без учета деформаций на смежных участках реки. Отсюда малая эффективность мероприятий, возникновение аварийной ситуации на вновь сооружаемых объектах, ошибки в прогнозах возможного развития процесса. Характерным примером такого рода является участок верхней Оби выше г.Барнаула. Здесь у левого коренного берега находится городской коммунальный водозабор, на правом пойменном - опора ЛЭП. Вследствие смещения излучины русла водозабор со временем оказался сначала в зоне аккумуляции наносов, а затем - в затонине, отделенной от

реки зарастающей песчаной косой и молодой поймой, к опоре ЛЭП сместилась зона размыва, и над ней нависла реальная угроза ее падения. В первом случае для поддержания в эксплуатационном состоянии водозабора и обеспечении водой населения почти миллионного города регулярно в левобережной части русла проводятся дноуглубительные работы; во втором случае были выполнено берегоукрепление. Однако выше его берег остается в свободном состоянии, и укрепленный каменной наброской участок стал образовывать мыс; размыв берега перед ним усилился, излучина активизировала свое смещение в поперечном по отношению к оси долины направлении, и в настоящее время возникает угроза разрушения следующей, ранее находящейся в глубине поймы опоры.

Опасность проявления русловых процессов и связанная с ней экологическая напряженность является потенциальной, если берега рек и приречные территории не освоены; при расположении на реках населенных пунктов, сельскохозяйственных угодий, инженерных объектов и коммуникаций опасность реализуется в экологической напряженности, поскольку она определяет условия жизни и деятельности людей. При этом экологическая напряженность может усиливаться, если не принимаются превентивные меры для предотвращения опасности даже в тех случаях, когда скорости деформаций русла сравнительно невелики. С другой стороны, проведение защитных мероприятий требует больших капиталовложений и затрат на их проектирование и выполнение. Вследствие этого возникающая напряженность становится также социально-экономической или эколого-экономической, поскольку идущие на защиту от опасности средства отвлекаются из статей бюджета на социальные нужды, развитие производства и т.д.

В зависимости от направленности развития русловые деформации могут быть горизонтальными (изменения положения русла в плане; синоним, часто употребляемый в литературе - плановые деформации) и вертикальными (изменение отметок дна русла). Отражением первых являются размывы берегов, происходящие в результате смещения форм русла и сопровождающиеся аккумуляцией наносов (намывом).

Это приводит, с одной стороны, к разрушению инженерных объектов, опор ЛЭП и мостовых переходов, дамб обвалования и других сооружений на берегах, утрате рекреационных зон, к потерям земельных угодий; с другой – к обмелению водозаборов, акваторий портов, водных подходов к нефтебазам, элеваторам, другим объектам. Подмыв рекой высоких (коренных) берегов нередко активизирует на них развитие оползней, осыпей, обвалов. Так как размыв и отступление берегов являются наиболее эффективной и разрушительной частью горизонтальных деформаций, в литературе за ними закрепился термин "боковая эрозия", хотя он далеко не полно и не совсем точно отражает сущность самого процесса. Вертикальные деформации, заключааясь в размыве самого русла или накоплении

аллювия, приводят соответственно к понижению или повышению отметок его дна и, как следствие, уровня водной поверхности. Следствием размывов дна является "провисание" подводных переходов (дюкеров, газо- и нефтепроводов), разрушение речных опор мостовых переходов и т.д. В противоположном случае (аккумуляция наносов - повышение отметок дна и уровня водной поверхности) усиливается затопление в половодье низких приречных территорий (высокой поймы, первой надпойменной террасы), вплоть до угрозы наводнений, происходит их подтопление, что вызывает необходимость наращивания дамб обвалования. Обычно вертикальные деформации положительного знака (аккумуляция наносов) сопровождаются большей интенсивностью и размахом боковой эрозии (размывами берегов).

Русловые деформации по времени своего развития могут быть направленными и периодическими. Для горизонтальных деформаций направленный процесс в целом не типичен, проявляясь на реках с относительно прямолинейным руслом при его расположении вдоль коренного берега (аналогичная тенденция характерна для разветвленных русел при их расположении вдоль коренного берега: в этом случае обычно формируются односторонние разветвления) или у врезанных излучин. Таковы в первом случае Волга до ее регулирования, Малая Северная Двина - следствие Кориолисова ускорения, Терек на широтном участке - тектонических перекосов, Обь выше г.Барнаула - воздействия ветра [2]. Направленное развитие врезанных излучин является следствием кинематической структуры потока. Более существенен их учет при оценке вторичных процессов на берегах, для которых речная эрозия является фактором активизации - оползней, обвалов. Направленные вертикальные деформации в естественных условиях обычно характеризуются чрезвычайно малой интенсивностью, проявляясь лишь в течение исторических и даже геологических отрезков времени; например, отступление правого коренного берега Северной Двины между слиянием Юга и Сухоны и устьем Вычегды (Малая Северная Двина) составляет 0,7 см/год [32]; сложенный лессовидными суглинками ШО-метровый уступ Предалтайского Степного плато на верхней Оби отступает со скоростью до 0,5 м/год [7].

Периодические деформации - основной вид проявления русловых процессов, который обычно учитывается при строительном проектировании. Длительность их проявления определяется временем существования русловой формы - от ее возникновения до отмирания, после чего процесс в той или иной мере повторяется, если не происходит общего изменения морфологии русла (например, при спрямлении излучины вдоль коренного берега русло трансформируется в прямолинейное). Интенсивность периодических деформаций зависит от стадии развития русловой формы, устойчивости русла (соотношения скорости потока и крупности наносов), геологического строения берегов, размеров реки (ее водоносности). Смещение в русле крупных аккумулятивных скоплений - побочней, осередков, отклоняющих стрежень потока к берегам, обуславливает временную активизацию или затухание процесса,

коротко-периодичную (через несколько лет) смену размывов берегов намывом и наоборот. С другой стороны, смещение форм руслового рельефа оказывает существенное влияние на состояние судовых ходов, вызывая изменение положения их трасс. Сезонные и многолетние переформирования перекатов, проявляющиеся в периодическом их обмелении, требуют регулярного выполнения дноуглубительных работ, причем их объемы и устойчивость прорезей зависят от того, насколько точен был прогноз этих переформирований.

Наиболее опасной формой проявления русловых процессов является размывы речных берегов под влиянием водного потока. От них страдают населенные пункты, инженерные объекты, коммуникации и другие сооружения, возведенные вблизи рек: водозаборы, линии электропередач и мостовые переходы; утрачиваются ценные сельскохозяйственные угодья, происходит потеря леса и т.д. Для борьбы с этим явлением или его предотвращения производится дорогостоящее берегоукрепление или возводятся дамбы, осуществляются различные регуляционные мероприятия на реках, вплоть до создания искусственного русла, отводящего поток от подвергнувшегося его воздействию объекта. В ряде случаев переносятся на новые места населенные пункты, инженерные сооружения или коммуникации. При этом размывы берегов являются естественным (природным) процессом, свойственным практически любой реке, и лишь форма их проявления и интенсивность, определяясь многими факторами (литологией пород, слагающих берега, типом русла, мощностью потока и т.д.), колеблется в очень широких пределах - от долей метра до десятков метров в год в среднем - и характеризуется изменчивостью во времени (от половодья к межени, от года к году), периодичностью развития - возникновением, активизацией, затуханием, прекращением и вновь возобновлением.

Местоположение зон размыва берегов связано, в первую очередь, формой русла (морфодинамическим его типом); она же определяет, при прочих равных условиях, скорость размыва и, соответственно, отступления берега. Одновременно происходит аккумуляция наносов у противоположных берегов, обмеление тех его зон, которые попали в области замедления течения, рукавов, водность которых сокращается и т.д.

Основными морфодинамическими типами русел, определяющими расположение зон размыва (и намыва) берегов рек и их пространственно-временную изменчивость являются излучины (меандрирование русла), разветвление русла на рукава, относительно прямолинейное, неразветвленное русло и их разновидности. Участок реки, в пределах которого преимущественное развитие получили формы русла того или иного типа, является морфологически однородным [5]. В зависимости от геолого-геоморфологического строения долины реки русла могут быть широкопойменными (для них  $B_n > 2-3B_p$ , где  $B_n$  - ширина поймы реки,  $B_p$  - ширина русла), врезанными ( $B_n < B_p$ , или пойма отсутствует) и адаптированными ( $B_p < B_n < 2-3B_p$ ) [7]. Первые соответствуют условиям свободного развития русловых

деформаций: берега рек сложены в основном легко размываемыми породами (песками, супесями, суглинками); развитие русла происходит среди поймы, деформации - периодические, сопровождаются на всем протяжении интенсивными размывами берегов (от первых метров до десятков метров в год). Врезанные русла полностью контролируются коренными берегами, сложенными пластичными или скальными породами; пойма встречается, фрагментарно у выпуклых берегов излучин, на островах (условия ограниченного развития русловых деформаций). Русло стабильно; деформации носят направленный характер, проявляясь в исторических или геологических отрезках времени; размывы берегов локальны; наибольшие величины - у пойменных берегов (не более 1-2 м/год на больших реках). Адаптированные русла занимают промежуточные положения по условиям развития русловых деформаций и их интенсивности. Для них характерен частичный контроль развития русла коренными берегами (на излучинах - верхнее крыло среди поймы, нижнее - возле коренного берега; прямолинейное русло - один берег коренной, противоположный - с узкой поймой и т.д.); в то же время здесь возрастает протяженность и степень воздействия речного потока на коренные берега.

Развитие той или иной формы (типа) русла - процесс естественный, обусловленный неустойчивостью прямолинейного движения потока [22, 25 и др.]. Однако при малом стоке наносов, формирующих в русле крупные аккумулятивные скопления - гряды (побочни, осередки), либо отсутствии внешних причин, закрепляющих изгиб потока (мысы и выступы берегов, оказывающие на него направляющее воздействие) или его разделение на отдельные ветви течения (повышение коренного ложа посередине реки), возникает относительно прямолинейное, неразветвленное русло. То же самое происходит при его расположении вдоль коренного берега, вследствие возникновения в потоке во время половодья циркуляционных течений, направленных к пойменному берегу, обуславливающих устойчивое положение русла возле коренного берега и направленных параллельно смещению русла в сторону последнего [7], одновременно происходит постоянный подмыв основания коренного берега и перенос наносов к противоположному, пойменному, что вызывает обмеление прилегающей к нему зоны русла. Восстановление исходной формы русла происходит ниже мыса коренного берега, вызывающего отклонение потока и его изгиб, либо под влиянием оползней или крупных обвалов коренного берега, искривляющих поток. Например на верхней Оби в районе Шелаболихи в середине 70-х годов на левом коренном берегу (80-100-метровый уступ Степного плато) оползень вызвал отклонение стрежня потока к противоположному правому пойменному берегу, развитие там рукава и обмеление водных подходов к пристани и элеватору. В пойменных берегах прямолинейное неразветвленное русло сохраняется при отсутствии побочной и осередков, обсыхающих в меженный период, либо при их большой подвижности, из-за которой они не успевают

закрепиться растительностью. Смещаясь вдоль русла со скоростью десятков - сотен метров в год, они вызывают миграцию зон размыва противоположного берега. В результате вдоль обоих берегов возникают прирусловые полосы, периодически размываемые или нарастающие. Суммарная ширина их составляет до  $0,5-0,7 B_p$ , достигая 200-300 м на каждом берегу таких рек, как Ока, Вычегда, Дон, периодичность смены размыва намывом и наоборот - в среднем 5-7 лет.

Прямолинейные врезанные русла отличаются очень высокой устойчивостью, стабильностью плановых очертаний и не размываемыми берегами.

Развитие излучины широкопойменного русла происходит, если возникает устойчивое скопление наносов у одного из берегов или малоподвижный побочень закрепляется растительностью раньше, чем смещается на полную свою длину. Изгиб русла вызывает формирование в потоке определенного поля скорости с чередующимися вдоль берегов зонами ускорения и замедления течения и поперечной циркуляцией, направленной от вогнутого к выпуклому берегу.

Чередование зон замедления и ускорения течения обуславливает на пологих излучинах соответствующее распределение зон размыва берегов и аккумуляции наносов и преимущественное продольное перемещение излучины. Циркуляционные течения при этом вызывают постепенное увеличение кривизны излучин, по мере роста которой скорость размыва берегов возрастает, составляя в начальной стадии на крупных реках 1 -3 м/год, в конечной - до 20 м/год при их песчаном строении.

Крутые излучины развиваются в трех возможных направлениях. Излучина может спрямляться путем образования протока в основании пойменного сегмента, где отметки поймы наименьшие. Обычно это наблюдается при глубоком затоплении поймы (руслоформирующий расход воды проходит при уровнях наибольшего разлива реки). При таком спрямлении образуется прорванная излучина, а сам процесс часто называют незавершенным меандрированием [25]. Размывы берегов, затухают до образования новой излучины в спрямленном русле. Старое русло отмирает либо частично продолжает функционировать, объединяясь с ранее образовавшимися староречьями и образуя извилистую пойменную многорукавность (например, пойму на р.Вычегде) со своими зонами размыва и намыва берегов внутри поймы. Залесенность или большая высота поймы препятствуют спрямлению русла, и дальнейшая эволюция излучины происходит по одной из двух других схем. К такому же эффекту приводит направляющее на поток воздействие коренного берега (его выступа или мыса), если русло выше развивающейся излучины располагается вдоль него или он составляет тыловую часть сегмента, ограниченного крыльями излучины. При песчаном строении пойменных берегов происходит трансформация сегментной формы излучины в петлеобразную (омеговидную); на ее крыльях возникают излучины второго порядка, вогнутые размываемые

берега которых ориентированы навстречу друг другу, а в привершинной части вдоль всего вогнутого берега создается зона устойчивого размыва, обеспечивающего поперечное смещение всей излучины в целом. Такое расположение зон размыва берегов приводит к сближению крыльев и в конечном счете к спрямлению излучины путем встречного размыва берегов. Старое русло быстро отмирает, превращаясь в старичное озеро; в спрямленном русле начинается развитие новой излучины.

При глинистом строении берегов поймы, из-за повышенной противо-эрозийной устойчивости грунтов, излучина приобретает вытянутую поперек долины форму - синусоидальную или пальцеобразную. Участки русла между вершинами смежных излучин представляют собой прямолинейные вставки с относительно стабильными берегами. В вершине излучины зона размыва локализуется коротким отрезком вогнутого берега, где скорости потока выше не размывающих для глинистых грунтов. Однако по мере его отступления и роста кривизны русла нарушается условие обтекания потоком берегов. Возле вогнутого берега возникает водоворотная зона, в которой происходит накопление наносов; размыв его прекращается; стрежень потока смещается к выпуклому берегу, который частично размывается; происходит консервация излучины и общая стабилизация планового положения русла.

На реках других регионов возможны еще более интенсивные, вплоть до катастрофических, проявления русловых деформаций. Например, на Амударье при дейише берега размываются со скоростью 500-1000 м/год, составляя в среднем около 250 м/год и достигая интенсивности за время развития 50 м/час; крупные осередки смещаются со скоростью до 1700 м/год; число Лохтина при этом имеет значения меньше 0,5. С другой стороны, оценка опасности в 0 баллов (отсутствие опасности) достаточно условна, так как полностью безопасных, с точки зрения русловых процессов, рек не бывает. Так, на реках Восточной Сибири, русла которых формируются в скальных грунтах, берега не размываются и являются стабильными. В то же время происходит, хотя и очень медленное, смещение галечно-валунных гряд, заносятся наносами дноуглубительные прорезы, нарушается функционирование водозаборов; для судоходства на таких реках опасность представляют выходы скал на дне и скальные береговые выступы ("быки"), которые являются следствием многовекового размыва потоком разных по прочности горных пород, "прижимы" течения к скальным берегам, распространение в русле камней "одинцов" - результат специфических особенностей переноса и накопления крупнообломочного материала и т.д. Опасность здесь приобретает другие формы, и ее оценка зависит от вида хозяйственной деятельности на реке: она не опасна при строительстве на берегах и опасна для судоходства.

Степень опасности русловых процессов, обусловленной горизонтальными деформациями русел и возможностью ее прогнозирования (предвидения), зависит от

морфодинамического типа русла. Извилистое, разветвленное на рукава или относительно прямолинейное неразветвленное русла характеризуются вполне определенными закономерностями размещения зон намыва и размыва берегов, которые имеют свою специфику как на разных стадиях развития каждой формы русла, так и в зависимости от их морфологического типа; благодаря эволюции форм русла может также изменяться интенсивность деформаций, достигая со временем в характерных местах максимальных значений. Кроме того, имеет значение врезанный, широкопойменный или адаптированный характер русел, что соответствует ограниченным, свободным или переходным условиям формирования русел и развития русловых деформаций по геолого-геоморфологическим факторам. Он определяет наряду с разной устойчивостью русел вероятность возникновения опасности русловых процессов для инженерных сооружений и мероприятий, отсутствие опасности или слабую опасность русловых процессов на реках с врезанным руслом, всегда разную степень опасности на реках с широкопойменным руслом, а также обуславливает неодинаковое расположение зон повышенной опасности по отношению к элементам форм русла. Например, у вынужденных излучин вогнутый берег в нижнем крыле является относительно стабильным, тогда как у свободных такой же формы именно здесь берег размывается особенно интенсивно; размеры врезанных излучин часто не соответствуют параметрам современного русла (его водности и ширине), отражая либо геологическую структуру, либо палеогеологическую обстановку прошлых геологических эпох.

Приведенные сведения об опасных проявлениях русловых процессов относятся к средним и большим рекам. На малых реках абсолютные значения показателей опасности меньше, но по отношению к размерам русла реки они сохраняются такими же, а в ряде случаев и превышают их. Русловые деформации на малых реках являются опасными при максимальных скоростях размыва берегов уже до 5 м/год, наибольшая протяженность фронта размыва - до 30% от длины реки или ее участка и при периодичности повторения размывов в одном и том же месте - первые десятилетия. К умеренно опасным относятся малые реки в областях чередования условий свободного и ограниченного развития русловых деформаций реки с ограниченными условиями развития русловых деформаций, где изменения планового положения русел практически не происходит.

Естественные направленные вертикальные деформации русел, как правило, отличаясь очень малой интенсивностью (доли миллиметра в год), обычно не учитываются при строительном и водохозяйственном проектировании. Однако в данном случае речь идет об общих направленных деформациях, а не об изменениях отметок дна, связанных с развитием форм русла, смещением и режимом форм руслового рельефа, которые следует рассматривать вместе с соответствующими горизонтальными

деформациями и движением аллювиальных гряд. Последние являются периодическими или текущими во времени, местными или локальными по распространению на реке. Исключения представляют некоторые неординарные условия проявления общего врезания или общей направленной аккумуляции наносов. На реках России они редки; наиболее ярким примером являются процессы аккумуляции в низовьях Терека, на нижнем Амуре и его притоках, где они вызывают угрозу катастрофических наводнений или кардинальных перестроек речной сети. В других районах мира подобные процессы характерны для равнинных рек Средней Азии и Казахстана (р. Амударья, р. Сырдарья, р. Или), Хуанхэ и др. Менее известны примеры высоких скоростей естественного врезания рек, которое обычно лимитируется подстилающими русло трудно размываемыми коренными грунтами или формирующейся отмосткой из частиц повышенной крупности по отношению к размывающей скорости потока. Однако в последнее время появились сведения о том, что в горах реки часто врезаются со скоростью от 1 до 7 см в год, зафиксированы катастрофические скорости врезания (32 см/год) [7].

### **3.4 Руслоформирующие расходы**

При рассмотрении вопросов, связанных с русловыми процессами, часто используется понятие руслоформирующего расхода. Формирование речного русла определяется одновременным действием многих взаимосвязанных факторов. Поэтому говорить о руслоформирующем расходе, выделяя его из общего ряда факторов, влияющих на руслообразование, по сути дела, нельзя, если не сделать целый ряд оговорок и ограничений, устраняя этим влияние других факторов. Отсутствие таких ограничений делает понятие руслоформирующего расхода расплывчатым и неопределенным. На формирование русла как в естественных условиях, так и в условиях урбанизированной территории, влияют факторы, изменяющие не только сток воды водотока, но и наносов, поэтому говорить о руслоформирующем расходе можно лишь в том случае, если характеристики стока наносов в процессе формирования русла остаются неизменными или тесно коррелируют со стоком воды.

Четкая формулировка самого термина «руслоформирующий расход» затруднена также и тем обстоятельством, что внутри русловые изменения существенно разных масштабов происходят на разных структурных уровнях и в периоды времени, существенно различающиеся по длительности. Процесс перемещения частиц грунта водным потоком в значительной мере определяется отношением  $U_k/W$  ( $U_k$  – мгновенная скорость на уровне вершин выступов шероховатости;  $W$  – гидравлическая крупность частиц) и только при  $U_k/W > 1$  такое перемещение становится возможным. При

отсутствии перемещения частиц донного грунта активные русловые переформирования исключены и происходит лишь локальное осаждение достаточно крупных взвесей, поступающих в поток с водосборной площади (в местах слияния притоков с основным руслом). Поступающая мелкодисперсная взвесь транспортируется транзитом без осаждения, не вызывая русловых переформирований.

Таким образом, можно предполагать, что руслоформирующими могут быть расходы, отвечающие условию  $U_k/W > 1$ , поскольку русловые переформирования, происходящие на разных структурных уровнях, для своей полной реализации требуют различного времени взаимодействия между потоком и руслом, очевидно, что характер русловых переформирований будет зависеть от формы гидрографа и обеспеченности данного расхода. Н. И. Маккавеев и Р. С. Чалов отмечают наличие нескольких руслоформирующих расходов для одного и того же водотока, происхождение которых вызывает специфические изменения в очертаниях русла и поймы, однако эти изменения четко не связываются с принятыми структурными уровнями руслового процесса. Существуют и другие предложения по определению руслоформирующего расхода, например, по максимуму произведения расхода наносов на повторяемость суточных расходов воды, либо по расходу, отвечающему устойчивым морфометрическим связям для данного водотока. Совершенно очевидно, что при этом принимаются во внимание коренные по характеру, наиболее медленные, необратимые русловые переформирования.

Все эти, существенно разные подходы к определению руслоформирующего расхода основываются на результатах отдельных наблюдений и качественных описаний. При всей сложности проявлений и многообразии типов русловых процессов разработка строгого многоуровневого подхода к уточнению самого понятия «руслоформирующий расход» и выработке количественных подходов к его определению — дело будущего. Здесь для условий прямолинейного русла с постоянным очертанием поперечного сечения рассмотрим возможность однонаправленных изменений русла при  $U_k/W > 1$ , когда поток перемещает русловые наносы и стремится сохранять равновесность массообменного процесса между потоком и руслом. Будем считать, что непосредственной причиной деформаций речного русла является нарушение баланса наносов.

Водный поток может быть руслоформирующим, если он воздействует на форму русла, производя размывы, либо создавая отложения наносов. Размыв донных грунтов может приводить к повышению концентрации твердых частиц в водном потоке только в том случае, если концентрация еще не достигает равновесной. Время достижения равновесной концентрации  $T_p$  позволит оценить длину участка русла, в пределах которого происходит размыв и концентрация возрастает от нулевой в исходном расчетном створе

до равновесной концентрации  $c_d$ . Поскольку предполагается, что концентрация  $c_d$  достигается на всей площади поверхности дна в слое сальтации толщиной  $h_p$ , для определения времени  $T_v$  рассмотрим баланс массы в этом слое. Изменение объема твердых частиц в этом слое за время  $dt$  над единичной площадкой  $h_p dc$  (где  $dc$  — приращение концентрации) определяется объемом твердых частиц, взвешиваемых с данной площади.

Расчет показывает, что равновесная концентрация достигается на начальном участке течения в весьма малые промежутки времени, близкие к удвоенному периоду скачка частицы. Следовательно, даже в тех случаях, когда скорость водного потока превышает критическую и возможен размыв грунта, поток насыщается взвесью сразу же на небольшом по длине начальном участке движения и только здесь может производить локальный размыв русла. На всем дальнейшем пути поток не имеет возможности производить размывов или отложений наносов при постоянных размерах поперечного сечения русла. При этом изменение конфигурации русла может происходить лишь последовательно сверху вниз по течению по мере углубления русла и прекращения размывов на начальном участке течения. Этот процесс обычно наблюдается при нарушении естественных условий на участках русла ниже перегораживающих сооружений [24]. На остальных участках русла расходы, обеспечивающие превышение критических скоростей и нарушение устойчивости частиц русла, не могут являться руслоформирующими. Указанные обстоятельства вызывают очевидные затруднения в четком определении руслоформирующего расхода, на что указывает В. С. Лапшенков. Местный размыв русла ниже сооружений, перехватывающих сток наносов (или увеличивающих сток воды, например, при дополнительном обводнении водотока), будет происходить до тех пор, пока условие устойчивости частиц  $U_k/W=1$  не будет достигнуто за счет повышения крупности частиц донного грунта, либо за счет снижения скорости течения. Снижение скорости течения при углублении русла вследствие его размыва возможно только за счет уменьшения уклона, что приводит в конечном счете к значительной врезке русла ниже перегораживающих сооружений.

Таким образом, любой расход в цилиндрическом русле вследствие весьма быстрого достижения равновесной концентрации при постоянной форме поперечного сечения не может вызывать однонаправленных русловых деформаций (размывов или заиления) на всей длине русла. Возможны лишь локальные размывы и трансформации донных форм.

Нарушение динамического равновесия между потоком и руслом на значительных участках его протяженности может происходить лишь при расходах,

приводящих к затоплению пойменных территорий. Таким образом, появляется возможность внести физическую ясность в определение руслоформирующего расхода, которое ранее принималось многими исследователями без достаточного обоснования [22]. Становится также более понятным, почему руслоформирующий эффект таких расходов эквивалентен эффекту всего гидрографа: при расходах, меньших руслоформирующего, несмотря на повышение мутности с увеличением расхода, имеет место динамическое равновесие между потоком и руслом и значительных русловых переформирований не происходит.

Наличие скоростей течения в русле, превышающих критическую скорость, является необходимым, но не достаточным условием самопромывки русла. Вторым необходимым условием является выход паводкового потока на пойму.

Интенсивность удаления из русла накопленных отложений на прилегающие затопленные пойменные участки будет определяться скоростью поперечного массообмена между русловым и пойменным потоками. Имеются данные, указывающие на проявление в этой зоне особых кинематических эффектов и возникновение крупномасштабных вихревых структур с вертикальной осью [4].

Поскольку возникновение вихревых структур связано с неустойчивостью течения в зоне взаимодействия руслового и пойменного потоков, интенсивность поперечных пульсаций будет определяться разностью скоростей в русле и на пойме. Наибольший масштаб вихревых структур определяется шириной зоны динамического взаимодействия руслового и пойменного потоков. По натурным наблюдениям А. Л. Радюка [3], согласующимся с данными Р. Селлина, вихревая зона захватывает большую часть ширины русла и заполнена вихрями, средний размер которых соизмерим с глубиной потока в основном русле.

Взвесь, переносимая из руслового потока на пойму, осаждается вследствие небольших скоростей течения на пойме. Естественно, что быстрее других осаждаются наиболее крупные песчаные частицы, образуя прирусловый вал [7]. Мелкая взвесь (илистые и пылеватые фракции) осаждается на всей площади поймы, положительно влияя на ее плодородие.

В тех случаях, когда широкое речное русло имеет развитые прибрежные мелководья, в пределах которых скорости течения невелики и в паводок здесь не происходит размыва донных наносов, а условие предельного равновесия достигается лишь в стрежневой части русла, происходит перераспределение наносов в поперечном сечении русла. В этом случае стрежневая часть русла углубляется, а прибрежные мелководья аккумулируют наносы. При общем повышении мутности речного потока вследствие размывов в стрежневой части продольной передвижки наносов на

значительные расстояния не происходит. Это подтверждается данными натурных наблюдений и должно учитываться при проектировании гидравлической промывки речных русел.

Поперечный перенос взвеси из строжневых зон размыва в прибрежные зоны седиментации является важным составным элементом руслового процесса побочного типа [5].

#### **4. АНТРОПОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ. ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ.**

Антропогенная деятельность в речных долинах многогранна, и различные ее виды оказывают неодинаковое по масштабам воздействие на экологическое состояние рек. Однако большинство их в той или иной степени нарушает природное равновесие и тем самым создает определенную экологическую напряженность.

Более того, нарушается равновесие и при таких видах антропогенной деятельности, которая призвана снизить естественную экологическую напряженность, в частности, при защите берегов и инженерных объектов от их разрушений в ходе русловых деформаций, накоплении запасов весенних вод половодья на пересыхающих в межень реках, углублении рек для их транспортного использования и др.

Таким образом, происходит замена одного вида экологической напряженности другим; при этом возникновение антропогенно-обусловленной экологической напряженности вызвано объективной необходимостью использования рек и их ресурсов для обеспечения жизнедеятельности и жизнеобеспечения человека.

Разнообразие видов взаимодействия хозяйственной деятельности человека и инженерных сооружений с русловыми процессами обуславливает необходимость их типизации, которая в свою очередь, позволит оценивать экологические последствия этого взаимодействия.

Первую обоснованную классификацию предложил Б.Ф.Снищенко, в ее основу положено выделение двух классов воздействия инженерных сооружений на речные русла – активных и пассивных. Активные гидротехнические сооружения сами непосредственно видоизменяют речные русла, например, карьеры, прорези и др. Пассивные – воздействуют на русло лишь своим присутствием в нем, например, мостовые опоры, причальные стенки и т.д.

#### **4.1 Воздействие гидротехнических сооружений и водохозяйственных мероприятий в руслах и поймах рек на экологию и процесс саморегулирования исследуемой системы**

Воздействию гидротехнических сооружений и водохозяйственных мероприятий на жидкий сток, гидравлические, морфометрические и другие характеристики рек посвящена обширная научная литература. В частности, в работе «Антропогенное воздействие на русловые процессы» Н.Б. Барышникова выполнен детальный анализ их воздействия на русловые и пойменные процессы [2]. Все гидротехнические сооружения и водохозяйственные мероприятия по степени их воздействия на русловые процессы подразделяются на активные и пассивные. С небольшими дополнениями эту типизацию можно распространить и на другие гидрологические и морфометрические характеристики речных русел и рек в целом. Любая типизация - это схема, необходимая для разработки расчетных методик и др. В данную типизацию внесены небольшие изменения.

Так, продольные дамбы обвалования большой протяженности и карьерные участки, коренным образом изменяющие русловые процессы на участках большой протяженности, а также оказывающие значительное влияние на гидравлику потока и его гидрологические характеристики, отнесены к первой категории активных сооружений.

В учебнике не представляется возможным выполнить детальный анализ воздействия всех видов гидротехнических сооружений на экологию и процесс саморегулирования исследуемой системы. Поэтому ограничимся рассмотрением влияния лишь основных активных сооружений.

##### **4.1.1 Воздействие регулирующих водохранилищ**

К активным, в первую очередь, относят регулирующие водохранилища, оказывающие исключительно большое влияние на жидкий сток и сток наносов, русловые процессы и другие характеристики. Они коренным образом изменяют морфологическое строение русел и пойм на участках большого протяжения, особенно на равнинных реках. При этом изменяются как величина годового стока за счет увеличения испарения с поверхности водохранилищ, так и его внутригодовое распределение, особенно под воздействием водохранилищ многолетнего регулирования.

Процессы, происходящие в верхних бьефах водохранилищ, принципиально отличаются от аналогичных, происходящих в нижних бьефах. Поэтому рассмотрим их раздельно, начав с верхних бьефов.

При возведении водохранилищ, особенно на равнинных реках происходит затопление и подтопление больших площадей пойменных и других земель. Так, по данным Вендрова, на территории бывшего Советского Союза площадь водного зеркала водохранилищ

превысила 25 млн.га. В то же время, по данным Н.Н. Пельт, примерно 40% этих площадей приходится на затопляемые поймы. Следовательно, общую площадь затопленных пойменных земель на территории бывшего СССР, следует оценить примерно в 10 млн.га. Однако эти цифры не включают в себя площади подтопляемых земель и в первую очередь пойм, на которых из-за значительного повышения уровня грунтовых вод резко изменяется характер растительности. Вместо высокопродуктивных пойменных лугов образуются непродуктивные болотные массивы, и тем самым подтопленные поймы почти полностью исключаются из сельскохозяйственного использования. Следует отметить, что водохранилища выводят из сельскохозяйственного и другого назначения затопляемые и подтопляемые земли не только на основном водотоке, но и на его притоках.

В верхних бьефах часто происходят затопления и подтопления различных населенных пунктов, иногда даже городов, особенно расположенных на поймах. Как правило, их переносят на более высокие места, находящиеся вне зоны подтопления водохранилищами. Например, в зону затопления и подтопления водохранилища Красноярской ГЭС попало 133 населенных пункта, водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС - 19 поселков.

Следует отметить, что водохранилища часто вызывают ряд негативных процессов, как правило, обусловленных просчетами, допущенными при проектировании, строительстве и эксплуатации ГЭС. Так, на ряде водохранилищ, созданных в восточных регионах страны, их чаши предварительно не вычищались, миллионы кубометров леса не были вырублены, а были затоплены при заполнении водохранилищ. Наиболее наглядными примерами являются водохранилища Братской и Саяно-Шушенской ГЭС, где затоплено несколько миллионов кубометров строевого леса. Помимо убытков от неиспользования этого леса в народном хозяйстве, его затопление приводит к авариям водного транспорта и, что самое главное, затопленные деревья являются причиной резкого снижения качества воды, иногда приводя к загниванию весьма больших участков водохранилища. Для ликвидации последствий на Братском водохранилище было создано специальное подразделение, задачей которого являлась очистка чаши водохранилища от затопленного леса. Это один из ярких примеров бесхозяйственности и хищнического отношения к природным ресурсам. На некоторых водохранилищах, где процесс их затопления осуществлялся без предварительного очищения их чаши, наблюдалось образование торфяных островов. Площадь последних достигала нескольких квадратных километров, а толщина нескольких метров.

В южных регионах «болезнью» водохранилищ является зарастание их сине-зелеными водорослями. Их быстрый рост обусловлен интенсивным поступлением в водохранилища органических и минеральных удобрений, смываемых с полей и поступающих из других источников. Быстрый рост, последующее отмирание и гниение таких водорослей приводит

к резкому ухудшению качества воды и невозможности ее использования не только для питья, но и для хозяйственных целей.

Большие водохранилища оказывают существенное влияние на климатические условия прилегающей территории, особенно в летне-осенние периоды. Наиболее четко это проявляется в регионах с резко выраженной антициклонной деятельностью. В качестве примера можно привести изменение климата в районе г. Красноярска под влиянием Красноярского водохранилища, где произошли значительные изменения погодных условий, выразившиеся в резком увеличении влажности и осадков в виде дождей в летне-осенние периоды.

Остро стоит вопрос о негативных последствиях строительства больших водохранилищ на горных реках, где высота плотин довольно часто превышает сотни метров. Например, в Китае плотина Лоньяня высотой 178 м, Дун Цзян - 157 м, Эртрань - 240 м и др. В Индии в 1969 г. построена каменная плотина Нагарджана Сагар высотой 124,7 м. На реках Средней Азии также построено несколько плотин, высота которых превышает 200 м. Это плотины Рангунской и Нурекской ГЭС высотой соответственно 330 и 305 м. На Кавказе - Ингурская ГЭС с плотиной высотой 271,5 м и многие другие.

При таких высоких плотинах создаются водохранилища объемом в десятки и даже сотни км<sup>3</sup>, что в сейсмически опасных, а большинство горных районов таковыми и являются, может приводить, а иногда и приводило к землетрясениям. Катастрофическими являются и обрушения больших массивов горных пород в водохранилищах из-за волнения и других причин, приводящие к образованию мощной волны, способной не только разрушить прибрежные селения, но даже плотину водохранилища.

Рассмотрим процессы, происходящие в нижних бьефах гидроузлов. Как уже указывалось, в них поступает лишенная наносов осветленная вода со скоростями, равными или большими бытовых. Это сразу же приводит к образованию воронки местного размыва, глубины в которой могут достигать десятков метров. По мере стабилизации воронки размыва поток перестает насыщаться наносами, что приводит к деформациям общего размыва, распространяющимся на десятки, а иногда и сотни километров. Этот процесс весьма продолжительный, на равнинных реках он может формироваться десятки, а иногда и сто лет. Характер этих деформаций заключается в однонаправленном врезе русла и понижении отметок уровней и дна.

В связи с регулированием стока максимальные расходы воды, как правило, существенно уменьшаются, особенно в нижних бьефах водохранилищ многолетнего и сезонного регулирования. Меженный же сток, наоборот, существенно увеличивается. Врезание русла и следующая за ним сработка уровней обычно приводят к снижению уровней грунтовых вод, следовательно, и к уменьшению их запасов в маловодные периоды.

Как уже указывалось, в нижних бьефах ГЭС пики паводков снижаются и паводочные воды на ряде рек не затопляют поймы, что в аридной зоне приводит к их остепнению и необходимости орошения. Однако орошение также не компенсирует уменьшения продуктивности пойм из-за отсутствия мелких гумусовых частиц, приносимых паводками в бытовых условиях. Так, Вендров приводит пример остепнения ранее высокопродуктивной поймы р. Иртыша, вызвавшего необходимость специальных попусков Бухтарминской ГЭС. Весьма значительные попуски производятся из водохранилищ Волгоградской и Куйбышевской ГЭС с целью обеспечения нерестилиц рыб и продуктивности Волго-Ахтубинской поймы. Эти попуски производятся в ущерб энергетике.

В Казахском научно-исследовательском институте энергетики провели детальные наблюдения по реализации проектов восстановления биологической продуктивности поймы р. Иртыша на участке ниже Бухтарминской ГЭС. В период наполнения водохранилища (1960-1963 гг.) прекратилось затопление пойменных лугов, которое было основой их урожайности. Продуктивность этих лугов сократилась с 17 до 3-4 ц/га из-за прекращения их обводнения. Такое положение привело к необходимости сельскохозяйственных попусков из водохранилища Бухтарминской ГЭС в ущерб энергетике. “Схема” таких попусков, основанная на теории трансформации паводочной волны при ее совмещении с паводками основных притоков на этом участке рек Убы и Ульбы, была разработана в ГПИ. Несмотря на приближенный характер “схемы” и ряд ее недостатков, она была реализована при проведении попусков в 1962, 1964-1972 гг. Первый попуск 1962 г. не привел к затоплению поймы, но его опыт позволил резко повысить их эффективность в последующий период. Несмотря на большие энергетические потери, только в 1964 г. урожайность лугов достигла и даже несколько превысила соответствующую в естественных бытовых условиях. Это объясняется тем, что пойма перед попуском четыре года «отдыхала» и в 1964 г. были израсходованы запасы питательных веществ, накопленных на пойме в предыдущий период. В последующие 1965-1972 гг. урожайность лугов составляла только 55-87 % их естественной продуктивности. Это обусловлено резким уменьшением поступления питательных веществ при попусковом затоплении пойм по сравнению с их естественным затоплением, а также частичным заболачиванием и переувлажнением лугов. Пойма, как аккумулятор плодородия, сама регулировала и гарантировала свое плодородие. В условиях пуска пойма подвержена в первую очередь регулярному “ударному” воздействию волны пуска, осветленные массы воды которого “раскачивают” плодородный слой и бесполезно вымывают из озер и углублений накопившийся годами ил.

Таким образом, следует отметить, что попуски для восстановления продуктивности пойменных лугов вполне оправданы как временная мера, но из-за ряда негативных последствий для интенсификации сельскохозяйственного производства на поймах целесообразно перейти на регулярное орошение пойменных земель с одновременной их мелиорацией. В качестве радикального было принято решение о строительстве на р.Иртыше каскада ГЭС.

Однонаправленное врезание русла в нижем бьефе приводит к снижению базиса эрозии притоков, что, в свою очередь, приводит к врезанию их русел, т.е. к изменению типа русловых, а, следовательно, и пойменных процессов и существенному уменьшению затопляемости пойм. Другим следствием врезания русел является падение или посадка уровней, приводящая к значительному увеличению уклонов водной поверхности притоков и их скоростей, а также выносу крупных фракций наносов в основное русло. Последние, отмашивая русло, замедляют или прекращают процесс его размыва.

Таким образом, в нижних бьефах ГЭС из-за направленных деформаций размыва русла основного водотока и его притоков, как правило, происходит увеличение площадей их сечения, а, следовательно, и пропускной способности русел. Это приводит к значительному уменьшению частоты и продолжительности затопления пойм, что в совокупности с уменьшением мутности приводит к уменьшению количества наносов, отлагающихся на них.

В последние годы в связи со строительством и эксплуатацией ГЭС, расположенных на реках, протекающих в суровых климатических условиях, особенно остро встала проблема затопления пойм зимними паводками. Регулирующие водохранилища, накапливая воду в паводочный период, существенно увеличивают летний и зимний сток. Пропуск высоких зимних расходов воды при сечении реки, забитом льдом и шугой, происходит при низких зимних коэффициентах  $k_z$ , что часто приводит к затоплению пойм.

Рассмотрим эту проблему более детально на примере Красноярской ГЭС, где в 1968-1974 гг. были проведены специальные исследования пропуска повышенных, с учетом аварийной нагрузки, расходов воды ( $3500 \text{ м}^3/\text{с}$ ). В нижнем бьефе ГЭС формируется полынья, размеры которой зависят от суровости зимы, режима попусков ГЭС, температуры воды, поступающей из водохранилища, и от объемов и температуры промышленных вод, сбрасываемых предприятиями, расположенными ниже ГЭС. На Красноярской ГЭС минимальные размеры полыньи в период наблюдений с 1968 по 1974 г. изменялись от 50-70 км в суровую зиму 1968-69 г. (при  $Q=1200\div 1500 \text{ м}^3/\text{с}$ ) до 140 км в 1970-1974 гг. (обычные зимы). Наибольшие размеры полыньи, достигающие 300 км, наблюдаются в марте.

В условиях попускового режима работы ГЭС, когда расходы воды изменяются в значительных пределах от 1200 до 3500 м<sup>3</sup>/с, происходит взлом кромки льда и забивка русла льдом и шугой, т.е. образования заторов и зажоров, что вызывает максимальное повышение уровней воды. При прорыве происходит затопление пойм и поселков, расположенных на них. Расчеты зимних коэффициентов, выполненные в Гидропроекте, показали, что их значения не превышают наблюдающихся в бытовом режиме.

Как показали исследования института Гидропроект, зимние коэффициенты при увеличении расходов воды до 3000 м<sup>3</sup>/с практически не зависят от последних, что объясняется зажорными явлениями и перемещением кромки льда при изменении температуры воздуха и расходов воды. При расходах воды от 3000 до 4000 м<sup>3</sup>/с выявлена слабая зависимость зимних коэффициентов от расхода воды. Однако коэффициент корреляции этой зависимости мал, а среднее квадратическое отклонение велико. Кроме того, данные измерений расходов воды у пос. Атаманово в полынье несколько выше кромки льда показали, что значения зимних коэффициентов близки к 0,30 из-за подпора от льда и шуги. Все это привело к необходимости принять для расчетов уровней воды зимнего периода минимальные, близкие к естественным, значения зимних коэффициентов.

Таким образом, в зимний период проектировщики вынуждены решать обратную задачу, т.е. рассчитывать уровни затопления пойм по расчетным значениям попусковых расходов воды, минимальным значениям зимних коэффициентов и кривой расходов воды летнего периода.

По данной методике выполняются расчеты для ряда ГЭС, расположенных в суровых климатических условиях (Саяно-Шушенской, Бурейской, Вилюйской и других).

Недостатками методики являются недоучет русловых деформаций, обусловленных как общим размывом нижнего бьефа, так и зажорно-заторными явлениями, и ориентировочные значения зимних коэффициентов. Более совершенной является методика расчета зажорных уровней в условиях попускового режима работы ГЭС, разработанная В.А. Бузиным, но и она требует значительной доработки. По-видимому, совершенствование такой методики, являющейся крайне важной в условиях строительства ГЭС на реках, протекающих в зоне с суровыми климатическими условиями – дело ближайшего будущего.

Рассмотрим другие проблемы, возникающие при возведении регулирующих водохранилищ. Одной из наиболее острых проблем является снижение рыбопродуктивности рек. В первую очередь это обусловлено тем, что плотины гидроузлов, перегораживая реки, закрывают проходным рыбам доступ к местам нерестилищ. Различные приспособления, применяемые для улучшения пропуска рыб (рыбоходы, рыбоподъемники и другие) пока малоэффективны. Нерестилища многих видов рыб располагаются на

затапливаемых поймах. Если же последние не затапливаются, то рыбам необходимо приспособляться к изменившимся условиям. При этом значительная их часть гибнет. Помимо этого, различные озера и другие пониженные части пойм, часто соединяющиеся с руслом различными протоками, являются хорошими местами выгула мальков рыб.

Действительно, если сравнить рыбопродуктивность таких величайших Сибирских рек, как Обь и Енисей, имеющих близкую водность, то рыбопродуктивность р. Оби до зарегулирования ее стока была примерно в десять раз больше рыбопродуктивности р. Енисея. Это объясняется тем, что р. Обь имеет широкие, до 70 км, затопляемые продолжительный период времени, поймы. В то время как на р. Енисей поймы небольшие, да и затопляются они на непродолжительный период времени.

Резкое понижение уровней, достигающее в нижних бьефах некоторых рек 1.5-2.0 м, вызывает трудности с эксплуатацией ряда важных гидротехнических сооружений: водозаборов, водовыпусков, причалов и других. Действительно, водозаборы при низких уровнях обнажаются и требуются капитальные работы, чтобы восстановить такие сооружения.

Довольно большие затруднения вызывает посадка уровней для судоходства. Так, например, на участке р. Волги ниже Горьковской ГЭС от Городца до Нижнего Новгорода, длиной около 54 км, для обеспечения судоходства в период до заполнения водохранилища Чебоксарской ГЭС ежегодно выбиралось свыше 10 млн.м<sup>3</sup> грунта. Несмотря на такие большие объемы, достичь необходимых транзитных глубин в маловодные периоды не представлялось возможным, и поэтому речные суда преодолевали этот затруднительный участок в период специальных попусков из водохранилища Горьковской ГЭС.

Имеется и гидрологический аспект проблемы, обусловленный существенным падением уровней из-за русловых деформаций, при значительных падениях уровня воды в нижних бьефах их отметки в маловодные периоды становятся меньше отметок нулей графиков. Таким образом, отсчеты уровней в этот период становятся отрицательными несмотря на то, что отметки нулей графиков назначаются на 0.5 м ниже наинизших уровней.

Опыт проектирования некоторых гидроузлов на равнинных реках и последующая экологическая экспертиза показали резко отрицательное их воздействие на окружающую среду. Необходимо было либо внести коренные изменения в проекты, либо отклонить их. Примером последнего является разработка проекта Нижне-Обской ГЭС на р. Оби мощностью около 40 млн.кВт. При создании водохранилища этой ГЭС площади затопления и подтопления составили бы сотни тысяч км<sup>2</sup>, а экологические последствия были бы не предсказуемы. Иная участь была у ГЭС на р. Тикантино притоке р. Амазонки, где проектировалось строительство гидроузла Тукуруи. Реализация проекта привела бы к затоплению 2160 км<sup>2</sup> тропического леса. Поэтому было рекомендовано отклонить проект и

предусмотреть внесение в него коренных изменений, направленных на снижение негативных экологических последствий. В противном случае гниение древесины привело бы к интенсивному выделению различных вредных газов, гибели биоты и ухудшению качества воды. Известны также случаи приостановки строительства ГЭС правительством из-за недостаточного экологического обоснования, как это было с плотиной Элк Крик в США.

Интересные данные приводятся Н.И.Хирсановым и Н.В.Арефьевым, которые отмечают, что «...недостаточно глубокий анализ экологических вопросов на ряде гидроэнергетических и водохозяйственных комплексов привел к прекращению их проектирования и строительства (Даугавпилская ГЭС, Армянская и Краснодарская АЭС и др.). Из-за нерешенности экологических вопросов приостановлено проектирование Туруханской, Катунской, Гиллойской, Нижнеамурской, Бестобинской ГЭС, Дальнереченского ГЭК, Ржевского гидроузла и др. Задержано завершение строительства и наполнение водохранилищ Чебоксарской, Нижнекаменской, Саяно-Шушенской ГЭС».

Таким образом, водохранилища, особенно большие, нарушают процесс саморегулирования в исследуемой системе. Для его восстановления, точнее приспособления к новым условиям жизнедеятельности реки, необходим длительный период адаптации. Последний может наступить только после того, как сформируются новые условия, фактически новая система.

В большинстве случаев водохранилища, построенные без объективной экологической экспертизы, оказывают резко негативное воздействие на экологию прилегающего региона.

В то же время сооружение небольших водохранилищ на малых реках, которые в основном служат для поддержания напора и практически не осуществляют регулирования паводочного стока, оказывают положительное влияние на процесс саморегулирования исследуемой системы, и главное, негативно не воздействуют на экологию окружающего региона. Типичным их примером являются мельничные плотины и создаваемые при них водохранилища. В период пропуска половодий и паводков они, как правило, не действуют, а аккумулируют сток только после их пропуска, подпирая уровни на высоту нескольких метров. Это приводит к уменьшению скоростей истощения запасов подземных вод и сохранению жизнедеятельности реки в меженные периоды.

Таким образом, обеспечение проблемы экологической безопасности проектирования строительства гидротехнических сооружений в последние годы приобретает решающее значение. В предшествующие годы значительные просчеты по этой проблеме привели к негативным последствиям.

Такое положение с проблемами экологической безопасности привело как к разработке ряда нормативных документов, пока еще недостаточно научно обоснованных, так и к

интенсификации научных исследований в этом направлении. В частности, к разработке различных классификаций экологических воздействий при гидротехническом строительстве. Их анализ приведен в работе Н.И. Хрисанова и Н.В. Арефьева. Авторы рекомендуют разделить антропогенные воздействия на три типа.

I. Детерминированные антропогенные воздействия (при проектировании):

- затопление и подтопление земель;
- берегопереработка;
- и эрозия почв;
- ликвидация полезных ископаемых;
- изменение гидрологического, гидрохимического и гидробиологического режимов;
- изменение климата и ландшафта;
- изменение наземной флоры и фауны;
- тектонические изменения (повышение сейсмичности).

II. Временные антропогенные воздействия (при строительстве):

- акустическое загрязнение;
- загрязнение атмосферы при работе строительной техники;
- замутнение воды, сбросы нефтепродуктов;
- строительно-хозяйственные постройки, склады, коммуникации;
- строительно-хозяйственные отходы, залповые сбросы и выбросы загрязнений, плановые строительные воздействия;
- нарушение почвенного и растительного покрова;
- комплексные воздействия на флору и фауну.

III. Стохастические антропогенные воздействия (в ходе эксплуатации):

- засуходоливание поймы, зимние затопления земель, ледотермические и климатические изменения в нижнем бьефе;
- тепловые, механические (наносообразование), химическое загрязнение водохранилищ;
- биологическое, органическое (естественное и искусственное), биогенное и бактериальное загрязнения;
- загрязнение ядохимикатами и нефтепродуктами;
- изменение органолептических свойств;
- аварийные воздействия на все природные сферы.

В последние годы эта проблема продолжает тщательно изучаться в ряде научных и проектных организаций.

Рекомендации по оценке экологических воздействий различных видов и их учета при гидротехническом и водохозяйственном строительстве продолжают совершенствоваться. Их учет при проектировании и строительстве является обязательным.

#### **4.1.2 Воздействие мостовых переходов**

Интенсивное дорожное строительство во всем мире вызвало необходимость совершенствования методов проектирования и строительства мостовых переходов с учетом требований экологии. Действительно, протяженность железных и автомобильных дорог с твердым покрытием составляет миллионы километров. Они пересекают большое количество различных водотоков, от мелких временных до больших рек, имеющих широкие поймы. В среднем на 0,8-1,0 км дороги приходится одно водопропускное сооружение (труба, мост или мостовой переход). Учитывая специфику поставленной задачи, ограничимся рассмотрением воздействия только мостовых переходов, перекрывающих поймы сплошными дамбами. Как известно, мостостроители стремятся не строить на поймах мосты, ограничиваясь сооружением их только в руслах. Более того, если русло не пропускает максимальный расход расчетной обеспеченности, то предпочитают его уширение за счет прирусловой поймы. Мосты же на поймах строят лишь в исключительных случаях, когда это обусловлено объективно обоснованными требованиями различных водопользователей, в частности, для рыбного хозяйства, мелиорации и других.

Мостовые переходы включают в себя мосты, дамбы или эстакады и различные регуляционные сооружения. Положение мостовых переходов определяется направлением трассы дорог, но, учитывая, что они являются наиболее дорогостоящими сооружениями, разрабатывается несколько их вариантов. Окончательный же вариант принимается на основе технико-экономических расчетов. При этом ось моста обычно располагают перпендикулярно оси русла, если по нему проходит 70% и более максимального расхода воды расчетной обеспеченности, и перпендикулярно оси поймы, если по ней проходит 70% и более максимального расхода воды. Строительство переходов под различными углами к осям русла и поймы допускается только как исключение из-за косоуструйности течения и трудностей, возникающих при пропуске льда.

Мостовые переходы, перекрывающие поймы сплошными дамбами, оказывают большое влияние на гидравлические характеристики потока и морфометрические характеристики русел и пойм только на участках ограниченной длины. Размеры последних в основном зависят от степени сжатия паводочного потока и размеров реки. Любые мостовые переходы, впрочем, как и мосты, сужают сечение и тем самым увеличивают удельные расходы воды, следовательно, и средние скорости течения в подмостовом русле. Сужая сечение, они создают предмостовой подпор, при котором уменьшаются скорости

потока и его транспортирующая способность, что приводит к осаждению донных наносов. В подмостовом русле образуется гидравлический прыжок, при котором значительно увеличиваются уклоны водной поверхности и скорости потока. Отсутствие или малое количество поступающих сверху наносов и скорости потока, значительно превышающие бытовые, приводят к интенсивным деформациям размыва, распространяющимся на значительные расстояния ниже перехода.

Мостовые переходы, создавая подпор, повышают уровни затопления пойм в верхних бьефах выше бытовых и увеличивают продолжительность их затопления. Около дамбы обвалования образуются застойные зоны. На больших реках на затопленных поймах могут возникать ветровые волны, разрушающие коренные берега.

Ниже перехода на пойму вместо мелких наносов, гумуса и других питательных веществ выносятся продукты подмостового размыва, т.е. русловой аллювий, который ухудшает структуру пойменных почв и снижает их сельскохозяйственную продуктивность.

В качестве примера можно привести р. Верхнюю Уссурку приток р. Уссури, на которой расположено несколько мостовых переходов. При пропуске в 1989 г. паводка, близкого к 1% обеспеченности, для борьбы с наводнением было проведено несколько мероприятий, в частности, переброшена часть стока в соседний бассейн. Однако это не оказало существенной помощи в решении проблемы, поэтому решено было взорвать часть пойменной дамбы и создать проран в ней. К сожалению, это было сделано со значительным запозданием по времени, когда выше дамбы уровни достигли критических значений и перепад между верхним и нижним бьефами достиг значительной величины. Поэтому, хотя проран в дамбе и привел к некоторому снижению уровня в верхнем бьефе, но вызвал образование волны прорыва. Последняя при своем движении разрушила часть расположенного ниже по течению г. Дальнереченска, нанеся ему значительный материальный ущерб.

В последние годы построено несколько мостовых переходов на участках больших рек (Волга, Кама и др.), находящихся в подпоре от нижерасположенных водохранилищ ГЭС. Особенности их эксплуатации состоят в резко выраженном неустановившемся движении воды, а также в том, что поймы, расположенные как выше, так и ниже перехода в течение всего года находятся в затопленном состоянии. Типичным примером является мостовой переход через р. Волгу в 20 км выше города Казани на автомобильной дороге Нижний – Новгород - Казань. Этот участок находится в подпоре от нижерасположенного водохранилища Самарской ГЭС и подвержен пусковому режиму работы вышерасположенной Чебоксарской ГЭС. Мостовой переход состоит из сплошной земляной дамбы длиной 4,5 км, перекрывающей левобережную пойму, и мост через русло р. Волги, длиной около 1 км.

При проектировании и строительстве этого перехода были допущены серьезные просчеты. Поэтому при пропуске первого же паводка обеспеченностью, близкой к 50%, сосредоточенный по прирусловой протоке пойменный поток направился на регулирующее сооружение и разрушил его. Скорости потока были настолько велики, что был вымыт 18-ти метровый металлический шпунт. В результате возникла угроза размыва дамбы. Для предотвращения этого строители вырыли на пойме канал шириной в 300 м и глубиной 10-12 м, который впадал в русло Волги примерно в 400 метрах выше дамбы мостового перехода. В этом канале был сосредоточен пойменный поток. Однако возникла угроза, что в результате регрессивной эрозии может быть перехвачен русловой поток Волги, что могло привести к огромным убыткам. Поэтому пришлось проводить дополнительные изыскания для оценки ситуации и разработки фоновых прогнозов пойменных деформаций. Последний показал, что развитие этой эрозии в дальнейшем будет затухать.

Этот пример не является типичным, так как он обусловлен просчетами проектирования. Более важным является анализ воздействия мостовых переходов на экологию. С этой точки зрения большое значение имеет то, что поймы, расположенные как в верхнем, так и в нижнем бьефах, находятся в затопленном состоянии в течение всего года. В меженные и даже в паводочные периоды на них имеются большие участки застойных зон или зон с ограниченным водообменом. На мелководных, особенно прибрежных участках пойм, куда интенсивно поступают различные органические и минеральные удобрения и происходит значительный прогрев воды, наблюдается интенсивный рост водорослей.

Как в верхнем, так и в нижнем бьефах, поймы сложены песчаными отложениями глубиной более 20 м, вполне пригодными для производства силикатного кирпича, необходимого для жилищного и производственного строительства как г. Казани, так и в других городах Татарстана. В то же время аналогичный песок добывался в карьере площадью около 30 га, и расположенном в сосновом бору в зеленой зоне г. Казани. По-видимому, было бы целесообразно перевести карьер для добычи песка на пойму. Это несколько улучшило бы ее экологическое состояние, так как в карьере значительно увеличились бы глубины и уменьшился бы прогрев воды.

Таким образом, мостовые переходы ухудшают экологическое состояние русел и пойм на участках ограниченной длины. Они также нарушают процесс саморегулирования в исследуемой системе на тех же участках. Его восстановление происходит после формирования нового динамически устойчивого русла.

### 4.1.3 Воздействие карьеров в руслах и на поймах рек

Интенсивное развитие народного хозяйства страны, строительство большого количества промышленных предприятий, гидротехнических сооружений, жилищное и другое строительство требовали все большего объема нерудных материалов. Одним из наиболее дешевых способов их получения считалась добыча песка и гравия из русел и пойм рек с помощью различных земснарядов. Однако при этом не учитывалось отрицательное воздействие на экологию. И действительно, интенсификация добычи нерудных материалов из русел рек привела к ряду негативных последствий, основным из которых является посадка уровней, в ряде случаев достигающая 4-5 м и приводящая к обнажению водозаборов и водовыпусков, подмыву мостовых опор и переходов нефтегазопроводов, нарушению устойчивости портовых гидротехнических сооружений, осложнению работы портов и ухудшению судоходных условий.

На ряде рек страны: Томи, Оби, Кубани, Уфе, Иртыше, Стрые и других объемы извлекаемого грунта, в основном аллювия, во много раз, а иногда даже на один-два прядка, превышали годовой сток донных наносов этих рек, частично компенсирующих удаленный аллювий. Поэтому для заполнения таких карьерных выемок за счет естественного стока наносов потребуются десятки, а иногда и сотни лет.

Размеры карьеров по глубине и ширине часто соизмеримы с аналогичными размерами рек, а длина достигает нескольких ширин рек, на которых они образованы. Их местоположение обычно приурочено к гребням перекатов, побочням, пляжам, осередкам, островам или другим выпуклым элементам русла и поймы.

Таким образом, карьеры нарушают морфологическое строение рек и тем самым оказывают существенное влияние на их водный и русловой режимы. Степень этого влияния находится в прямой зависимости от размеров карьерных выемок относительно размеров реки. Поэтому карьеры обычно подразделяют на малые и большие. К малым относят одиночные карьеры, занимающие небольшую часть русла или поймы реки. Такие карьеры существенного влияния на русловой и водный режимы рек не оказывают, так как их поверхность почти полностью покрыта водоворотной областью, которая препятствует воздействию транзитного речного потока на дно карьера. К тому же такие карьеры довольно быстро заполняются наносами, поступающими с вышерасположенных участков рек.

Резко отличное воздействие потока происходит на дно карьеров, к которым относятся большие одиночные и массовые карьеры. Водоворотные области в этих карьерах примыкают как к их верховому, так и к низовому откосам, а транзитный поток воздействует на дно карьера почти на всем его протяжении. Помимо этих двух видов карьеров в практике применяется и третий способ - добыча грунта на большом участке реки, длина которого

может достигать десятков километров, как это наблюдалось на р.Иртыш и р.Белой, на участке большой длины.

Рассмотрим более детально гидравлику потока и деформации русла в районе большого карьера. С этой целью выделим три участка, соответственно, расположенных выше карьера, занимающего площадь карьера, и третий - ниже карьера. Под воздействием потока происходят интенсивные деформации размыва русла на первом и третьем участках и, соответственно, занесение русла на втором участке.

Непосредственно после создания карьера на первом участке происходит аккумуляция наносов перед карьером. Далее, по мере снижения уровней и увеличения уклонов на этом участке начинается размыв дна, распространяющийся вверх против течения. В низовой части этого участка происходит увеличение уклонов водной поверхности и скоростей течения, что, как правило, вызывает увеличение размеров донных гряд. Величина врезания русла обычно пропорциональна длине карьера.

На втором участке отмечается отложение наносов, интенсивно поступающих с верхнего, первого участка. Занесение карьера наносами происходит последовательным смещением вниз верхового склона карьера. Взвешенные наносы могут частично откладываться в нижней части карьера.

На третьем, относительно коротком участке, происходит общий размыв русла. Зона максимального размыва дна примыкает к низовому откосу карьера, захватывая этот откос. По мере удаления от карьера интенсивность размыва дна уменьшается, а расход наносов постепенно увеличивается по длине участка.

Таким образом, с течением времени весь карьер как бы смещается вниз по течению, значительно изменяя при этом свою форму. Скорость смещения карьера находится в прямой зависимости от соотношения его размеров с объемом стока наносов.

Гидравлика потока в зоне влияния карьеров исключительно сложная и недостаточно изученная, во многом зависящая от размеров карьеров, стока наносов, грунтов, слагающих русла и берега рек, и ряда других факторов.

Рассмотрим негативное влияние разработки карьеров для добычи песка и гравия, создаваемых в руслах рек на примере рек Иртыша и Томи. Воздействие таких карьеров на гидрологический режим и русловые процессы сказывается локально в основном в районе больших городов. Например, в районе рейда Омского порта, где добыча песка и гравия особенно велика.

Добыча песка осуществляется на участке с границами 1845-1905-й км от устья реки. Здесь также систематически повсюду дноуглубительные работы для обеспечения достаточных судоходных глубин, расположены причалы Омского порта, эксплуатируются водозаборы коммунального и промышленного водоснабжения, дюкерные переходы

нефтепроводов и линии связи и набережные города. Важное народнохозяйственное значение участка делает любое нарушение гидрологического режима и русловых процессов в рассматриваемом районе особенно ощутимым для многих отраслей народного хозяйства: промышленности, речного транспорта и городского хозяйства.

За последние десятилетия глубинная эрозия русла вследствие добычи из русловых карьеров песка непрерывно возрастала. Суммарное увеличение вместимости русла, по данным ГГИ составило 27 млн.м<sup>3</sup>, достигая на отдельных участках 0,8 млн.м<sup>3</sup> на 1км. Образовавшиеся объемы вместимости должны были бы заполняться аллювием за счет донных и взвешенных наносов. Однако из-за зарегулированности стока вышерасположенными водохранилищами сток наносов р. Иртыша у г. Омска резко сократился, и поэтому заполнение указанных емкостей происходит медленно и не может компенсировать объема выемки. Действительно, за последние 20 лет было извлечено около 38 млн.м<sup>3</sup> песка, а компенсировано за счет стока наносов только 30 % этой величины. К тому же и состав наносов существенно изменился. Вместо крупного песка и гальки в русле откладываются частицы пыли, ил и мелкий песок.

Выполняемые Иртышским бассейновым управлением дноуглубительные работы для поддержания судоходных глубин не оказали существенного влияния на вместимость русла, так как извлекаемый грунт транспортировался за пределы судового хода, но откладывался в том же русле. Увеличение вместимости русла в результате добычи из него строительного песка повлекло весьма существенное изменение руслового процесса и посадку уровней воды, резко проявляющиеся в период межени.

Анализ данных наблюдений показывает, что до 1955 г. посадки уровней незначительны, несмотря на дноуглубительные работы для улучшения судоходных условий. В дальнейшем из-за карьерных разработок русла наметились значительные посадки уровней, которые могут быть определены по изменению положения зависимости  $Q=f(H)$ , наблюдаемой с 1955 г. Анализ кривых расходов по Омскому гидрологическому посту за 1936-1983 гг. показал, что посадки уровней за период с 1955 г. достигли 100-141 см (табл.4.1).

Таблица 4.1 Снижение уровня воды на гидрологическом посту Омск за период 1955-1983 гг.

Расход воды, м <sup>3</sup> /с	Уровень воды над "0" графика		Снижение уровня, см
	при естественном режиме (1955 г.)	при антропогенном воздействии (1983 г.)	
1000	100	0	100
800	60	-54	114
600	13	-128	141
500	-14	-136	122
400	-42	-166	124
Среднее	-	-	120

На гидрологическом посту Красноярска, расположенном ниже Омского поста на 60 км (наблюдения начаты с 1958 г.), посадки уровней значительно меньше и составляют 19-34 см (табл.4.2). В то же время на гидрологическом посту Покрово-Иртышское, расположенном в 105 км выше (по течению) Омского поста, т.е. выше расположения карьеров, значимого снижения уровней не обнаружено, хотя дноуглубительные работы на этом участке проводятся и проводились с той же интенсивностью.

Таким образом, значительное влияние на посадку уровня на р. Иртыше зафиксировано на участке длиной 60 км. По-видимому, эта величина несколько больше, но установить точное расстояние не представляется возможным из-за отсутствия постов ниже пос. Красноярки. Однако ориентировочные расчеты, хотя и грубо приближенные, показывают, что посадки уровней, постепенно уменьшаясь, могут наблюдаться на расстоянии около 100 км от г. Омска.

Особенно неблагоприятные условия сложились на р. Томи в районе г. Томска, где в результате разработки карьеров по добыче песка и гравия и за счет выполнения дноуглубительных работ для поддержания все возрастающих габаритов судового хода с 1950 по 1990 гг. произошло снижение проектного уровня на 2,6 м. Ежегодные выемки грунта, в основном гравия, достигли 1 млн.м<sup>3</sup> при среднегодовом стоке наносов р. Томи в 20-25тыс.м<sup>3</sup>, что, естественно, не могло привести к компенсации вынутаго грунта. К тому же добыча гравия и частичное заполнение карьеров песчаными наносами резко уменьшило значения критических скоростей.

Таблица 4.2 Снижение уровней на гидрологическом посту Красноярска за период 1958-1982 гг.

Расход воды, м <sup>3</sup> /с	Уровень воды над “0” графика		Снижение уровня, см
	при естественном режиме (1958 г.)	при антропогенном воздействии (1982 г.)	
1000	340	321	19
800	284	260	24
600	222	188	34
Среднее	-	-	26

Это привело к обнажению городских водозаборов и водовыпусков, ухудшению работ речного порта и другим негативным последствиям.

Иногда падение уровней сменялось его увеличением (1966, 1968 гг. и др.), несмотря на то, что объемы добычи этих материалов не уменьшались. По-видимому, это объясняется повышенным стоком донных наносов в эти годы. Причина падения уровней заключается в том, что при разработке перекатов и других выпуклых форм рельефа резко увеличиваются глубины, что ведет к уменьшению гидравлических сопротивлений и, как следствие, к падению уровней. Вторым фактором, который имеет особенно существенное значение на

горных реках, является разработка крупных отложений (галька, валуны и др.), в бытовых условиях, выполняющих роль отмостки, и тем самым увеличивающих гидравлические сопротивления.

Таким образом, величина падения уровня в основном зависит от двух факторов; годовых объемов добычи аллювия ( $W_a$ ) и стока наносов ( $W_n$ ), т.е.  $\Delta H = f(W_a, W_n)$ .

При этом на величину падения уровней существенное влияние оказывают не только объемы аллювия, изъятые в текущем году, но и в предшествующие годы. По-видимому, и сток наносов за предшествующие годы также оказывает воздействие на величину падения уровня.

#### **4.1.4 Дамбы обвалования и их влияние на экологию**

Дамбы обвалования наиболее распространенные сооружения при защите от наводнений территорий и населенных пунктов. Широко применяются при углублении судоходных путей, в водохозяйственном и другом гидротехническом строительстве.

Дамбы представляют возвышающиеся над поверхностью земли искусственные сооружения, отсыпаемые или намываемые обычно из местных материалов. Как правило, они имеют трапециевидное сечение с закрепленными откосами. Откосы дамб обвалования рек и польдерных систем чаще всего закрепляются посевом быстрорастущих трав. Дамбы проходят по пересеченной местности с различной шероховатостью. Глубины воды около них по сравнению с плановыми размерами потоков обычно невелики.

Наиболее часто дамбы обвалования применяются для защиты городов и других населенных пунктов от паводков и весенних паводков, а также защиты части или всей поймы от затопления с целью расположения на ней сельскохозяйственных угодий, подразделяясь на незатопляемые и затопляемые. Последние допускают затопление пойм весенним паводком, но защищают ее от затопления дождевыми летне-осенними паводками. Наибольшее развитие они получили в КНР, где вдоль берегов Великих китайских рек построены дамбы длиной в тысячи километров.

Однако дамбы обвалования могут иметь и другое предназначение. Например, в Нидерландах значительная часть территории залива Зандерзее отделана дамбами от моря и используется в виде польдеров для сельского хозяйства. В дельте р. Невы построена дамба длиной 25 км, основной целью которой является защита Санкт-Петербурга от наводнений.

Рассмотрим наиболее частые случаи строительства дамб обвалования для ограждения пойм или ее части с расположенными на них городами, поселками, промышленными предприятиями и сельскохозяйственными угодьями и их влияние на экологию.

В последние годы во многих больших и малых городах жилищное строительство переносится на пойменные земли. Несмотря на значительное его удорожание, считается, что с экономической точки зрения оно выгодно, так как затраты на строительство дамб и инженерное обустройство территорий окупаются в течение 10-50 лет. В настоящее время в ряде больших и средних городов России на пойменных землях проживает до 89 % населения, т.е. на территории, ранее периодически затоплявавшейся.

Большинство исследователей рекомендуют располагать дамбы обвалования на некотором расстоянии от берегов русла, оставляя часть поймы для пропуска редких и катастрофических паводков. Однако эти рекомендации в погоне за дополнительными территориями иногда нарушаются, что часто приводит к катастрофическим последствиям, как это было, например, на р. Абакан, где была неправильно спроектирована и построена дамба, защищающая г. Абакан от наводнения. В результате паводок, близкий к 1 % обеспеченности, размыл оголовки дамбы и затопил город, нанеся тем самым большой ущерб народному хозяйству.

Дамбы обвалования, полностью или частично отгораживая пойму от русла реки на участках различной, иногда очень большой длины, оказывают сильное воздействие на русловые процессы. Действительно, дамбы, препятствуя развитию плановых деформаций, заставляют систему “поток-русло” перестраиваться, переводя плановые деформации в высотные.

Учитывая, что уклоны дна и свободной поверхности водотоков, как правило, постепенно уменьшаются вниз по течению реки, что приводит к уменьшению и транспортирующей способности потоков. Поэтому в низовьях рек возникает острая проблема отложения избыточного количества наносов. Последние, отлагаясь в русле, увеличивают отметки его дна и уровней воды. Это может привести к прорывам дамб и затоплениям обширных пойменных территорий. Неэффективным является и дальнейшее наращивание отметок дамб, ибо постепенное отложение наносов в русле может привести к тому, что отметки его будут превышать отметки поверхности поймы. В этом случае прорывы дамб будут особенно опасными.

Особенно четко эти процессы проявляются в дельтах рек, где уменьшение уклонов водной поверхности является вполне закономерным процессом. Как правило, в дельтах, да и на ряде пойм, для борьбы с прорывами дамб строят дублирующие дамбы, параллельные основным. Однако проблема отложения и транспорта наносов, приносимых потоком с вышерасположенных участков, остается.

На верхнем и нижнем участках рек, имеющих продольный профиль, близкий к профилю динамического равновесия, после возведения дамб, отделяющих пойму от русла, наблюдаются интенсивные деформации размыва. Это объясняется резким увеличением

удельных расходов и скоростей руслового потока из-за поступления пойменных вод в русло. Следствием этого является значительное увеличение транспортирующей способности руслового потока, которая, как известно, пропорциональна средней скорости в степени, примерно равной 3-4 и значительно превышает аналогичную, но в бытовых условиях. Так как с вышерасположенных участков, где сечение не сжато дамбой, поступает расход наносов меньше транспортирующей способности потока, то поток и добирает недостающее количество наносов, размывая аллювий и даже коренное русло.

Размыв русла увеличивает глубины в нем и, как следствие, уменьшает гидравлические сопротивления, что приводит к посадкам уровней. По мере уменьшения уклонов водной поверхности руслового потока его транспортирующая способность также уменьшается, а на нижерасположенные участки поступает все большее количество наносов. Это приводит к уменьшению посадок уровней и, наконец, должен быть участок, на котором наблюдается равенство транспортирующей способности потока и поступающего с верхних участков расхода наносов. Именно на этом участке однонаправленные деформации размыва сменяются периодическими. Последние обусловлены не стационарностью движения потока.

Таким образом, продольные дамбы обвалования существенным образом изменяют экологическую обстановку. В частности, поймы не затопляются и в аридных зонах при отсутствии полива они остепняются. Периодические аккумуляции наносов в руслах сменяются однонаправленными деформациями размыва, что сопровождается посадками уровней.

Далее, в этом случае формируется принципиально новая искусственная система, для отработки процесса саморегулирования которой необходим длительный период адаптации.

Проведенный анализ и расчеты позволяют сделать следующие выводы:

- практически все активные гидротехнические сооружения и водохозяйственные мероприятия оказывают отрицательное влияние на экологию участков, находящихся под их воздействием;
- активные сооружения обычно нарушают, а иногда и полностью разрушают процесс саморегулирования в исследуемой системе;
- пассивные сооружения не оказывают существенного влияния на экологию и процесс саморегулирования в исследуемой системе.

В связи с этим закономерно возникает вопрос о целесообразности строительства активных гидротехнических сооружений и водохозяйственных мероприятий. Действительно, при борьбе с тепловым и газовым загрязнением атмосферы, приводящим к глобальному потеплению климата, наиболее эффективными источниками производства энергии являются гидростанции. Однако именно их строительство приводит к наибольшим

негативным последствиям и даже к нарушению жизнедеятельности речных систем. Это противоречие необходимо разрешать с наименьшим ущербом для природы. ГЭС безусловно следует строить, но полностью соблюдая рекомендации независимой научно-обоснованной экологической экспертизы. Аналогичные рекомендации необходимо учитывать и при строительстве других гидротехнических сооружений и проведении водохозяйственных мероприятий.

#### **4.2 Проблемы русловых процессов при переборке стока**

Водные ресурсы России значительны, среднегодовой сток наших рек составляет около 4700 км<sup>3</sup>, или приблизительно 12% речного стока всего земного шара. Общие запасы воды в настоящее время практически обеспечивают развитие всех отраслей народного хозяйства. Вместе с тем из-за неравномерного распределения стока по территории во многих районах наблюдается недостаток водных ресурсов. Так, на Север и Северо-Восток страны приходится более 80% стока, а на южные районы с развитой промышленностью и сельским хозяйством — всего 20%. В засушливых, наиболее важных сельскохозяйственных районах протекает только 10% речных вод. Для большинства бассейнов основная доля стока приходится на весенний период. Гидрограф рек находится в резком несоответствии с графиком водопотребления, особенно для целей орошения земель.

В этих условиях полное использование речных вод связано с необходимостью перераспределения и коренного изменения режима стока. Создание межбассейновых соединений и регулирующих водохранилищ — одна из важнейших задач комплексного использования водных ресурсов.

За годы Советской власти в нашей стране построены крупнейшие водохозяйственные и транспортно-энергетические системы. Одним из наиболее крупных сооружений комплексного назначения явился канал им. Москвы. Вахшский, Большой Ферганский и другие каналы Средней Азии, сеть крупных каналов Северного Кавказа и Закавказья обеспечили подъем орошаемого земледелия в предвоенные годы.

Крупные водохозяйственные системы создаются во многих странах мира. Особенно больших масштабов комплексное гидротехническое строительство достигло в США и Канаде (водный путь по р. Святого Лаврентия протяжением 3800 км, комплексное использование рек Теннесси, Миссури, Колумбии, Колорадо, Пис-Ривер и др.). В верховьях р. Колорадо по туннелю длиной 21 км перебрасывается сток с западного склона Скалистых гор на восточный.

В Западной Европе проектируется крупная водохозяйственная система для переброски вод от подножия Альп на расстояние 800 км в пределы Северо-Германской низменности. Большое строительство ведется в Австралии, во многих странах Африки и Азии; кроме проблем энергетики, при этом решаются проблемы орошения и борьбы с наводнениями. К числу крупнейших относятся многоцелевые комплексы Бхакра-Нангал, Хиракуд и Меттур в Индии. В юго-восточной части Австралии завершается строительство оросительно-энергетической системы «Снежные горы». В ее состав входят 160 км туннелей, 130 км акведуков, водохранилища и каскады ГЭС общей мощностью 4 млн. кВт.

В современных условиях изменяются требования, предъявляемые к различным отраслям водного хозяйства. Ведущую роль в использовании рек приобретают обеспечение водой сельского хозяйства и водоснабжение промышленных предприятий и городов. Строительство гидроэлектростанций будет все более перемещаться в горные районы, так как создание водохранилищ на равнинных реках связано с потерей земельных, лесных и других неводных ресурсов.

По мере возрастания масштабов водохозяйственного строительства резко возрастают и масштабы вызываемых им преобразований естественного режима рек. Изменяется прежде всего структура гидрографической сети, искусственно создаются новые водотоки, появляются межбассейновые соединения и водохранилища. В новых сочетаниях начинают проявлять себя основные природные факторы, определяющие русловой режим. Нарушается естественное эрозивно-аккумулятивное равновесие, происходят необратимые сдвиги в динамическом взаимодействии потока и русла. Отсюда ясно, какое большое значение приобретают исследования закономерностей формирования размываемых русел и разработка методов прогноза русловых процессов при переброске стока. Раньше такие сложные задачи перед наукой не стояли и не решались.

Изучение общих деформаций русел в результате искусственного изменения водного режима являлось целью многих исследований. В настоящее время созданы методы расчета эрозийных процессов и заиления водохранилищ, деформаций продольного профиля и поперечных сечений русел зарегулированных рек и каналов. Получены данные для фонового прогноза русловых переформирований на участках большой протяженности в условиях искусственного изменения гидрологического режима рек.

До последнего времени в речной гидравлике рассматривались русловые процессы в несвязных грунтах, среди песчаных аллювиальных пород. Их взаимодействие с потоком воды определяется только весом и крупностью частиц. Поэтому при изучении

взвешивания и перемещения песчаных наносов удавалось сравнительно легко схематизировать механизм воздействия потока на частицы грунта. Так были получены основные гидродинамические характеристики грунтов — гидравлическая крупность и критические скорости, отвечающие началу движения донных наносов.

Но при переброске стока в сфере руслоформирующей деятельности, наряду с несвязными массами песка, оказываются покровные породы и аллювиальные отложения, обладающие различной степенью связности. Характеристика русловых процессов в связных грунтах требует новых количественных соотношений, учитывающих сцепление частиц как фактор повышенной устойчивости против размыва. Возникают и качественные особенности руслового режима. Формы песчаного русла легко приходят в соответствие с динамической структурой потока, зоны эрозии и аккумуляции непосредственно сопряжены одна с другой и наблюдаются в пределах одной русловой формы — побочня или гряды. Иное положение в русле, сложенном из глинистых пород. Эрозионные образования в связных грунтах угловаты и плохообтекаемы по форме. Русло приобретает макрошероховатый рельеф дна и ломаные очертания береговой линии. Во впадинах макрошероховатости возникают вихревые зоны — очаги повышенных гидравлических сопротивлений. Зоны насыщения потока наносами и аккумуляции оказываются удаленными на большие расстояния от мест первоначального размыва.

Частицы связного грунта при взаимодействии с потоком воды проявляют противоречивые свойства. С одной стороны, пока сохраняется связь с массивом породы на дне они трудно поддаются размыву, с другой — оторвавшись от него, легко распадаются на мельчайшие частицы, которые на участке размыва не образуют чехла донных отложений. Из-за своей химической активности глинистые породы разрушаются под действием диффузионного выщелачивания водным потоком.

Для объяснения всех этих процессов уже недостаточно общезначимых представлений о глинистых породах; необходимо изучить гидродинамическую основу их эрозии. Но если физическая природа и инженерно-строительные свойства связных грунтов достаточно исследованы, то изучение механизма гидродинамического и гидрохимического взаимодействия потока и глинистых пород только начинается. Инициатива в этой области принадлежит Ц. Е. Мирцхулава, который разработал критерии устойчивости связных грунтов при размыве. Но имеющиеся данные все еще недостаточно систематизированы для того, чтобы по ним можно было представить полный комплекс факторов, определяющих русловую процесс в связных грунтах. Не решена задача о методах разделения речных наносов на две части — продукты смыва с поверхности бассейна и продукты размыва, образованные в самом русле. Этим объясняется несовпадение результатов расчетов твердого стока по различным

эмпирическим формулам, отклонение так называемой географической мутности от фактического насыщения наносами конкретных рек. Недостаточно изучена динамика морфологических изменений русла и речной долины, особенно при переброске стока.

Действующие нормы и технические условия проектирования не содержат самых необходимых рекомендаций и сведений, которые давали бы возможность прогнозировать русловые процессы в глинистых руслах. Во многих случаях, несмотря на формальное соблюдение проектных норм, приходится сталкиваться с непредвиденными размывами русел каналов и рек, особенно в нижних бьефах плотин.

Водохозяйственное строительство не может ждать создания законченной теории русловых процессов. В практике проектирования строгие теоретические расчеты сочетаются с инженерной интуицией и учетом опыта эксплуатации осуществленных объектов. Хотя многие проблемы русловых процессов не решены, при создании систем переброски стока, таких, как Каракумский, Аму-Бухарский, Невинномысский и другие каналы, был найден тот проектный оптимальный вариант, в котором нашли свое решение сложные задачи проектирования искусственных водных артерий. Вместе с тем современные достижения геоморфологии, гидрологии и динамики русловых потоков дают все необходимые предпосылки для обоснования водохозяйственных проектов. Возникла потребность обобщить и систематизировать инженерный опыт и научные данные по проблемам русловых процессов при переброске стока.

Получает широкое распространение подход к русловым процессам как к явлениям взаимодействия двух сред — водного потока и грунтов его ложа. В отличие от гидромеханического представления о взаимодействии потока и русла как граничной поверхности потока новый подход сочетает геоморфологические и гидравлические методы, позволяет изучать не только движение потока, но и динамику русловых перестроений.

## **5. ЭНЕРГОВООРУЖЕННОСТЬ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА И ГОРЮЧИЕ ИСКОПАЕМЫЕ. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ.**

### **5.1. Экологическая напряженность за последние 50 лет. Экологическое равновесие между гидросферой, литосферой и атмосферой.**

В последнее время резко усилилось антропогенное воздействие на природную систему в целом, что довольно часто приводит к общему нарушению процесса саморегулирования ее составляющих и, как следствие, к их разрушению, т.е. к экологической катастрофе. К сожалению, можно привести множество общеизвестных примеров, когда из-за недальновидной политики, сиюминутной выгоды или просто халатности людей происходят разрушения составляющих звеньев этой очень сложной

системы. Наиболее типичными примерами являются Чернобыльская авария, полигоны в штате Невада и в Семипалатинске, Аральское море, наступление пустынь в Африке, вырубка лесов в Южной Америке и Африке и др.

Любая система работает при воздействии на нее как внешних, так и внутренних факторов. Основным внешним фактором, оказывающим решающее воздействие на любую естественную систему, находящуюся на земной поверхности, является солнечная энергия, которая способствует развитию живой природы и играет решающую роль в любых процессах, происходящих на земле. Воздействие солнечной энергии и процессов, происходящих на солнце, на природные системы в целом и, в частности, на рассматриваемую экосистему, происходит как непосредственно, так и через другие факторы. Исследование природной системы в целом и создание ее математической модели очень сложная задача, решение которой дело ближайшего будущего.

Еще в 1884 г. А.И. Воейков привел крылатую фразу: “Реки продукт климата их бассейнов”, тем самым подчеркнул роль климата в формировании стока рек. Именно он определяет величину и распределение осадков как во времени, так и в пространстве, их агрегатное состояние, величину испарения, характер растительности и другие факторы. Поэтому роль климата трудно переоценить. Климат является зональным фактором, на который существенное влияние оказывают ряд азональных факторов (воздействие морей и океанов, рельеф местности и др.).

В последние годы в научной литературе дискусируется вопрос о направлении в изменении климата. Особенно остро при этом стоит вопрос о соотношении антропогенной и естественной его составляющих. Действительно, глобальные изменения климата являются периодическими и происходят в различные периоды времени. Попытки выделить продолжительность циклов этих изменений неоднократно осуществлялись и будут осуществляться различными исследователями, но это привело и видимо в дальнейшем будет приводить к увеличению количества таких разнопериодных циклов от нескольких лет (11, 33 и др.) до нескольких тысяч и даже десятков тысяч лет (1800 и др.). Для выделения таких циклов обычно используются данные как инструментальных измерений различных метеорологических параметров, так и анализ косвенных признаков и методов, используемых в различных отраслях науки (геологии, гидрологии и палеогеографии и др.).

Сложность данной проблемы заключается в выделении естественной тенденции в изменении климата и антропогенной составляющей. Тем более что эта проблема имеет большое практическое значение. В качестве примера можно привести исследования по проблеме колебаний уровня Каспийского моря. Большинство исследователей в шестидесятых, начале семидесятых годов существенно преувеличивая роль антропогенного фактора, прогнозировали дальнейшее падение уровня Каспийского моря и

на этой основе разрабатывали крупномасштабные проекты переброски стока рек в бассейн Каспийского моря. Однако, начиная с 1977 года, направление тренда естественной составляющей климата изменилось на противоположное, что привело к значительному увеличению количества осадков, в частности в бассейне р. Волги, и, как следствие, к увеличению уровня моря. Следует отметить наличие других концепций. В частности, М.И. Кривошей считает, что роль климатического фактора завышена, а роль подземного притока в Каспий резко занижена.

Не останавливаясь на анализе основных концепций изменения климата, который приведен в ряде последних работ, отметим, что большинство исследователей, а также и ВМО прогнозируют в ближайшие годы потепление в умеренных широтах.

В связи с отсутствием надежного долгосрочного прогноза изменения климата, а, следовательно, и составляющих уравнения водного баланса, при моделировании гидрологических процессов рассматриваются различные сценарии, в которых принимается ступенчатый график повышения среднегодовой температуры воздуха, как правило, через  $0,5^{\circ}\text{C}$  (0,5; 1; 1,5 и т.д.). В этом случае переход от расчетного повышения температур к изменениям жидкого стока и стока наносов исключительно сложен, так как отсутствует объективная оценка, а тем более методика расчетов изменений, составляющих уравнения.

Существенную роль играют и физико-географические условия бассейна реки: рельеф местности, геологическое строение, озерность, лесистость и другие. В частности, ориентация склонов оказывает существенное влияние на величину и характер выпадения осадков и на величину испарения. Так известно, что на склонах гор и возвышенностей, ориентированных в направлении основных переносов влаги, количество выпадающих осадков резко превышает аналогичное на противоположных склонах и на равнинной местности. А именно осадки и являются решающим фактором в формировании речного стока. Существенна роль геологического строения бассейна, так как слагающие его породы также осуществляют регулирование стока, определяя величину и интенсивность фильтрации осадков, т.е. ту их часть, которая формирует подземный сток. Геологические особенности строения бассейна и породы, его слагающие также определяют величину и характер поступления частиц грунта и других продуктов разрушения, слагающих бассейн пород, в реки и в конечном итоге величину стока наносов.

Интересную гипотезу предложил Б.Л. Соколов, которая может существенно изменить современные представления о формировании речного стока. Соколов считает, что доля подземного стока в общем и особенно паводочном стоке значительно выше и по его данным может достигать 60-90 %, т.е. подземная составляющая стока в 2-3 раза больше, чем при классическом расчленении гидрографа стока.

Таким образом, почво-грунты являются одним из регуляторов паводочного стока, способствующим снижению максимальных расходов воды и увеличению продолжительности паводков и половодий. Другими регуляторами стока в бассейне реки являются озера и болота. Если регулирующая роль озер определена довольно четко, то влияние болот на этот процесс значительно сложнее и зависит от их типа и других факторов. Следует также отметить большое значение в регулировании паводочного стока растительности в целом и особенно леса. Длительные дискуссии о влиянии леса на сток, проходившие в пятидесятых-шестидесятых годах прошлого столетия, показали различную степень регулирующего влияния леса на сток и зависимость этого влияния от климата, степени залесенности бассейна и даже от состава и пород деревьев.

Основной формой проявления воздействия бассейна реки на развитие речного русла является поступление в него продуктов эрозии, как следствия эрозионно-аккумулятивных процессов на территории бассейна - эрозии почв, овражной эрозии, транспорта смытого материала в балочной сети, в ручьях и малых реках.

Зависимость процессов эрозии от природных факторов прослеживается как на равнинах, так и в горах, подчиняясь в целом географической зональности. Протяженность почвенно-растительных зон соразмерна с параметрами бассейнов больших рек и значительно превосходит склоновые водосборы, водосборы балок и оврагов. Поэтому эрозия почв и оврагообразование тесно связаны с таким зональным явлением как сток воды и климат. Показателями факторов эрозии почв, в наиболее полной мере отражающих природные условия, являются эрозионные потенциалы осадков (ЭПД) и рельефа (ЭПР), коэффициент смываемости почв и эрозионный индекс агроценозов (для культурной растительности). Среди первых выделяются показатели, характеризующие развитие эрозии при стоке талых вод, которой подвержена большая часть территории страны: 57 % сельскохозяйственных земель относится к эрозионно-опасным от стока талых вод, 33 % - талых и дождевых вод и лишь 10% - только дождевых вод.

За исключением ЭПР, остальные показатели обнаруживают отчетливую зональность в своем распространении. Так эрозионный потенциал дождей возрастает с севера на юг вплоть до зоны степей вследствие смены в этом направлении низкоинтенсивных обложных осадков высокоинтенсивными ливневыми. Далее на юг Европейской части России происходит дальнейшее его повышение к горам, а в Средней Азии и Казахстане - понижение в пустынных и полупустынных районах и резкий рост в предгорьях, особенно вдоль хребтов, обращенных навстречу влагонесущим потокам воздуха (Зеравшанский, Заилийский Алатау). В горах с высотой ЭПД снижается. Показатель смываемости почв изменяется в обратном направлении: наименее устойчивы к смыву подзолистые почвы,

наиболее - высокогумусированные черноземы и песчаные почвы пустынь (последние - вследствие их водопроницаемости).

В реальных условиях закономерности развития эрозии почв благодаря сложному взаимодействию факторов оказываются иными, чем под воздействием отдельных факторов. В зоне тундры определяющими являются многолетнемерзлые грунты и высокий коэффициент стока. Эрозия почв проявляется слабо, т.к. основной сток, связанный со снеготаянием, приходится на период, когда почва находится в мерзлом состоянии; естественный растительный покров хорошо защищает почву, но достаточно незначительного нарушения дернины, чтобы эрозионный процесс принял катастрофический характер. Благодаря склоновым процессам овраги быстро превращаются в балки. Несмотря на это, заовраженность тундры больше, чем лесной зоны, что связано с термокарстом, создающим условия для линейной эрозии.

В лесной зоне, благодаря значительной защитной роли растительности, смыв почв со склонов относительно невелик. На севере зоны потери почвы благодаря эрозии в среднем составляют 0,1 т/га/год, в срединной части - 0,3-0,6 т/га/год, в южной - 2-4 т/га/год. Максимум смыва (3,5 т/га/год) имеет место в лесостепи и северной части степной зоны. Максимальные значения смыва, достигающие 50 т/га/год, тяготеют к районам с пересеченным рельефом на юге ЕТР и Украины. Безлесье, не сомкнутость травяного покрова и ливневые дожди, а также легкая податливость эрозии покровных пород, способствуют интенсивному смыву почв и образованию оврагов. Это, в свою очередь, приводит к тому, что реки сильно нагружены продуктами эрозии: средняя мутность воды степных рек в несколько раз больше, чем лесных. Обилие наносов и значительная неравномерность стока способствуют тому, что на единицу объема стока приходится в несколько раз больше выносимого литогенного материала, чем в лесной зоне. Однако модуль стока наносов меньше, так как модуль стока воды убывает в большей степени, чем растет мутность потоков. В результате для степной зоны в условиях активного развития эрозии на водосборах характерны процессы обмеления и деградации малых рек.

Второй пояс максимальных значений смыва почв (местами до 40-60 т/га) на территории Европейской части России приурочен к узкой предгорной полосе центральной части Северного Кавказа.

На юго-востоке в зоне сухих степей и полупустынь ЕТР модуль смыва убывает в связи с уменьшением количества осадков, за исключением районов поливного земледелия, где он увеличивается за счет ирригационной эрозии. Например, в Дагестане смыв почв значительно ниже, чем в центральной части Северного Кавказа в сходных по условиям рельефа районах, поскольку здесь ЭПД меньше в 4-10 раз.

В сельскохозяйственной зоне Западной Сибири и Северного Казахстана зональные закономерности эрозии почв такие же, как и в Европейской части России. Однако величина смыва здесь меньше (1-2 т/га), что связано с невысокими значениями ЭПР и ЭПД; лишь в Зауральских предгорьях и на Казахском мелкосопочнике он достигает 2-3, реже 4 т/га. Исключения составляют лишь равнины Алтая, где вместе с ростом ЭПР увеличивается и ЭПД: здесь зафиксирован максимальный смыв почв - 50-70 т/га.

В Восточной Сибири условия рельефа обуславливают возрастание интенсивности эрозии до 5-10 т/га. Наибольших значений смыв достигает в Южном Прибайкалье и Забайкалье (15-20 т/га), а также в сельскохозяйственных районах Дальнего Востока. В равнинных районах Средней Азии эрозия почв заметно проявляется только в предгорных районах.

Такой же закономерности подчиняется развитие овражной эрозии. Несмотря на обилие азональных факторов, влияющих на оврагообразование, на равнинах она образует отчетливые широтные зоны. На Русской равнине выделяется полоса сильно заовраженной территории, охватывающая лесостепь и север степной зоны: плотность оврагов - несколько десятков на 100 км<sup>2</sup>, густота 50-150 км/км<sup>2</sup>. В северной половине лесной зоны и в лесотундре оврагов почти нет: 1-2 на 100 км<sup>2</sup>. Под влиянием азональных факторов местами развивается "островная" овражность, соответствующая пересеченному рельефу, окраинам поливных массивов и т.п. Сильно заовраженная полоса, хотя и с несколько меньшей плотностью оврагов, протягивается по югу Западной Сибири вплоть до Алтая. Далее на восток интенсивная овражная эрозия отмечена лишь на отдельных территориях - юг Приморья, долина р.Лены в Центральной Якутии.

В горных областях эрозионные процессы отличаются как по формам проявления, так и по интенсивности развития. Характеризуясь большой крутизной и повышенными значениями коэффициента стока, склоны гор относятся к наиболее эрозионно-опасным землям, на которых даже незначительное нарушение растительного покрова и равновесия частиц может привести к полному уничтожению почвы. Эрозионные процессы развиты здесь весьма интенсивно и в естественных условиях, о чем свидетельствует повышение мутности рек в сотни и тысячи раз во время дождевых паводков, велика величина ежегодного слоя денудации гор - около 0,5 мм, а также маломощных почвенных профилей.

Вырубка лесов на склонах гор сопровождается катастрофическим смывом почвы, если одновременно не проводятся мероприятия по ее закреплению и защите от разрушения. К таким же последствиям, но с очаговым распространением, может привести строительство дорог, прокладка линий электропередачи трубопроводов, возведение различных инженерных сооружений на склонах, которые создают условия не только для смыва почвы, но и для возникновения крупных линейных форм - горных оврагов. Крайним проявлением

воздействия поступающего в реки склонового рыхлого материала является возникновение селей.

Фактор рельефа в горах - главная причина увеличения эрозионной опасности от предгорий к высокогорью. Однако он появляется только в условиях нерационального хозяйственного использования земель. Влияние остальных факторов (климата, растительности, почвенного покрова), создающих естественную вертикальную поясность в развитии эрозионных процессов, обуславливают общее снижение их интенсивности с высотой. Увеличение количества осадков в предгорьях по сравнению с прилегающими равнинами, совпадая с возрастанием уклонов и расчлененности рельефа, создает условия для резкого усиления здесь интенсивности эрозионных процессов. Поэтому полоса предгорий обычно отличается не только наибольшей активностью эрозии, но и максимальной эрозионной опасностью земель при их хозяйственном использовании.

В среднегорье и высокогорье, несмотря на общее увеличение или неизменное количество жидких осадков, эрозионная способность дождей с высотой местности уменьшается, что обусловлено в основном преобладанием на значительных высотах низкоинтенсивных дождей. Таяние снега в горах более растянуто во времени, чем на равнине; поэтому несмотря на большие запасы воды, талый сток не оказывает заметного влияния на эрозионные процессы в горных районах.

Противоэрозионная стойкость почв в горных странах также в определенной мере подчиняется вертикальной зональности, увеличиваясь в целом от предгорий к высокогорьям. Хозяйственное использование земель в горах изменяется таким образом, что по мере увеличения высоты местности, оно все меньше способствует развитию эрозионных процессов - сокращается площадь пашни, уменьшается продолжительность выпаса скота на пастбищах.

Направленность эрозионно-аккумулятивных процессов в верхних звеньях гидрографической сети зависит от соотношения между эрозионной и транспортирующей способностью водных потоков и поступлением в балки и малые реки литогенного материала со склонов. При прочих равных условиях, чем меньше река, тем в большей степени ее "жизнеспособность" зависит от характера и интенсивности процессов на водосборе. Водотоки низких порядков (первого, второго) находятся в прямом контакте со своими водосборами, принимая значительную часть смываемого с их площади материала. По мере увеличения порядка реки эта связь становится все более опосредованной, сохраняясь лишь при активном выносе продуктов размыва из оврагов, расчленяющих высокие берега рек.

Особенно отчетливо эти взаимосвязи появляются при развитии антропогенной эрозии почв, поставляющей в малые реки с водосборов избыточное (по отношению к

установившемуся в течение исторических или геологических отрезков времени) количество наносов. Существующий в естественных условиях баланс наносов в системах “водосбор-русло”, с одной стороны, и “эрозия – транспорт - аккумуляция наносов”, с другой, оказывается нарушенным под влиянием ускоренной эрозии почв, что приводит к необратимым изменениям в жизни малых рек.

Этому в значительной мере способствует поступление в реки вместе с наносами химически растворенного вещества (минеральных удобрений, а также микроэлементов, содержащихся в самой почве в естественном состоянии). Если часть смытых с водосбора твердых частиц не достигает речной сети, аккумулируясь в балках, западинах и отрицательных формах микрорельефа склонов и у их подножья, то химически растворенное вещество более или менее равномерно распределяется по сети малых рек в соответствии с их водоносностью. В результате химической эрозии повышается минерализация речной воды и, как следствие, происходит развитие водной растительности, зарастание прирусловых отмелей и береговых откосов. По данным В.Р. Калининой и В.П. Петрова минерализация воды в р. Протве (Калужская область), благодаря частичному растворению и выносу склоновыми потоками с полей удобрений, повысилась за 10 лет более чем в 1,5 раза (от 122 до 195 мг/л). Основным источником загрязнения при этом являются соединения фосфора и азота. Соединения азота легко выносятся поверхностными водами; фосфор же, до 80 % содержания которого связано с эрозией почв на пашне, представляет собой главный фактор эвтрофикации рек, наиболее проявляется в степных районах Нижнего Дона и Северного Кавказа. Сильное загрязнение фосфором (более 10 мг/л) характерно для севера Ростовской, юга Воронежской и Курской областей, образующими вместе с первыми, единую зону на юге Европейской части России, в некоторых районах Хакасии, Иркутской области и Бурятии. Минимальное загрязнение фосфором характерно для севера сельскохозяйственной зоны Европейской части, Среднего и Южного Урала, юга Сибири, Забайкалья и Дальнего Востока.

Количество наносов, поступающих с водосбора, определяется интенсивностью эрозийных процессов на его поверхности и полнотой доставки продуктов эрозии в речную сеть. По данным Е.П. Чернышова на юге Русской равнины смыв за период снеготаяния в среднем по пашне составляет 0,05-1,5 т/га год. Минимальные значения относятся к юго-востоку (Ростовская область) территории, максимальные - к северной части Среднерусской возвышенности. Близкие (0,5-1,5 т/га год) значения смыва от стока талых вод получены для центральной части Среднерусской возвышенности. На полевых водосборах с крутизной склонов 2-150 смывается от 0,8 до 2,5 т/га год. Согласно карте “Эрозионная опасность сельскохозяйственных земель ЕТС”, средняя величина смыва на пахотных землях в Европейской части изменяется от 0,5-1 до 20-30 т/га год. Максимальные значения,

достигающие 50 т/га год, тяготеют к районам с пересеченным рельефом в южных и юго-западных районах. В лесной и лесостепной зонах интенсивность эрозионных процессов на естественных кормовых угодьях на порядок и более меньше, чем на пашне. В годы с выдающимися ливнями, либо на ограниченных с большими, предельными для пахотных земель, уклонами в районах с высоким эрозионным потенциалом осадков в теплую часть года отмечена катастрофическая интенсивность эрозионных процессов (первые сотни т/га год). На пропашных культурах при крутизне склонов 3-150, по наблюдениям И.П. Ковальчука, за лето смывается до 50 т/га почвы.

Вторым источником наносов (по структуре потоков, но не по количеству) является овражная эрозия. Объем этой составляющей определяется плотностью и интенсивностью оврагов. Последняя зависит не только от природных условий, определяющих развитие оврагов (осадки, глубина базисов эрозии, форма склонов, размываемость пород и др.), но также от стадии развития последних. Поэтому пояс максимальной интенсивности прироста оврагов при прочих равных условиях смещен к районам более позднего сельскохозяйственного освоения, т.е. на юго-восток Европейской части России.

Доля вклада каждого из рассматриваемых выше видов эрозии в общем стоке наносов весьма различна, причем, если овражная составляющая может приближаться к нулю, то в отношении поверхностного смыва такая ситуация нереальна, поскольку поверхностный смыв в процессе хозяйственного освоения территории предшествует овражной эрозии и в отличие от последней не имеет тенденции в историческом масштабе времени к сработке потенциала.

## **5.2 Загрязнение природной среды вредными веществами**

На всех стадиях своего развития человек был тесно связан с окружающим миром. Но с тех пор как появилось высокоиндустриальное общество, опасное вмешательство человека в природу резко усилилось, расширился объём этого вмешательства, оно стало многообразнее и сейчас грозит стать глобальной опасностью для человечества. Расход не возобновляемых видов сырья повышается, все больше пахотных земель выбывает из экономики, так как на них строятся города и заводы. Исходя из выше сказанного, можно дать следующее определение термину «загрязнение окружающей среды»: это — нежелательное изменение её свойств в результате антропогенного поступления различных веществ и соединений. Источники загрязнения среды различны:

- Добыча природных ресурсов
- Возвращение в природу огромной массы отходов хозяйственной деятельности человека.
- Загрязнение гидросферы

- **Загрязнение атмосферы**

Но наиболее масштабным и значительным является химическое загрязнение среды несвойственными ей веществами химической природы. Среди них - газообразные и аэрозольные загрязнители промышленно-бытового происхождения. Прогрессирует и накопление углекислого газа в атмосфере. Дальнейшее развитие этого процесса будет усиливать нежелательную тенденцию в сторону повышения среднегодовой температуры на планете. Продолжается также и загрязнение, и истощение водных ресурсов, которое может вызвать существенные нарушения газо и водообмена между гидросферой и атмосферой.

### **5.2.1 Загрязнения атмосферы**

Человек загрязняет атмосферу уже тысячелетиями, однако последствия употребления огня, которым он пользовался весь этот период, были незначительны и не сопровождалась серьезными последствиями. Это начальное загрязнение воздуха не представляло проблемы, ибо люди обитали тогда небольшими группами, занимая неизмеримо обширную нетронутую природную среду. Так было вплоть до начала девятнадцатого века. Лишь за последние сто лет развития рост промышленности "одарил" нас такими производственными процессами, что возникли города с населением более миллиона человек, рост которых остановить нельзя.

#### *Химическое загрязнение*

В основном существуют три основных источника загрязнения атмосферы: промышленность, бытовые котельные, транспорт. Доля каждого из этих источников в общем загрязнении воздуха сильно различается в зависимости от места. Сейчас общепризнано, что наиболее сильно загрязняет воздух промышленное производство. Источники загрязнений - теплоэлектростанции, которые вместе с дымом выбрасывают в воздух сернистый и углекислый газ, металлургические предприятия, особенно цветной металлургии, которые выбрасывают в воздух оксиды азота, сероводород, хлор, фтор, аммиак, соединения фосфора, частицы и соединения ртути и мышьяка; химические и цементные заводы. Вредные газы попадают в воздух в результате сжигания топлива для нужд промышленности, отопления жилищ, работы транспорта, сжигания и переработки бытовых и промышленных отходов.

Атмосферные загрязнители разделяют на первичные, поступающие непосредственно в атмосферу, и вторичные, являющиеся результатом превращения последних. Основным источником загрязнения на планете являются тепловые электростанции, металлургические и химические предприятия, котельные установки, потребляющие более 70% ежегодно добываемого твердого и жидкого топлива. Основными вредными примесями являются следующие:

- а) Оксид углерода: Получается при неполном сгорании углеродистых веществ. В воздух он попадает в результате сжигания твердых отходов, с выхлопными газами и выбросами промышленных предприятий. Ежегодно этого газа поступает в атмосферу не менее 1250 млн.т. Оксид углерода является соединением, активно реагирующим с составными частями атмосферы и способствует повышению температуры на планете.
- б) Сернистый ангидрид. Выделяется в процессе сгорания серосодержащего топлива или переработки сернистых руд (до 170 млн.т. в год). Часть соединений серы выделяется при горении органических остатков в горнорудных отвалах. Только в США общее количество выброшенного в атмосферу сернистого ангидрида составило 65 % от общемирового выброса.
- в) Серный ангидрид. Образуется при окислении сернистого ангидрида. Конечным продуктом реакции является аэрозоль или раствор серной кислоты в дождевой воде, который подкисляет почву, обостряет заболевания дыхательных путей человека. Выпадение аэрозоля серной кислоты из дымовых факелов химических предприятий отмечается при низкой облачности и высокой влажности воздуха.
- г) Сероводород и сероуглерод. Поступают в атмосферу раздельно или вместе с другими соединениями серы. Основными источниками выброса являются предприятия по изготовлению искусственного волокна, сахара, коксохимические, нефтеперерабатывающие, а также нефтепромыслы. В атмосфере при взаимодействии с другими загрязнителями подвергаются медленному окислению до серного ангидрида.
- д) Оксиды азота. Основными источниками выброса являются предприятия, производящие азотные удобрения, азотную кислоту и нитраты, анилиновые красители, нитросоединения, вискозный шелк, целлулоид. Количество оксидов азота, поступающих в атмосферу, составляет 20 млн.т. в год.
- е) Соединения фтора. Источниками загрязнения являются предприятия по производству алюминия, эмалей, стекла, керамики, стали, фосфорных удобрений. Фторсодержащие вещества поступают в атмосферу в виде газообразных соединений фтороводорода или пыли фторида натрия и кальция. Соединения характеризуются токсическим эффектом. Производные фтора являются сильными инсектицидами.
- ж) Соединения хлора. Поступают в атмосферу от химических предприятий, производящих соляную кислоту, хлорсодержащие пестициды, органические красители, гидролизный спирт, хлорную известь, соду. В атмосфере встречаются как примесь молекулы хлора и паров соляной кислоты. Токсичность хлора определяется видом соединений и их концентрацией. В металлургической промышленности при выплавке чугуна и при переработке его на сталь происходит выброс в атмосферу различных тяжелых металлов и ядовитых газов. Так, в расчете на 11 т чугуна выделяется 12,7 кг сернистого газа и 14,5 кг

пылевых частиц, содержащих соединения мышьяка, фосфора, сурьмы, свинца, паров ртути и редких металлов, смоляных веществ и цианистого водорода.

### *Аэрозольное загрязнение*

Аэрозоли - это твердые или жидкие частицы, находящиеся во взвешенном состоянии в воздухе. Твердые компоненты аэрозолей в ряде случаев особенно опасны для организмов, а у людей вызывают специфические заболевания. В атмосфере аэрозольные загрязнения воспринимаются в виде дыма, тумана, мглы или дымки. Значительная часть аэрозолей образуется в атмосфере при взаимодействии твердых и жидких частиц между собой или с водяным паром. В атмосферу Земли ежегодно поступает около  $11 \text{ км}^3$  пылевидных частиц искусственного происхождения. Большое количество пылевых частиц образуется также в ходе производственной деятельности людей. Основными источниками техногенной пыли являются выбросы от следующих производственных процессов: а) сжигание каменного угля (до 93,60 млн.т/г), б) выплавка чугуна (до 20,21 млн.т/г), в) выплавка меди (до 6,23 млн.т/г), г) выплавка цинка (до 0,18 млн.т/г), д) выплавка олова (до 0,004 млн.т/г), е) выплавка свинца (до 0,13 млн.т/г), ж) производство цемента (до 53,37 млн.т/г).

Основными источниками искусственных аэрозольных загрязнений воздуха являются ТЭС, которые потребляют уголь высокой зольности, обогатительные фабрики, металлургические, цементные, магнезитовые и сажевые заводы. Аэрозольные частицы от этих источников отличаются большим разнообразием химического состава. Чаще всего в их составе обнаруживаются соединения кремния, кальция и углерода, реже - оксиды металлов: железа, магния, марганца, цинка, меди, никеля, свинца, сурьмы, висмута, селена, мышьяка, бериллия, кадмия, хрома, кобальта, молибдена, а также асбест.

Еще большее разнообразие свойственно органической пыли, включающей алифатические и ароматические углеводороды, соли кислот. Она образуется при сжигании остаточных нефтепродуктов, на нефтеперерабатывающих, нефтехимических и других подобных предприятиях.

Источником пыли и ядовитых газов служат массовые взрывные работы. Так, в результате одного среднего по массе взрыва в атмосферу выбрасывается около  $12 \text{ тыс. м}^3$  условного оксида углерода и более 1150 т пыли. Производство цемента и других строительных материалов также является источником загрязнения выбросами пыли и других вредных веществ в атмосферу.

К атмосферным загрязнителям относятся углеводороды - насыщенные и ненасыщенные, включающие от 11 до 13 атомов углерода. Они подвергаются различным превращениям, окислению, полимеризации, взаимодействуя с другими атмосферными загрязнителями после возбуждения солнечной радиацией. В результате этих реакций образуются перекисные соединения, свободные радикалы, соединения углеводов с

оксидами азота и серы часто в виде аэрозольных частиц. При некоторых погодных условиях могут образовываться особо большие скопления вредных газообразных и аэрозольных примесей в приземном слое воздуха. В результате вредные выбросы сосредотачиваются под слоем инверсии, содержание их у земли резко возрастает, что становится одной из причин образования смога.

В состав основных компонентов смога входят озон, оксиды азота и серы, многочисленные органические соединения. Устойчивая безветренная погода, будет способствовать высокой концентрации реагирующих веществ. Такие условия создаются чаще в июне-сентябре при продолжительной ясной солнечной погоде и реже зимой.

### ***Загрязнение от автотранспорта и самолетов***

В последние десятилетия в связи с быстрым развитием автотранспорта и авиации существенно увеличилась доля выбросов, поступающих в атмосферу от подвижных источников: грузовых и легковых автомобилей, тракторов, тепловозов и самолетов. Согласно оценкам, в городах на долю автотранспорта приходится от 30 до 70 % общей массы выбросов (в зависимости от развития в данном городе промышленности и числа автомобилей).

#### **А) Автотранспорт.**

Основной вклад в загрязнение атмосферы вносят автомобили, работающие на бензине (около 75 %), затем самолеты (примерно 5 %), автомобили с дизельными двигателями (около 4 %), тракторы и другие сельскохозяйственные машины (около 4 %), железнодорожный и водный транспорт (примерно 2 %). К основным загрязняющим атмосферу веществам, которые выбрасывают подвижные источники, относятся оксид углерода (около 70 %), углеводороды (примерно 19 %) и оксиды азота (около 9 %).

Относительная доля (от общей массы выбросов) углеводородов и оксида углерода наиболее высока при торможении и на холостом ходу, доля оксидов азота - при разгоне. Из этих данных следует, что автомобили особенно сильно загрязняют воздушную среду при частых остановках и при движении с малой скоростью.

Создаваемые в городах системы движения в режиме "зеленой волны", существенно сокращающие число остановок транспорта на перекрестках, призваны сократить загрязнение атмосферного воздуха в городах. Несмотря на то, что дизельные двигатели более экономичны, таких веществ, как CO, HnСm, NOx, выбрасывают не более, чем бензиновые, они существенно больше выбрасывают дыма (преимущественно несгоревшего углерода), который к тому же обладает неприятным запахом, создаваемым некоторыми несгоревшими углеводородами. В сочетании же с создаваемым шумом дизельные двигатели не только сильнее загрязняют среду, но и воздействуют на здоровье человека гораздо в большей степени, чем бензиновые.

## **Б) Самолеты**

Хотя суммарный выброс загрязняющих веществ двигателями самолетов сравнительно невелик (для города, страны), в районе аэропорта эти выбросы вносят определяющий вклад в загрязнение среды. К тому же турбореактивные двигатели (так же как дизельные) при посадке и взлете выбрасывают хорошо заметный на глаз шлейф дыма. Значительное количество примесей в аэропорту выбрасывают и наземные передвижные средства, подъезжающие и отъезжающие автомобили.

Согласно полученным оценкам, в среднем около 42 % общего расхода топлива тратится на выруливание самолета к взлетно-посадочной полосе перед взлетом и на заруливание после посадки. При этом доля несгоревшего и выброшенного в атмосферу топлива при рулении намного больше, чем в полете. Помимо улучшения работы двигателей, существенного уменьшения выбросов можно добиться путем сокращения времени работы двигателей на земле и числа работающих двигателей при рулении.

В последние 10 - 15 лет большое внимание уделяется исследованию тех эффектов, которые могут возникнуть в связи с полетами сверхзвуковых самолетов и космических кораблей. Эти полеты сопровождаются загрязнением стратосферы оксидами азота, серной кислотой и частицами оксида алюминия, которые в свою очередь ведут к разрушению озонового слоя со всеми последующими губительными воздействиями ультрафиолетовой радиации на биосферу Земли.

### ***Шумовое загрязнение***

Шумы относятся к числу вредных для человека загрязнений атмосферы. Раздражающее воздействие звука (шума) на человека зависит от его интенсивности, спектрального состава и продолжительности воздействия. Шумы со сплошными спектрами менее раздражительны, чем шумы узкого интервала частот. Наибольшее раздражение вызывает шум в диапазоне част от 3000-5000 Гц.

Работа в условиях повышенного шума на первых порах вызывает быструю утомляемость, обостряет слух на высоких частотах. Затем человек как бы привыкает к шуму, чувствительность к высоким частотам резко падает, начинается ухудшение слуха, которое постепенно развивается в тугоухость и глухоту. При интенсивности шума 135-140 дБ возникают вибрации в мягких тканях носа и горла, а также в костях черепа и зубов; если интенсивность превышает 140 дБ, то начинает вибрировать грудная клетка, мышцы рук и ног, появляются боль в ушах и голове, крайняя усталость и раздражительность; при уровне шума свыше 160 дБ может произойти разрыв барабанных перепонок.

Однако шум губительно действует не только на слуховой аппарат, но и на центральную нервную систему человека, работу сердца, служит причиной многих других заболеваний.

Одним из наиболее мощных источников шума являются вертолеты и самолеты особенно сверхзвуковые.

На интенсивность шума и площадь распространения существенное влияние оказывают метеорологические условия: скорость ветра, распределение температуры воздуха по высоте, облака и осадки.

### **5.2.2 Влияние загрязнения атмосферы на человека, растительный и животный мир.**

Все загрязняющие атмосферный воздух вещества в большей или меньшей степени оказывают отрицательное влияние на здоровье человека. Эти вещества попадают в организм человека преимущественно через систему дыхания. Органы дыхания страдают от загрязнения непосредственно, поскольку около 50% частиц примеси радиусом 0,01-0,1 мкм, проникающих в легкие, осаждаются в них.

Проникающие в организм частицы вызывают токсический эффект, поскольку они: а) токсичны (ядовиты) по своей химической или физической природе; б) служат помехой для одного или нескольких механизмов, с помощью которых нормально очищается респираторный (дыхательный) тракт; в) служат носителем поглощенного организмом ядовитого вещества.

В некоторых случаях воздействие одних загрязняющих веществ в комбинации с другими приводят к более серьезным расстройствам здоровья, чем воздействие каждого из них в отдельности. Большую роль играет продолжительность воздействия.

Статистический анализ позволил достаточно надежно установить зависимость между уровнем загрязнения воздуха и такими заболеваниями, как поражение верхних дыхательных путей, сердечная недостаточность, бронхиты, астма, пневмония, эмфизема легких, а также болезни глаз. Резкое повышение концентрации примесей, сохраняющееся в течение нескольких дней, увеличивает смертность людей пожилого возраста от респираторных и сердечно-сосудистых заболеваний.

#### **А) Оксид углерода.**

Концентрация CO, превышающая предельно допустимую, приводит к физиологическим изменениям в организме человека, а концентрация более 750 млн. к смерти. Объясняется это тем, что CO - исключительно агрессивный газ, легко соединяющийся с гемоглобином. При соединении образуется карбоксигемоглобин, повышение, содержания которого в крови сопровождается:

а) ухудшением остроты зрения и способности оценивать длительность интервалов времени,

б) нарушением некоторых психомоторных функций головного мозга,

в) изменениями деятельности сердца и легких,

г) головными болями, сонливостью, спазмами, нарушениями дыхания и смертностью.

Степень воздействия оксида углерода на организм зависят не только от его концентрации, но и от времени пребывания человека в загазованном СО воздухе. Так, при концентрации СО равной 10-50 млн., при экспозиции 50-60 мин отмечаются нарушения, приведенные в п. "а", 8-12 ч - 6 недель - наблюдаются изменения, указанные в п. "в". Нарушение дыхания, спазмы, потеря сознания наблюдаются при концентрации СО, равной 200 млн., и экспозиции 1-2 ч при тяжелой работе и 3-6 ч в покое. К счастью, образование карбоксигемоглобина в крови - процесс обратимый: после прекращения вдыхания СО начинается его постепенный вывод из крови; у здорового человека содержание СО в крови каждые 3-4 ч уменьшается в два раза. Оксид углерода - очень стабильное вещество, время его жизни в атмосфере составляет 2-4 мес.

#### **Б) Диоксид серы и серный ангидрид**

Диоксид серы ( $\text{SO}_2$ ) и серный ангидрид ( $\text{SO}_3$ ) в комбинации со взвешенными частицами и влагой оказывают наиболее вредное воздействие на человека, живые организмы и материальные ценности.  $\text{SO}_2$  - бесцветный и негорючий газ, запах которого начинает ощущаться при его концентрации в воздухе 0,3-1,0 млн., а при концентрации свыше 3 млн.  $\text{SO}_2$  имеет острый раздражающий запах. Диоксид серы в смеси с твердыми частицами и серной кислотой уже при среднегодовом содержании 9,04-0,09 млн. и концентрации дыма 150-200 мкг/м<sup>3</sup> приводит к увеличению симптомов затрудненного дыхания и болезней легких, а при среднесуточном содержании  $\text{SO}_2$  0,2-0,5 млн. и концентрации дыма 500-750 мкг/м<sup>3</sup> наблюдается резкое увеличение числа больных и смертельных исходов.

#### **В) Оксиды азота и некоторые другие вещества**

Оксиды азота, соединяющиеся при участии ультрафиолетовой солнечной радиации с углеводородами, образуют пероксилацетилнитрат (ПАН) и другие фотохимические окислители, в том числе пероксибензоилнитрат (ПБН), озон ( $\text{O}_3$ ), перекись водорода ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), диоксид азота. Эти окислители, основные составляющие *фотохимического смога*, повторяемость которого велика в сильно загрязненных городах, расположенных в низких широтах северного и южного полушария.

Наличие в составе ПАН диоксида азота и йодистого калия придает смогу коричневый оттенок. При концентрации ПАН выпадает на землю в виде клейкой жидкости губительно действующей на растительный покров.

Все окислители, в первую очередь ПАН и ПБН, сильно раздражают и вызывают воспаление глаз, а в комбинации с озоном раздражают носоглотку, приводят к спазмам грудной клетки, а при высокой концентрации (свыше 3-4 мг/м<sup>3</sup>) вызывают сильный кашель и ослабляют возможность на чем либо сосредоточиться.

В городах вследствие постоянно увеличивающегося загрязнения воздуха неуклонно растет число больных, страдающих такими заболеваниями, как хронический бронхит, эмфизема легких, различные аллергические заболевания и рак легких.

### **5.2.3 Загрязнение водной среды**

Загрязнение атмосферы, принявшее крупномасштабный характер, нанесло ущерб рекам, озерам, водохранилищам, почвам. Загрязняющие вещества и продукты их превращений рано или поздно из атмосферы попадают на поверхность Земли. Эта и без того большая беда значительно усугубляется тем, что и в водоемы, и на землю непосредственно идет поток отходов. Огромные площади сельскохозяйственных угодий подвергаются действию различных пестицидов и удобрений, растут территории свалок. Промышленные предприятия сбрасывают сточные воды прямо в реки. Стоки с полей также поступают в реки и озера. Загрязняются и подземные воды - важнейший резервуар пресных вод.

#### *Химическое загрязнение*

Всякий водоем или водный источник связан с окружающей его внешней средой. На него оказывают влияние условия формирования поверхностного или подземного водного стока, разнообразные природные явления, индустрия, промышленное и коммунальное строительство, транспорт, хозяйственная и бытовая деятельность человека. Последствием этих влияний является привнесение в водную среду новых, несвойственных ей веществ - загрязнителей, ухудшающих качество воды. Загрязнения, поступающие в водную среду, классифицируют по разному, в зависимости от подходов, критериев и задач. Так, обычно выделяют химическое, физическое и биологические загрязнения.

Химическое загрязнение представляет собой изменение естественных химических свойств воды за счет увеличения содержания в ней вредных примесей как неорганической (минеральные соли, кислоты, щелочи, глинистые частицы), так и органической природы (нефть и нефтепродукты, органические остатки, поверхностно-активные вещества, пестициды).

#### *А) Неорганическое загрязнение.*

Основными неорганическими (минеральными) загрязнителями пресных и морских вод являются разнообразные химические соединения, токсичные для обитателей водной среды. Это соединения мышьяка, свинца, кадмия, ртути, хрома, меди, фтора. Большинство из них попадает в воду в результате человеческой деятельности. Тяжелые металлы поглощаются фитопланктоном, а затем передаются по пищевой цепи более высокоорганизованным организмам. Токсический эффект некоторых наиболее распространенных загрязнителей гидросферы представлен в таблице 5.1.

Таблица 5.1.

<i>Вещество</i>	<i>Планктон</i>	<i>Ракообразные</i>	<i>Моллюски</i>	<i>Рыбы</i>
1. <i>Медь</i>	+++	+++	+++	+++
2. <i>Цинк</i>	+	++	++	++
3. <i>Свинец</i>	-	+	+	+++
4. <i>Ртуть</i>	++++	+++	+++	+++
5. <i>Кадмий</i>	-	++	++	++++
6. <i>Хлор</i>	-	+++	++	+++
7. <i>Роданид</i>	-	++	+	++++
8. <i>Цианид</i>	-	+++	++	++++
9. <i>Фтор</i>	-	-	+	++
10. <i>Сульфид</i>	-	++	+	+++

Степень токсичности (примечание):

- - отсутствует
- + - очень слабая
- ++ - слабая
- +++ - сильная
- ++++ - очень сильная

Кроме перечисленных в таблице веществ, к опасным источникам инфекции водной среды можно отнести неорганические кислоты и основания, обуславливающие широкий диапазон pH промышленных стоков (1,0 - 11,0) и способных изменять pH водной среды до значений 5,0 или выше 8,0, тогда как рыба в пресной и морской воде может существовать только в интервале pH 5,0 - 8,5.

Среди основных источников загрязнения гидросферы минеральными веществами и биогенными элементами следует упомянуть предприятия пищевой промышленности и сельское хозяйство. С орошаемых земель ежегодно вымывается около 6 млн. т солей.

Отходы, содержащие ртуть, свинец, медь локализованы в отдельных районах у берегов, однако некоторая их часть выносится далеко за пределы территориальных вод. Загрязнение ртутью значительно снижает первичную продукцию морских экосистем, подавляя развитие фитопланктона. Отходы, содержащие ртуть, обычно скапливаются в донных отложениях заливов или эстуариях рек. Дальнейшая ее миграция сопровождается накоплением метиловой ртути и ее включением в трофические цепи водных организмов.

#### ***Б) Органическое загрязнение.***

Среди вносимых в океан с суши растворимых веществ, большое значение для обитателей водной среды имеют не только минеральные, биогенные элементы, но и органические остатки. Вынос в океан органического вещества оценивается в 300 - 380

млн. т/год. Сточные воды, содержащие суспензии органического происхождения или растворенное органическое вещество, пагубно влияют на состояние водоемов. Осаждаясь, суспензии заливают дно и задерживают развитие или полностью прекращают жизнедеятельность данных микроорганизмов, участвующих в процессе самоочищения вод. При гниении данных осадков могут образовываться вредные соединения и отравляющие вещества, такие как сероводород, которые приводят к полному загрязнению воды в реке. Наличие суспензий затрудняют также проникновение света на глубину, и замедляет процессы фотосинтеза.

Одним из основных санитарных требований, предъявляемых к качеству воды, является содержание в ней необходимого количества кислорода. Вредное действие оказывают все загрязнения, которые, так или иначе, содействуют снижению содержания кислорода в воде. Поверхностно активные вещества - жиры, масла, смазочные материалы - образуют на поверхности воды пленку, которая препятствует газообмену между водой и атмосферой, что снижает степень насыщенности воды кислородом.

Значительный объем органических веществ, большинство из которых не свойственно природным водам, сбрасывается в реки вместе с промышленными и бытовыми стоками.

В связи с быстрыми темпами урбанизации и несколько замедленным строительством очистных сооружений или их неудовлетворительной эксплуатацией водные бассейны и почва загрязняются бытовыми отходами. Особенно ощутимо загрязнение в водоемах с замедленным течением или непроточных (водохранилища, озера).

Разлагаясь в водной среде, органические отходы могут стать средой для патогенных организмов. Вода, загрязненная органическими отходами, становится практически непригодной для питья и других надобностей. Бытовые отходы опасны не только тем, что являются источником некоторых болезней человека (брюшной тиф, дизентерия, холера), но и тем, что требуют для своего разложения много кислорода. Если бытовые сточные воды поступают в водоем в очень больших количествах, то содержание растворимого кислорода может опуститься ниже уровня, необходимого для жизни морских и пресноводных организмов.

### ***Загрязнение пестицидами.***

Пестициды составляют группу искусственно созданных веществ, используемых для борьбы с вредителями и болезнями растений. Пестициды делятся на следующие группы: инсектициды - для борьбы с вредными насекомыми, фунгициды и бактерициды - для борьбы с бактериальными болезнями растений, гербициды - против сорных растений.

Установлено, что пестициды уничтожая вредителей, наносят вред многим полезным организмам и подрывают здоровье биоценозов. В сельском хозяйстве давно уже стоит проблема перехода от химических (загрязняющих среду) к биологическим (экологически чистым) методам борьбы с вредителями. В настоящее время более 5 млн. т. пестицидов поступает на мировой рынок. Около 1,5 млн. т. этих веществ уже вошло в состав наземных и морских экосистем золовым и водным путем.

Промышленное производство пестицидов сопровождается появлением большого количества побочных продуктов, загрязняющих сточные воды. В водной среде чаще других встречаются представители инсектицидов, фунгицидов и гербицидов. Синтезированные инсектициды делятся на три основных группы: хлорорганические, фосфоорганические и карбонаты.

Хлорорганические инсектициды получают путем хлорирования ароматических и жидких гетероциклических углеводородов. К ним относятся ДДТ и его производные, в молекулах которых устойчивость алифатических и ароматических групп в совместном присутствии возрастает, всевозможные хлорированные производные хлородиена (элдрин). Эти вещества имеют период полураспада до нескольких десятков лет и очень устойчивы к биодеградации. В водной среде часто встречаются полихлорбифенилы - производные ДДТ без алифатической части, насчитывающие 210 гомологов и изомеров. За последние 40 лет использовано более 1,2 млн. т. полихлорбифенилов в производстве пластмасс, красителей, трансформаторов, конденсаторов.

Полихлорбифенилы (ПХБ) попадают в окружающую среду в результате сбросов промышленных сточных вод и сжигания твердых отходов на свалках. Последний источник поставляет ПХБ в атмосферу, откуда они с атмосферными осадками выпадают во всех районах Земного шара.

### ***Загрязнение синтетическими поверхностно-активными веществами.***

СПАВ относятся к обширной группе веществ, понижающих поверхностное натяжение воды. Они входят в состав синтетических моющих средств (СМС), широко применяемых в быту и промышленности. Вместе со сточными водами СПАВ попадают в материковые воды и морскую среду.

СМС содержат полифосфаты натрия, в которых растворены детергенты, а также ряд добавочных ингредиентов, токсичных для водных организмов: ароматизирующие вещества, отбеливающие реагенты (персульфаты, пербораты), кальцинированная сода, карбоксиметилцеллюлоза, силикаты натрия.

В зависимости от природы и структуры гидрофильной части молекулы СПАВ делятся на анионоактивные, катионоактивные, амфотерные и неионогенные. Последние не образуют ионов в воде. Наиболее распространенными среди СПАВ являются

анионоактивные вещества. На их долю приходится более 50% всех производимых в мире СПАВ.

Присутствие СПАВ в сточных водах промышленности связано с использованием их в таких процессах, как флотационное обогащение руд, разделение продуктов химических технологий, получение полимеров, улучшение условий бурения нефтяных и газовых скважин, борьба с коррозией оборудования. В сельском хозяйстве СПАВ применяется в составе пестицидов.

### ***Загрязнение нефтью и нефтепродуктами.***

Нефть представляет собой вязкую маслянистую жидкость, имеющую темно-коричневый цвет и обладающую слабой флуоресценцией. Нефть состоит преимущественно из насыщенных алифатических и гидроароматических углеводородов. Основные компоненты нефти - углеводороды (до 98%) - подразделяются на 4 класса:

**а) Парафины** (алкены) - (до 90% от общего состава) - устойчивые вещества, молекулы которых выражены прямой и разветвленной цепью атомов углерода. Легкие парафины обладают максимальной летучестью и растворимостью в воде.

**б) Циклопарафины** - (30 - 60% от общего состава) - насыщенные циклические соединения с 5-6 атомами углерода в кольце. Кроме циклопентана и циклогексана в нефти встречаются бициклические и полициклические соединения этой группы. Эти соединения очень устойчивы и плохо поддаются биоразложению.

**в) Ароматические углеводороды** - (20 - 40% от общего состава) - ненасыщенные циклические соединения ряда бензола, содержащие в кольце на 6 атомов углерода меньше, чем циклопарафины. В нефти присутствуют летучие соединения с молекулой в виде одинарного кольца (бензол, толуол, ксилол), затем бициклические (нафталин), полуциклические (пирен).

**г) Олефины** (алкены) - (до 10% от общего состава) - ненасыщенные нециклические соединения с одним или двумя атомами водорода у каждого атома углерода в молекуле, имеющей прямую или разветвленную цепь.

Нефть и нефтепродукты являются наиболее распространенными загрязняющими веществами в Мировом океане.

Наибольшие потери нефти связаны с ее транспортировкой из районов добычи. Аварийные ситуации, слив за борт танкерами промывочных и балластных вод, - все это обуславливает присутствие постоянных полей загрязнения на трассах морских путей. В период за 1962-79 годы в результате аварий в морскую среду поступило около 2 млн. т. нефти. За последние 30 лет, начиная с 1964 года, пробурено около 2000 скважин в Мировом океане, из них только в Северном море 1000 и 350 промышленных скважин

оборудовано. Из-за незначительных утечек ежегодно теряется 0,1 млн. т. нефти. Большие массы нефти поступают в моря по рекам, с бытовыми и ливневыми стоками.

Объем загрязнения из этого источника составляет 2,0 млн. т./год. Со стоками промышленности ежегодно попадает 0,5 млн. т. нефти. Попадая в морскую среду, нефть сначала растекается в виде пленки, образуя слои различной мощности. Нефтяная пленка изменяет состав спектра и интенсивность проникновения в воду света. Пропускание света тонкими пленками сырой нефти составляет 1-10% (280нм), 60-70% (400нм). Пленка толщиной 30-40 мкм полностью поглощает инфракрасное излучение. Смешиваясь с водой, нефть образует эмульсию двух типов: прямую - "нефть в воде"- и обратную - "вода в нефти". Прямые эмульсии, составленные капельками нефти диаметром до 0,5 мкм, менее устойчивы и характерны для нефти, содержащей поверхностно-активные вещества. При удалении летучих фракций, нефть образует вязкие обратные эмульсии, которые могут сохраняться на поверхности, переноситься течением, выбрасываться на берег и оседать на дно.

#### ***Соединения с канцерогенными свойствами.***

Канцерогенные вещества - это химически однородные соединения, проявляющие трансформирующую активность и способность вызывать канцерогенные, тератогенные (нарушение процессов эмбрионального развития) или мутагенные изменения в организмах. В зависимости от условий воздействия они могут приводить к ингибированию роста, ускорению старения, нарушению индивидуального развития и изменению генофонда организмов.

К веществам, обладающим канцерогенными свойствами, относятся хлорированные алифатические углеводороды, винилхлорид, и особенно, полициклические ароматические углеводороды (ПАУ). Максимальное количество ПАУ в современных донных осадках Мирового океана (более 100 мкг/км массы сухого вещества) обнаружено в тектонически-активных зонах, подверженным глубинному термическому воздействию. Основные антропогенные источники ПАУ в окружающей среде - это пиролиз органических веществ при сжигании различных материалов, древесины и топлива.

#### ***Тяжелые металлы.***

Тяжелые металлы (ртуть, свинец, кадмий, цинк, медь, мышьяк) относятся к числу распространенных и весьма токсичных загрязняющих веществ. Они широко применяются в различных промышленных производствах, поэтому, несмотря на очистные мероприятия, содержание соединения тяжелых металлов в промышленных сточных водах довольно высокое. Большие массы этих соединений поступают в океан через атмосферу. Для морских биоценозов наиболее опасны: ртуть, свинец и кадмий. Ртуть переносится в океан с материковым стоком и через атмосферу.

При выветривании осадочных и изверженных пород ежегодно выделяется 3,5 тыс. т. ртути. В составе атмосферной пыли содержится около 12 тыс. т. ртути, причем значительная часть - антропогенного происхождения. Около половины годового промышленного производства этого металла (910 тыс. т./год) различными путями попадает в океан. В районах, загрязняемых промышленными водами, концентрация ртути в растворе и взвесах сильно повышается. При этом некоторые бактерии переводят хлориды в высокотоксичную метил ртуть.

Заражение морепродуктов неоднократно приводило к ртутному отравлению прибрежного населения.

Свинец - типичный рассеянный элемент, содержащийся во всех компонентах окружающей среды: в горных породах, почве, природных водах, атмосфере, живых организмах. Наконец, свиней активно рассеивается в окружающую среду в процессе хозяйственной деятельности человека. Это выбросы с промышленными и бытовыми стоками, с дымом и пылью промышленных предприятий, с выхлопными газами двигателей внутреннего сгорания. Миграционный поток свинца с континента в океан идет не только с речными стоками, но и через атмосферу. С континентальной пылью океан получает (20-30 т) свинца в год.

#### ***Сброс отходов в море с целью захоронения (дампинг).***

Многие страны, имеющие выход к морю, производят морское захоронение различных материалов и веществ, в частности грунта, вынуженного при дноуглубительных работах, бурового шлака, отходов промышленности, строительного мусора, твердых отходов, взрывчатых и химических веществ, радиоактивных отходов. Объем захоронений составил около 10% от всей массы загрязняющих веществ, поступающих в Мировой океан.

Основанием для дампинга в море служит возможность морской среды к переработке большого количества органических и неорганических веществ без особого ущерба воды. Однако эта способность не беспредельна.

Поэтому дампинг рассматривается как вынужденная мера, временная дань общества несовершенству технологии. В шлаках промышленного производства присутствуют разнообразны органические вещества и соединения тяжелых металлов. Бытовой мусор в среднем содержит 32-40% органических веществ; 0,56% азота; 0,44% фосфора; 0,155% цинка; 0,085% свинца; 0,001% ртути; 0,001% кадмия.

Во время сброса и прохождения материала сквозь столб воды, часть загрязняющих веществ переходит в раствор, изменяя качество воды, другая сорбируется частицами взвеси и переходит в донные отложения.

Одновременно повышается мутность воды. Наличие органических веществ часто приводит к быстрому расходованию кислорода в воде и не редко к его полному

исчезновению, растворению взвесей, накоплению металлов в растворенной форме, появлению сероводорода.

Присутствие большого количества органических веществ создает в грунтах устойчивую восстановительную среду, в которой возникает особый тип иловых вод, содержащих сероводород, аммиак, ионы металлов. Воздействию сбрасываемых материалов в разной степени подвергаются организмы бентоса и др.

В случае образования поверхностных пленок, содержащих нефтяные углеводороды и СПАВ, нарушается газообмен на границе воздух - вода. Загрязняющие вещества, поступающие в раствор, могут накапливаться в тканях и органах гидробионтов и оказывать токсическое воздействие на них.

Сброс материалов дампинга на дно и длительная повышенная мутность приданной воды приводит к гибели от удушья малоподвижные формы бентоса. У выживших рыб, моллюсков и ракообразных сокращается скорость роста за счет ухудшения условий питания и дыхания. Нередко изменяется видовой состав данного сообщества.

При организации системы контроля над сбросами отходов в море решающее значение имеет определение районов дампинга, определение динамики загрязнения морской воды и донных отложений. Для выявления возможных объемов сброса в море необходимо проводить расчеты всех загрязняющих веществ в составе материального сброса.

#### ***Тепловое загрязнение.***

Тепловое загрязнение поверхности водоемов и прибрежных морских акваторий возникает в результате сброса нагретых сточных вод электростанциями и некоторыми промышленными производствами. Сброс нагретых вод во многих случаях обуславливает повышение температуры воды в водоемах на 6-8°C. Площадь пятен нагретых вод в прибрежных районах может достигать 30 км<sup>2</sup>.

Более устойчивая температурная стратификация препятствует водообмену поверхностным и донным слоям. Растворимость кислорода уменьшается, а потребление его возрастает, поскольку с ростом температуры усиливается активность аэробных бактерий, разлагающих органическое вещество. Усиливается видовое разнообразие фитопланктона и всей флоры водорослей.

### **5.3 Русловой процесс как фактор самоочищения речного русла**

Русловой процесс до самого последнего времени рассматривался лишь с точки зрения его отрицательного влияния на инженерные сооружения, расположенные в русле и на пойме, в том числе и на состояние судового хода. При этом отрицательное

влияние было связано как с процессом размыва участков русла, так и с процессами заилиения.

В последние десятилетия в связи с ростом объема сточных вод, отводимых в реки, все более актуальной становится проблема повышения их самоочистительной способности, особенно в пределах урбанизированных территорий. Несмотря на повышение степени очистки сточных вод, внедрение систем замкнутого водоснабжения, использование самоочистительной способности рек и водоемов остается актуальным в течение продолжительного времени.

При рассмотрении факторов, влияющих на самоочистительную способность водотока, русловой процесс ранее не учитывался. Считалось, что самоочищение речной воды происходит под действием химических и микробиологических процессов, происходящих непосредственно в самой воде. Вместе с тем, осаждение взвесей антропогенного и техногенного происхождения, являющееся элементом руслового процесса, одновременно представляет собой важное звено в процессе самоочищения речной воды. Действительно, мелкодисперсная взвесь в виде илестых, пылеватых и коллоидных частиц вследствие чрезвычайно развитой поверхности является активным адсорбентом, изымающим из воды многие химические соединения и органические вещества. Именно на поверхности частиц мельчайшей взвеси осуществляется жизнедеятельность водных микроорганизмов, утилизирующих вредные примеси и органические вещества, так как доля свободноплавающих микроорганизмов невелика. В результате этих процессов масса частиц возрастает, устойчивость коллоидов нарушается, происходит коагуляция частиц, объединение их в хлопья и осаждение на дно реки. Окисление загрязняющих примесей связано с потреблением растворенного в воде кислорода, поэтому интересно сопоставить этот процесс с ходом осаждения мелкодисперсных взвесей.

Если характеризовать содержание органических примесей в речной воде в начальный момент времени биохимическим потреблением кислорода, необходимого для их окисления, а в момент времени  $t$  через  $L_t$ , то можно записать, что

$$L_t = L_0 - L \quad (5.1)$$

где  $L$  — количество кислорода, потребленное за время  $t$ .

Кинетическое уравнение первого порядка, использованное при выводе соотношения Стриттера—Фелпса и определении константы  $ki$ , не отвечает реальному физическому процессу изъятия органических примесей из речной воды. Отмечая этот факт, И. Д. Родзиллер указывает на причины чисто биохимического характера и не отмечает в данном случае непосредственной роли сорбции и седиментации взвеси. Экспериментальные исследования показали, что загрязненность речной воды, характеризуемая величиной

БПК, прослеживается на участках небольших водотоков, протяженностью около 10 км ниже выпусков сточных вод. Это согласуется с результатом расчета седиментации мелкодисперсной взвеси, и данными натурных наблюдений, выполненных на многих средних и крупных водотоках европейской территории России.

Наблюдения за состоянием дна водотоков ниже центров урбанизации позволяют обнаружить характерные признаки загрязненности дна на расстоянии в 10—15 км ниже города. Это позволяет предположить, что процесс самоочищения речной воды связан не с окислением имеющихся примесей, а с их сорбцией на мелкую взвесь с последующей ее седиментацией в речное русло. Потерянные водой органические и другие примеси аккумулируются в донных отложениях и продолжают окисляться, однако условия их «переработки» изменяются и будут существенно зависеть от хода руслового процесса. Таким образом, не исключено, что наряду с процессом окисления примесей в речном потоке действует значительно более мощный механизм самоочищения, связанный с седиментацией мелкой взвеси. Следует заметить, что этот механизм обеспечивает удаление примесей из воды за несколько десятков часов, в то время как биохимическая стабилизация органических примесей идет весьма медленно и может длиться несколько лет. При этом седиментация взвеси является одновременно и важным фактором руслового процесса, приводящим к изменению физико-механических характеристик донных грунтов и к накоплению загрязненных донных отложений.

При выпадении взвесей на дно водотока интенсивность их окисления снижается, что связано с уменьшением интенсивности турбулентного перемешивания жидкости в непосредственной близости от дна. Растворенный в воде кислород изымается верхним рядом частиц грунта и не поступает в более глубокие слои отложений. Поэтому активный аэробный процесс окисления примесей сменяется здесь вялотекущим анаэробным процессом окисления.

В активной фазе руслового процесса в периоды интенсивных половодий, когда превышает условие предельной устойчивости частиц к размыву и верхний слой донного грунта приходит в движение и перемещается, в той или иной форме возобновляются и интенсифицируются процессы аэробного окисления примесей, находящихся на дне. Иными словами, вследствие подвижки частиц донного грунта в виде сальтации, перекатывания, перемещения гряд в зону активного окисления попадают частицы, доступ кислорода к которым ранее отсутствовал. Таким образом, и в активной фазе русловой процесс существенно влияет на окисление загрязненных донных отложений и качество речной воды, поэтому направленное воздействие на русловой процесс может оказать заметное влияние на качество речной воды.

#### 5.4 Загрязнение участков речного русла и вторичное загрязнение речной воды

Загрязняющие вещества поступают в водоток с промышленными и бытовыми сбросными водами, а также с поверхностным стоком с урбанизированных территорий. Как показывает анализ, общая доля загрязнений, поступающих в водотоки со сбросными водами, уменьшается в связи с их очисткой и уменьшением и нормированием предельно-допустимых сбросов. Вместе с тем должное внимание к сильно загрязненному поверхностному стоку привлечено не было. В настоящее время поверхностный сток является основным поставщиком загрязненных взвесей и растворимых загрязнений.

Растворимые в воде вещества по мере поступления в водоток либо существуют в виде раствора, либо сорбируются мелкодисперсными взвесями. Сорбирующая способность мелкой взвеси объясняется прежде всего чрезвычайно развитой их поверхностью. Так, 1 см<sup>3</sup> взвеси, измельченной до частиц крупностью в 10<sup>-3</sup> мм, имеет поверхность 6 м<sup>2</sup>. Существенную роль в процессе сорбции играет «мозаичная» структура поверхности, неоднородность ее физических и химических свойств [9]. И. Д. Родзиллер отмечает, что мелкодисперсная взвесь минерального происхождения может обеспечивать удаление из воды диссоциирующих электролитов, веществ, находящихся в ионном состоянии, молекул органических веществ. Как считает В. Т. Каплин, кинетика сорбционного процесса может быть описана уравнением первого порядка

$$\frac{dc}{dt} = -k_c c \quad (5.2)$$

интегрирование которого дает

$$c = c_0 e^{-k_c t} \quad (5.3)$$

где  $c_0$  — концентрация загрязняющего вещества в начальный момент времени  $t = 0$  до контакта воды с сорбирующими частицами;  $k_c$  — коэффициент сорбции, зависящий от удельной поверхности сорбента, способности вещества к сорбции, от скорости обратного перехода с поверхности сорбента в воду.

Значение  $k_c$  определяется экспериментально. При выводе предполагается, что, кроме концентрации  $c$ , все остальные параметры процесса сохраняются постоянными. Весьма важным обстоятельством является зависимость коэффициента сорбции от концентрации мелкодисперсной взвеси  $c_m$

$$k_c = k'_c c_m \quad (5.4)$$

тогда

$$c = c_0 e^{-k_c t c_m} \quad (5.5)$$

откуда

$$k_c = \frac{1}{t c_m} \ln \frac{c_0}{c} \quad (5.6)$$

Следовательно, кинетика процесса сорбции будет существенно изменяться по мере седиментации взвеси, все более отклоняясь от уравнения первого порядка. Этот вывод качественно согласуется с характером изменения ВПК в водотоках. И.Д.Родзиллер считает, что «сорбционное извлечение веществ из воды является ее очисткой от этих веществ, но не обезвреживание самого водоема. Здесь наблюдается перемещение вещества (из растворенного в воде состояния) на поверхность сорбирующих частиц и вместе с ними на дно водоема».

Нерастворимые загрязняющие вещества органического происхождения, соединения тяжелых металлов, нефтепродукты, попадая в водоток, осаждаются на участках большей или меньшей протяженности в зависимости от степени дисперсности и гидравлической ситуации на участке водотока в месте поступления загрязняющих веществ. Осаждение нефтепродуктов связано с их эмульгированием и сорбированием на частицах взвеси.

Консервативные вещества аккумулируются на поверхности дна и под действием руслового процесса перемешиваются с донными грунтами, загрязняя грунтовый слой значительной толщины, достигающей 1 м и более.

Неконсервативные вещества, сорбированные взвесями, трансформируются в процессе разнообразных химических и микробиологических превращений. В результате таких превращений могут образовываться более опасные продукты, чем исходные реагирующие вещества. При этом концентрации вновь образующихся растворимых и легкоподвижных продуктов распада в грунте оказываются значительно выше концентраций этих веществ в воде. Таким образом, в грунте создаются источники вторичного загрязнения речной воды продуктами распада. Вторичное загрязнение речной воды происходит также вследствие нарушения сложившегося равновесия между концентрацией неконсервативных примесей в речной воде и поровой воде донных грунтов. Такое нарушение равновесия может быть следствием гидрологической ситуации (паводок), либо следствием прекращения сбросов загрязненных стоков. Вторичное загрязнение может заметно ухудшать качество речной воды в течение длительного периода после прекращения сбросов загрязненных сбросных вод и перехвата поверхностного стока.

#### 5.4.1 Подрусловое течение и диффузия примесей из загрязненных донных отложений в речную воду

Перенос загрязняющих примесей в грунтах речного русла существенным образом зависит от подруслового фильтрационного течения. Подрусловое фильтрационное течение зависит от уклона поверхности речного потока и локальной гидрогеологической ситуации, которая может существенно изменяться в зависимости от местных условий. При местном повышении горизонта грунтовых вод в окрестностях русла возможен выход подруслового фильтрационного течения в речной поток. В случае местного понижения горизонта грунтовых вод происходит инфильтрация речной воды в русловые грунты. Подрусловое фильтрационное течение в ряде случаев может влиять на миграцию примесей в самих донных грунтах.

В ходе процесса массопереноса примесей в донных грунтах из зон их повышенного содержания в зоны меньшей концентрации, а также в речной поток происходит дисперсия (рассеивание) примесей.

Экспериментальные данные показывают, что коэффициенты диффузии  $D_x$  и  $D_z$  зависят от скорости фильтрационного течения. При скорости фильтрации меньше 0,01 см/с процесс переноса приобретает молекулярный характер. Это обстоятельство определяет необходимость детального исследования подруслового фильтрационного течения, особенно вблизи границы раздела «грунт — речной поток». В этой зоне вследствие тангенциального воздействия речного потока скорость течения значительно выше скорости фильтрационного течения рис.5.1. Это позволяет говорить о возникновении здесь дополнительного течения, индуцированного в грунте тангенциальным воздействием основного потока.

При исследовании характеристик индуцированного течения вблизи границы раздела, фильтрационный поток рассматривается в рамках модели условной сплошной среды, как это принято в теории фильтрации.

Выполненное теоретическое исследование характеристик индуцированного фильтрационного течения, возникающего в водонасыщенном грунте вблизи границы раздела грунт — речной поток, позволило установить, что это течение возникает в сравнительно тонком слое грунта, имеет значительно более высокие скорости течения по сравнению с «чистой» фильтрацией и может оказывать влияние на перенос примесей из грунта в воду, вызывая его интенсификацию.

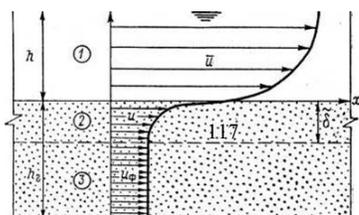


Рисунок 5.1. Схема взаимодействия речного потока и подруслового  
фильтрационного течения

Исследование взаимодействия руслового потока и подруслового фильтрационного течения, которое началось, по сути дела, лишь в последнее время, открывает новую страницу в понимании как динамики руслового потока, так и процесса взвешивания частиц донного грунта [20]. Исследования такого взаимодействия впервые были выполнены в нашей стране Г. В. Васильченко и А.С. Калиновичем и носили поисковый характер. Было установлено, что скорости подруслового течения изменяются от скорости фильтрации в толще руслового грунта до скорости потока  $u_k$  на вершинах зерен шероховатости. Для такого резкого изменения скоростей (затруднения, связанные с прямыми измерениями скорости в толще зернистого материала) требуется детальная разработка методики исследований с использованием электрохимического метода измерений и миниатюрных датчиков скорости. Частные измерения подруслового течения были выполнены В. Графом, некоторые данные сообщаются У.Цанке. Исследованиями В. Н. Спиридонов, охвачен широкий диапазон крупности частиц грунта с тщательным измерением коэффициента фильтрации и скоростей течения  $u_k$  вблизи вершин верхнего ряда частиц грунта со стороны потока и скорости  $M < \Delta$  на нижней границе верхнего ряда частиц грунта. Эти параметры необходимы для проверки теоретического решения и оценок, сделанных на его основе.

Исследования, выполненные на грунтах сильно изменяющейся крупности, и обобщение известных данных позволили установить, что коэффициент фильтрации для несвязных грунтов с достаточной точностью может определяться из соотношения

$$gd^2 / (k_\phi \gamma) = 1200 \quad (5.7)$$

где  $\gamma$  — кинематическая вязкость воды.

Таким образом, имеются все необходимые данные для расчета профиля скорости в слое индуцированного фильтрационного течения. При сопоставлении расчетных и экспериментальных данных, обнаруживается удовлетворительная сходимость и подтверждается предлагаемый метод расчета.

Пульсационные скорости индуцированного фильтрационного течения впервые были зарегистрированы Г. В. Васильченко. Эти измерения показали, что при отсутствии подвижек частиц грунта пульсации заметны не ниже первого ряда частиц

грунта, а при обтекании преграды и подвижках частиц грунта пульсации скорости заметны и на большей глубине.

Большой интерес представляют результаты экспериментальных исследований индуцированного течения, выполненные А. Б. Клавенем и В. Н. Коковиным. Сопоставление характеристик течения в канале с закрепленной шероховатостью из одного ряда дробы с течением в канале со слоем дробы толщиной 3 см позволило авторам отметить увеличение сопротивления на 10—30%.

### **5.5 Понятие о теоретическом обосновании экологических аспектов русловых процессов**

Анализ особенностей динамики речного потока и руслового процесса на урбанизированных территориях, а так же в зонах влияния антропогенного воздействия требует системного подхода, классификации влияющих факторов и оценки масштабов их воздействия на речную сеть.

Основные факторы существенно изменяющие динамику речного потока и ход руслового процесса – это факторы, влияющие на гидравлические и морфологические характеристики потока и русла:

1. Изменяющие сток воды.
2. Изменяющие сток наносов.
3. Изменяющие геометрию речного русла.

В естественных условиях эти факторы действуют, как взаимозависимые, в условиях антропогенного влияния каждый фактор может действовать индивидуально, независимо от других.

В зависимости от характера изменения действующих факторов (по величине и по времени) масштаб влияния их на водоток различен и будет проявляться на различных структурных уровнях руслового процесса по разному.

При оценке влияния факторов на речной поток можно выделить два основных класса:

1. Класс факторов – активизирующий процессы размыва и транспорт наносов.
2. Класс факторов – активизирующий заиливание русла.

К первому классу факторов относятся:

Отведение значительного количества очищенных стоков

Дополнительное обводнение для разбавления сильно загрязненных вод.

В том числе за счет территориального перераспределения стока.

Регулирование стока

Нарушение термического и ледового режима

- Увеличения уклона на участке русла
- Искусственное сужение русла (нарушение стационарного режима).
- Уменьшение стока наносов
- Локальные размывы вблизи инженерных сооружений

Ко второму классу факторов относятся:

- Водопотребление (уменьшение стока)
- Регулирование стока
- Увеличение стока наносов и изменение его количественного состава
- Зарастание
- Искусственное повышение глубины

Поступление техногенных и антропогенных примесей, изменяющих качественный состав стока наносов, вызывающих консолидацию донных грунтов и увеличивающих их устойчивость к размыву.

Масштаб влияния факторов урбанизации на водоток зависит от соотношения между классом водотока и мощностью центра урбанизации. Характеристика масштаба влияния факторов урбанизации выражается:

$$M_{эл} = \sum Q_c / Q_{95\%} \quad (5.8)$$

где  $\sum Q_c$  – суммарный расход сбросных вод

$Q_{95\%}$  - среднегодовой расход 95% обеспеченности.

Ориентируясь на формулу для определения масштаба влияния факторов урбанизации, понятно, что учитываются к сожалению не все влияющие факторы. Однако надо отметить,

если  $M_{вл} < 1$  - возможно поддерживать сбалансированную экологическую систему, сохраняется самоочистительная способность водотока,

если  $M_{вл} > 1$  – поддерживать удовлетворительное санитарное состояние водотока сложно и дорого, в некоторых случаях, в следствие необратимых изменений русла реки и полного перерождения экологической системы возратить водоток к приемлемому состоянию оказывается невозможным.

### **5.6 Экологический отклик внутренних водных путей на судоходство**

Судоходство на внутренних водных путях является одним из самых древнейших видов транспорта. Вследствие наличия на территории России огромного количества рек, озёр, каналов, а также выхода к морям и океану, страна является одной из самой развитой в сфере судоходства. Часть рек России обладают небольшим уклоном в среднем и нижнем течениях, вследствие чего устанавливаются выгодные условия для осуществления судоходства на внутренних водных путях.

На юге страны реки используются для судоходства в течение примерно десяти месяцев, в то время как на Крайнем Севере и Дальнем Востоке менее четырёх месяцев, также используются реки для осуществления экспедиционного завоза грузов в течение небольшого паводкового периода. Класс внутренних водных путей определяется габаритами судового хода. Судовой ход – это водное пространство на внутренних водных путях, назначенный для движения корабля и обозначаемое на местности или на карте.

Организация речных соединений между каналами и бассейнами связало водные пути бассейнов Волги, Невы и Дона в общую глубоководную систему в Европейской части страны с выходами в Чёрное, Каспийское, Балтийское, Белое, Азовское моря.

На сегодняшний день внутренние водные пути образуют огромный инфраструктурный комплекс, что позволяет поддерживать связь с 22 республиками, 9 краями, 46 областями, 3 городами федерального значения, 1 автономной областью и 4 автономными округами России. Протяжённость всех водных внутренних путей, применяемых для судоходства более 100 тыс. км, среди которых более 16 тыс. км искусственно созданных путей, объединяющих в своей инфраструктуре более 700 гидротехнических сооружений.

Несмотря на активное развитие данной отрасли, стоит также учитывать, какое влияние речное судоходство оказывает на экологию. Источниками загрязнения речных вод являются продукты пассажирского и грузового судоходства такие как, загрязнение машинным маслом и выхлопными газами, а также общая нагрузка на речные системы, ввиду большого количества причальных конструкций, также к источникам загрязнения можно отнести шумовое загрязнение от водного транспорта. Но особое внимание следует уделить непосредственно влиянию антропогенного фактора на русловые процессы для обеспечения бесперебойной работы судоходства. К таким факторам следует отнести различного рода дноуглубительные и дноно-намывные мероприятия в руслах рек, которые, в свою очередь могут привести к развитию эрозионных процессов по берегам речных долин. Борьба с эрозионными процессами предполагает проектирование и возведение укрепительных сооружений, что также приводит к негативному влиянию антропогенного воздействия данного типа на экологию.

Протяжённость водных объектов страны, которые эксплуатируются в качестве ВВП составляет 101484,8 км. В связи с тем, что для объединения речных бассейнов строят на реках гидроузлы, создаются разветвлённые сети искусственных глубоководных путей. В настоящее время доля речного транспорта в грузообороте составляет около 3% и находится в состоянии спада по причине крупной конкуренции с остальными видами транспорта.

Помимо грузовых перевозок, для многих населенных пунктов таких регионов, как Сибирь и Дальний Восток речной транспорт является единственным возможным средством

пассажирских перевозок. Основными транспортными артериями этих регионов являются реки Обь, Енисей, Лена, Яна, Индигирка. В верховьях рек, где расположены железнодорожные транспортные узлы, проводка судов с грузами зависит существенным образом от глубин на фарватере. Поэтому водность рек в навигационный период играет огромную роль при доставке жизнеобеспечивающих грузов.

В суровых климатических условиях, а также недостаточно развитой или даже отсутствующей дорожно-транспортной инфраструктуры особую роль играет завоз продуктов, строительных и горюче-смазочных материалов в отдаленные районы по рекам, на которых срок навигации ограничен сравнительно короткими периодами высокой воды и свободного ото льда русла. Не использовать эти периоды – значит, усложнить и значительно удорожить доставку всех этих товаров. Известны случаи, когда при неожиданном срыве судоходных глубин приходилось обеспечивать доставку грузов с применением воздушного транспорта. При наступлении раннего ледостава на р. Лене из-за неожиданно наступивших холодов, речной флот неоднократно оказывался в ледяной западне. Опасаясь губительного воздействия на вмерзшие суда весеннего ледохода, в течение зимы путейцы пробивали во льду каналы для отвода судов в устьевые зоны притоков, где интенсивность ледового воздействия менее значительна.

В связи с этим особую актуальность приобретает гидрологическое обеспечение водного транспорта. Отечественная гидрология традиционно рассматривает обслуживание водного транспорта, как одну из своих первостепенных задач. Из элементов гидрологического режима для судоходства наибольший интерес представляет оперативная информация об уровнях водных объектов, о резком изменении водности, о русловых деформациях, о ледовой обстановке, а также прогнозы этих явлений.

Сведения об уровнях воды на участках, лимитирующих судоходство, приобретают особую ценность при быстром изменении отметок в связи со сгонно-нагонными явлениями в устьевых зонах или вблизи гидротехнических сооружений. На основе такой информации представляется возможным оптимизировать способы выполнения перевозок, например, преодолевать перекаты на пике волны попуска или нагона. Прогноз расплывания волны попуска на лимитирующем судоходство участке предполагает получение двойного экономического эффекта, это увеличение загрузки судов, следующих через перекат, а также уменьшения объема сбросов на ГЭС, часть которых для достижения судоходных глубин в нижнем бьефе в ряде случаев приходится производить в холостую. Разумеется, эффективное использование таких прогнозов требует повышенной четкости и слаженности работы диспетчерской службы, плавсостава и энергетиков.

Использование рек как путей сообщения среди всех других видов освоения водных ресурсов в наиболее полной мере базируется на учете особенностей их руслового режима.

Это определяется зависимостью состояния судоходных трасс и методов дноуглубления от направленности и интенсивности переформирований русел на всех структурных уровнях проявлений русловых процессов. Поэтому проектирование прорезей и выправительных сооружений максимально опирается на руслоформирующую деятельность речного потока. Особенно важен учет русловых процессов на реках с неустойчивым и слабоустойчивым руслом, на которых условия судоходства лимитируются мелководностью перекатов и перекатных участков, многолетним и сезонным режимами их деформаций, переформированиями русла в целом.

Правильный выбор трассы фарватера, стабилизация ее положения, обеспечение оптимальных для судоходства глубин определяются соответствием методов дноуглубления русловому режиму рек и прогнозным оценкам русловых переформирований. Это вместе с тем обеспечивает гидроэкологическую безопасность при выполнении путевых мероприятий и сохранение рек как природных объектов. Такой подход, представляющий собой управление русловыми процессами, характерен для российской школы воднотранспортного использования рек.

Перспективные прогнозы составляются при глобальных изменениях водности рек, и стока наносов, и реализации крупных водохозяйственных проектов. Прогнозирование русловых деформаций, основанное на закономерностях развития и формах проявления русловых процессов как в естественном состоянии рек, так и при различных по масштабу антропогенных нарушениях, является главным принципом управления русловыми процессами. Оно заключается в искусственном воздействии на русла рек, при котором обеспечивается максимально возможная их гидроэкологическая безопасность, как природных объектов.

При этом их формы закрепляются в оптимальном положении, позволяющем свести к минимуму опасные и неблагоприятные проявления русловых процессов и в то же время обеспечить достижение поставленной цели, углубление русла при транспортном использовании реки, или разработку русловых карьеров стройматериалов, или защиту берегов от размыва и т.д. Поэтому проекты использования рек и их ресурсов будут обоснованы, если учтены направленность и темпы русловых деформаций, возможные изменения русел и специфика проявления процессов в различных условиях.

Использование водных ресурсов, воднотранспортная эксплуатация рек, строительство хозяйственных и коммунальных объектов на берегах, переходов через реки, коммуникаций должны учитывать интенсивность, направленность и формы проявления русловых процессов, развитие которых создает угрозу нарушения работы водозаборов и водовыпусков, разрушения береговых объектов, обмеления судовых ходов, возникновения аварийной обстановки на мостовых и подводных переходах.

По длине реки происходит постоянное изменение условий руслоформирования, вследствие чего одни участки практически безопасны для функционирования хозяйственной инфраструктуры, в пределах же других требуется регулирование русла для обеспечения надежности объектов, предотвращения опасных проявлений русловых процессов, выполнения берегозащитных и дноуглубительных работ.

При перспективном планировании водохозяйственных мероприятий, дноуглубительных и регуляционных работ не менее важным является выделение участков реки по сложности русловых деформаций, их интенсивности и опасности для функционирования речной и береговой хозяйственной инфраструктуры.

Среди крупных рек наиболее опасными для инженерных объектов и сооружений являются реки, протекающие в условиях свободного развития русловых деформаций, где русла формируются в рыхлых песчаных, супесчаных, легко суглинистых и лессовидных отложениях. Увеличивает вероятность опасности от размыва берегов также режим естественной аккумуляции наносов в реках, снижающий устойчивость русел. Опасным в отношении русловых процессов (4 балла) является верхняя и средняя Обь, нижний Амур, Лена частично в среднем (особенно от района г. Якутска до устья Алдана) и нижнем течении.

По длине реки Лены изменяются параметры русла и условия его формирования. Одни участки с точки зрения русловых процессов безопасны для эксплуатации, другие требуют регулирования для улучшения условий судоходства и водохозяйственной обстановки, выполнения берегозащитных работ и т. д. Трудности использования реки и ее ресурсов обусловлены разветвленностью русла и его сложными переформированиями на одних участках, выходами скальных пород в русле и галечно-валунным составом наносов на других, снижением глубин ниже гарантированных и стеснением русла скалами на третьих.

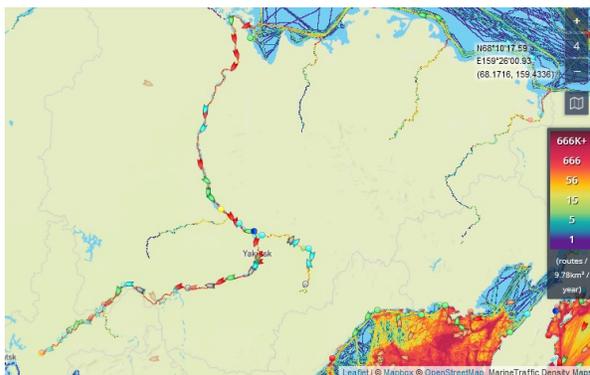


Рисунок 5.2. Перемещение судов различного типа по р.Лена

Как видно из рисунка 5.2 (данные взяты с сайта Marine Traffic), на реке Лена речное судоходство очень развито, несмотря на вышеизложенные трудности при эксплуатации данного внутреннего водного пути.

Перспективное планирование водохозяйственных и водотранспортных мероприятий, разработка проектов управления русловыми процессами основываются на оценке морфодинамической сложности участков русла, определяющей состав гидротехнических работ, технико-экономическую эффективность проектов и возможные инвестиции в их реализацию. Для успешного планирования этих работ важно ранжирование участков реки по сложности морфологии русла и русловых деформаций.

Для оценки сложности и опасности проявлений русловых процессов, влияющих на водохозяйственное и транспортное использование реки, предложена методика, основывающаяся на анализе соотношения критериев, характеризующих устойчивость русла, состав руслообразующих наносов, морфодинамический тип русла, водность реки, условия прохождения руслоформирующих расходов воды, распространенность и количество перекатов.

Новые информационные технологии затрагивают все отрасли, обладающие большим научно-техническим и инновационным потенциалом, в том числе и судоходство. Однако для того, чтобы оно оставалось эффективным и соответствовало требованиям времени, нужна современная трансформация традиционных бизнес-процессов, эволюция морских информационных систем. Среди морских информационных систем существенная роль принадлежит гидрометеорологическим станциям, предоставляющим необходимые для навигации кораблей и работы других систем корабельного вооружения данные о состоянии окружающей среды. Эта информация, как правило, отправляется в базы данных гидрометеорологических центров.

Морская отрасль должна перейти к внедрению общей «умной» экосистемы для обеспечения взаимодействия и поддержки принятия решений: единой платформы для масштабного управления движением флота. С ее помощью будут упорядочены потоки информации между различными, до того разрозненными элементами данной экосистемы: экипажем на борту судна, службой управления флотом, портовыми операторами, персоналом службы движения судов и учебными центрами.

Поэтому одной из основных сегодняшних задач, с которой приходится сталкиваться морской отрасли – это необходимость адаптации к цифровой эпохе. Одним из направлений на пути реализации широких возможностей современной вычислительной техники в морском деле стали навигационные информационные системы с отображением электронной навигационной карты. Они предоставляют пользователю информацию в

наиболее удобном виде, позволяют повысить оперативность и точность решения традиционных задач.

Интегрированные навигационные информационные системы управления судном открывающие еще более широкие возможности по обеспечению безопасности плавания, автоматизации процесса судовождения, снятия с судоводителя значительной части физической и психологической нагрузки. Внедрение таких интегрированных систем является важным средством снижения аварийности флота по вине человеческого фактора.

Еще одним из важнейших направлений развития морских информационных систем на фоне стремительного развития вычислительной техники в современных условиях является развитие географических информационных систем (ГИС) и ГИС-технологий. Географические информационные системы – это новое мировоззрение, построенное на пространственном мышлении с помощью вычислительной техники, сочетающая теорию, методы и традиции классической картографии и географии с возможностями и аппаратом прикладной математики, информатики и компьютерных технологий.

Для экономического развития территорий, занимаемых объектами морской инфраструктуры, необходимы четкие и конкретные управленческие решения, чему содействуют на всех уровнях в области морской деятельности информационные технологии. Благодаря ГИС появилась возможность улучшения эффективности мониторинга состояния акватории, решения различных проектных задач, связанных с усовершенствованием проектирования и эксплуатации гидротехнических сооружений, в том числе причалов. ГИС технологии находят все большее применение в инженерном проектировании, как для выполнения оперативных расчетов и оценки состояния водных ресурсов, так и для изучения и анализа гидрологического режима водных объектов, а также для построения цифровых моделей рельефа.

## Список литературы

1. Антроповский В.И. Морфология долин и деформации русел рек в карстовых районах Европейской части России // Труды V конференции «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей». М.: ИВП РАН. 1999.
2. Барышников Н.Б. Антропогенное воздействие на русловые процессы -Л.: Изд-во ЛГМИ, 1990.
3. Барышников Н.Б. Морфология, гидрология и гидравлика пойм.- Л.: Гидрометеиздат, 1984.
4. Барышников Н.Б., Самусева Е.А. Антропогенное воздействие на саморегулирующуюся систему бассейн- речной поток- русло –СПб, изд-во РГГМУ, 1999.
5. Барышников Н.Б., Попов И.В. Динамика русловых потоков и русловые процессы - Л.: Гидрометеиздат, 1988.
6. Беновицкий Э.Л. О коэффициенте гидравлического трения по границе заросшей высшей водной растительности в открытых руслах. «Водные ресурсы» з, «Наука», 1991г., с.71-75
7. Беркович К.М., Чалов Р.С., Чернов А.В. Экологическое русловедение – М: ГЕОС, 2000.
8. Большаков В.А., Векшина Т.В. Гидравлические сопротивления и учет стока при зарастании русел рек водной растительностью//Перспективы развития науки и образования: сборник научных трудов 31 марта 2016 г. по материалам III международной научно-практической конференции/ Под общ. Ред. А.В. Туголукова – Москва: ИП Туголуков А.В., 2016 – 259с.
9. Боровков В.С. Русловые процессы и динамика потоков на урбанизированных территориях -Л.: Гидрометеиздат, 1989.
10. Векшина Т.В. Гидравлические сопротивления и учет стока зарастающих рек – Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук/Санкт-петербург, 2004.
11. Векшина Т.В. Гидравлические сопротивления русел рек, зарастающих растительностью // Учёные записки Российского государственного гидрометеорологического университета № 15. Научно-теоретический журнал. – СПб.: изд. РГГМУ, 2010. – С. 19-26.
12. Векшина Т.В., Большаков В.А. Математическая модель влияния зарастания на гидравлические сопротивления речных русел // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право / Вып. 3 (21) / Под ред. д.т.н.,

- проф. Истомина Е.П. – СПб.: ООО «Андреевский издательский дом» – 2017. – С. 145-147
13. Великанов М.А. Динамика русловых потоков -М.: Гидрометеоздат, 1954.Т1, М.: Гидрометеоздат 1955, Т2.
  14. Владимиров А.М. и др. Экологические аспекты использования и охраны водных ресурсов. Изд. РГГМИ, С-Пб 1997.
  15. Голосов В.Н. Перераспределение наносов в верхних звеньях флювиальной сети земледельческих регионов: теория вопроса и опыт регионального анализа (на примере равнин умеренного пояса) В сб. «Эрозия почв и русловые процессы» вып.13, изд. МГУ, 2001, с.94-119.
  16. Гончаров В.Н. Основы динамики русловых потоков -Л.: Гидрометеоздат, 1954.
  17. Гришанин К.В. Гидравлические сопротивления естественных русел -Л.: Гидрометеоздат, 1992.
  18. Жадин В.И., Герд С.В. Реки, озера и водохранилища СССР их фауна и флора – М: Государственное учебно-педагогическое издательство министерства просвещения РСФСР, 1961.
  19. Знаменская Н.С. Гидравлическое моделирование русловых процессов --Л.: Гидрометеоздат, 1992.
  20. Исаев Д.И. Особенности подрусловых потоков при грядовом режиме наносов //Проектирование, строительство и эксплуатация гидротехнических сооружений водных путей. 14-15 ноября 2017 г. Сборник материалов юбилейной международной научно-практической конференции, посвященной 110-летию создания гидротехнической лаборатории имени профессора В.Е. Тиманова. – СПб.: Изд-во ГУМФ им.Адм.С.О. Макарова, 2017, 364с., С.286-291.
  21. Карасев И.Ф. Речная гидрометрия и учет водных ресурсов -Л.: Гидрометеоздат, 1980.
  22. Карасев И.Ф. Русловые процессы при переброске стока --Л.: Гидрометеоздат, 1975.
  23. Карасев И.Ф. Эколого-гидрологические характеристики водного режима рек. Ж. «Гидротехническое строительство», 1997, № 5, с. 40-45.
  24. Карасев И.Ф., Коваленко В.В. Стохастические методы речной гидравлики и гидрометрии.- СПб.: Гидрометеоздат, 1994
  25. Кондратьев Н.Е., Попов И.В.,Снищенко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса -Л.: Гидрометеоздат, 1982.
  26. Константинов А.С. Общая гидробиология – М: Высшая школа, 1986.
  27. Макковеев М.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М., 1955.

28. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности. Ч. 1 – М.: Наука, 1967.
29. Наставление по изысканиям и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки (НИМП –72).-М.: Транспорт, 1972.
30. Ржаницын Н.А. Морфологические и гидрологические закономерности речной сети.- Л.:Гидрометеоиздат, 1960г.
31. Фашевский Б.В. Основы экологической гидрологии. Минск,1996.
32. Чалов Р.С. Общее географическое и инженерное русловедение: предмет исследований и положение в системе наук. Вестн. Моск. Ун-та. Сер.5, География. 1992, №6, с.10-16.
33. Чоу В.Т. Гидравлика открытых каналов –М.: Стройиздат, 1969.

## Содержание

Введение	стр.3
1. Экологическая напряженность и кризисные экологические ситуации	стр.5
1.1 Понятие «экология», «экологическое русловедение», общие задачи экологического русловедения	стр.5
1.2. Экологическая напряженность. Экологическая ситуация. Кризисная экологическая ситуация	стр.6
1.3 Необходимость комплексного подхода к оценке результатов антропогенного воздействия	стр.11
2.Русловые процессы	стр.16
2.1 Формирование стока наносов	стр.21
2.3 Основные положения гидроморфологической теории. Необратимые и обратимые деформации	стр.23
2.4. Гидрохимическая эрозия глинистых грунтов	стр.27
2.5 Фоновые и локальные прогнозы русловых процессов	стр.31
2.6 Современное состояние исследований гидравлических сопротивлений при зарастании русел	стр.32
3.Природные и антропогенные факторы экологической напряженности	стр.46
3.1.Природные факторы экологической напряженности	стр.46
3.2 Наводнения в Санкт-Петербурге	стр.48
3.2.1 Прогнозы наводнений	стр.51
3.2.2 Затопы льда на реке Неве	стр.52
3.3 Естественные русловые деформации как фактор экологической напряженности (опасные проявления русловых процессов)	стр.53
3.4 Руслоформирующие расходы	стр.62
4. Антропогенное воздействие на русловые процессы. Гидротехнические сооружения	стр.66
4.1 Воздействие гидротехнических сооружений и водохозяйственных мероприятий в руслах и поймах рек на экологию и процесс	

саморегулирования исследуемой системы	стр.67
4.1.1 Воздействие регулирующих водохранилищ	стр.67
4.1.2 Воздействие мостовых переходов	стр.76
4.1.3 Воздействие карьеров в руслах и на поймах рек	стр.79
4.1.4 Дамбы обвалования и их влияние на экологию	стр.83
4.2 Проблемы русловых процессов при переброске стока	стр.86
5. Энерговооруженность человеческого общества и горючие ископаемые. Экологические последствия	стр.90
5.1. Экологическая напряженность за последние 50 лет. Экологическое равновесие между гидросферой, литосферой и атмосферой	стр.90
5.2 Загрязнение природной среды вредными веществами	стр.97
5.2.1 Загрязнения атмосферы	98
5.2.2 Влияние загрязнения атмосферы на человека, растительный и животный мир.	103
5.2.3 Загрязнение водной среды	стр.105
5.3 Русловой процесс как фактор самоочищения речного русла	стр.112
5.4 Загрязнение участков речного русла и вторичное загрязнение речной воды	стр.115
5.4.1 Подрусловое течение и диффузия примесей из загрязненных донных отложений в речную воду	стр.117
5.5 Понятие о теоретическом обосновании экологических аспектов русловых процессов	стр.119
5.6 Экологический отклик внутренних водных путей на судоходство	стр.120
Список литературы	стр.127

Учебное издание

*ВЕКШИНА ТАТЬЯНА ВИКТОРОВНА, канд. техн. наук*  
*БОЛЬШАКОВ ВЛАДИМИР АЛЕКСЕЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент*  
*КОРИНЕЦ ЕКАТЕРИНА МИХАЙЛОВНА, канд. техн. наук*

## **ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РУСЕЛ СУДОХОДНЫХ РЕК**

---

Подписано в печать 31.10.2022. Формат 60×84/16. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 8,25. Тираж 100. Заказ 132.

---

Выпущено ООО «Медиапапир»  
с готового оригинал-макета, предоставленного заказчиком.  
194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 28, литера А,  
помещ. 3-н, ком. 184, 185, 188, 192, 193, 194. Тел.: (812) 987-75-26  
mediapapir@gmail.com www.mediapapir.com www.mediapapir.ru