

*В. И. Антроповский, О. А. Шелухина*

**ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ГИДРОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ  
ТЕОРИИ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ  
ПРИ ПРЕОБРАЗОВАНИИ РЕЧНЫХ СИСТЕМ**

[Выполнена по гранту РФФИ (проект 06-05-64997)]

*Излагаются положения гидролого-морфологической теории русловых процессов рек, преобразованных хозяйственной деятельностью человека. Отмечаются особенности русловых деформаций на участках указанных рек и возможные методы их расчета и прогноза.*

*V. Antropovsky, O. Shelukhina*

**BASIK CONCEPTS OF HYDROMORPHOLOGIKAL THEORY OF CHANNEL PROCESSES DURING RIVER SYSTEMS TRANSFORMATION**

*The concepts of hydromorphological theory of channel processes in rivers transformed by human activity are presented; specific features of channel in some reaches of such rivers are described; possible methods for computation these channel changes are given.*

В процессе хозяйственной деятельности вместо естественных речных систем создаются водохозяйственные системы рек и каналов [1, 2]. Для оптимального проектирования, создания и успешной эксплуатации водохозяйственных систем необходимы прогнозы русловых переформирований. Особенности указанных прогнозов (большая заблаговременность, необходимость рассмотрения протяженных участков водотоков, даже целых рек и речных систем, возможность использования лишь имеющихся материалов, ограниченность сроков составления в условиях многостадийности и многовариантности проектирования) определяют использование в первую очередь гидролого-морфологических методов прогнозирования. Представления о дискретности, структурности русловых форм и типизации руслового процесса, содержащиеся в гидролого-морфологической теории, позволяют детализировать отдельные ее положения применительно к новым условиям функционирования водотоков и значительно расширяют возможности прогноза русловых деформаций [3–5].

Законы русловых переформирований в преобразованных условиях остаются неизменными. Однако вследствие изменения основных руслоформирующих факторов (прежде всего стока воды и наносов) проявления русловых процессов претерпевают видоизменения и подлежат уточнению и конкретизации.

Действительно, изменение водности, режима стока воды и стока наносов приводят к изменению гидродинамических свойств потока (мощности, работы, производимой водным потоком, величин и распределения скоростей течения и гидродинамических сил, транспортирующей способности и т. д.). Русло и пойма в других масштабах участвуют во взаимодействии с потоком. С появлением новых базисов эрозии при создании гидроузлов возникают новые факторы, ограничивающие развитие русловых процессов, а ранее существовавшие в естественных условиях (выходы трудноразмываемых пород) — при новой водности и уровне режиме — оказывают иное влияние.

Русловой процесс в условиях измененного стока воды и наносов представляет собой однонаправленные изменения морфологического строения русла и поймы, сопровождающиеся обратимыми циклическими изменениями, сопутствующими новому гидрологическому режиму. Значительное развитие получают местные (локальные) деформации вблизи гидротехнических сооружений.

Резкое увеличение однонаправленных необратимых деформаций является, пожалуй, самой характерной особенностью руслового процесса рек с измененным стоком воды и наносов. В естественных условиях реки обычно находятся в состоянии, близком к динамическому равновесию, т. е. в состоянии, при котором обнаруживаются только обратимые деформации, определяющиеся транзитом наносов. Они бывают большими по величине и развиваются довольно интенсивно. Обратимость этих деформаций проявляется в периодической смене размывов намывами и наоборот.

При преобразовании рек и создании каналов однонаправленные необратимые деформации приобретают первостепенное значение и гораздо интенсивнее однонаправленных деформаций в естественных условиях, ощутимых в масштабах геологического времени. Обратимые циклические деформации развиваются на их фоне. Продолжительность развития необратимых деформаций, вызываемых хозяйственной деятельностью, измеряется в масштабах продолжительности существования инженерных сооружений и обычно составляет несколько десятков (иногда сотен) лет.

Сток наносов, являющийся внутренним содержанием русловых процессов [6–8], вследствие преобразований изменяется. Это определяется новыми условиями его формирования на водосборе и, что особенно важно, — появлением однонаправленных эрозионно-аккумулятивных процессов непосредственно в пределах речных участков, ограниченных гидротехническими сооружениями. Например, в реках-водоприемниках наносы поступают не только из верхних звеньев гидрографической сети. Они начинают поступать и за счет необратимой эрозии, вызываемой изменением режима и увеличением мощности потока, лишенного в значительной мере наносов. В реках-донорах, вследствие уменьшения стока воды, происходит снижение мощности потока и перегрузка его наносами. Транзит и одновременно, в какой-то мере, регулирование стока наносов [9, 6] осуществляются посредством сопутствующих обратимых деформаций.

Проявлением регулирования стока наносов является, в частности, общеизвестный факт размыва плесов и намыва гребней перекатов в период половодий и паводков и обратный процесс — в период межени. По мнению И. Ф. Карасева, есть объективные основания считать, что чередование плесов-перекатов и связанная с ним неравномерность движения потока представляет естественный оптимум, обеспечивающий минимум потерь энергии.

Анализ условий поступления, транзита наносов и аккумуляции имеет важное значение при исследовании деформаций преобразованных и искусственных водотоков. Здесь находят проявление так называемые «закон взаимосвязи и взаимообусловленности видов эрозионно-аккумулятивных процессов» и «закон единства эрозионно-аккумулятивного процесса» [10–12].

Меняется состав и соотношение донных и взвешенных наносов. При одностороннем размыве, например, в нижних бьефах гидроузлов и в реках-водоприемниках часть донных наносов переходит во взвешенные. При отложении наносов (например, на реках-донорах), наоборот, часть взвешенных наносов переходит в донные. Это объясняется перераспределением, а в случае отъемов стока или увеличения водности — и существенным изменением гидродинамических сил, действующих в придонном слое и толще потока.

При преобразовании рек меняется соотношение между пойменными и русловыми процессами [13, 14]. В естественных реках, как правило, количество наносов, попадающих в русло вследствие подмыва пойменных берегов, равно количеству наносов, оседающих на пойме в виде наилка. На преобразованных реках этот баланс нарушается и происходит перестройка поймы. На реках-донорах (с изъятием стока) вследствие понижения уровня воды обычно происходит осушение пойм. Поймы перестают играть прежнюю роль регулятора стока половодий и высоких паводков и во многом теряют свои ценные, с точки зрения сельского хозяйства, качества. В русле обычно начинает преобладать глубинная эрозия. На реках-водоприемниках, наоборот, — дно долины (вместе с поймой) затапливается и превращается в русло более многоводной реки [3, 4, 15].

Саморегулирование рек с измененным стоком воды и наносов проявляется в наиболее яркой форме [9, 16]. Саморегулирующимися, как известно, считаются механические и придонные системы, способные путем внутренней перестройки продолжать выполнение своих функций при ограниченных изменениях внешних условий, в которых они развиваются. Посредством механизма саморегулирования происходит формирование нового русла. При незначительном изменении гидрологического режима река сохраняет свои осредненные гидравлические и морфометрические характеристики [5, 17, 18]. При более существенных изменениях гидрологического режима река изменяет эти характеристики, но еще сохраняет тип русловых процессов. При очень сильных нарушениях режима происходит изменение не только общих осредненных параметров, но и характера русловых процессов. Исключение представляют участки рек с морфологическими и гидравлическими характеристиками, близкими к критериальным, т. е. граничным для двух смежных типов русловых процессов. В этом случае русло находится в неустойчивом состоянии и возможно изменение типа русловых процессов даже при незначительных изменениях гидрологического режима и осредненных характеристик.

Посредством перестройки русла и поймы река стремится вернуться в состояние динамического равновесия. При этом находят проявление прямая и обратная связи во взаимодействии процессов эрозионно-аккумулятивного комплекса [6, 11]. Например, регулирование вызывает изменение основных руслоформирующих факторов: стока воды, наносов и, как следствие, — транспортирующей способности потока [15, 16]. В соответствии с новой транспортирующей способностью потока перестраиваются русло и пойма в бьефах гидроузлов. Вследствие изменения базисов эрозии происходит переформирование верхних частей зарегулированных рек и притоков, выражающееся в изменении продольного уклона, плановой формы и поперечных сечений рек. Отмеченные переформирования, в свою очередь, могут сказаться на поступлении наносов из первичной гидрографической сети и со склонов бассейна.

Общим для решения задач русловых деформаций в естественных и преобразованных условиях является то, что их можно (и следует) рассматривать на каждом структурном уровне самостоятельно. На каждом из этих уровней действуют свои законы и требуются свои методы исследования [18, 7, 8]. Структурность в русловом процессе (иерархия дискретных русловых форм) обуславливает и соответствующие системы исследования и прогнозирования. Наиболее важным, с точки зрения хозяйственных запросов, является исследование мезоформ и макроформ русловых и пойменных образований. Для исследования и прогнозирования состояния мезоформ и морфологически однородных участков (представляющих собой цепь макроформ) изучение поведения отдельных частиц наносов и мелких гряд — микроформ — не обязательно. Задачи могут решаться методами гидрологии и геоморфологии. Возрастает роль и значение гидролого-морфологического направления исследований.

Получить какой-либо обобщенный количественный показатель, характеризующий степень преобразований, пока затруднительно. По-видимому, он должен отражать изменение баланса стока воды и наносов. В то же время для каждого класса преобразованных рек может быть разработана своя система показателей особенностей стока воды и наносов. Так, для рек с зарегулированным стоком важными характеристиками при рассмотрении русловых переформирований являются максимальные расходы воды, сбрасываемые в нижний бьеф гидроузла, продолжительность их пропуска и коэффициент зарегулированности стока. Для рек-доноров дополнительно необходимо знать коэффициент водозабора [19]. Аналогично для рек-водоприемников может быть использован коэффициент водоприема, а для антирек — коэффициент подачи воды в обратном направлении, вверх по реке. По-видимому, для каждого класса преобразованных рек возможно построение связей (зависимостей) характеристик пропускной способности и руслового процесса с определяющими факторами, в том числе и с указанными показателями.

Очень важной частью научного обобщения, особенно на эмпирической стадии развития науки, является классификация (типизация) русловых процессов. Она в какой-то мере заменяет отсутствие строгих теоретических методов. При каждом типе руслового процесса имеет место своя схема развития деформаций, что имеет прогностическое значение. Типизация русловых процессов ГГИ [7, 8] является достаточно детальной и широко применяется при рассмотрении обратимых деформаций. При рассмотрении искусственных и преобразо-

ванных рек эту типизацию целесообразно использовать совместно с динамической классификацией А. В. Караушева и И. Ф. Карасева, учитывающей направленность процесса.

При рассмотрении русловых процессов рек с нарушенной хозяйственной деятельностью гидрологическим режимом используются классификация гидротехнических сооружений по степени влияния на русловые процессы Б. Ф. Снищенко [7], а для земляных каналов — гидрологическая классификация В. С. Алтунина [20].

В условиях всеобъемлющего и разностороннего характера преобразований полезны комплексная водохозяйственная классификация водотоков и водохозяйственное районирование [3–5].

В водохозяйственных системах вода подается по соединительным каналам с помощью насосных станций из рек-доноров в реки-водоприемники. Некоторые участки рек-доноров используются для переброски воды в обратном направлении и превращаются в антиреки. Звенья водохозяйственных систем, выполняющие одни и те же функции, представлены в виде соответствующих классов водотоков.

Указанные комплексная водохозяйственная классификация и водохозяйственное районирование учитывают одновременно природные признаки водотоков и влияние хозяйственной деятельности. Водотоки в них сгруппированы по характеру и степени преобразований с учетом их физико-географических особенностей применительно к составлению типовых русловых задач и разработке соответствующих им схем расчета и прогноза русловых деформаций. Классификация и районирование могут использоваться при разработке типовых комплексов гидротехнических сооружений и создании системы инженерных мероприятий по регулированию и стабилизации русловых процессов в звеньях водохозяйственных систем. Они позволяют перейти к разработке методов управления русловыми процессами.

Каждому классу (типу) преобразованных водотоков свойственна определенная схема развития однонаправленных необратимых деформаций, заканчивающаяся созданием определенной формы русла. Модификации конечной формы объясняются различиями типа русловых процессов рек в естественном состоянии и различиями степени и вида преобразований.

Схема классификации русловых процессов рек в преобразованных условиях представлена в работе [19] в виде таблицы, где по горизонтали расположены классы рек по видам и степени преобразований (согласно водохозяйственной классификации), а по вертикали — типы русловых процессов (согласно типизации ГГИ), характеризующие обратимые русловые и пойменные деформации. Таким образом, клетки этой таблицы соответствуют всем известным типам русловых процессов для каждого класса рек. Особенности русловых процессов в каждом отдельном случае отражены с помощью индексов. При этом прописными буквами обозначен класс участка реки с определенной направленностью процесса, а цифрами — тип обратимых русловых деформаций. В таблице представлены индексы русловых процессов для более или менее изученных классов преобразованных рек (в числителе — при сравнительно небольшом изменении основных руслоформирующих факторов; в знаменателе — индексы наиболее вероятного руслового процесса при смене типа обратимых деформаций). По

мере развития исследований преобразованных рек заполнение таблицы индексами будет продолжено. Предложенная классификация обладает свойством открытости. Имеется возможность дополнять ее и развивать дальше.

Примером преобразованных рек могут служить реки с зарегулированным стоком, реки-доноры и реки-водоприемники. При рассмотрении однонаправленных необратимых деформаций выявляются дискретные русловые образования, специфические для каждого вида (класса) преобразованных водотоков.

При регулировании стока участки рек, оказывающиеся в нижних бьефах гидроузлов, превращаются в канализованные реки. По гидравлическому режиму, морфологии русловых форм и гидравлике потока они занимают промежуточное положение между каналами и реками. На участках рек в нижних бьефах гидроузлов, особенно на равнинных реках, обычно образуется приплотинная яма размыва с нижерасполагающимся повышением дна вследствие отложения наиболее крупнозернистых наносов, вымываемых из ямы. В местах впадения незарегулированных притоков, как правило, появляются значительные грядобразные скопления наносов, приводящие к наращиванию существующих и к образованию новых перекатов. В верхних бьефах, в зоне выклинивания подпора вследствие усиления плановых деформаций и отложения наносов часто образуются осередки и острова. Донные наносы перемещаются в виде грядообразных скоплений типа устьевых баров (как называемое «тело занесения»). Специфические дискретные образования выделяются и при рассмотрении других классов преобразованных и искусственных водотоков.

На реках-водоприемниках происходит саморазмыв первичных русел, играющих роль пионерных прорезей. При близком залегании к поверхности коренных трудноразмываемых пород возможно расширение водотока. Формируются новые русла большей пропускной способности с иным характером русловых процессов. Интересно при этом [10, 15], что поток, образовавшийся в результате слияния двух или нескольких потоков, может транспортировать принесенный ими материал при меньшем уклоне, чем уклон каждого из потоков до их слияния. Этим обосновывается известный в геоморфологии закон: *раз соединившиеся речные долины больше не разъединяются*.

На реках-донорах, вследствие отъемов воды, происходит заиление, занесение наносами водохранилищ и снижение интенсивности русловых процессов в нижних бьефах. При большом стоке наносов (например, на участках предгорных рек) по мере занесения водохранилищ низконапорных гидроузлов возможен «завал» нижних бьефов наносами.

Особый класс водотоков, бурное исследование которых началось в связи с мероприятиями по межбассейновой переброске стока, представляют большие земляные каналы, которые являются связующим звеном между каналами статического равновесия и реками с высокой степенью зарегулированности стока.

При создании водохозяйственных систем отдельные речные участки планируется эксплуатировать в режиме антиреки. Процессы, происходящие на антиреках, и их характеристики потока остаются практически не выясненными [15, 21].

Особенности русловых деформаций преобразованных водотоков различных классов определяют особенности оценки их деформаций — методик расчета и прогнозирования. Например, при расчете характеристик пропускной

способности и прогнозировании русловых деформаций рек-водоприемников наряду с балансовыми методами могут использоваться морфометрические и гидравлические зависимости, полученные для земляных каналов при саморазмыве. При аналогичной оценке рек-доноров применимы балансовые методы и морфометрические зависимости, используемые на предгорных реках с низконапорными гидроузлами при завале наносами их нижних бьефов.

С помощью указанных методов составлены прогнозы общих русловых переформирований на участках рек разного класса, подвергающихся преобразованиям [5, 13, 19, 22].

С целью изучения антирек некоторые исследователи возлагают большие надежды на русловые размываемые модели. Возможен другой путь — исследование рек с обратными течениями (Сухона, Волхов и др.), которые являются природными аналогами антирек. Опробованию подлежат все методы, способствующие в какой-то мере решению этой задачи.

Оценка возможных русловых деформаций в крупных земляных каналах может быть проведена посредством использования методов баланса наносов, лабораторного моделирования, аналогии и гидроморфологических зависимостей [3, 4, 5, 13, 19, 15].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Вендров С. Л. Проблемы преобразования речных систем СССР. Л., 1979.
2. Воронаев Г. В. Единая водохозяйственная система страны // Водные ресурсы. 1976. № 6. С. 99–109.
3. Антроповский В. И. О классификации и районировании русел преобразованных рек и каналов // Гидротехническое строительство. 1984. № 11. С. 28–34.
4. Антроповский В. И. Основные положения гидролого-морфологической теории руслового процесса при исследовании искусственных и преобразованных водотоков // Труды ЗапСибРег НИГМИ. 1985. Вып. 72. С. 85–98.
5. Антроповский В. И. Особенности оценки русловых переформирований в условиях преобразования рек // Труды V Всесоюзного гидрологического съезда. Т. 10. Кн. 1. Л., 1986. С. 294–301.
6. Караушев А. В. Общие и некоторые частные вопросы теории русловых процессов и склоновой эрозии // Труды ГТИ. 1972. Вып. 191. С. 5–22.
7. Кондратьев Н. Е., Попов И. В., Сущенко Б. Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л., 1982.
8. Кондратьев Н. Е. Русловые процессы рек и деформации берегов водохранилищ. СПб., 2000.
9. Антроповский В. И., Барышников Н. Б., Немчинов К. В. Влияние стока наносов, русловых процессов и ограничивающих факторов на саморегулирование в системе речной поток—русло // Восемнадцатое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов: Доклады и краткие сообщения. Курск, 2003.
10. Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М., 1955.
11. Маккавеев Н. И. Общие закономерности эрозионно-русловых процессов // Труды IV Всесоюзного гидрологического съезда. Л., 1976. Т. 10. С. 8–12.
12. Проблемы теоретической геоморфологии. М., 1988.
13. Антроповский В. И. Некоторые итоги исследования русловых процессов на зарегулированных реках и каналах // Труды Академии водохозяйственных наук. 1995. Вып. 1. С. 60–66.
14. Антроповский В. И., Барышников Н. Б., Саликов В. Г. Антропогенное воздействие на пойменные процессы // Девятнадцатое пленарное межвузовское координационное со-

вещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. Доклады и краткие сообщения. Белгород, 2004. С. 33–40.

15. Кузьмин И. А., Викулова Л. И. Проблема русловых процессов при переброске стока // Водные ресурсы. 1974. № 2. С. 49–61.

16. Россинский К. И., Кузьмин И. А. Некоторые вопросы прикладной теории формирования речных русел // Проблемы регулирования речного стока. 1947. Вып. 1. С. 88–130.

17. Антроповский В. И., Аверичкин О. Б., Мосин В. В. Методы исследования динамики речных русел и пойм на реках с измененным стоком воды и наносов // Известия РГО. 2003. Т. 135. Вып. 6. С. 73–78.

18. Антроповский В. И., Аверичкин О. Б., Мосин В. В. Методы исследования динамики русел и пойм рек с естественным режимом стока воды и наносов // Вестник географического факультета РГПУ им. А. И. Герцена. СПб., 2004. Вып. 4. С. 77–86.

19. Антроповский В. И. Русловой процесс преобразованных рек // Сборник работ по гидрологии. 1988. № 20. С. 163–170.

20. Алтунин В. С. Мелиоративные каналы в земляных руслах. М., 1979.

21. Знаменская Н. С., Ющенко Ю. С. Гидравлическое сопротивление в реках и антиреках // Труды ГГИ. 1980. Вып. 344.

22. Нежиховский Р. А., Антроповский В. И. Об оценке пропускной способности и русловых деформаций при территориальном перераспределении речного стока (на примере р. Шексны) // Труды ГГИ. 1987. Вып. 313. С. 31–48.