



### Глава 3. ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ (На примере системы поток - русло)

Регулирование речных русел является одним из немногих примеров управления геоморфологическими динамическими системами. Основные принципы регулирования русел могут быть положены в основу разработки методов управления другими процессами рельефообразования, происходящими на контакте движущихся сред разной плотности.

Под оптимальным регулированием функционирования системы *поток - русло* понимается создание устойчивого режима работы хозяйственного объекта, расположенного в пределах зоны влияния потока, при максимальном использовании естественной направленности русло-

вого процесса, минимальном ущербе другим хозяйственным объектам и природе, и, при соблюдении этих условий, минимуме капитальных вложений и эксплуатационных затрат. Главными принципиальными трудностями на пути такой оптимизации являются высокая динамичность системы *поток - русло*, множественность внешних факторов, влияющих на функционирование системы и наличие сложной внутренней организации системы.

В системе *поток - русло* происходит взаимодействие водного потока с размываемым руслом; это взаимодействие, по М.А.Великанову (1958), является сущностью руслового процесса. Оно выражается, с одной стороны, в трансформации поля скоростей и формировании в потоке сложного иерархического комплекса турбулентных вихрей, с другой - в русловых деформациях (переформированиях) и возникновении столь же сложного иерархически построенного комплекса форм руслового рельефа.

Одним из важных свойств руслового процесса является его двойственность. Рассмотрим некоторые ее проявления.

1) При взаимодействии потока и русла в неизменных гидравлических условиях *начальной неустойчивостью* (возможностью стать русловыми формами) обладают флуктуации отметок дна в широком диапазоне длин волн. Зародышами русловых форм становятся флуктуации таких длин волн, которые в начальный период развития обладают *максимальной неустойчивостью*, максимальными скоростями увеличения высоты и быстрее других достигают макроскопических размеров (Kennedy, 1963). Из них же в качестве русловых форм сохраняются лишь те, что в окончательный период развития приобретают состояние динамической устойчивости характерных размеров. Таким образом, при регулировании руслового процесса необходимо вызывать такие его изменения, которые на начальной стадии протекают максимально быстро, а затем затухают.

2) Наличие состояния *динамической устойчивости* характерных размеров русловых форм при заданных условиях протекания руслового процесса обуславливает ограниченность морфологических комплексов русловых образований (Великанов, 1958). Однако предельное разнообразие природных условий формирования речных русел, разная история развития рельефа речных долин приводят к значительному разнообразию морфодинамических типов речных русел. Это, с одной стороны, определяет принципиальную возможность управления русловым

процессом на основе изменения начальных и граничных условий, а с другой - создает существенную неопределенность результата регулирования при неполном учете руслоформирующих факторов.

3) В результате взаимодействия потока и его размываемого ложа формируется единый континуум русловых форм, характеризующихся непрерывным спектром характерных размеров. Одновременно этот континуум обладает свойствами дискретности (Кондратьев, 1953): в нем объективно выделяются отдельные русловые формы, которые объединяются в иерархически построенные комплексы - структурные ячейки и структурные уровни. Их принадлежность к единому континууму обуславливает взаимовлияние отдельных форм и их комплексов через их взаимодействие с русловым потоком. Так как управление русловым процессом обычно проводится с целью изменения некоторой дискретной единицы руслового рельефа - русловой формы или комплекса русловых форм, необходим учет влияния на регулируемую часть всего остального руслового рельефа и наоборот.

4) Существование у руслового рельефа континуальных свойств связано с наличием единых законов, определяющих формирование и развитие всего континуума и возникновение общих для него закономерностей. В то же время объективные дискретные свойства и иерархическая организация структуры в силу принципа эмерджентности приводит к возникновению для разных комплексов русловых форм совершенно разных закономерностей их развития, например, разных типов связей морфологии русловых форм разных структурных уровней с определяющими факторами (Знаменская, 1984). Поэтому при регулировании руслового процесса на разных структурных уровнях русловых форм необходимо учитывать как возможность использования общих законов их развития, так и существование существенно отличных частных закономерностей.

5) Русловые деформации (переформирования) суть суммы изменений отметок размываемого ложа реки противоположных знаков - размыва и аккумуляции, протекающих одновременно на разных участках русла и сменяющихся во времени на одном участке. Так как регулирование руслового процесса обычно приводит к изменению интенсивности или даже направленности русловых деформаций, необходимо учитывать, что интенсификация деформаций одного знака на регулируемом участке русла приведет к интенсификации деформаций противоположного знака на сопряженном участке, а во времени вероятно

изменение знака деформаций русла.

Только учет двойственных, противоположных свойств руслового процесса может позволить осуществлять оптимальное регулирование функционирования системы *поток-русло*.

Целью регулирования руслового процесса обычно является закрепление на некоторый, заранее оговоренный, отрезок времени заданной морфологии русла и заданного поля скоростей, реже - заданного гидрологического режима и режима русловых деформаций. Основными способами регулирования являются: 1) редукция руслового процесса путем создания необходимой морфологии русла гидротехническими сооружениями; 2) активизация руслового процесса путем изменения либо морфологии русла, либо скоростей для достижения устойчивости необходимой морфологии русла с помощью самого потока; 3) создание искусственного русла с заданными параметрами. Обычно в практике регулирования русел применяется сочетание этих способов.

Редукция руслового процесса осуществляется либо путем армирования русла тяжелыми гидротехническими сооружениями, либо путем создания бейшлотов и водохранилищ, и в целом является эффективным способом регулирования русел. Армирование русел имеет природный аналог - слабоизменяющиеся врезанные в скальные породы русла, и исторически начало применяться раньше других методов. Известно большое количество приемов строительства берегоукрепительных сооружений, с появлением новых материалов и технологий они совершенствуются. Армирование всего русла реки, и берегов, и дна, в XIX веке применялось сравнительно редко на некоторых средних реках Западной Европы (Водарский, 1939), в настоящее время на протяженных участках естественных русел вообще не применяется. Обычно осуществляется частичная редукция руслового процесса на одном из структурных уровней. Так, редукция руслового процесса на уровне макроформ - строительство набережных - осуществлено в большинстве городов, расположенных на берегах рек. Отдельные элементы стабилизации руслового рельефа жесткими креплениями присутствуют практически во всех гидротехнических сооружениях.

При редукции руслового процесса путем стабилизации лишь части русла следует иметь в виду неоднозначность реакции русловых форм разных структурных ячеек и уровней на одни и те же изменения в системе *поток - русло* (4-е свойство системы). Так, стабилизация

руслового рельефа на структурном уровне макроформ может привести к активизации русловых переформирований на уровне мезоформ. Например, закрепление берегов слабоизвилистого русла р. Вислы (Польша) продольными сооружениями в конце XIX в. привело к отторжению от берегов побочной, переформированию их в осередки и увеличению скорости их смещения вниз по реке. Стабилизация мезоформ — это уменьшение активной ширины русла, размыв вогнутых берегов, то есть активизация переформирований макроформ руслового рельефа. Одновременно увеличивается глубина русла и скорость потока, это приводит к увеличению размеров и скорости смещения микроформ. Примером является закрепление побочной р. Бразос (США) в начале XX в. тамариском, в результате чего резко уменьшилась пропускная способность русла и начались наводнения в долине реки. Стабилизация микроформ — создание искусственной шероховатости русла, обычно применяется в каналах и быстротоках для уменьшения скоростей течения. При регулировании естественных водотоков применяется редко. Теоретические исследования, проведенные Б.А. Шуляком, показывают, что созданием закрепленного микрорельефа в потоке можно активизировать смещение частиц наносов, так как при этом происходит увеличение придонных скоростей над гребнями гряд на 10–30 %.

Практически полностью и на всех структурных уровнях руслового рельефа редукция руслового процесса достигается сооружением систем плотин со шлюзами, с помощью которых свободная река превращается в серию тиховодных подпорных бьефов. На шлюзованных реках достигаются значительные габариты судоходных путей, водохранилища часто имеют комплексное назначение, поэтому этот метод регулирования русел также применяется очень давно. Этим методом достигнуто регулирование как небольших (например р. Северский Донец), так и крупных рек (р. Миссисипи выше Огайо, р. Волга). В результате создания подпорных бьефов русловые процессы в их чистом виде практически не проявляются, преобладает аккумуляция наносов и волновая переработка берегов.

Метод редукции руслового процесса удобен своей простотой и эффективностью, поэтому он достаточно широко применяется. Однако его нельзя назвать оптимальным. Реализация этого метода приводит к изменению сущности природного объекта — реки. При армировании русел делается попытка уничтожить главное свойство системы поток — русло — взаимодействие элементов. Оно замещается односторонним

воздействием неразмываемого русла реки на поток. При этом, если конфигурация и размеры жесткого русла не будут соответствовать гидравлическим характеристикам потока, сооружения окажутся в неустойчивом режиме и постоянно будут подвергаться опасности разрушения потоком.

При шлюзовании река исчезает как таковая, заменяется цепочкой слабopроточных прудов, при этом ухудшается качество вод. Габариты судовых ходов при этом жестко закрепляются, и в случае потребности их увеличения система шлюзов должна реконструироваться. Редукция руслового процесса требует больших капитальных вложений и значительных эксплуатационных расходов.

Метод регулирования системы *поток - русло* путем активизации руслового процесса имеет не менее продолжительное применение. Это сооружение многочисленных водостесняющих дамб и полу-запруд на реках Западной Европы в XVIII-XX вв., перекрытие несудоходных рукавов рек, строительство струенаправляющих дамб и т.п. (Водарский 1939). Наиболее последовательно этот метод реализовался в России в XIX в. инженерами-путейцами для обеспечения судоходных условий на крупных русских реках, где невозможно было применение западноевропейского опыта. В начале XX в. В.М.Лохтиным и Н.Е.Лелявским были обоснованы методы выправления рек путем использования энергии потока, а Н.П.Пузыревским, В.Е.Тимоновым и В.Г.Клейбером - дноуглубление в тех же целях. Эти два основных подхода были в дальнейшем синтезированы в трудах советских гидротехников и специалистов по русловым процессам - М.В.Потапова, Н.И.Маккавеева, А.И.Лосиевского, Н.А.Ржаницына, В.В.Дегтярева, Р.С.Чалова.

Теоретической основой метода активизации руслового процесса является свойство системы *поток - русло* формировать устойчивые морфологические комплексы на базе малых изменений неустойчивых элементов рельефа русла и динамических структур потока, и единство аккумуляции и размыва. Технически активизация руслового процесса - это спрямление изгибов русла; отторжение побочной и кос; разработка капитальных прорезей для перераспределения стока воды по рукавам или по ширине русла; приведение русла к высокому коренному берегу; производство землечерпательных работ для местного увеличения (или уменьшения) скоростей и глубин потока; сооружение бун и создание искусственной шероховатости для увеличения интенсивности аккумуляции; возведение струенаправляющих, водостесняющих,

водораслаивающих и наносоуправляющих сооружений; перекрытие рукавов в многорукавных руслах; периодическое уничтожение отмости на дне потока; изъятие наносов из зон интенсивной их аккумуляции по наносотсасывающим прорезям и обводным каналам и т.п. Все эти мероприятия обычно не требуют предварительного знания конкретных параметров формируемого русла - достаточно правильно оценить тенденцию развития русловых деформаций и критические размеры русла. Однако это не означает, что метод активизации руслового процесса не требует существенного теоретического обоснования - именно при его применении требуется знание тонкостей взаимодействия потока и русла, для того, чтобы направить русловой процесс в необходимую сторону. Так, Н.И.Маккавеев формулирует следующие общие позиции, которые следует учитывать при трассировании прорезей на судоходных реках: рельеф русла, поймы и коренных берегов; режим переформирования русла на данном участке реки; расположение при руслоформирующем расходе воды зон ускорения и замедления течения (спада и подпора) по ширине и длине русла; особенность возникновения местных циркуляционных течений в потоке; источники поступления в русло наносов (или наоборот - осветленной воды) /Доманевский и др., 1956/; пути перемещения скоплений наносов; характер грунта берегов и дна. В каждом конкретном случае необходим учет и возможных специфических условий руслового процесса. Большое количество типичных сочетаний морфологии русла и определяющих русловой процесс факторов с рекомендуемыми комплексами выправительных сооружений разработано Н.И.Маккавеевым и его сотрудниками (Проектирование..., 1964).

Общими принципами, которыми следует руководствоваться при применении метода активизации руслового процесса являются стимулирование деформаций противоположного знака и перенос деформаций нежелательной направленности в другое место русла. Так, например, при активном размыве вогнутого берега излучины можно расположить вдоль берега наброску из бетонных тетраэдров, "дикобразов" или "сипаев" для увеличения шероховатости и стимулирования аккумуляции наносов; можно создать системами струнаправляющих сооружений поперечную циркуляцию противоположного знака и также стимулировать аккумуляцию наносов; можно спрямить излучину и перенести процессы размыва в спрямляющий прскол; можно осуществлять у вогнутого берега искусственный гидронамыв; можно осуществить подрезку

выпуклого берега; можно создать зону аккумуляции у вогнутого берега системой бун и т.д. Столь большое разнообразие способов регулирования русла позволяет в каждом конкретном случае выбрать наиболее эффективный и дешевый вариант системы сооружений. При активизации руслового процесса можно стимулировать переформирования всего иерархического комплекса русловых форм, так что морфология русла на разных структурных уровнях изменится согласованно. Однако и здесь следует иметь в виду разную скорость, а иногда и знак русловых деформаций для русловых форм на разных этажах их сложной структуры. Гораздо чаще применяются способы выправления русел, сочетающие редукцию руслового процесса на одних структурных уровнях руслового рельефа с активизацией его на других структурных уровнях. Так, Н.С.Лелявским был предложен метод выправления русла путем укрепления подмываемых берегов на излучинах. При этом активизируется русловой процесс на уровне микроформ, увеличивается расход наносов на участке выправления и увеличиваются глубины русла. Применение этого способа существенно уменьшает объемы эксплуатационного землечерпания для поддержания судоходных глубин и предохраняет постройки вдоль берегов рек от размыва.

Следует учитывать также обязательную согласованную активизацию русловых деформаций противоположного знака на других сопряженных участках русла, предусматривать влияние этих наведенных деформаций на хозяйственные сооружения. В отдельных случаях, когда активизация руслового процесса приводит к избыточным деформациям, приходится применять последующую искусственную стабилизацию руслового рельефа. Так, на реках Западной Европы, где проводилось массовое выправление русел двухсторонним стеснением полузапрудами, необходимо было укрепление дна рек полосами каменной наброски. В таких случаях методы активизации и редукции руслового процесса фактически переходят один в другой.

При регулировании функционирования системы *поток - русло* методом активизации руслового процесса максимально может быть использован оптимальный путь управления системой - использование собственной энергии системы и возможность малого изменения ее природных свойств. Однако неразработанность многих разделов теории руслового процесса приводит к тому, что строительство выправительных сооружений, особенно на крупных реках со сложным русловым режимом сопряжено со значительным риском - вместо возбуждения проектируе-

ных русловых переформирований могут возникнуть незапланированные и нанести значительный ущерб. Поэтому активизация руслового процесса на средних реках проводится осторожно, в несколько этапов, с последовательным достижением необходимого эффекта и исправлением сопутствующих выправлению ошибок. На крупных же реках в основном применяется самый простой и безопасный способ - транзитное и эксплуатационное землечерпание.

При высокой интенсивности русловых переформирований в естественном русле их регулирование средствами современной техники нецелесообразно, так как требует высоких капитальных и эксплуатационных затрат и ведет к полной трансформации русла. В этих условиях оптимальным является создание искусственного русла (канала), расположенного рядом с естественным и питающегося водой из него. Аналогичное решение принимается в случае отсутствия подходящего естественного водотока для ирригации, судоходства, водоснабжения в данной местности. В таком канале можно создать удобный для хозяйственных нужд гидрологический и русловой режим.

Опыт создания ирригационных и судоходных каналов насчитывает тысячелетия (ирригационные каналы Египта и Двуречья, судоходный канал Сесостриса I). При их проектировании решались две взаимосвязанные проблемы: выбор размеров канала, достаточных для пропуска необходимого количества воды и (или) судов заданных габаритов, и обеспечение малой заносимости каналов. Обе проблемы решались и в настоящее время решаются подбором "устойчивых" при заданном расходе воды ширины и глубины канала и обеспечения в канале "незаиляющей" скорости потока. Теоретической основой этого пути является принцип ограниченности морфологических комплексов и основанные на нем метод гидравлико-морфологических зависимостей (в СССР) и режимная теория (в англо-американской литературе). Однако, в силу разнообразия природных факторов, определяющих начальные и граничные условия описывающих русловой процесс уравнений, для предвычисления устойчивых параметров искусственного русла часто недостает информации и эти параметры рассчитываются неверно. Влияние многих существенных факторов руслоформирования, например, гидрологического режима, только начинает осмысливаться.

Гораздо более целесообразным представляется путь создания в крупных каналах удобного для их эксплуатации руслового режима, который обеспечивал стабильность макроформ, локальную устойчивость

мезоформ (в местах расположения водозаборных и других подобных сооружений) и максимально активное перемещение микроформ, влекомых и взвешенных наносов. При наличии судоходства должны выдерживаться габариты судового хода. Наибольшую сложность представляет собой решение первой задачи, так как здесь необходима запланированная редукция руслового процесса на одном из структурных уровней при его активизации на других структурных уровнях. Здесь целесообразно создание полого извилистого русла канала с частичным креплением вогнутых берегов излучин элементами повышенной шероховатости. Одновременно извилистое русло обеспечивает предсказуемый режим переформирования мезоформ и активизацию перемещения микроформ. Если количество поступающих в канал наносов тем не менее превышает транспортирующую способность потока, следует либо сделать более изменчивым гидрологический режим - ввести попуски, либо активизировать процессы аккумуляции наносов в отстойниках.

Таким образом, главным инструментом регулирования функционирования системы *поток - русло* является двойственность свойств руслового процесса, однако она же и создает максимальные сложности при управлении системой. При активизации процессов взаимодействия потока и русла возникает возможность использовать энергию руслового потока (в случае правильной оценки естественной направленности русловых переформирований) для создания удобного для человека режима речного русла и сохранения русла как природного объекта. Другие методы регулирования русел - редукция руслового процесса и создание искусственных русел - необходимо использовать как вспомогательные, за исключением тех случаев, когда добиться нужного эффекта основным методом невозможно.

Метод активизации природных процессов для достижения хозяйственного эффекта используется и при регулировании других геоморфологических процессов. Примерами являются искусственный спуск лавин, формирование морских пляжей путем подачи на береговой склон пляжеобразующего материала, снижение эрозии почв активизацией впитывания в грунт поверхностного стока. Это путь эффективного управления геоморфологическими динамическими системами в условиях максимального сохранения природного состояния рельефа и рельефообразующих процессов.