

3. ДИНАМИКА ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ РЕЛЬЕФА РЕЧНОГО РУСЛА

В речном русле одновременно существует большое количество русловых форм разных размеров и морфологии. Этот комплекс часто обладает иерархической структурой — более мелкая русловая форма является частью более крупной. Основные представления о номенклатуре и структурной организации форм руслового рельефа сложились благодаря работам Н. Н. Жуковского [1], К. И. Россинского и И. А. Кузьмина [7], Н. И. Маккавеева [6]. Были выделены группы русловых образований, близких по морфологии и динамике и соответственно значительно отличающихся по этим свойствам от других групп русловых форм. В наиболее определенном виде подобный структурный подход к изучению речных русел оформился в работах Н. Е. Кондратьева [4, 5], в которых были выдвинуты положения о дискретности руслового рельефа и его структурных уровнях. В современной литературе по русловому процессу [2, 5, 8, 12] эти положения нашли широкое развитие. Так, структурных уровней руслового рельефа выделяется не менее восьми: 1) частицы наносов; 2) ультрамикроформы; 3) микроформы; 4) мезоформы; 5) макроформы; 6) мегаформы; 7) морфологически однородные участки; 8) продольный профиль реки.

Объективным способом определения количества структурных уровней руслового рельефа и их разграничения является спектральный анализ рядов отметок дна русла. Для охвата всего диапазона размеров русловых форм необходимо подбирать реализации отметок дна разной длины и с разным интервалом квантования с тем, чтобы по длине реализации укладывалось не менее 20 характерных длин волн, а каждая волна описывалась не менее чем 10 отметками дна. После совмещения спектров отдельных реализаций получается комплексная функция спектральной плотности руслового рельефа. Обычно на комплексных спектрах выделяется несколько областей длин волн, к которым приурочена относительно большая дисперсия ряда (т. е. амплитуд соответствующих по размерам русловых форм). Эти области разделены узкими диапазонами длин волн, которым соответствует относительно меньшая доля дисперсии. Области длин волн с относительно большими амплитудами хорошо идентифицируются с выделяемыми традиционными методами структурными уровнями руслового рельефа. Наиболее отчетливо структурные уровни выделяются на графиках спектральной плотности отметок дна, по-

строенных в логарифмическом масштабе, в виде ступеней функции спектральной плотности (рис. 1).

Структурные уровни руслового рельефа охватывают очень широкий диапазон русловых форм, их размеры различаются внутри

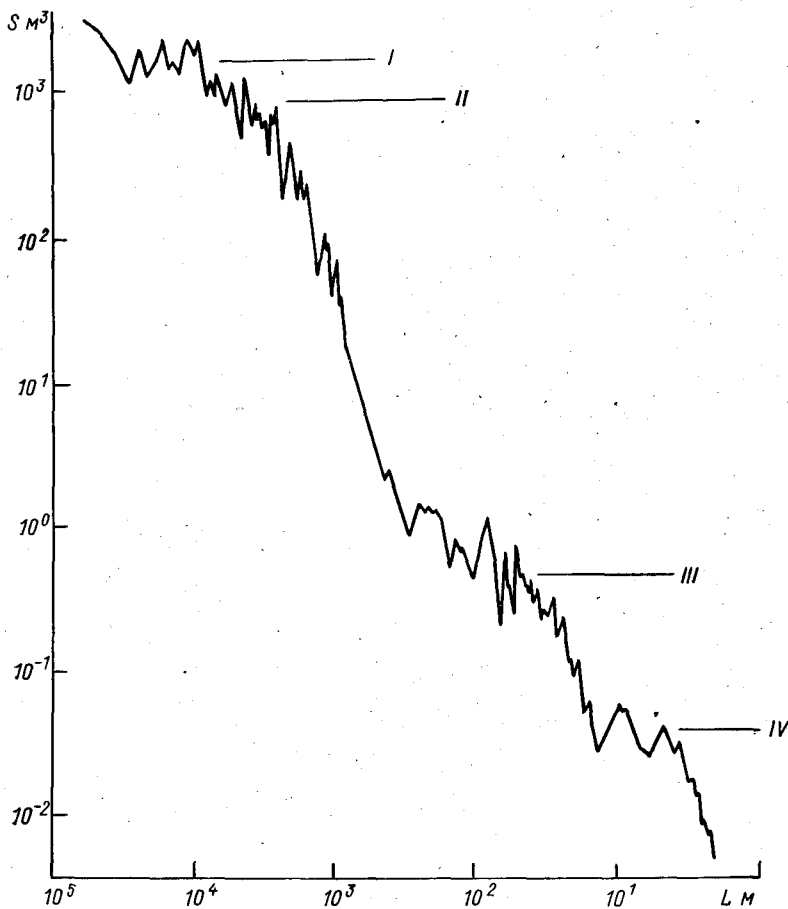


Рис. 1. Функция спектральной плотности S отметок дна русла р. Нигера с выделением структурных уровней руслового рельефа. I — макроформ, II — мезоформ, III — микроформ, IV — ультрамикроформ.

одного структурного уровня иногда на порядок. Однако для большинства структурных уровней характерно разделение на более компактные группы русловых форм, которые предложено называть структурными ячейками [9] и присваивать им определенный ранг. Так, если на некоторой реке (например, на р. Вычегде ниже устья р. Сысолы) формы 1-го ранга — это свободные меандры

(собственно макроформы и формы русла), то в их пределах располагаются формы 2-го ранга — побочни (на более узких и устойчивых участках реки они замещаются соответствующими по размерам ленточными грядами, на более широких — осередками); на побочнях, в свою очередь, выделяются формы 3-го ранга — песчаные волны. Побочни и песчаные волны относятся к структурному уровню мезоформ. Песчаные волны усложняются формами 4-го ранга — шалыгами, шалыги — застругами (5-й ранг). На застругах выделяются формы 6-го ранга — дюны (или гряды). Эта группа русловых форм на р. Вычегде относится к структурному уровню микроформ. При дальнейшем усложнении руслового рельефа на дюнах появляются рифели и рябь (ультрамикроформы), количество рангов увеличивается до 8. Таким образом, в составе одного структурного уровня может быть выделено от 1 до 3 структурных ячеек руслового рельефа. Приведенное соотношение номенклатуры структурных уровней и структурных ячеек наиболее распространено в природе, но не единственно.

Качественная группировка форм руслового рельефа по признакам сходства их морфологии, размеров, динамики и расположения в иерархическом ряду наиболее проста. При наличии подробных схем русла или аэрофотоснимков можно выявить всю систему структурных ячеек. Однако из-за сходства морфологии и размеров отдельных русловых форм соседних рангов возникает трудность в их типизации. Для устранения субъективизма необходимо применение методов количественной группировки объектов, однородных по одному или нескольким признакам, т. е. методов кластер-анализа. Для выявления иерархии русловых образований можно использовать два способа [9]: метод усредненного связывания Кинга в сочетании с линейной детерминированной моделью распознавания образов и спектральный анализ. При спектральном анализе рядов глубин русла хорошо выделяются ленточные гряды, песчаные волны, шалыги и более мелкие формы руслового рельефа, отчетливо выраженные в изменении отметок дна; при анализе рядов кривизны русла выделяются меандры и острова, побочни и осередки, т. е. формы, хорошо выраженные в плане.

Эти способы в целом дают близкие результаты и хорошо дополняют друг друга. Качественная группировка в сочетании с методом Кинга позволяет представить себе русловые формы каждой выделенной структурной ячейки, установить их характерные размеры. Благодаря спектральному анализу выделяются структурные ячейки и определяются характерные размеры русловых форм при очень сложной структуре руслового рельефа, когда качественная группировка наименее объективна.

Количество структурных ячеек (рангов) русловых форм определяет степень сложности руслового рельефа. Сложность руслового рельефа увеличивается скачкообразно по мере постепенного увеличения водности реки (рис. 2). При некотором пороговом рас-

ходе воды на самых мелких элементарных русловых формах возникают новые формы, возникает новая структурная ячейка руслового рельефа более низкого ранга, или даже новый структурный уровень.

«Снизу» степень сложности руслового рельефа ограничивается абсолютным размером частиц наносов, так как не может сформироваться русловая форма размером менее нескольких десятков частиц аллювия. К. С. Ричардс [14] теоретически установил пре-

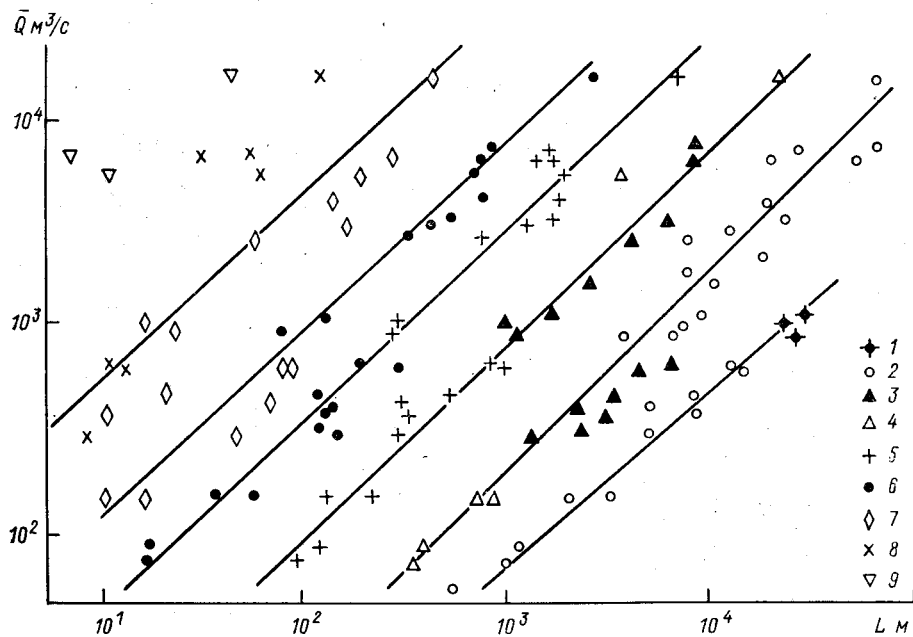


Рис. 2. Изменение размеров русловых форм и структуры руслового рельефа при изменении водности рек.

1 — сложные излучины, 2 — излучины, 3 — побочки, 4 — ленточные гряды, 5 — песчаные волны, 6 — шалыги, 7 — заструги, 8 — дюны, 9 — рифели.

делы соотношения длин самых мелких русловых форм с диаметром аллювия: $630d > \lambda > 27d$. На р. Алдане со средним диаметром аллювия $d = 70 \div 80$ мм самые мелкие русловые формы имеют шаг $60 \div 100$ м. На р. Киренге $d = 30 \div 40$ мм, самые малые русловые формы имеют длину $10 \div 20$ м. На р. Нигере при крупности донных грунтов $0,6 \div 0,8$ мм на дне формируется рябь с шагом $0,4 \div 0,6$ м. На р. Тереке в низовьях при $d = 0,25$ мм шаг ряби не превышает $0,2 \div 0,3$ м. Таким образом, критическое число λ/d колеблется в пределах $400 \div 1000$, т. е. близко к верхнему пределу Ричардса.

Вторым фактором, ограничивающим сложность системы русловых форм «снизу» является соотношение скорости потока u

и подвижности донных грунтов. Данные М. С. Ялина и Е. Карыхана [15], А. Ю. Умарова [10], Л. Д. Когана и В. П. Углова [3] указывают на смыв наиболее мелких донных форм с превышением критического значения этого соотношения. В низовьях р. Терек в условиях межени в русле наблюдается сложная иерархия донных и внутрирусловых форм. Однако при увеличении расходов воды до среднегодовых и соответствующем росте скоростей потока рифели и расположенные на застругах дюны размываются. При руслоформирующих расходах воды (при уровнях воды в бровках поймы) размываются также и заструги. Во время катастрофических паводков происходит размыв всех гряд, меньших побочней. Т. Е. Лисл [13] сообщает, что в результате катастрофического паводка 1964 г. на малых галечных реках Калифорнии практически была уничтожена разница между плёсами и перекатами, сформировалось полностью бесструктурное русло.

Ограничение на сложность структуры руслового рельефа «сверху» накладывает ширина долины реки между бортами и их литология. Оно касается развития наиболее крупных форм руслового рельефа, чаще всего форм русла. Их продольные размеры не могут превышать характерных размеров изгибов бортов долины, в основном определяющихся геолого-геоморфологическими факторами. Например, свободные излуцины р. Вычегды прослеживаются на протяжении всего верхнего и среднего течения реки. Ниже устья р. Вымы они настолько увеличиваются по длине и выполаживаются в соответствии с увеличением водности реки, что морфологически теряются в изгибах долины реки и могут быть выделены лишь условно (рис. 2). В низовьях рек Нигера и Енисея, судя по связи длин русловых форм с расходами воды (рис. 2), русловые формы 1-го ранга вообще отсутствуют, а излуцины этих рек имеют 2-й ранг. При этом на р. Нигере они настолько пологи, что находятся на стадии морфологического вырождения, а на р. Енисее (ниже устья р. Нижней Тунгуски) практически все излуцины врезаны в борта долины и местами адаптируются к конфигурации местных геологических структур. В то же время в расширении долины р. Енисея ниже м. Муксунинского появляется форма 1-го ранга — узел разветвления на рукава Большой и Дербябинский Енисей, соответствующая по размерам водности реки.

Наиболее существенным явлением в изменении структуры руслового рельефа является переход от подвижных внутрирусловых форм к относительно стабильным формам русла, которые и дают основания классифицировать внешний морфологический тип русла. Морфологический тип русла определяется характерным пространственным сочетанием русловых форм одного или нескольких рангов, расположенных выше меженного уреза воды в реке и в разной степени покрытых пойменным наилком и растительностью. Эти русловые формы могут быть первичными, заложенными в процессе оформления речного русла в том или ином субстрате,

и могут быть вторичными, возникшими при стабилизации внутрирусловых форм того или иного ранга. Известно три основных морфологических типа русла: прямолинейные (с периодическим расширением); извилистые, разветвленные на рукава [7] и довольно многочисленное количество морфологических типов, являющихся усложненными модификациями основных [11].

Стабилизация внутрирусловой формы рельефа и ее переход в форму русла связан с достижением его некоторых критических размеров: уменьшением слоя и частоты затопления в половодье и паводки и соответственно уменьшением скорости смещения по руслу; формированием пойменного аллювия, зарастанием растительностью и некоторой его морфологической трансформацией. Интенсивность этих процессов обусловлена, с одной стороны, гидравлическими факторами, степенью сложности рельефа речного русла и относительной высотой внутрирусловых форм, а с другой стороны, комплексом физико-географических факторов: гидрологическим режимом реки, временем и периодом субаэрального существования форм руслового рельефа, климатическими условиями для поселения пионерной растительности на аллювиальных песках, мутностью воды в реке, скоростью образования пойменного аллювия, мощностью активного слоя аллювия при затоплении русловой формы во время паводков и т. п.

Таким образом, морфологический тип русла определяется сочетанием аazonальных гидравлических факторов и подверженных горизонтальной зональности физико-географических факторов. При этом чем ниже ранг русловых форм, которые стабилизируются, перекрываются пойменным наилком и определяют форму русла, тем сложнее морфологический тип русла. Типичным примером является русло Верхней Оби на 50-километровом участке ниже слияния рек Бии и Катунь. Здесь значительная распластанность русла, достаточно большая водность и мелкий аллювий обусловили сложность структуры руслового рельефа — здесь насчитывается 9 рангов внутрирусловых форм. В то же время благоприятные климатические условия Алтайского края обусловили хорошую приживаемость пионерной растительности (ивы) на покрытых наилком песчаных отмелях. В результате здесь русловые формы 5-го ранга (шалыги из структурного уровня микроформ) превратились в небольшие острова. Сформировалось русло со сложными разветвлениями, местами близкое к разбросанному.

В условиях дельты р. Енисея, где также нет факторов, ограничивающих гидравлически обусловленную сложность руслового рельефа, переход к формам русла произошел на уровне форм 2-го ранга — побочней (относящихся к структурному уровню мезоформ), так как даже обсыхающие на два летних месяца песчаные осередки в условиях арктического климата не осваиваются растительностью и за 100 лет. В результате здесь сформировалось морфологически более простое разветвленное русло.

Однако ситуация, когда из внутрирусловых форм рельефа разных рангов на разных реках (или разных участках одной реки) образуются разные морфологические типы русел, не единственная. Часто одинаковые формы русла и морфологические типы русел возникают из внутрирусловых форм разных рангов. Как уже отмечалось, ниже устья р. Выми излучины на р. Вычегде перестают морфологически выделяться. Однако на этом же участке начинают зарастать растительностью и стабилизироваться побочни, и русло продолжает оставаться свободномеандрирующим, но уже на уровне 2-го ранга русловых форм. Песчаные волны, осложнявшие побочни, в свою очередь преобразуются в побочни. Соответственно изменяется морфология и положение в иерархическом ряду остальных элементов системы руслового рельефа. Река Терек ниже Каргалинского гидроузла и дельтовый рукав Нигера—Форкадос свободно меандрируют. Однако на р. Тереке излучины — это формы 1-го ранга, они сформировались из изгибов потока реки среди плавней, излучины рукава Форкадос сформировались из узлов разветвлений, и они уже 3-го ранга.

Таким образом, морфологически одинаковые русловые формы на разных реках и даже на разных участках одной и той же реки могут занимать разное положение в иерархическом ряду русловых образований, иметь разный ранг. Следовательно, они будут относиться к разным ветвям зависимости размеров русловых форм от величин, определяющих гидравлических факторов. Это обстоятельство должно учитываться при составлении гидролого-морфометрических (режимных) зависимостей, широко используемых при анализе руслового процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуковский Н. Н. Обзор основных явлений естественного формирования речного русла. — В кн.: Вопросы гидротехники свободных рек. М., 1948, с. 329—363.
2. Знаменская Н. С. Системная методология как основа изучения руслового процесса. — В кн.: Динамика и термика рек и водохранилищ. М., 1984, с. 171—194.
3. Коган Л. Д., Углов В. П. Формы транспорта и расход наносов. — В кн.: Гидрофизические процессы в реках и водохранилищах. М., 1985.
4. Кондратьев Н. Е. О дискретности русловых процессов. — В кн.: Проблемы русловых процессов. Л., 1953, с. 32—46.
5. Кондратьев Н. Е., Попов И. В., Сنيщенко Б. Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. — Л.: Гидрометеиздат, 1982. — 272 с.
6. Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозии в ее бассейне. — М.: изд. МГУ, 1955. — 346 с.
7. Россинский К. И., Кузьмин И. А. Некоторые вопросы прикладной теории формирования речных русел. — В кн.: Проблемы регулирования речного стока, вып. 1. М. — Л., 1947, с. 88—130.
8. Снищенко Б. Ф. Связь типов русел с формами речных долин. — Геоморфология, 1979, № 1.
9. Сидорчук А. Ю. Структура рельефа речного русла. — Вестник Моск. ун-та, сер. геогр., 1984, № 2, с. 17—23.

10. Умаров А. Ю. Особенности и метод расчета микро- и макроформ дна русла. — Изв. АН УзССР, сер. техн., 1983, № 3, с. 53—57.

11. Чалов Р. С. Географические исследования русловых процессов. — М.: изд. МГУ, 1979. — 234 с.

12. Чалов Р. С. Факторы русловых процессов и иерархия русловых форм. — Геоморфология, 1983, № 2.

12. Lisle T. E. Effects of aggradation and degradation in riffle-pool morphology in natural gravel channels, northwestern California. Water Resour. Res., 1982, v. 18, N 6, с. 1643—1651.

13. Richards K. S. The formation of ripples and dunes on an erodible bed. J. Fluid Mech., 1980, v. 99, N 3, с. 597—618.

14. Yalin M. S., Karahan E. Steepness of sedimentary dunes. J. Hyd. Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng., 1979, v. 105, N 4, с. 381—392.