

УДК 551.482.212

А. Ю. Сидорчук



СТРУКТУРА РЕЛЬЕФА РЕЧНОГО РУСЛА

Русловой рельеф характеризуется большим разнообразием и сложностью. Во многом благодаря последней в теории руслового процесса давно проявился структурный подход к анализу рельефа речного русла. Возникла необходимость выделения групп русловых образований, близких по морфологическим и динамическим свойствам. На основании их изучения и определения степени влияния на них других форм руслового рельефа разрабатывались методы выправления русла. По мере углубления знаний о речном русле выдвигались все более обоснованные предложения по номенклатуре форм русел и внутрирусловых форм рельефа. Благодаря работам Н. Н. Жуковского, К. И. Россинского и И. А. Кузьмина, Н. И. Маккавеева складывались основные представления о структурной организации форм руслового рельефа. В наиболее определенном виде структурный подход к изучению речных русел был сформулирован Н. Е. Кондратьевым [2], выдвинувшим положение о дискретности руслового рельефа и его структурных уровнях. В современной литературе выделяется шесть структурных уровней, в рамках которых русловым процессам присущи специфические закономерности: частицы наносов; микроформы, соизмеримые с глубиной потока; мезоформы, соизмеримые с шириной потока; макроформы, соизмеримые с шириной дна долины; морфологически однородные участки, внутри которых наблюдается постоянство типов и размеров русловых форм; вся река. Намечены критерии для отделения одного структурного уровня русловых форм от другого, получены их морфологические, динамические, а в ряде случаев и режимные характеристики [1, 5, 7, 8].

Стремление исследовать столь широкие классы русловых образований, как структурные уровни, оставляет в стороне более обособленные группы русловых форм, которые составляют внутреннее содержание структурных уровней. Эти группы можно назвать структурными ячейками и присвоить им и входящим в них русловым формам определенный ранг [9]. Существование этих групп русловых форм отмечается большинством исследователей, но даже в наиболее подробных работах, посвященных структурному анализу руслового рельефа [1, 7, 8], внутри каждого изучаемого структурного уровня рассматриваются лишь одна-две группы форм.

В то же время даже при моделировании руслового процесса в больших лотках с размываемым ложем при постоянном расходе воды одновременно образуются не только микро- и мезоформы, сравнимые по размерам с глубиной и шириной лотка, но и формы некоторых промежуточных размеров [4]. На морфологически однородных участках крупных рек простой конфигурации, например извилистых или разветвленно-извилистых, можно выделить до 6—8 рангов русловых форм. Так, на р. Вычегде выше устья р. Сысолы (рис. 1) в русле развиты формы 1-го ранга — свободные меандры (собственно формы русла); в их пределах находятся формы 2-го ранга — побочни (на более узких и устойчивых участках русла они замещаются соответствующими по размерам ленточными грядами, на более широких — осередками); на побочнях выделяются формы 3-го ранга — песчаные волны, в свою оче-

редь, усложняются формами 4-го ранга — шалыгами, шалыги — за-
 стругами (5-й ранг). На застругах выделяются формы 6-го ранга —
 дюны. При дальнейшем усложнении руслового рельефа на дюнах
 появляются рифели и рябь. Количество структурных ячеек рус-
 ловых форм определяет степень сложности руслового рельефа.

Ранжировку структурных ячеек руслового рельефа удобно произ-
 водить «сверху вниз», т. е. первый (высший) ранг присваивать самым
 большим русловым формам.

Приведенная на рис. 1
 качественная группировка
 форм руслового рельефа по
 признакам близости их мор-
 фологии, размеров и места в
 иерархическом ряду наибо-
 лее проста. При наличии
 подробных карт русла, аэро-
 фотоснимков и известного
 опыта исследователя можно
 выявить всю систему струк-
 турных ячеек. Однако из-за
 близости морфологии и раз-
 меров отдельных русловых
 форм соседних рангов воз-
 никает определенная труд-

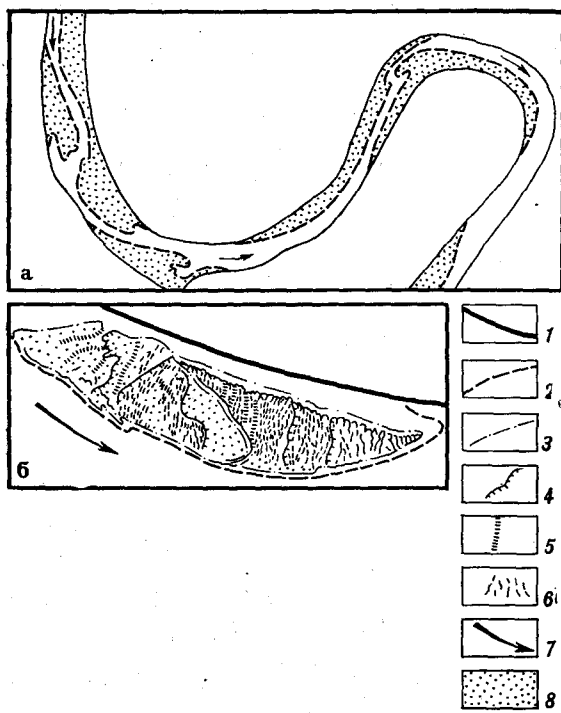


Рис. 1. Структура рельефа русла
 р. Вычегды выше устья р. Сысо-
 лы: а — побочни (2) на меанд-
 рах (1); б — песчаные волны (3),
 шалыги (4), заструги (5) и дюны (6)
 на побочне. Условные обозначе-
 ния: 1—6 — границы русловых
 форм; 7 — направление течения;
 8 — надводные пески

ность в их типизации, что создает впечатление нестрогости и субъек-
 тивности качественной группировки. Для устранения субъективизма
 необходимо применение методов количественной группировки объектов,
 однородных по одному или нескольким признакам, т. е. методов кла-
 стер-анализа. Для выявления иерархии русловых образований были
 использованы два способа. Первый — метод усредненного связыва-
 ния Кинга в сочетании с детерминированной моделью распознава-
 ния образов [6, 10]. Внутри морфологически однородного участка
 реки измеряются размеры (длина) форм руслового рельефа. По
 этим данным рассчитываются логарифмы длин и их величины рас-
 полагаются в порядке убывания. Весь ряд разбивается на N началь-
 ных кластеров (разрядов) с размахом 0,1 (или 0,05), для вошедших
 в каждый кластер n_i значений определяются их средние \bar{x}_i и дисперсии
 D_i . Для каждой пары соседних начальных кластеров i и $i+1$ расчи-
 тывается критерий различия—расстояние Махалонобиса:

$$Mk_i^2 = \frac{n_i n_{i+1} (n_i + n_{i+1} - 2) (\bar{x}_i - \bar{x}_{i+1})^2}{(n_i + n_{i+1}) [(n_i + 1) D_i + (n_{i+1} + 1) D_{i+1}]} \quad (1)$$

и вероятность P_i их принадлежности к разным кластерам по детер-

минированной модели распознавания образов [10] по формуле

$$P_j = 1 - \frac{1}{2} P_i + P_i \Phi \left| \frac{c - \mu_{i+1}}{\sigma_{i+1}} \right| - \frac{1}{2} P_{i+1} + P_{i+1} \Phi \left| \frac{\mu_i - c}{\sigma_i} \right|, \quad (2)$$

где $c = 2 \ln(n_{i+1}/n_i) + \bar{x}_i^2/D_i - \bar{x}_{i+1}^2/D_{i+1}$;

$$\mu_k = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(x) \Phi |t_k| dx;$$

$$P_i = \frac{n_i^1}{n_{i+1} + n_i}; \quad P_{i+1} = \frac{n_{i+1}}{n_{i+1} + n_i};$$

$$\sigma_k^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (\varphi(x) - \mu_k)^2 \Phi |t_k| dx;$$

$$t_k = \frac{x - \bar{x}_k}{\sqrt{D_k}}; \quad \varphi(x) = 2x(\bar{x}_i/D_i - \bar{x}_{i+1}/D_{i+1});$$

Φ — функция Лапласа.

По формуле

$$R_{cp} = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^{N-1} P_j M \kappa_j^2 \quad (3)$$

определяется степень несовпадения выделенных кластеров. На следующем этапе кластеры, для которых произведение $M \kappa^2 P_i$ минимально, объединяются в один, и вся процедура повторяется для $N = N - 1$ начальных кластеров. Расчет продолжается до тех пор, пока кластеров не останется два. Затем по максимуму критерия R_{cp} , а также из физических предпосылок выбирается система наиболее несовпадающих между собой кластеров, которые и будут объективно выделенными структурными ячейками русловых форм. Условием применимости этого способа является логнормальность распределения длин русловых форм каждого ранга, эта гипотеза не противоречит опытным данным.

Вторым способом выделения структурных ячеек русловых форм является спектральный анализ, широко используемый в настоящее время при исследованиях рельефа речного русла. Спектральному анализу подвергаются пространственные ряды максимальных или средних глубин русла, площадей живых сечений, азимутов или кривизны оси русла. Функции спектральной плотности показывают распределение дисперсии процесса по диапазонам частот или длин волн. Поэтому более выраженные в рельефе и близкие к периодическим русловые формы в некотором диапазоне длин выделяются на функции спектральной плотности в виде локального максимума — пика. При спектральном анализе рядов глубин русла хорошо выделяются ленточные гряды,

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. Для охвата всей иерархии русловых образований необходимо подбирать реализации характеристик рельефа русла разной длины и снимать с них информацию с разным шагом. Для выявления меандров, островов, побочней, осередков, ленточных гряд, длина которых в 5—20 раз превышает ширину русла, целесообразно выбирать шаг, равный ширине русла, и длину реализации в пределах морфологически однородного участка, равную 500—

1000 ширинам русла. Для выявления шалыг, заструг, дюн и более мелких гряд необходимы продольные профили дна рек такой протяженности, чтобы в них укладывалось 20—100 длин выделяемых русловых форм. Шаг не должен превышать 1/10 длины выделяемой гряды. Для получения единой картины нужно совместить функции спектральной плотности, относящиеся к разным диапазонам длин.

Изложенные способы в целом дают близкие результаты и хорошо дополняют друг друга. Качественная группировка в сочетании с методом Кинга позволяет зримо представить себе русловые формы каждой выделенной структурной ячейки, установить их характерные размеры.

Спектральный анализ позволяет выделить структурные ячейки и установить характерные размеры русловых форм при очень сложной структуре руслового рельефа, когда качественная группировка наименее объективна. Иногда, чаще на уровне микроформ, спектральный анализ раскрывает организацию русловых форм внутри структурных ячеек, выделенных другими методами как однородные. Эти случаи требуют специального изучения. Наибольшую информацию о структуре руслового рельефа дает спектральный анализ максимальных (или средних) глубин русла реки. Площадь под такой кривой спектральной плотности в некотором диапазоне длин волн пропорциональна объему аллювия (или другого материала)

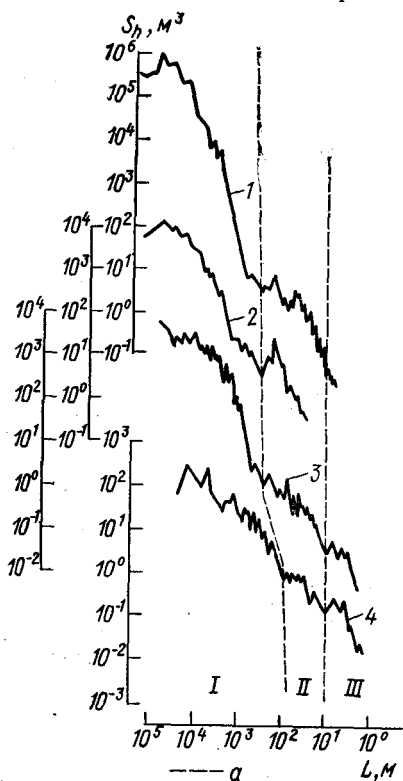


Рис. 2. Функции спектральной плотности максимальных глубин в низовьях рек: 1 — Енисей, 2 — Лены, 3 — Нигера, 4 — Терека. Границы структурных уровней (а): I — мезоформ, II — микроформ, III — ультрамикроформ

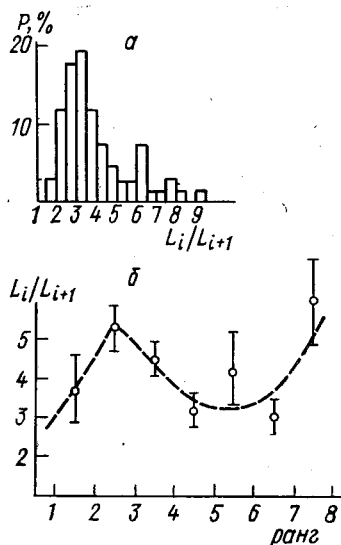
ла), заключенного в русловых образованиях соответствующих размеров. Кроме локальных максимумов, соответствующих структурным ячейкам, на спектрах выделяется несколько широких областей длин волн. К этим областям приурочен основной объем русловых образований. Они разделяются сравнительно узкими зонами длин волн, которым соответствуют малые объемы русловых форм. По такому критерию, имеющему как морфологическое, так и энергетическое содержание, выделяются классы русловых форм, которые идентифицируются с общепринятыми структурными уровнями макро-, мезо- и микроформ. На графиках связи спектральной плотности глубин с величинами длин волн, построенных в логарифмическом масштабе (рис. 2), эти уровни отчетливо выделяются как ступени функции спектральной плотности.

Таким образом, структурная организация системы руслового рельефа как минимум трехступенчатая: каждая русловая форма входит в структурную ячейку некоторого ранга, которая является составной частью одного из структурных уровней. Каждая из выделенных ступеней организации, в свою очередь, образует иерархический ряд.

Морфологические свойства элементов иерархической системы руслового рельефа определяются взаимодействием между ними. Типы зависимостей между морфологией различных элементов системы руслового рельефа обусловлены степенью осреднения морфологических характеристик русловых форм внутри ступеней организации руслового рельефа.

Так, при изучении конкретных русловых форм разных рангов обнаруживается их осязательное взаимовлияние. Н. И. Маккавеев [3] показал зависимость динамики побочней от их положения на излучине реки. Р. С. Чалов [11] выявил обратное воздействие динамики побочней на переформирования излучин. Для русловых форм 3—7-го рангов отмечается единая закономерность — длина более мелкой гряды увеличивается на гребне более крупной формы соседнего ранга и уменьшается в ее подвале. Для русловых форм, далеко отстоящих друг от друга в иерархическом ряду, закономерность в целом обратная: длины более мелких гряд больше в ложбинах и меньше у гребней русловых форм более высокого ранга.

Рис. 3. Гистограмма отношений длин русловых форм соседних рангов (а) и зависимость этого отношения от рангов русловых форм (б)



В то же время между размерами конкретных русловых форм более высокого ранга и средними размерами расположенных на каждой из этих русловых форм гряд более низких рангов нет связи (таблица). Коэффициент корреляции между длинами конкретных крупных русловых форм и средними размерами осложняющих именно эти формы гряд следующего ранга не превышает 0,6. Со средними длинами гряд, более отдаленных в иерархическом ряду, связь еще менее ощутима. Это означает, что на самом крупном побочне чаще всего расположены не самые крупные шалыги и пр., а на самой мелкой заструге можно обнаружить относительно крупные дюны. В этом смысле можно говорить о частичной статистической независимости русловых форм разных рангов. Поэтому можно производить выборку и изучать статистические характеристики морфологии русловых форм определенной структурной ячейки на морфологически однородном участке вне зависимости от того, какие русловые формы других рангов здесь существуют.

Внутри морфологически однородного участка средние размеры русловых форм разных структурных ячеек снова связаны единой закономерностью. Отношения средних длин русловых форм структурных ячеек соседних рангов L_i/L_{i+1} на самых разных реках — от микрорек в экспериментальных лотках до таких, как Енисей, — объединяются в довольно компактную гистограмму (рис. 3, а). Многомодальность кривой распределения указывает на ее гетерогенность. Действительно, гистограммы величины L_i/L_{i+1} для русловых форм каждой пары структурных ячеек соседних рангов оказались существенно разными. Модальное и среднее значения этого отношения зависят от рангов струк-

Матрица коэффициентов корреляции длин русловых форм более высокого ранга со средними длинами осложняющих их форм более низких рангов на однородном участке р. Нигер

Русловая форма	Ранг	1	2	3	4	5	6	7	8
Меандр	1	1,0	0,5	-0,2	-0,1	-0,1	-0,2	—	—
Узел разветвления	2	0,5	1,0	0,6	0,1	-0,3	-0,2	—	—
Побочень, ленточная гряда	3	-0,2	0,6	1,0	0,6	-0,3	-0,2	—	—
Песчаная волна	4	-0,1	0,1	0,6	1,0	0,6	-0,2	—	—
Шальга	5	-0,1	-0,3	-0,3	0,6	1,0	—	—	—
Заструга	6	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	—	1,0	0,2	0,2
Дюна	7	—	—	—	—	—	0,2	1,0	0,3
Рифель	8	—	—	—	—	—	0,2	0,3	1,0

турных ячеек (рис. 3, б). Наличие такой единой для самых разных рек связи позволяет оценить средние размеры русловых форм любой структурной ячейки по размерам русловых форм одной из структурных ячеек известного ранга и степени сложности системы русловых форм. Отсюда же следует единство, с точностью до константы, связей размеров русловых форм всех структурных ячеек, вне зависимости от их ранга с определяющими гидравлическими факторами. Подобное единство связей было обнаружено для русловых форм разных структурных уровней (а фактически — разных структурных ячеек) В. В. Ромашиним [8] и Н. С. Знаменской [19].

Принадлежность структурных ячеек к тому или иному структурному уровню определяет величину отношения размеров русловых форм структурных ячеек соседних рангов и характер изменений этого отношения. На структурном уровне макроформ и на переходе к мезоформам мода величины L_i/L_{i+1} равна 2,0—3,0, что соответствует данным В. В. Ромашина [8]. На структурном уровне мезоформ она составляет 4,0—6,0, на структурном уровне микроформ уменьшается до 2,0—3,0 и увеличивается до 6,0—8,0 на структурном уровне ультрамикроформ. Соответственно изменяется и среднее значение отношения L_i/L_{i+1} (рис. 3, б).

Иерархическая система речного русла, в свою очередь, является подсистемой в системе поток—русло. Ведущим звеном, определяющим свойства всей системы, является речной поток. Наличие столь сложной организации рельефа речного русла, отображающего структуру речного потока, позволяет предполагать не менее сложную организацию структуры речного потока.

A. Yu. Sidorchuk

THE STRUCTURE OF A RIVERBED RELIEF

The structural organization of the system of a riverbed relief is, as minimum, a three-stage one. Concrete riverbed forms can be classified according to their size and morphological type (meanders, side drifts, dunes, etc.) into structural nuclei of different ranks, which, in turn, represent the components of broader classes of riverbed forms — the structural levels. The morphological properties of the elements of the hierarchical series of a riverbed relief are in many respects determined by interaction between them. The types of relationships between the individual elements of the system of a riverbed relief are determined by the degree of approximation to their mean values of the morphological characteristics of the riverbed forms within each of the stages of the system's organization.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Знаменская Н. С. Донные наносы и русловые процессы. Л., 1976.
2. Кондратьев Н. Е. О дискретности русловых процессов. — В кн.: Проблемы русловых процессов. Л., 1953.
3. Маккавеев Н. И. Руело реки и эрозия в ее бассейне. М., 1955.
4. Маккавеев Н. И., Хмелева Н. В., Зайтов И. Р., Лебедева Н. В. Экспериментальная геоморфология. М., 1961.
5. Попов И. В. Деформации речных русел и гидротехническое строительство. Л., 1969.
6. Пугачев В. С. Теория вероятностей и математическая статистика. М., 1979.
7. Ромашин В. В. Типы руслового процесса в связи с определяющими их факторами. — Тр. ГГИ, 1968, вып. 155.
8. Ромашин В. В. О структурном подходе к русловой морфометрии. — Тр. ГГИ, 1969, вып. 169.
9. Сидорчук А. Ю. Структура потока и руслового рельефа. — В кн.: Закономерности проявления эрозионных и русловых процессов в различных природных условиях. М., 1981.
10. Хартиган Дж. А. Задачи, связанные с функциями распределения в кластер-анализе. — В кн.: Классификация и кластер. М., 1980.
11. Чалов Р. С. Географические исследования русловых процессов. М., 1979.

Поступила в редакцию
17.03.83