

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М.В.ЛОМОНОСОВА

Географический факультет

На правах рукописи

УДК 556.537; 551.435.11

СИДОРЧУК АЛЕКСЕЙ ЮРЬЕВИЧ

МОРФОЛОГИЯ, ДИНАМИКА И СТРУКТУРА РЕЧНОГО
РУСЛА

11.00.07 - гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
доктора географических наук

Москва - 1992

Работа выполнена в Научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов географического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова

Официальные оппоненты: БОЖИНСКИЙ Александр Николаевич,
доктор географических наук,
старший научный сотрудник.
ВАРЫШНИКОВ Николай Борисович,
доктор географических наук,
профессор.
АЛТУНИН Валерий Степанович,
доктор технических наук,
профессор.

Ведущая организация: Институт водных проблем

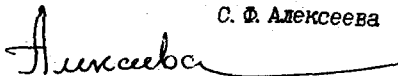
Защита состоится 27 февраля 1992 года в 15 часов на заседании специализированного гидрометеорологического совета Д-053.05.30 в Московском государственном университете им. М. В. Ломоносова по адресу:
119899, Москва, ГСП-3, Ленинские горы, МГУ, географический факультет, ауд. 18-01, 18 этаж

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке географического факультета МГУ на 21 этаже.

Автореферат разослан " 27 " января 1992 г.

Ученый секретарь
специализированного Совета,
кандидат географических наук

С. Ф. Алексеева



Актуальность исследования. Реки являются одними из наиболее динамичных гидрологических объектов. Временные и пространственные изменения речных русел обусловлены всем комплексом гидравлических, гидрологических, ландшафтно-климатических факторов. Они характеризуются сложной внутренней структурой, присущей как русловому потоку, так и рельефу русла. В то же время велика хозяйственная освоенность русел рек, их пойм и долин. По руслам осуществляется судоходство, здесь расположены разнообразные гидротехнические сооружения, разного рода переходы. Поймы рек и их долины используются под застройку, сельскохозяйственные нужды, здесь размещены коммуникации, многочисленные инженерные сооружения. Многие аспекты теории взаимодействия потока и русла, прикладные вопросы влияния русловых переформирований на функционирование хозяйственных объектов рассмотрены отечественными и зарубежными гидрологами, геоморфологами и гидротехниками: В.М.Лохтиным, Н.С.Делявским, М.А.Великановым, Н.И.Маккавеевым, Н.А.Ржаницыным, К.И.Россинским, И.А.Кузьминым, Н.Е.Кондратьевым, И.В.Поповым, О.В.Андреевым, К.В.Гришаниным, Н.С.Знаменской, С.Шаммом, Д.Кеннеди, К.Ричардсом, Г.Паркером. В работах этих исследователей заложены основы структурного анализа морфологии и динамики речного русла. Однако сложность системы поток-русло раскрыта недостаточно. Нет физически обоснованной теории генезиса всех классов русловых образований, разделения русловых форм по структурным уровням организации. Слабо обоснована типизация форм русел (макроформ), их гидравлическая и ландшафтно-климатическая обусловленность. Такая недостаточная разработанность теории руслового процесса приводит к значительным сложностям при решении прикладных задач, связанных с освоением русел рек. Сказанным выше определяется актуальность темы предлагаемой диссертационной работы.

Целью работы является развитие методологии структурного анализа в теории руслового процесса и на этой основе обоснование основных характеристик морфологии и динамики сложного иерархически организованного комплекса русловых форм с учетом гидравлических, гидрологических и ландшафтно-климатических факторов. В этой связи необходимо решить следующие задачи:

1. Найти место структурного анализа морфологии и динамики рельефа речного русла в общей теории систем, приложить аппарат системного подхода к выявлению элементов, структуры и организации руслового рельефа.

2. Выявить механизм образования сложного иерархического комплекса форм руслового рельефа и обосновать структурную классифи-

кацию русловых образований.

3. Изучить общие закономерности морфологии и динамики грядовых форм руслового рельефа в различных гидравлических и гидрологических условиях.

4. Обосновать гидравлическую, гидрологическую и ландшафтно-климатическую обусловленность различных морфологических типов речного русла.

5. Определить главные принципы оптимального регулирования руслового рельефа в целях рационального природопользования.

Методика исследований определяется физико-географической природой рельефа речного русла. С одной стороны, функционирование системы поток-русло обусловлено законами гидродинамики и гидравлики, с другой стороны, оно подчиняется географическим закономерностям. Поэтому для создания теоретической основы исследований использован метод малых возмущений. Гидрологические и географические закономерности исследовались методами натурального эксперимента. Проведены промеры грядового рельефа дна крупных и средних рек (Терека, Нигера, Лены, Оби, Енисея, Пура, Яны, Днестра), изучены его деформации на различных фазах гидрологического режима. Измерены уровни, расходы, скорости течения, расходы взвешенных и влекомых наносов. Используются картографические методы исследований для выявления морфологии и динамики крупных гряд и форм русел рек в различных природных условиях. Применены методы математического моделирования процессов трансформации русел рек. Используются натурные и лабораторные данные, опубликованные в литературе. Основной массив эмпирического материала собран для рек с песчаным аллювием, так что выводы диссертации обосновываются для этого класса рек.

Личный вклад автора. В диссертации изложены результаты непосредственных натурных изысканий на реках Тереке, Нигере, Лене, Оби, Яне, Днестре, Енисее и теоретических исследований автора в период 1977-1991 гг. Автором составлялись программы научных исследований, которые реализовывались при его личном участии, проводилась обработка данных наблюдений, их обобщение, написание глав научных и научно-производственных отчетов. Автор принимал участие также во внедрении результатов исследований в практику народного хозяйства. Основные теоретические разработки, натурные данные, выводы и практические рекомендации, приведенные в диссертации, принадлежат автору.

Научная новизна работы

1) Разработаны основные принципы структурного анализа рельефа речного русла: выявления элементов, структуры и организации русловых форм. Обоснована необходимость сочетания дискретного и континуального подходов в русловом анализе.

2) С применением методов кластеризации элементов руслового рельефа и спектрального анализа непрерывных реализаций геометрических характеристик русла выявлен сложный иерархический комплекс русловых форм. Обоснована объективность группирования русловых форм в структурные ячейки и структурные уровни.

3) Для выявления наиболее полной структуры рельефа речного дна обоснована необходимость исследования методом малых возмущений наиболее полных уравнений плановой гидравлики в форме, предложенной Н.А.Картвелишвили.

4) На основе теоретических исследований генезиса руслового рельефа получена новая структурная классификация грядовых русловых форм. Выявлено ее соотношение с известными морфодинамическими классификациями русловых форм.

5) На основе обширного собственного натурального материала с привлечением опубликованных в литературе данных получены основные морфологические и динамические характеристики грядовых форм руслового рельефа в различных гидравлических и гидрологических условиях.

6) Разработан метод расчета скоростей смещения гряд и расхода наносов, перемещающихся в форме гряд, с использованием всего иерархического комплекса грядового рельефа речного дна.

7) Выявлены критерии для определения морфологического типа русла на основе гидравлических характеристик потока и ландшафтно-климатических условий стабилизации русловых форм.

8) Предложены главные принципы оптимального регулирования структуры руслового рельефа в целях рационального природопользования.

9) Предложены основные принципы регулирования русла в низовьях р.Терек в условиях колебаний уровня Каспийского моря и антропогенного изменения гидрологического режима реки.

Практическое значение работы.

Методология структурного анализа морфологии и динамики рельефа речного русла позволяет осуществлять прогнозирование русловых деформаций последовательно для всех русловых форм из иерархического комплекса с учетом их взаимовлияния. В таком случае избегается односторонний взгляд на проблему, когда учет влияния на хозяй-

ственные сооружения лишь некоторого узкого класса русловых форм приводит к нарушению работы сооружения в результате переформирований другого класса русловых форм. Разрабатываемый автором подход был реализован при выработке рекомендаций по возведению водозаборных сооружений металлургического завода у пос.Аджакута на р.Нигер (Нигерия); при разработке рекомендаций по улучшению условий судоходства на р.Енисей в низовьях; при прогнозе русловых деформаций русла р.Терек в низовьях для обоснования схемы водопользования в бассейне реки; при анализе нарушений работы водозабора у пос.Мохсоглох на реке Лене. Теоретические и прикладные разработки автора вошли в отчеты по программам ГКНТ СССР 0.85.06 (1976-1980 гг.), 0.85.01 06.05.Н1, 0.85.06 01.04.Н3 и Н4 (1981-1985 гг.), 0.85.01 06.06.Н1, "Мировой океан" 03.12.Н3 (1986-1990 гг.).

Апробация результатов работы.

Результаты, изложенные в диссертации, неоднократно докладывались на международных и всесоюзных научных съездах, совещаниях и конференциях. Из них основные: III и IV Всесоюзные совещания "Закономерности проявления эрозионных и русловых процессов в различных природных условиях", Москва, 1981, 1987; Всесоюзная научная конференция "Исследование русловых процессов для практики народного хозяйства", Москва, 1983; II и III Всесоюзная конференция "Динамика и термика рек, водохранилищ и эстуариев", Москва, 1984, 1989; Всесоюзные координационные совещания по проблеме ГКНТ СССР 0.85.06, Ленинград, 1980, 1984; Всесоюзные координационные совещания по проблеме ГКНТ СССР 0.85.01, Ленинград, 1986, 1987, 1988, 1989; Ломоносовские чтения, МГУ, Москва, 1984, 1985, 1986; Всесоюзное совещание "Природные ресурсы устьевых областей рек, их охрана и использование", Одесса, 1984; Всесоюзное совещание "Охрана природной среды морей и устьев рек", Владивосток, 1986; Всесоюзная конференция "Проблемы инженерной географии", Владимир, 1987; Всесоюзный семинар "Проблемы теоретической геоморфологии", Иркутск, 1987; XIX пленум геоморфологической комиссии АН СССР, Казань, 1988; Всесоюзная конференция "Методология экологического нормирования", Харьков, 1990; IX съезд Географического общества СССР, Казань, 1990; Международный симпозиум "Гидрология и экология", Ленинград, 1990; Международный симпозиум "Геоморфологические процессы и окружающая среда", Казань, 1991.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 48 научных работ в том числе 1 монография. Написаны главы в 16 научных отчетах.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы из 209 наименований. Работа изложена на 306 страницах, в том числе 72 рисунка, II табл. В главах рассматриваются: проблемы структурного анализа, как составляющей системного подхода к теории руслового процесса; механизм образования сложной иерархической структуры руслового рельефа; морфология, динамика и взаимовлияние структурных элементов руслового рельефа; морфологические типы речных русел и определяющие их факторы; принципы оптимального регулирования структуры руслового рельефа в целях рационального природопользования.

Автор относит себя к научной школе географического направления руслового анализа, основанной профессором Н.И.Маккавеевым, который определил главные научные воззрения автора. На протяжении всей научной деятельности автор ощущал благожелательную поддержку и конструктивную критику профессора Р.С.Чалова. Полезные дискуссии автор вел с профессорами К.В.Гришаниным, Н.С.Знаменской, В.Н.Михайловым, Б.Ф.Снищенко, в.н.с. К.М.Берковичем, доц. Н.И.Алексеевским. Эта работа не могла бы быть выполнена без поддержки коллектива научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов и Комплексной эрозионно-русловой экспедиции Географического факультета МГУ. Всем этим лицам автор выражает глубокую благодарность.

Содержание работы.

Базовыми теоретическими положениями для структурного анализа рельефа речного русла являются:

1) Принцип взаимодействия потока и русла, сформулированный М.А.Великановым (1948). Механизм этого взаимодействия Н.И.Маккавеев (1955) понимает как стображение поверхностью твердой среды особенностей движения воды и перемещаемых ею наносов. Мощным аппаратом описания такого механизма является метод малых возмущений.

2) Принцип дискретности руслового процесса, сформулированный Н.Е.Кондратьевым (1953) - наличие конкретных ограниченных в пространстве и во времени русловых форм. Физической основой дискретности руслового рельефа является структурность турбулентного потока в макромасштабе.

3) Принцип континуальности руслового процесса - непрерывность (на макроуровне) руслового потока и поля отметок речного русла, взаимосвязанность и взаимопереходы отдельных русловых форм и их

комплексов.

4) Принцип организации руслового рельефа Н.Е.Кондратьева (1953) - группирование русловых форм по комплексу признаков по уровням организации в структурные ячейки и структурные уровни. При этом образуются иерархические комплексы русловых форм, структурных ячеек, структурных уровней. Для каждого уровня организации характерно наличие особых закономерностей развития входящих в них русловых образований.

5) Принцип ландшафтно-климатической обусловленности морфологии и динамики русел рек, обоснованный Н.И.Маккавеевым (1955) и Р.С.Чаловым (1979). Отражает закономерное изменение во времени и пространстве основных факторов руслового процесса и выражается в зональности руслового процесса, региональных особенностях его проявления.

Структурный анализ системы поток-русло направлен на сближение основных направлений исследования руслового процесса: гидравлично-гидродинамического и географо-гидроморфологического. На основе определения связей между объективно выделенными элементами системы делается попытка синтеза результатов гидравлических и географических исследований руслового процесса.

Глава I. Структурный анализ, как составляющая системного подхода к теории руслового процесса.

Система поток-русло относится к классу динамических саморазвивающихся систем, состоит из двух компонентов - текущей жидкости и размываемого русла. Между потоком и руслом происходит взаимодействие, которое является сущностью руслового процесса (Великанов, 1948). В результате этого взаимодействия в системе возникает новое свойство - структурность: в потоке формируется русловая макротурбулентность, в русле - русловой рельеф.

Система поток-русло является частью геосистемы и техносистемы. Ее внутренние свойства существенно зависят от ландшафтно-климатических и антропогенных факторов.

В общей теории систем определен набор основных категорий, позволяющих изучать системы разных типов на единой методологической основе. Эти категории целесообразно рассмотреть в приложении к системе поток-русло.

I.1. Элементы.

Русловой рельеф - это форма поверхности контакта (непрерывного или периодического) размываемых грунтов с движущейся жидкостью, изменяющаяся в результате их взаимодействия. Основными

элементами руслового рельефа являются грядовые формы, в пределах которых градиенты поверхности не меняют знак с отрицательного (нулевого) на положительный.

На рис. I.1 показан способ выделения гряд на профиле при иерархическом строении руслового рельефа (наиболее частый случай). При этом целесообразно использовать данные о динамике донных форм для уточнения принадлежности гряд к определенному иерархическому уровню.

Поверхность (или линия на профиле) самого высокого ранга для данной совокупности грядовых форм будет описывать отрицательную форму русла. Она характеризуется замкнутыми и незамкнутыми границами по урезу воды, осевой линией, особыми точками - изгиба, перегиба, вершины, оголовья (разветвления), ухвостья (слияния). Сочетание особых точек, знаков кривизны границ, изменения кривизны по длине русла определяет все возможные типы элементов формы русла: прямые участки, изгибы, расширения, сужения, разветвления. Обычно выделяется иерархия особых точек, что существенно увеличивает количество возможных форм русла. Процедура разделения их на иерархические ранги мало отличается от процедуры разделения гряд. Обычно при этом используется осевая линия (рис. I.2).

Каждая грядовая русловая форма и форма русла в целом имеют сложную конфигурацию, которая изменяется в процессе их эволюции. Поэтому применяется набор морфометрических параметров (по И.В. Попову, 1969, измерителей), которые достаточно определенно описывают данный элемент руслового рельефа: шаг, высота, крутизна и т.п.

I.2. Структура.

Структура есть множество связей в системе, выбранных некоторым организованным способом для синтеза системы (Месарович, 1964). В системе поток-русло выделено два класса связей: 1) системообразующие; 2) морфологические. Последние являются следствием первых и реализуются в пределах комплекса руслового рельефа: связи соседства, объединения, иерархические.

Выделение связей соседства - это операция начальной дискретизации руслового рельефа, установления объективных пространственных границ между его элементами. Дискретность руслового рельефа в первую очередь определяет наличие связей соседства.

Объединение форм руслового рельефа производится по набору морфологических, морфометрических, динамических и литологических признаков. Эти связи определяют континуумы русловых форм. Объекты группируются по признаку сходства комплекса свойств. Для клас-

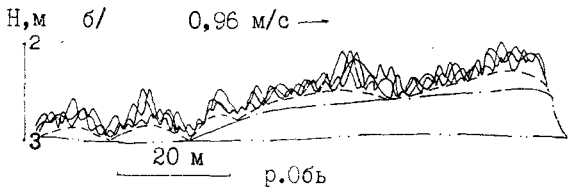
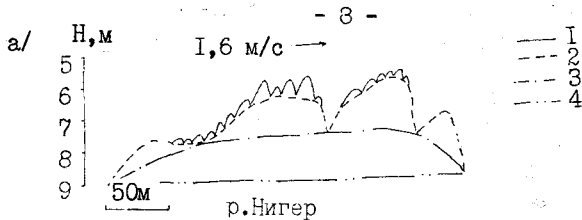


Рис. 1.1. Выделение в сложном иерархическом комплексе гряд рифелей /1/, дон /2/, заструг /3/ без учета /а/ и с учетом /б/ динамики гряд. 4- граница русла.

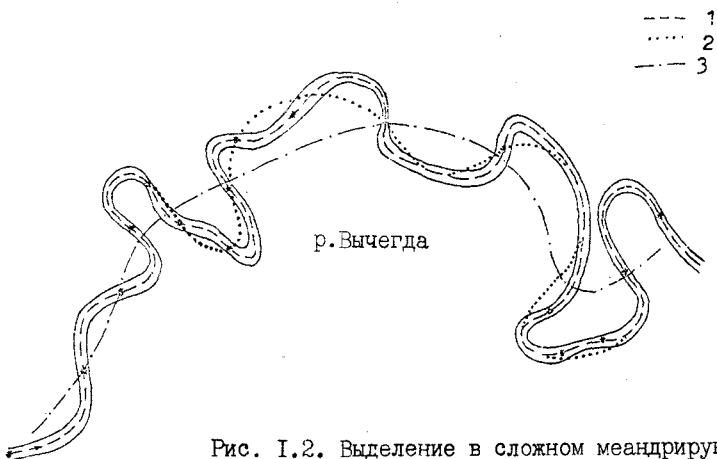


Рис. 1.2. Выделение в сложном меандрирующем русле иерархического комплекса излучин разного порядка. Условные обозначения: 1 - осевая линия излучин I порядка; 2 - излучин 2 порядка; 3 - излучин 3 порядка.

теризации форм руслового рельефа применяются как дискретные, так и континуальные методы. В рамках дискретных методов кластеризации подвергаются наборы морфометрических параметров отдельных русловых форм. Хорошие результаты дает метод усредненного связывания Кинга с применением в качестве показателя различия F - критерия, по которому выбирается комплекс наиболее несовпадающих между собой групп русловых форм (Сидорчук, 1984).

Каждая выделенная группа русловых форм также характеризуется набором морфометрических параметров (например, средними значениями и дисперсиями), которые выступают в качестве дискретных показателей некоторого непрерывного образования. Средние морфометрические параметры русловых форм, составляющих группы, можно, в свою очередь, подвергнуть операции кластеризации и выявить объединения групп, более близких друг к другу по морфологии составляющих их форм, чем другие группы.

Континуальные методы кластеризации форм руслового рельефа не требуют предварительного выделения отдельных элементов, а основаны на обработке полей или рядов показателей руслового рельефа. Ряды (таблицы) отметок дна русел (или других непрерывно изменяющихся параметров - ширины, площади живого сечения, кривизны оси русла), подвергаются спектральному и корреляционному анализам. По расстояниям между максимумами корреляционных функций и по длинам волн, соответствующих статистически достоверным максимумам спектральной плотности, определяются длины русловых форм. Функции спектральной плотности позволяют оценить долю общей дисперсии ряда, приходящуюся на выделенный диапазон длин русловых форм. Тем самым оценивается средняя высота этих форм.

В результате применения континуальных методов анализа выделяются не отдельные русловые формы, а их группировки по комплексу признаков - по близости длины и высоты форм при анализе рядов отметок дна; по близости амплитуд и шагов излучин при анализе рядов кривизны русла. Таким образом получают характерные морфометрические параметры объединений русловых форм. Обычно значения этих параметров несколько отличаются от величин, полученных при группировке русловых форм дискретными методами.

Функции спектральной плотности позволяют наметить границы более обобщенных группировок форм руслового рельефа. Кроме локальных максимумов, соответствующих группам форм, на спектрах обычно выделяются несколько широких областей длин волн с близкими величинами спектральной плотности (рис. 1.3). Они разделяются сравнительно узкими зонами, в пределах которых спектральная

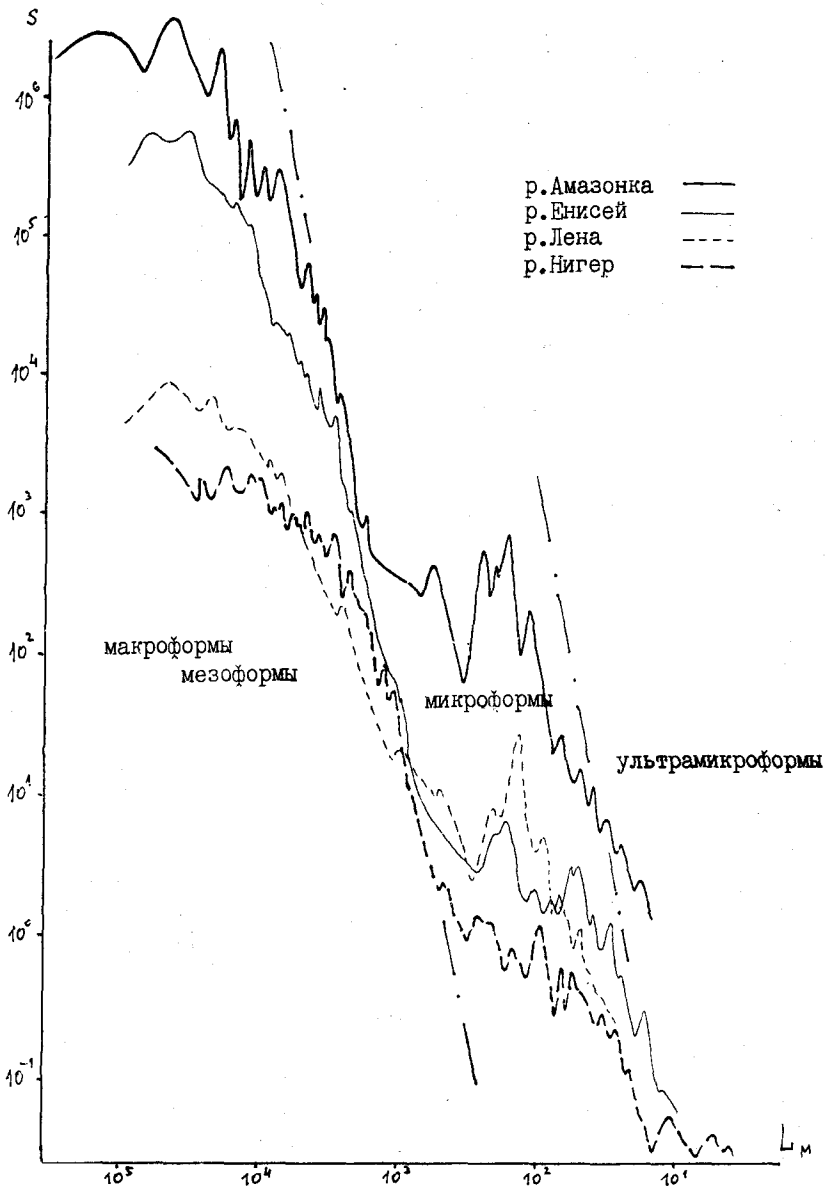


рис 1.3. Функции спектральной плотности рядов отметок дна крупных рек и структурные уровни организации руслового рельефа.

плотность резко изменяется по величине. На графиках функций спектральной плотности, построенных в билогарифмическом масштабе, эти области и зоны отчетливо выделяются как ступени спектральной плотности. Каждая такая ступень является уровнем организации руслового рельефа.

Методы дискретного и континуального анализов при кластеризации руслового рельефа имеют как положительные, так и отрицательные стороны. При использовании методов дискретного анализа выделяются отдельные русловые формы, изучаются свойства каждой из них, влияние всего комплекса на эту конкретную форму и наоборот. Алгоритм объединения отдельных форм в группы по набору признаков достаточно нагляден. Для каждой группы возможна оценка не только средних параметров, но и построение кривых распределения. Однако, высока степень субъективизма как в выделении отдельных форм, так и в выборе критерия наибольших различий кластеров.

Методы континуального анализа обезличивают конкретные русловые формы, приводят к прямому выявлению их ансамблей без операции дискретизации, а поэтому более объективны. Они особенно эффективны при большой сложности руслового рельефа. Однако, спектральный анализ обычно основан на использовании разложения массива данных в ряд Фурье по тригонометрическим функциям. Несинусоидальность большинства русловых форм приводит к увеличению широкополосности спектра и к уменьшению точности определения морфометрических параметров.

Анализ структуры руслового рельефа позволяет заключить, что в русловом процессе дискретные и континуальные свойства переплетены и дополняют друг друга, недоучет одной из сторон реального явления обеднит как теоретические, так и прикладные аспекты науки.

1.3. Организация.

Обладающая структурой система поток-русло более упорядочена, чем бесструктурный турбулентный поток. В системе поток-русло, как и в большинстве сложных систем, упорядоченность проявляется в форме иерархических связей: каждый элемент системы является частью более крупного элемента и, в свою очередь, состоит из более мелких элементов. Иерархические связи приводят к образованию в системе структурных уровней организации. Н.Е.Кондратьев (1953) выделил три основных структурных уровня руслового рельефа - микроформы, мезоформы, макроформы, описал их главные свойства. Н.С.Знаменская (1984) на основе принципа эмерджентности обозна-

чила основной признак, позволяющий отнести разные русловые формы к одному структурному уровню: одинаковые законы протекания руслового процесса, отличные от законов для русловых форм на других структурных уровнях.

Вертикальная структурная организация комплекса руслового рельефа как минимум трехступенчатая: 1) отдельные русловые формы (элементы комплекса) образуют низшую ступень организации; 2) отдельные формы группируются в объединения первого порядка, которые предложено называть структурными ячейками - они образуют среднюю ступень организации; 3) высшая ступень организации - это объединения групп, которые соответствуют структурным уровням руслового рельефа (рис. 1.4). Сложность комплекса русловых форм определяется количеством выделенных структурных ячеек и структурных уровней.

Внутри каждой ступени выявляются горизонтальные иерархические связи. Каждая отдельная русловая форма является частью более крупной формы (а наиболее крупная является частью элемента внешней по отношению к системе поток-русло геосистемы). В то же время, каждая отдельная русловая форма включает в себя в качестве элементов более мелкие русловые формы. Исключением являются частицы наносов, которые в системе поток-русло являются простыми элементами. Структурные ячейки и структурные уровни также образуют иерархический ряд (рис. 1.4).

Принципиальное значение имеет проблема ранжирования русловых форм (структурных ячеек, уровней) в иерархическом ряду. Ранжирование должно учитывать: 1) иерархическое соподчинение русловых форм разного ранга в пределах морфологически однородного участка одного русла; 2) морфодинамическое соответствие русловых форм одного ранга в разных речных руслах. На рис. 1.4 представлена морфодинамическая классификация руслового рельефа (Сидорчук, 1964), развивающая классификацию Н.Е.Кондратьева (1953). Р.С.Чалов (1983) предложил иерархическую классификацию руслового рельефа, состоящую из следующих звеньев: долина реки - пойма - форма русла - грядовая форма. Классификация Американского общества гражданских инженеров (ASCE, 1966) включает: морфологический тип русла - крупные гряды, определяющие конфигурацию меженного русла (бары) - мелкие донные формы. Эти морфодинамические классификации при разной терминологии оперируют одними и теми же понятиями. Они построены по принципу относительности размеров и признаков. В качестве базового принимается один и тот же элемент: макроформа (форма русла). Относительно макроформы по мере уменьшения размеров

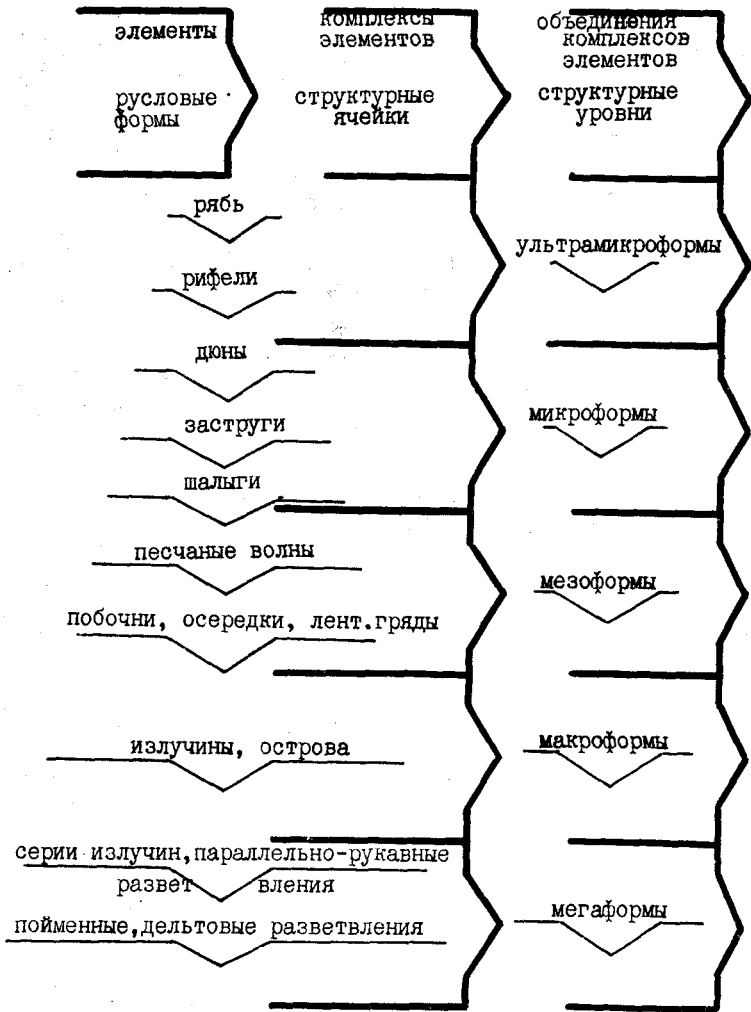


Рис. 1.4 . Иерархическая организация руслового рельефа

и/или потери качественных признаков (наличия поймы) выделяются мезоформы, микроформы, ультрамикроформы и рябь. Увеличение размеров относительно макроформы позволяет выделить мегаформы (сложные формы русла).

Относительность является общим недостатком всех морфодинамических классификаций. Поэтому они не удовлетворяют 2 условию ранжирования русловых форм. Однако именно в терминах этих классификаций накоплена основная информация о морфологии и динамике рельефа речного русла. Необходимо создание структурной классификации руслового рельефа, основанной на анализе механизма образования русловых форм, которая дополнит морфодинамическую классификацию, позволит определить морфодинамически эквивалентные русловые формы на разных реках.

Глава 2. Механизм образования сложной иерархической структуры руслового рельефа.

2.1. Структура турбулентного потока

В атмосфере, океане и русловом потоке известны вихревые структуры с линейными размерами, на порядок большими толщины тропосферы, глубины океана или реки. Скорость движения этих макромасштабных вихревых образований (циклонов и антициклонов в атмосфере, крупных изгибов океанических течений, вторичных движений в речных руслах) значительно меньше скоростей движения формирующих их потоков, то есть они относительно стационарны. По своей природе они являются макротурбулентными образованиями. Эти вихревые структуры изучаются методами статистической гидромеханики, причем большие размеры и относительно малые скорости перемещения вихрей позволяют применять не только временной, но и пространственный анализ (Монин, Озмидов, 1981). Вторичные движения описываются местными, осредненными во времени, скоростями потока. В русловом потоке с грядовым дном, в результате взаимодействия потока и русла, описывающие вторичные движения скорости изменены влиянием рельефа. Для восстановления первоначальных вторичных течений необходимо это влияние устранить. На р.Нигере во время половодья 1978 проведены подробные съемки поля скоростей над дюнами и осередком. В первом случае влияние рельефа устранялось с помощью уравнения неразрывности, во втором - с помощью уравнения Шези. В обоих случаях первоначальные скорости, описывающие вторичные движения, волнообразно изменяются по длине потока с шагом, близким к шагу гряд. Первоначальные скорости максимальны в ложбинах между грядами и минимальны в области гребней

гряд. В областях потока со скоростями меньше неразрывающих произошло отложение наносов, сформировались гряды, которые видоизменили первоначальное поле вторичных движений. При этом в случае донного рельефа произошла полная инверсия поля скоростей, образование осередка несколько уменьшило изменчивость первоначальных скоростей, но расположение минимумов и максимумов сохранилось.

Спектральный анализ рядов скоростей вторичных движений на ряде рек показал, что они качественно сходны с мелкомасштабными турбулентными пульсациями. В обоих случаях наблюдается уменьшение энергии структурного элемента потока с уменьшением его размеров. Вторичные движения представляют собой иерархически построенную систему вихрей, где происходит каскадная передача энергии первичных движений через относительно крупные структуры потока ко все более и более мелким. На функциях спектральной плотности отмечается участок, на котором зависимость спектральной плотности от волновых чисел описывается законом $n^{-\frac{5}{3}}$ (рис. 2.1). Однако на спектрах вторичных течений инерционный интервал начинается в области длин волн, на 2-3 порядка превышающих обычно принимаемую величину внешнего масштаба русловой турбулентности - глубину потока.

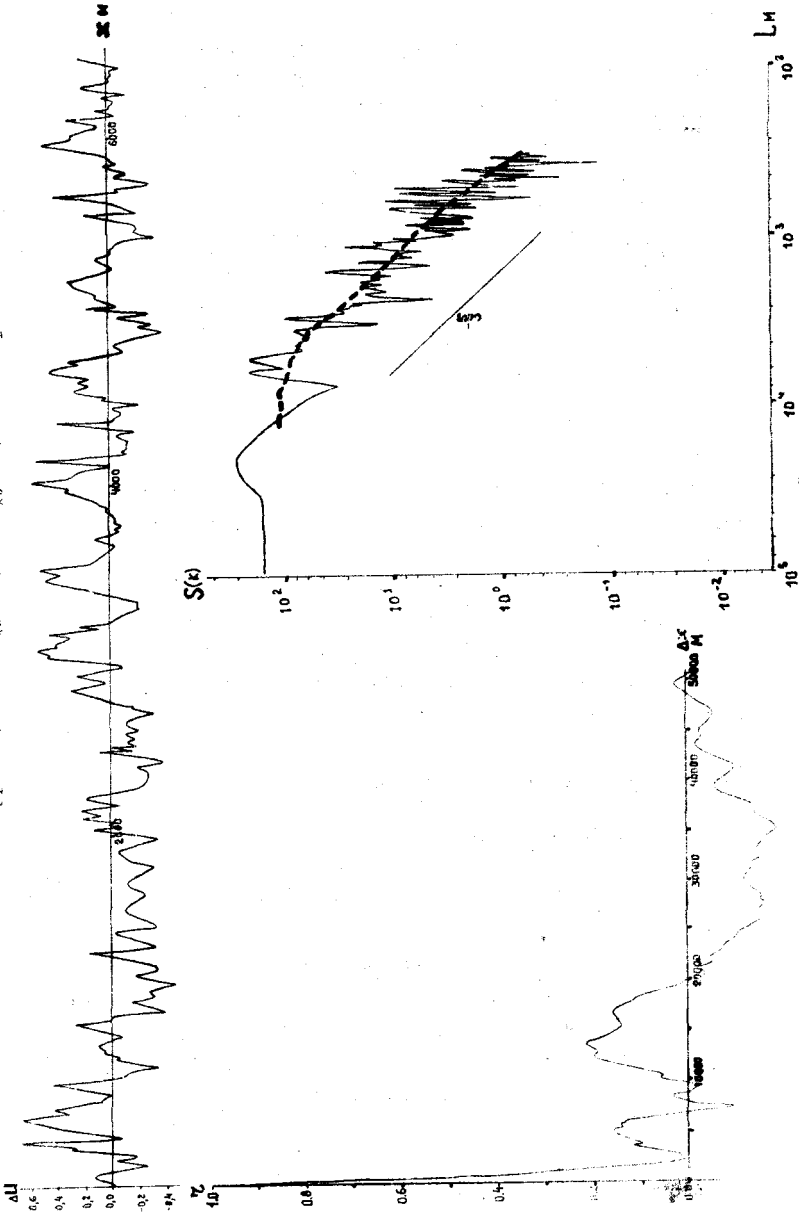
Максимумы спектральной плотности на энергетических спектрах можно трактовать как дополнительный приток энергии к определенным структурам потока либо непосредственно от первичного движения, либо за счет энергии наименее устойчивых вихрей. Эти энергонесущие структурные образования будут относительно устойчивыми в ряду неустойчивых вихрей руслового потока и именно они по своим размерам соответствуют русловым формам.

2.2. Развитие малых возмущений в русловом потоке.

Механизм отображения поля скоростей квазистационарных вихревых структур в размываемом ложе потока, который качественно описывали Дж. Дарвин (1863), М.А. Великанов (1948), Н.И. Маккавеев (1955), раскрывается с помощью метода малых возмущений. Целый цикл работ, который открывается статьями А. Андерсена (1957), Х. Ли (1957), Д. Кеннеди (1963), Н.Б. Кереселидзе (1969), создает стройную картину начальных этапов эволюции русловых форм, позволяет рассчитывать их характерные размеры. К.В. Гришанин (1974) отмечает, что метод малых возмущений поставил решение проблемы о происхождении волнообразного рельефа подвижного дна на научную основу.

Наибольший интерес представляет исследование уравнений пла-

Рис. 2.1. Изменение скоростей вторичных течений по длине русла р. Иннеги, их автокорреляционная функция и функция спектральной плотности.



новой гидравлики. Анализ работ Г.Паркера (1976), И.Фредсо (1978) и А.Е.Михинова (1983) показал, что чем более полная форма уравнений плановой гидравлики исследуется методом малых возмущений, тем более сложный характер имеет поле начальных неустойчивых возмущений. Наиболее полная форма уравнений плановой гидравлики записана Н.А.Картвелишвили (1973), где учитывается как кривизна свободной поверхности потока, так и кривизна линий тока в горизонтальной плоскости.

К уравнениям Картвелишвили применима стандартная процедура метода малых возмущений (Линь, 1955). Основные гидравлические характеристики представляются в виде суммы осредненной компоненты и компоненты возмущения. Если рассматривать для осредненных компонент случай установившегося равномерного потока в прямолинейном русле неизменной глубины, то после вычитания уравнений для осредненных компонент и линеаризации из уравнений Картвелишвили получается:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - (\alpha - 1) \frac{U \partial h}{H \partial t} + \alpha_1 U \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial z}{\partial x} + 2g \frac{uU}{C_0^2 H} - g \frac{U^2 h}{C_0^2 H^2} + H \left(\beta_1 \frac{\partial^2 z}{\partial t^2 \partial x} + 2U \beta_2 \frac{\partial^2 z}{\partial t \partial x^2} + U^2 \beta_3 \frac{\partial^2 z}{\partial x^3} \right) = 0; \quad (2-1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \alpha_2 U \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial z}{\partial y} + g \frac{vU}{C_0^2 H} + \alpha U^2 K + H \left(\beta_1 \frac{\partial^2 z}{\partial t^2 \partial y} + 2U \beta_2 \frac{\partial^2 z}{\partial t \partial x \partial y} + U^2 \beta_3 \frac{\partial^2 z}{\partial x^2 \partial y} \right) = 0;$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + U \frac{\partial h}{\partial x} + H \frac{\partial u}{\partial x} + H \frac{\partial v}{\partial y} = 0;$$

$$\frac{\partial z_0}{\partial t} + M \frac{\partial u}{\partial x} + S \frac{\partial v}{\partial y}; \quad M = \frac{\partial q_s}{\partial U}; \quad S = \frac{q_s}{U}.$$

Здесь U и H - осредненные продольная скорость и глубина потока, u, v, z, z_0, h - возмущения продольной и поперечной скоростей, отметки свободной поверхности и дна, глубины потока, C_0 - коэффициент Шези; x, y, t - продольная, поперечная, временная координаты; q_s - продольный расход наносов. Значения коэффициентов определяются формой вертикальной эпюры скоростей. В первом приближении $\alpha = 1,02$; $\alpha_1 = 0,42$; $\alpha_2 = 0,24$; $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0,3$.

Возмущения гидравлических характеристик в линейном приближении представляются в виде синусоидальных волн:

$$\{u; v; z; z_0\} = \{A(y); B(y); P(y); T(y)\} \exp[ik_1(x-ct)], \quad (2-2)$$

характеризуемых комплексной скоростью $c = c_R + ic_i$; При $c_i > 0$ волна возмущения увеличивает амплитуду во времени, т.е. неустойчива, при $c_i < 0$ волна возмущения устойчива. Здесь $k_1 = 2\pi/L_1$ - продольное волновое число, L_1 - длина волны.

Для описания возмущений кривизны линий тока K можно применить формулу И.Л.Розовского (1957)

$$K = - \frac{1 - 7,2\sqrt{H}/C_0}{7,4 - 13,0\sqrt{g}/C_0} \frac{v}{UH}. \quad (2-3)$$

После подстановки (2-2) и (2-3) в (2-1) получим систему уравнений

$$\begin{aligned} a_1 A + c_1 P + d_1 T &= 0; \\ b_2 B + c_2 \frac{dP}{dy} &= 0; \\ a_3 A + b_3 \frac{dB}{dy} + c_3 P + d_3 T &= 0; \\ a_4 A + b_4 \frac{dB}{dy} + d_4 T &= 0; \end{aligned} \quad (2-4)$$

где

$$\begin{aligned} a_1 &= -ik_1 c + \alpha_1 U ik_1 + 2g \frac{U}{C_0^2 H}; & a_3 &= ik_1 H; \\ c_1 &= g ik_1 - \beta_1 H ik_1^3 c^2 + 2UH \beta_2 ik_1^3 c - & b_3 &= H; \\ & - U^2 \beta_3 ik_1^3 + (\alpha - 1) \frac{U}{H} ik_1 c - g \frac{U^2}{C_0^2 H^2}; & c_3 &= -ik_1 c + ik_1 U; \\ d_1 &= -(\alpha - 1) \frac{U}{H} ik_1 c + g \frac{U^2}{C_0^2 H^2}; & d_3 &= ik_1 c - ik_1 U; \\ b_2 &= -ik_1 c + \alpha_2 U ik_1 + \alpha \gamma \frac{U}{H}; & a_4 &= M ik_1; \\ c_2 &= g - \beta_1 H k_1^2 c^2 + 2UH \beta_2 k_1^2 c - U^2 \beta_3 k_1^2; & b_4 &= S; \\ \gamma &= \frac{g}{C_0^2} - \frac{1 - 7,2\sqrt{H}/C_0}{7,4 - 13,0\sqrt{g}/C_0}; & d_4 &= -ik_1 c. \end{aligned}$$

Путем последовательного исключения переменных система (2-4) сводится к обыкновенному дифференциальному уравнению 2 порядка

$$\frac{d^2 P}{dy^2} + \lambda P = 0; \quad (2-5)$$

где

$$\lambda = \frac{b_2(-c_1 d_4 a_3 - c_3 a_4 d_1 + c_1 d_3 a_4 + c_3 d_4 a_1)}{c_2(b_3 d_4 a_4 - d_4 b_3 a_1 - b_4 d_1 a_3 + b_4 d_3 a_1)}. \quad (2-6)$$

Решение уравнения (2-5) зависит от выбора граничных условий. При $P(0) = P(b)$ и $dP/dy(0) = -dP/dy(b)$; $P(y) \sim \cos[\sqrt{\lambda}(y - \frac{b}{2})]$ - реализуется вариант симметричной конфигурации русловых форм. При $P(0) = -P(b)$ и $dP/dy(0) = dP/dy(b)$; $P(y) \sim \sin[\sqrt{\lambda}(y - \frac{b}{2})]$ - реализуется асимметричная конфигурация русловых форм. В обоих случаях

$$\lambda = \kappa_2^2 = \left(\frac{2\pi}{L_2}\right)^2 = \left(\frac{\nu\pi}{b}\right)^2; \quad (2-7)$$

где ν - действительное положительное число; L_2 - ширина волны; b - ширина русла. Рассматриваемые граничные условия соответствуют непрерывному спектру возмущений гидравлических характеристик потока как по продольному κ_1 , так и по поперечному κ_2 волновому числу (рис. 2.2).

2.3. Структура рельефа речного русла.

Если раскрыть функцию (2-6) с учетом (2-7), получим дисперсионное соотношение в виде алгебраического уравнения 4 степени относительно комплексной скорости C :

$$A_4 C^4 + A_2 C^3 + A_3 C^2 + A_1 C + A_5 = 0. \quad (2-8)$$

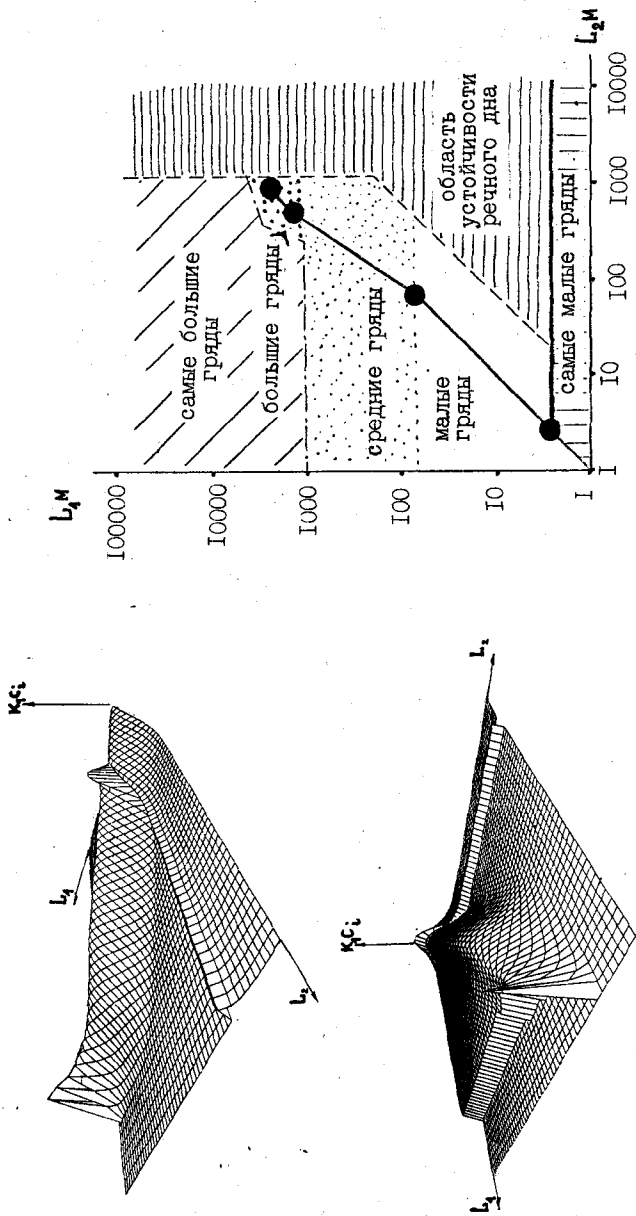
Каждый коэффициент является сложной функцией:

$$A_i = f_i(\kappa_1; \kappa_2; U; H; C_0; \gamma; q_s; \alpha; \alpha_1; \alpha_2; \beta_1; \beta_2; \beta_3).$$

Проведено численное исследование решений уравнения (2-8) в широком диапазоне изменения значений этих величин. При этом анализировалось решение, относящееся к волнам с минимальными скоростями продольного перемещения, которые соответствуют грядам на дне потока. Выделяются следующие области решения (рис. 2.2):

1) Область устойчивых возмущений. В этой области образование русловых форм не происходит. 2) Область двумерных коротковолновых возмущений с хорошо выраженным максимумом скорости роста амплитуды при длинах волн порядка глубины потока. Сопоставляется с самыми малыми грядами в рельефе речного русла. Верхней границей области является линия $L_1 = 6,3 H F_2$. 3) Область трехмерных возмущений с максимумом скорости роста амплитуд, приходящимся на главную диагональ спектра при $L_1 = L_2$, т.е. волны изометричны. Сопоставляются с малыми русловыми грядами. Верхней границей области при $(0,1 < F_2 < 0,9)$ является линия $L_1 = 5,2 H \lambda^{-0,3} \exp(2,0 F_2)$. 4) Область трехмерных возмущений, где с увеличением длины волны возмущения увеличивается ее вытянутость по потоку. Сопоставляется со средними русловыми грядами. Верхней грани-

Рис. 2.2. Непрервный двумерный спектр скоростей увеличения амплитуд малых возмущений отметок дна, полученный в результате решения линеаризованных уравнений планового движения потока Н.А.Картвели-швили и выделенные на нем области развития гряд различных типов.



цей области является линия $L_1 = 8,0 \text{ Н } \lambda^{-1} \exp(-1,8 F_2)$. 5) Область трехмерных возмущений с максимумом скорости роста амплитуд в точке

$$L_1 = 4,2 \text{ Н } \lambda^{-1} F_2^{-1,1} \quad (0,1 \leq F_2 \leq 0,5);$$

$$L_1 = 42,0 \text{ Н } \lambda^{-1} \exp(-3,1 F_2) \quad (0,5 < F_2 < 1,0);$$

$$L_2 = L_1 / \sqrt{\frac{2g}{\lambda}}.$$

Сопоставляются с большими грядами. 6) Область трехмерных длинноволновых возмущений, перемещающихся вверх по потоку. Характеризуются значительной вытянутостью ($L_1 \gg L_2$) и слабо выраженным максимумом скорости роста амплитуд. Сопоставляются с малоизученными русловыми формами - очень большими грядами (мегаформами).

Здесь $\lambda = \frac{2g}{C_0^2}$ - коэффициент гидравлического сопротивления, $F_2 = U/\sqrt{gH}$ - число Фруда.

Системы уравнений плановой гидравлики Сен-Венана и Буссинеска являются упрощенными вариантами полной системы (2-1). Неучет в уравнениях Буссинеска плановой кривизны линий тока приводит к потере информации о больших грядах и к некоторой трансформации распределения скоростей роста амплитуд малых и средних гряд. Только самые малые гряды, слабо зависящие от конфигурации потока в плане, описываются упрощенными уравнениями так же, как и полными. Неучет в уравнениях Сен-Венана волн свободной поверхности приводит к потере информации и по самым малым грядам.

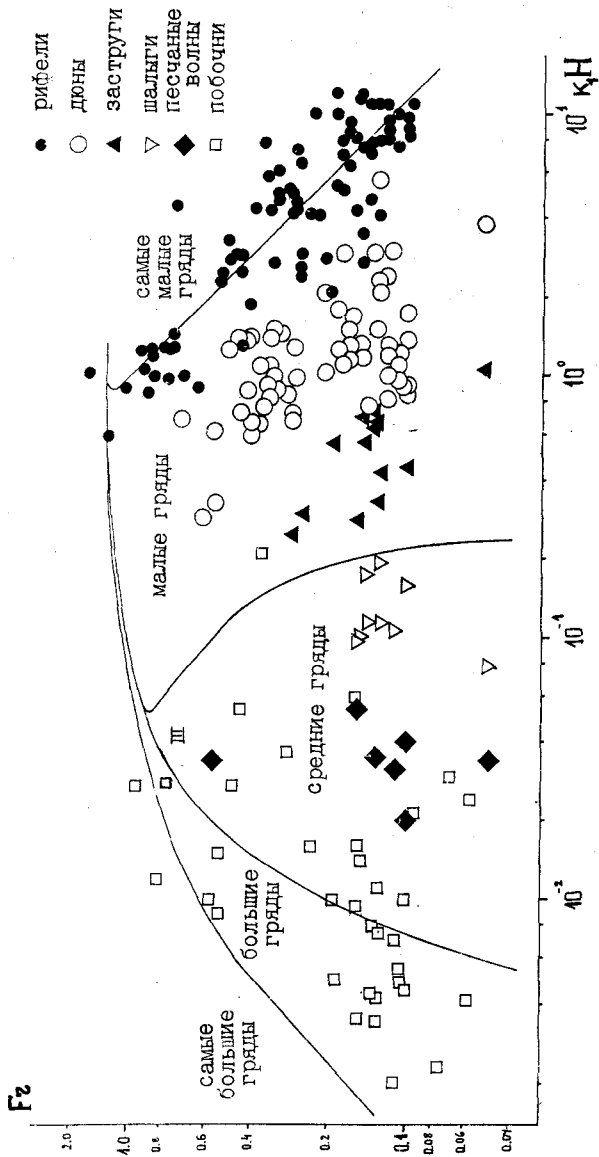
Каждой теоретически полученной области развития начальных возмущений отметок дна русла соответствует иерархический класс (или несколько классов) динамически устойчивых русловых форм (рис. 2.3, данные как по рекам, так и по лабораторным лоткам). Таким образом структурная гидравлическая классификация грядовых форм, опирающаяся на количественные показатели - гидравлические характеристики потока, создает теоретическую базу для обработки эмпирических данных о морфологии и динамике речного русла. Она дополняет морфодинамические классификации руслового рельефа, позволяет в единой системе ранжировать иерархические комплексы русловых форм, полученные для разных рек и разных участков одних рек.

Глава 3. Морфология и динамика грядовых форм рельефа речного русла.

3.1. Рябь.

Из всего комплекса форм руслового рельефа наиболее слабо изучена рябь. По определению американского общества гражданских

Рис. 2.3. Соответствие теоретически выделенным областям развития различных типов гряд развитых в реках и экспериментальных лотках иерархических комплексов руслового рельефа.



инженеров (ASCE, 1966) под рябью понимаются донные формы длиной до 0,3 м, размеры которых не зависят от глубины потока. Наличие ряби отмечается многими исследователями, однако практически нет работ, где отнесение наблюдаемых форм к ряби было бы обосновано. Нами зафиксирована рябь, как наиболее мелкие формы рельефа дна русла р.Нигера, при проведении подробных промерных работ в 1978-79 гг. На днах и рифелях отчетливо видны формы длиной 0,3-0,5 м и высотой 0,05-0,1 м. Аналогичные формы в соответствующей иерархической последовательности наблюдались на обсохших отмелях р.Нигера, что свидетельствует об отсутствии зависимости параметров ряби от глубины потока.

Шаг ряби на Нигере составил $L \sim 500$ диаметров донных наносов d . По данным Ялина (1964) $L \sim 1000d$. Результаты исследования Аллена (1968) указывают на более широкий диапазон относительной длины ряби - $L/d = 400+3000$. Ричардс (1980) провел теоретическое исследование формирования ряби методом малых возмущений. При высоте выступов шероховатости $\sim 4,5d$ получено соотношение $L/d = 200+2500$.

3.2. Ультрамикрорыбы (рифели)

Б.Ф.Снищенко (1983) относит к рифелям донные формы с характерным шагом порядка глубины потока. К.Ричардс (1980) выделяет подобные формы под названием мегарябь. Таким образом, под рифелями понимаются самые мелкие донные формы, размеры которых зависят от глубины потока. Их исследование проведено на р.Нигере в диапазоне глубин H 2,0+20,0 м, скоростей потока U 0,6+1,7 м/с, среднего диаметра грунта d 0,7+0,8 мм; на р.Оби при H 2+5 м, U 0,6+1,0 м/с; d 0,7+2,0 мм; на р.Лене при H 3+7 м, U 0,8+1,5 м/с, d 0,25 мм; на р.Тереке при H 0,5+8 м, U 0,5+3,0 м/с, d 0,2+0,5 мм.

Рифели являются двумерными донными формами. Их гребни прослеживаются поперек направления течения на расстояния, существенно превосходящие шаг вдоль потока. В русле р.Лены у пос.Мохсоголлох по данным локатора бокового обзора шаг рифелей по потоку составляет 5-10 м, а линии гребней прослеживаются поперек потока на 200-300 м. Часто линии гребней рифелей извилисты, благодаря чему формы приобретают некоторую трехмерность.

В продольном разрезе форма рифелей эллипсовидна, с выпуклыми верховым и низовым откосами. Верховой откос обычно длиннее низового - на р.Оби в 70% случаев коэффициент асимметрии формы рифелей $(L_v - L_n)/L_p$ положительный.

Кривая распределения длин рифелей обычно описывается гамма-

распределением.

$$dp = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} L_p^{\alpha-1} \exp(-\beta L_p) dL_p. \quad (3-1)$$

Параметры распределения связаны со средней длиной рифелей \bar{L}_p и коэффициентом вариации длин $C_{vL}: \alpha = 1/C_{vL}^2; \beta = 1/(\bar{L}_p \cdot C_{vL}^2)$. Так как $C_{vL} \approx 0,4$, кривая распределения длин рифелей описывается функцией с одним параметром - средней длиной рифелей.

Формулу для расчета средней длины рифелей можно получить теоретически, исходя из соответствия их самым малым грядам. Двумерность рифелей позволяет пренебречь кривизной линий тока в плане и поперечной составляющей возмущений скорости потока. Тогда система (2-1) существенно упрощается и, после пренебрежения малыми членами, допускает аналитическое решение. А.Е.Михинов (1985) из анализа уравнений Буссинеска получил формулу для расчета длин рифелей в виде

$$L_p = 5,4 H Fz. \quad (3-2)$$

Эта формула хорошо подтверждается измерениями длин рифеля в лотках и в реках. При числах Фруда < 1 она совпадает с результатами решения полной системы уравнений (2-1).

Анализ решения системы (2-1) показывает, что на участке сочленения областей развития самых малых и малых гряд образуется локальный максимум. Длины соответствующих этому максимуму трехмерных рифелей хорошо описываются формулой (3-2) с коэффициентом 7,4. Такие рифели широко распространены в русле р.Терека ниже устья Сунжи. Эмпирические данные показывают, что шаг трехмерных рифелей примерно вдвое больше шага двумерных рифелей.

Кривая распределения высот рифелей аппроксимируется распределением Вейбулла-Гнеденко:

$$dp = \mu \lambda h_p^{\mu-1} \exp(-\lambda h_p^\mu) dh_p. \quad (3-3)$$

Коэффициенты μ и λ связаны с \bar{h}_p и C_{vh} соотношениями $\bar{h}_p = \lambda^{-1/\mu} \Gamma(z+1)$; $C_{vh}^2 = \Gamma(zz+1) / \{\Gamma(z+1)\}^2 - 1\}$; $z = 1/\mu$. Данные наблюдений показывают малую изменчивость $C_{vh} \approx 0,5$, и кривая распределения высот рифелей определяется одним параметром - средней высотой \bar{h}_p . Здесь Γ - гамма-функция. Линеинное приближение в решении уравнений гидравлики методом малых возмущений не позволяет получить выражение для высот рифелей. Однако большое количество эмпирических данных и исследования Ялина, Карахана (1979), Дебольского, Когана, Михайловой (1976)

позволяют предложить следующую аппроксимацию зависимости высот рифелей от гидравлических характеристик

$$\frac{h_p}{H} = a \frac{U - u_m}{\sqrt{gH}} \exp \left[-b \frac{(U - u_m)}{u_m} \right] \quad 3.4$$

Коэффициенты a и b равны 1,6 и 0,5.

Стохастический характер распределения высот и длин рифелей обуславливает вероятностную связь между ними с широким диапазоном значений крутизны низового откоса рифелей h_p/L_m . Для верхней Оби ее величина не превосходит 0,4 (угол откоса 20°), а модальное значение приходится на 0,1-0,15 ($6-9^\circ$).

3.3. Микроформы.

Б.Ф.Снищенко (1983) к микроформам (грядам) относит донные формы с длинами порядка 10 глубин потока. В номенклатуре американского общества гражданских инженеров (1966) грядами называются донные формы, размеры которых занимают промежуточное положение между рябью и барами.

Общепринятая номенклатура разных ступеней иерархии микроформ еще не разработана, хотя они выделяются многими исследователями, работающими на натуральных объектах. Предлагается давать каждому грядовому комплексу название: доны - это микроформы, поверхность которых моделируется рифелями; заструги-микроформы, осложненные донами; шалыги - микроформы, на поверхности которых расположены заструги, и т.д. (Сидорчук, 1989).

Иерархический грядовый комплекс с непрерывным спектром, широким диапазоном длин волн и усложняющимся строением более крупных форм образуется на речном дне при установившихся гидравлических характеристиках потока. Сложность его строения обусловлена не наличием реликтовых форм (хотя они могут присутствовать), а наложением гряд меньшей длины на гряды большей длины.

Для микроформ выделяются две основные стадии развития: активная и пассивная. В активной стадии в потоке существуют вихревые структуры, отображением которых в размываемом грунте являются гряды. В пассивной стадии в потоке не могут образоваться вихревые структуры, отображающие существующие гряды. Пассивные гряды часто трансформируются при перемещении по их поверхности более мелких активных гряд.

Доны хорошо выражены в русле реки Нигер ниже устья р.Бенуэ. Их морфология и динамика исследованы в половодье - межень 1976-79 гг. (Сидорчук, 1983, 1985). В активную стадию развития доны представляют собой изометричные в плане трехмерные гряды. В вертикальной плоскости (как в продольном, так и в поперечном на-

правлении) склоны дон выпуклые, форма профиля симметричная, эллипсоидная. Однако низовой откос даже активных дон иногда бывает прямым или вогнутым. Симметричную форму в продольном разрезе имеет 46% активных дон Нигера, остальные обладают в основном положительной асимметрией.

Распределения длин и высот активных дон описываются теми же кривыми (3-1) и (3-3), что и для рифелей.

Теория неустойчивости малых возмущений в линейном приближении не дает возможности получить теоретическую формулу для длины наиболее вероятных дон. Анализ данных по длинам активных дон рек Амазонки, Нигера, Терека, Днестра показал, что для расчета длин дон применима формула вида (3-2)

$$L_g = \beta' H F^2.$$

Коэффициент имеет тенденцию увеличиваться с увеличением размера реки. Наиболее часто $\beta' = 30,0-40,0$, т.е. дны в 5-6 раз длиннее рифелей. Средние высоты дон описываются зависимостью (3-4), с коэффициентами $a = 3,2$ и $b = 0,3$.

Крутизна низового откоса активных дон меньше, чем у рифелей - в 78% случаев $h_g/L_n < 0,1$ (6°). Исследование поля скоростей во время половодья над активными днами показывает, что присоединенного вихря в подвалье таких гряд не образуется из-за малой крутизны низового откоса. На спаде половодья, по мере уменьшения глубин и удельного расхода потока, происходит трансформация поля скоростей над днами и изменение формы дон. Развитие дон вступает в пассивную стадию, когда их морфология и динамика обусловлены полем скоростей, определяемым существованием самих гряд.

В русле р.Нигера выделяются области: 1) замедленной трансформации и 2) ускоренной трансформации пассивных дон. В области замедленной трансформации при уменьшении расхода воды, глубин и скоростей потока морфология дон изменяется гораздо медленнее, чем на стадии активных дон. Эта область охватывает глубокие плесовые ложины с глубинами $H > 7$ м. Область ускоренной трансформации дон расположена в основном на перекатах, побочнях и осередках с глубинами $H < 5-6$ м. При уменьшении расходов воды и глубин потока трансформация пассивных дон происходит быстрее, чем активных. Значительная разница в скоростях течения над разными участками дны приводит к увеличению скорости смещения гребня и перекосу гряды. Она быстро приобретает асимметричную "классическую" треугольную форму со слегка выпуклым пологим верховым откосом и вогнутым низовым откосом крутизной до 30-35°.

В подвалье дны образуется присоединенный вихрь с обратными придонными течениями, поддерживающими крутой низовой откос. Более высокие и крутые дны быстрее приобретают асимметричную форму. Более низкие и пологие часто остаются симметричными, они сглаживаются и сливаются с крутыми днами. Происходит процесс скачкообразного удвоения длины гряды, который был детально рассмотрен Н.С.Знаменской (1989). Одновременно с потерей симметрий дны утрачивают ярко выраженную трехмерность. Соседние (поперек потока) дны сливаются, их гребни образуют единую, слегка волнистую линию, скошенную в сторону плеса. Дны становятся существенно двумерными. По мере понижения уровня воды в процесс слияния вовлекается все больше трехмерных дон. Шаг двумерных дон увеличивается от 1,5-2,0 шагов трехмерных дон в начале их ускоренной трансформации до 10 и более в его конце (рис. 3.1). Такие изменения дон обуславливают гистерезисный вид связей их морфометрических параметров с гидравлическими характеристиками потока. Связи такого рода являются типичными для дон многих рек (Allen, 1976; Снитченко, 1962).

Еще более существенное влияние оказывает гидрологический режим рек на морфологию и динамику более крупных микроформ-заструг и шалыг. На р.Нигере их характерные размеры складываются в конце подъема половодья и на его пике. Во время спада половодья они остаются практически постоянными и лишь в конце спада и во время межени, когда средние глубины воды становятся меньше 4,0 м, крупные микроформы начинают расплываться, симметричные гряды с пологими выпуклыми откосами становятся резко асимметричными. Верховой откос выполаживается, крутизна низового склона достигает угла естественного откоса - 33-35°. Кривые распределения длин крупных микроформ хорошо описываются гамма-распределением, коэффициент вариации длин увеличивается с увеличением размеров гряд: для заструг $C_{vL} = 0,4$, для шалыг - 0,34. Средние длины увеличиваются с увеличением глубины и кинетичности потока. Обычно заструги в 3,9 раза длиннее дон, шалыги в 3,9 раза длиннее заструг.

На р.Нигере, при средней крупности донных грунтов 0,6-0,9 мм и скоростях течения 0,7-1,6 м/с, заструги и шалыги большую часть гидрологического года находятся в пассивной стадии развития. На р.Тереке, при средней крупности аллювия 0,2-0,3 мм и скоростях течения 1,5-2,7 м/с, заструги - это в основном активные гряды с симметричной формой продольного профиля.

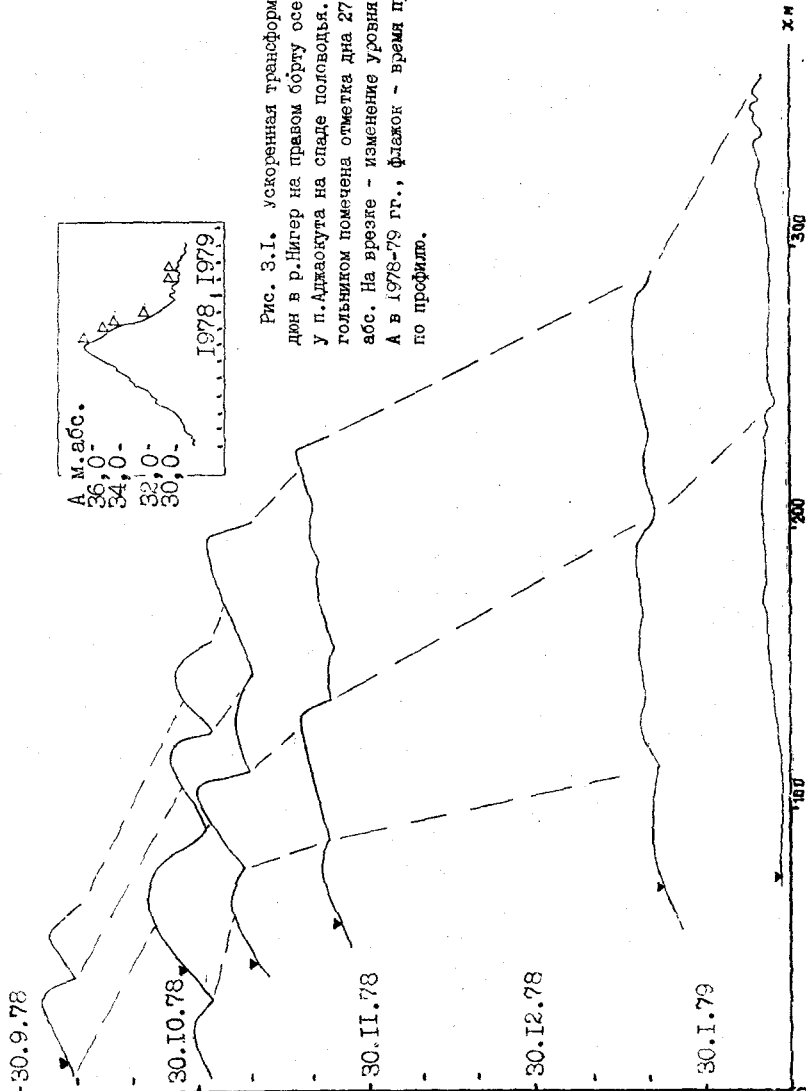


Рис. 3.1. ускоренная трансформация дон в р.Нигер на правом борту осередка у п.Адзаскута на спаде половодья. Треугольником помечена отметка дна 27,0 м. абс. На врезке - изменение уровня воды А в 1978-79 гг., флажок - время промера по профилю.

3.4. Взаимовлияние микроформ различных классов.

Совместное рассмотрение зависимости средних высот рифелей и микроформ разной сложности от определяющих гидравлических факторов (формула 3-4) показывает, что для всех донных форм характерно наличие двух ветвей этой зависимости. Прослеживается ветвь увеличения относительной высоты h/H донных форм с увеличением превышения скорости потока над неразмывающей $U - u_n$ и, после достижения максимума, ветвь уменьшения относительной высоты (смыва донных форм) при дальнейшем увеличении $U - u_n$. Однако смыв рифелей происходит при меньших скоростях потока, чем смыв микроформ, и чем крупнее микроформы, тем большие скорости

потока необходимы для их смыва. В результате возможны гидравлические условия, когда на донях не будут выделяться рифели (или будут очень слабо выражены), на поверхности заструг не будет дон, и т.д.

Сочетание рифелей и микроформ с разной высотой, крутизной и тенденцией развития в различные фазы гидрологического режима приводит к сложной картине изменений общего гидравлического сопротивления русла в ходе изменения гидравлических условий. На р.Нигере коэффициент сопротивления λ уменьшается с увеличением числа Рейнольдса Re в конце подъема уровней в половодье и достигает минимальных значений 0,007 на пике половодья при $Re = 2,0 \cdot 10^7$. В это время все микроформы имеют симметричный продольный профиль с пологим низовым откосом. Они не создают сопротивления формы. Наибольшая крутизна свойственна рифелям, в их подвальях образуются присоединенные вихри. Гидравлическое сопротивление определяется шероховатостью рифелей, длины которых увеличивается с увеличением водности реки.

Сопротивление достигает максимума в начале спада половодья: при значениях $Re \ 8,9 \cdot 10^6$ λ составляет 0,02-0,025. В дальнейшем на спаде половодья и в межень сопротивление русла уменьшается с уменьшением значения числа Рейнольдса. Главный вклад в сопротивление русла в этот период вносят резко асимметричные крутые двумерные дны и заструги, в подвальях которых появляются присоединенные вихри. Однако протяженность вихревых зон на единицу длины русла в это время меньше, чем в период развития рифелей, а с понижением уровней воды и увеличением длины гряд она еще более уменьшается. Коэффициент сопротивления составляет во время межени $\lambda = 0,002$ при $Re = 1,3 \cdot 10^6$.

Морфология донных форм более крупных размеров влияет на морфологию расположенных на них более мелких форм. Рифели, расположенные в пригребневой части дна, имеют большие длины и высоты, чем в ложбинах. В то же время, средние размеры (длины и высоты) мелких донных форм практически не связаны с размерами более крупной гряды, на которой они развиваются. Такие связи для донных форм рр. Нигера, Оки, Енисея, Терека характеризуются коэффициентами корреляции от 0,3 до -0,3.

Сложность строения грядового комплекса определяет его динамику, что отражается на величине расхода влекомых наносов, перемещающихся в виде донных форм.

Широко распространенный метод расчета расхода влекомых наносов q_s по данным о высоте h и скорости смещения C_r гребней донных гряд

$$q_s = (1-p) \sigma h c_r \quad (3-5)$$

базируется на допущении, что расход влекомых наносов равен расходу наносов, перемещающихся в форме гряд, то есть частицы наносов, смытые с верхового откоса гряды, откладываются на ее низовом откосе. Такое допущение правомерно при изучении движения гряд в пассивной стадии развития с крутыми низовыми откосами, где перемещение частиц наносов происходит в основном под действием силы тяжести. Если у донных форм всех типов в иерархическом комплексе формируются крутые низовые откосы, то результаты расчета расхода влекомых наносов не зависят от выбора типа донных форм, по динамике и морфологии которых проводится расчет. Для такого случая справедливы методы расчета скорости смещения крупной формы по данным о морфологии и динамике более мелких форм, предложенные Н.С. Знаменской (1968) и З.Д. Копалиани (1983). Однако даже во время межени не у всех донных форм крутизна низового откоса достаточна для отложения всех попадающих сюда частиц наносов. А во время половодья и паводков, когда переносится основная масса влекомых наносов, крутизна низового откоса донных гряд существенно меньше угла естественного откоса для песка в воде. В этом случае некоторая доля влекомых наносов транзитом проходит подвалья рифелей, так же как рифели частично проходят по низовым откосам дна, а дюны - по низовым откосам заструг. В таких условиях расчеты по формуле (3-5) дают заниженную оценку реального расхода наносов, и тем более заниженную, чем более крупные донные формы из иерархического комплекса используются для расчетов. Для р. Нигера в половодье 1976 г. удельный расход влекомых наносов, рассчитанный по

днуам, составил $5,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, по застругам - $1,17 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$. На р.Лене у п.Мохсоголлох на спаде половодья 1986 г. удельный расход наносов по рифелям составил $39,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, по днуам - $9,54 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$.

Динамика иерархически построенного комплекса донных русловых форм зависит от транзита частиц наносов в ложбинах между рифелями, перемещения рифелей в ложбинах между днуами и т.д. (Сидорчук, 1990). Скорости смещения гребней донных форм могут варьировать в широких пределах, становиться равными нулю и даже отрицательными (смещение вверх по реке) в зависимости от соотношения расходов влекомых наносов на верховых и низовых откосах гряд. Возможно более быстрое смещение гребней крупных гряд, чем расположенных на них мелких гряд за счет аккумуляции на низовом откосе крупной гряды наносов, транзитом проходящих по низовым откосам мелких гряд. При этом длина крупной гряды увеличивается при неизменных гидравлических характеристиках потока. Возможна обратная ситуация, когда за счет повышенного транзита наносов на низовом откосе гряды ее длина уменьшается. Наблюдается также дифференциация скоростей смещения донных форм разной крутизны из-за различных условий перемещения по их поверхности более мелких форм или частиц наносов. Так, на верхней Оби рифели с крутизной низового откоса 0,15-0,25 смещаются вниз по течению в 2-2,5 раза быстрее, чем рифели с крутизной низового откоса 0,05-0,15 при одинаковых гидравлических условиях из-за более полной аккумуляции транзитных наносов в подвальях крутых рифелей.

Доля расхода наносов, транзитом проходящих по ложбинам между грядами $q_{зл}$, от общего расхода влекомых наносов - коэффициент транзитности $K_{тр} = q_{зл}/q_s$, зависит от средней крутизны низового откоса гряд: $K_{тр} = \exp(-0,64 t_3^2)$. Тогда скорость смещения рифелей и других простых гряд можно рассчитать по формуле:

$$c_{г1} = na \frac{U^n}{H}; \quad (3-6)$$

скорость смещения дон с рифелями (или заструг с днуами) по формуле:

$$c_{г2} = n(n+1)a(1-p)c_1 h_1 \frac{U^n}{H^2} + na K_{тр1} \frac{U^n}{H+h_1}; \quad (3-7)$$

скорость смещения заструг с днуами и рифелями по формуле:

$$\begin{aligned}
 c_{r3} = & n(n+1)(n+2)a(1-p)^2 g_1 h_1 g_2 h_2 \frac{U^n}{H^3} + & (3-8) \\
 & + n(n+1)a(1-p)g_2 h_2 K_{TP1} \frac{U^n}{(H+h_1)^2} + n(n+1)a(1-p)g_1 h_1 K_{TP2} \frac{U^n}{(H+h_2)^2} + \\
 & + na K_{TP1} K_{TP2} \frac{U^n}{H+h_1+h_2} .
 \end{aligned}$$

При $n = 4$ и $a = 3,7 \cdot 10^{-4}$ получено удовлетворительное совпадение рассчитанных и фактических скоростей смещения донных форм разных типов на рр. Лене (п. Мохсоголлох), Нигере (п. Аджакута), Оби (исток - р. Ануй). Если не учитывать в вычислениях иерархическую структуру донного рельефа русла и транзит наносов, несоответствие рассчитанных величин данным измерений возрастает.

Существенной особенностью динамики сложного комплекса донных форм является возможность изменения скорости смещения более крупных гряд только за счет случайного изменения морфологии более мелких гряд. Так, согласно формуле (3-7) увеличение высоты и крутизны рифелей приводит к быстрому уменьшению скорости смещения дон. Уменьшение высоты и крутизны рифелей приводит к увеличению скорости дон, а при полном смыве рифелей скорость смещения дон нужно рассчитывать уже по формуле (3-6). Высоты и длины конкретных донных форм при неизменной глубине и скорости потока варьируют в очень широких пределах как в пространстве, так и во времени. Например, на р. Терек у с. Парачок во время паводка лета 1962 г. в течение одних суток при неизменных скоростях и глубинах потока высоты дон на застругах изменялись от 0 до 1,2 м. Соответственно, скорости смещения заструг варьировали почти в два раза - от $50-70 \cdot 10^{-5}$ м/с в периоды наличия дон до $120,0-160,0 \cdot 10^{-5}$ м/с в периоды их смыва. Подобные пульсации скорости смещения сложных гряд делают неоднозначными оценки расходов блекомых наносов даже с использованием формул типа (3-6) - (3-8), если не проведено достаточно частых повторных промеров для выявления изменчивости морфологии гряд.

3.5. Мезоформы (бары).

В современной русловой литературе принята в основном морфологическая классификация мезоформ. Кондратьев и др. (1962) выделяют три типа мезоформ: 1) Ленточные гряды - языковидные, практически симметричные, перегораживающие все русло потока. Наиболее возвышена средняя часть гребня гряды, при низких уровнях она иногда обсыхает и образуется одиночный осередок. 2) Побочни-гря-

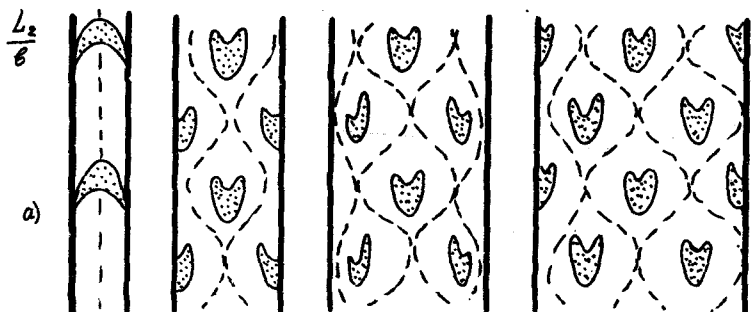
ды с перекошенными в плане гребнями; направления перекоса в последовательных грядах противоположны. Прибрежные части побочной образуют отмели, примыкающие к противоположным берегам в шахматном порядке. Гребни побочной часто называют перекатами. 3) Осередки-мезоформы каплевидной формы, распложенные в середине русла реки или у его берегов.

Конфигурация мезоформ в русле во многом определяется граничными условиями. Теория малых возмущений показывает, что если возмущения у берегов русла одинаковы по величине и по направлению (при этом по длине русла знак возмущений периодически изменяется на противоположный), то в таком русле (рис. 3.2^а)

образуются симметричные русловые формы: ленточные гряды, осередки, симметричные параллельные цепочки осередков. Если же возмущения у берегов русла имеют разный знак (также периодически изменяющийся по длине потока), то образуются асимметричные русловые формы: побочки, односторонние цепочки осередков (рис. 3.2^б).

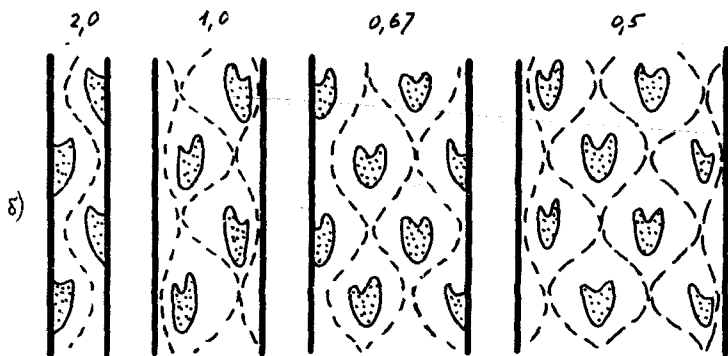
Мезоформы руслового рельефа могут существовать в активном или пассивном состоянии. При активном развитии мезоформа перемещается как единое целое и представляет собой отображение в размываемом ложе потока формирующей ее вихревой структуры. Состояние активного развития мезоформ реализуется только во время высоких паводков. В эти периоды складываются характерные размеры этих аккумулятивных образований - длина и ширина. Высота мезоформ увеличивается с увеличением расхода воды так же, как и высота микроформ руслового рельефа. Однако после превышения скоростями потока пороговых значений начинается смыв мезоформ. Лисл (1962) описывает катастрофический паводок на малых реках Калифорнии, когда перекаты были размывы, плесовые ложины заполнились наносами. Ширины русел увеличились, амплитуда мезоформ резко уменьшилась. По мере спада паводка первоначальный рельеф восстановился.

Критерием активного состояния мезоформ является форма свободной поверхности потока над ними. Если длинные волны на поверхности потока находятся в противофазе длинным волнам отметок речного дна, это указывает на активное перемещение мезоформ за счет размыва в плесовых ложинах и аккумуляции на перекатах. Такая ситуация была зафиксирована в русле р.Нигера осенью 1957 года во время половодья с максимальным расходом воды 37000 м³/с. В период прохождения более низкого половодья 1976 года, при макси-



$$P(0) = P(b); \quad P'(0) = -P'(b)$$

симметричная конфигурация.



$$P(0) = -P(b); \quad P'(0) = P'(b)$$

асимметричная конфигурация.

Рис. 3.2. Морфология грядового комплекса в речном русле при разных соотношения ширины русловых форм L_2 и ширины русла b ; и разных граничных условиях для возмущений потока.

мальном расходе воды 20000 м³/с свободная поверхность потока ставилась практически ровной, уклоны были одинаковы и в плесах, и на перекатах. Активного перемещения мезоформ не наблюдалось.

В русле нижнего Нигера побочни формируются в местных расширениях русла, часто в выбоинах берегов. В многоводные годы здесь происходит отрыв стрежня потока от берега, в выбоине образуется тиховод или водоворотная зона. Происходит аккумуляция наносов и зарождаются побочни. В многоводный период многолетнего цикла водности реки побочни увеличиваются в размерах и начинают перемещаться вниз по руслу со скоростями 100-150 м/год. Если зарождение побочни в выбоине берега произошло в маловодный период цикла водности, то в последующие маловодные годы побочень размывается. В течение одного гидрологического года также происходит существенное переформирование побочней и осередков. Так, осередок у пос. Аджакута в половодье покрывается слоем воды 3-4 м. Оголовок осередка разрастается вверх по течению, иногда примыкает к правому берегу в области его выбоины. Ухвостье осередка вытягивается вниз по течению (до 200 м за 1978г.). В меженный период осередок обсыхает, происходит размыв его оголовка. В маловодный год ухвостье также размывается и тогда происходит общее уменьшение размеров осередка. При многоводной межени осередок смещается вниз по реке (на 250 м за 1978-79гг.). Пассивное развитие наиболее обычно для мезоформ. В этом состоянии мезоформа имеет сложное строение, ее поверхность моделируется иерархическим построенным комплексом микроформ. На гребень мезоформы при перемещении более мелких донных форм поставляются наносы и гряды пассивно сползают вниз по течению за счет аккумуляции этих наносов на низовом откосе. В свою очередь влияние мезоформ на микроформы и рифели проявляется за счет дифференциации глубин и скоростей потока в пределах мезоформ. На гребне мезоформы гряды более мелкие, чем на верховых откосах. На низовом ее откосе гряды обычно не формируются из-за неустойчивости грунта. В ложбинах между мезоформами ниже крутого откоса часто формируется застойная зона, где накапливаются тонкие наносы. Здесь образуется рябь на тонкозернистых грунтах.

Совмещение данных о морфологии грядовых форм руслового рельефа, сформированных в естественных реках и лабораторных потоках, с теоретически полученными зависимостями для длин волн неустойчивых малых возмущений руслового рельефа разных классов (рис. 2.3) показывает их соответствие: теоретическим самым малым грядам в натуральных потоках соответствуют рифели; малым грядам - дю-

ны, заструги; средним грядам - шалыги, песчаные волны; большим грядам - мезоформы руслового рельефа.

Соответствие различных типов грядовых русловых форм разным классам малых возмущений отметок дна речного русла создает теоретическую базу для выделения структурных уровней руслового рельефа, обоснования наличия качественных различий между формами разных структурных уровней. Так, рифели необходимо отнести к отдельному структурному уровню ультрамикроформ, так как они соответствуют классу самых малых гряд, для них характерна двумерность и зависимость от рельефа свободной поверхности потока. Дюны, заструги и шалыги относятся к структурному уровню микроформ, они соответствуют малым и средним грядам, не зависят от формы свободной поверхности потока. Во многих реках эти грядовые формы характеризуются значительной инерционностью морфологических параметров, большую часть времени их морфология и динамика не соответствуют гидравлическим характеристикам потока.

Ленточные гряды, побочни, осередки относятся к структурному уровню мезоформ. Они соответствуют большим грядам, зависят от конфигурации струй потока в плане. Для них выявлена принципиально другая зависимость морфологии от гидравлических характеристик потока, чем для ультрамикроформ и микроформ; величина шага рифелей, дюн и заструг прямо пропорциональна кинетичности потока; величина шага мезоформ обратно пропорциональна кинетичности потока, зависит от величины коэффициента сопротивления. Мезоформы еще более инерционны, чем микроформы, они находятся в активной стадии только в периоды максимальной энергии потока, а большую часть гидрологического года их морфология и динамика не связаны прямо с гидравлическими характеристиками потока, а определяются морфологией и динамикой более мелких гряд.

Глава 4. Форма речного русла и определяющие ее факторы.

Понятие "форма русла" (морфологический тип русла) еще недостаточно устоялось в литературе по теории и прикладным вопросам руслового процесса. Часто в качестве его синонимов выступают понятия "макроформа", "тип руслового процесса". Формой речного русла (в плане) является конфигурация русла, определенная бортами долины и/или наиболее устойчивыми элементами руслового рельефа, которые управляют как меженным, так и половодным речным потоком. Форма русла часто обусловлена созданными в ходе русловых процессов русловыми формами, но в дальнейшем закрепленными поймообразованием. Мезоформы, обычно не покрытые пойменным наилком

и растительностью, динамичны во время половодья. Они часто устойчивы по отношению к меженному речному потоку и в основном управляют им. Поэтому можно говорить о меженной форме русла, определяемой конфигурацией мезоформ. Общепринятой является классификация основных форм русел К.И.Россинского, И.А.Кузьмина (1947), с уточнениями О.В.Андреева и И.А.Ярославцева (1953) и Л.Б.Леопольда и М.Г.Уолмена (1957): русла разделяются на прямолинейные; меандрирующие, и разветвленные на рукава.

4.1. Основные факторы, определяющие форму русла.

Стабилизация больших грядовых форм (мезоформ), появление на них растительности и образование поймы наиболее отчетливо видны при прослеживании изменения морфологии русла одной и той же реки на значительном протяжении. Река Вычегда в верхнем течении (до 770 км от устья) характеризуется свободномеандрирующим руслом с ленточными грядами и песчаными волнами (рис. 4.1). С увеличением ширины русла до 200 м и среднегодового расхода воды до $140 \text{ м}^3/\text{с}$ в извилистом русле на основе ленточных гряд формируются расположенные в шахматном порядке побочни, шаг которых в 2-2,5 раза меньше шага излучин. Побочни осложнены песчаными волнами с шагом в 2,5-4,0 раз меньше шага побочней. По мере увеличения вниз по течению расхода воды в реке и ширины русла размеры свободных излучин и побочней с песчаными волнами увеличиваются. Увеличение размеров излучин приводит к все большему контролю формы русла бортами долины, так как шаг излучин увеличивается до размеров литологически однородных участков бортов долины. Свободные излучины становятся вынужденными и адаптированными, а с 200 км от устья уже не выявляются в литологически обусловленных изгибах дна долины. Увеличение размеров побочней и уменьшение скорости их смещения вниз по руслу приводит к поселению на них пионерной растительности. Уже начиная с 400 км от устья на большинстве побочней Вычегды формируются небольшие острова, а некоторые наиболее крупные побочни полностью зарастают, покрываются пойменным аллювием и превращаются либо в острова, либо формируются излучины. Ниже 200 км практически все крупные побочни стабилизируются и начинают определять извилистую форму руслу. Происходит резкое уменьшение размеров излучин при увеличении расхода воды в реке. Соответственно на этом участке происходит уменьшение размеров побочней и песчаных волн. Таким образом, в низовьях р.Вычегды иерархический комплекс русловых форм оказывается сдвинутым на один ранг в сторону более мелких форм по сравнению с комплексом руслового рельефа среднего течения реки. При этом сохраняют-

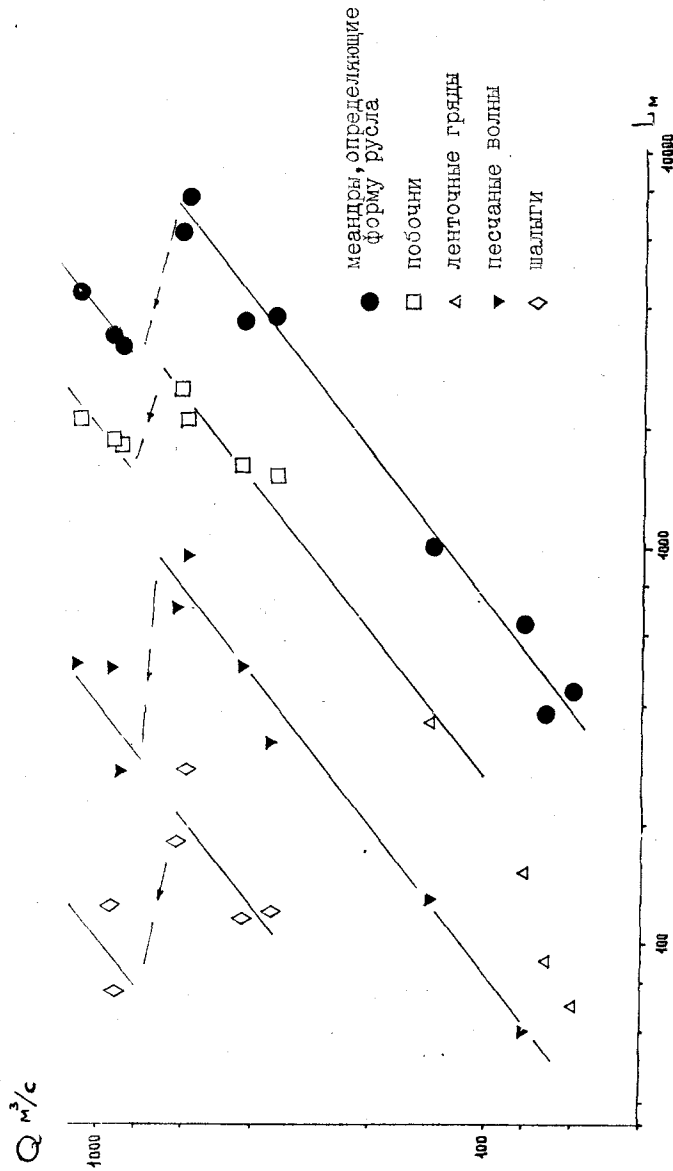


Рис. 4.1. Преобразование формы русла р. Вычегды с увеличением расхода воды по длине реки и закреплением растительностью подвижных побочней, и связанная с этим перестройка иерархического комплекса грядового руслового рельефа.

ся относительные морфологические характеристики входящих в него образований.

Превращение мезоформ в макроформы может происходить не только в пространстве, по длине реки, но и во времени, при изменении характера растительного покрова. Показателен пример распространения тамариска в Северной Америке. По данным Графа (1978), тамариск был завезен сюда в 1800 г. Растет тамариск группами из нескольких высоких (10-12 м) деревьев, окруженных большим количеством кустов 5-6 м высотой, селится в основном на песках, закрепляя их. В результате на реках плато Колорадо осередки и побочни превратились в острова и массивы поймы, стали длиннее и шире. Блэкберн и др. (1982) описали поселение тамариска на реке Бразос (Техас, США). До 1940 г. тамариск не произрастал в русле. К 1950 г. большая часть песчаных побочней покрылась этим кустарником (32% первоначальной площади русла реки), к 1963 г. - 47%, к 1979 г. - 57% площади русла. Песчаные побочни полностью стабилизировались и были включены в состав поймы. Ширина русла уменьшилась со 157 м в 1941 г. до 67 м в 1979 г., извилистое русло преобразовалось в сложноеандрирующее. Надлер и Шамм (1981) описали смену морфологического типа русел рек Южный Платт и Арканзас в условиях изменения гидрологического режима рек. В середине XIX в. их бассейны осваивались под орошаемое земледелие. Это привело в начале XX в. к повышению уровня грунтовых вод, которое вызвало прекращение пересыхания рек летом, значительное уменьшение внутригодовой неравномерности стока и увеличение густоты прибрежной растительности, расселение тамариска. В результате на р. Южный Платт произошло преобразование широкого (450 м шириной) прямолинейного русла с многочисленными осередками в слабоеандрирующее узкое (100 м) однорукавное русло. Осередки покрылись растительностью, превратились в острова, которые объединились в массивы, прицелились к берегу и образовали пойму, заполняющую 0,75 ширины прежнего русла. На р. Арканзас слабоизвилистое широкое (300 м) осередковое русло преобразовалось в меандрирующее однорукавное узкое (~30 м) русло. Основными процессами, приведшими к перестройке русла, явилось прицеление осередков к берегам, закрепление их растительностью, рост крутизны излучин у этих закрепленных форм и увеличение ширины поймы за счет уменьшения ширины реки. Глубины на обеих реках при преобразовании остались прежними, соответственно, сильно уменьшилась относительная ширина.

Морфология и динамика формы русла определяется положением в

иерархическом ряду тех гидравлически обусловленных грядовых русловых форм, которые стабилизируются процессом поймообразования. Если такая стабилизация происходит на структурном уровне самых больших гряд, то формируется русло с мегаформами - сложными излучинами или параллельнорукавными разветвлениями, или пойменной многорукавностью или, вблизи устья реки, дельтовой многорукавностью. Если форма русла определяется стабилизированными русловыми формами на структурном уровне больших гряд, возникает меандрирующее русло, или русло с одиночными, простыми сопряженными и даже сложными сопряженными разветвлениями, если пойма образуется на всем комплексе больших гряд. Количество основных рукавов зависит от соотношения ширины русла к ширине русловых форм:

$K_p = B/L_2$. При $K_p \leq 0,50$ русло меандрирует; если $0,5 < K_p \leq 1,0$ - образуется дворукавное русло; при $1,0 < K_p \leq 1,5$ - трехрукавное и т.д. (рис. 3.1). Наиболее сложная форма русла присуща тем рекам, где стабилизация и образование поймы захватывает и средние гряды. Примером является русло верхней Оби в районе устья р.Ануя. Здесь широко распространены донные формы - рифели ($L \sim 2,5$ м), доны ($L \sim 20$ м), заструги ($L \sim 70$ м). Средние гряды (шалыги) с шагом $L \sim 250$ м обсыхают во время межени, становятся барханообразными или каплевидными осередками и побочными. Многие формы этих размеров покрыты пойменным аллювием, стабильны, превратились в небольшие острова. Острова средних размеров ($L \sim 1000$ м) также относятся к структурному уровню средних гряд. Именно эти острова определяют конфигурацию русла верхней Оби. Крупные острова и островные массивы относятся к структурному уровню больших гряд, имеют среднюю длину $L \sim 3000$ м. Наиболее крупные массивы - скопления островов, разделенные участками более узкого собранного русла, имеют шаг 6000-8000 м, относятся к самым большим грядам.

В процессе перехода русловых форм к закрепленным процессом поймообразования формам русла на разных реках может происходить конвергенция морфологии форм русла, обусловленных стабилизацией русловых форм разных иерархических уровней. Например, р.Терек в низовьях, р.Вычегда в районе устья р.Вьмы, р.Нигер в дельте, меандрируют. Излучины русел этих рек морфологически подобны друг другу, с близкими диапазонами соотношений шага излучин и ширины русла. Однако же излучины нижнего Терека - это первичные формы русла, которые образовались при постепенном заилении плавней, окружающих транзитные струи речного потока. Излучины Вычегды

сформированы заросшими растительностью и покрытыми пойменным аллювием побочными, а излучины рукавов в дельте Нигера образовались в результате стабилизации более мелких мезоформ - песчаных волн. Острова в дельте Енисея и на верхней Оби также морфологически подобны, так как их конфигурация и соотношение длины и ширины определяются гидравлической выгодностью каплевидной формы. Но они принадлежат к разным структурным уровням руслового рельефа и подчиняются разным зависимостям между морфологическими и гидравлическими характеристиками потока и русла.

Если известны основные гидравлические характеристики потока, ширина русла и характерный размер русловых форм, стабилизированных растительностью и пойменным наилком, представляется возможность оценить вероятный морфологический тип русла. Для такого анализа удобно переписать формулы, описывающие границы между областями развития ряд разных типов в безразмерном виде. Для этого разделим длину L_1 и глубину H на ширину потока B и получим для границы между малыми и средними грядами

$$\frac{L_1}{B} = 5,2 \lambda^{-0,3} \frac{H}{B} \exp(2,0 F_2); \quad L_2 = L_1; \quad (4-1)$$

для границы между средними и большими грядами

$$\frac{L_1}{B} = 8,0 \lambda^{-1} \frac{H}{B} \exp(-1,8 F_2); \quad L_2 = \sqrt{5\lambda} L_1; \quad (4-2)$$

для больших гряд

$$\begin{aligned} \frac{L_1}{B} &= 4,2 \lambda^{-1} \frac{H}{B} F_2^{-1,1} \quad (0,1 \leq F_2 \leq 0,5); \\ \frac{L_1}{B} &= 42,0 \lambda^{-1} \frac{H}{B} \exp(-3,1 F_2) \quad (0,5 < F_2 < 1,0); \\ L_2 &= \sqrt{5\lambda} L_1. \end{aligned} \quad (4-3)$$

Часто форма речного русла определяется морфологией больших гряд, то есть критерием B/L_{2sr} . Исходя из формул (4-3) критерий морфологии русла запишется в виде:

$$\begin{aligned} \frac{B}{L_{2sr}} &= 0,11 \sqrt{\lambda} \frac{B}{H} F_2^{1,1} \quad (0,1 \leq F_2 \leq 0,5); \\ \frac{B}{L_{2sr}} &= 11,0 \sqrt{\lambda} \frac{B}{H} \exp(3,1 F_2) \quad (0,5 < F_2 < 1,0). \end{aligned}$$

Таким образом, в большинстве случаев морфологический тип русла будет определяться критерием $\sqrt{\lambda} B/H$, введенным В.М.Лятхером и А.М.Прудовским (1959) и получившим дальнейшее обоснование у И.Ф.Карасева (1975), а также числом Фруда. При $\sqrt{\lambda} B/H \leq 4,7/F_2^{1,1}$ формируется побочное (ленточногрядовое) или меандрирующее рус-

до; при $4,7/F_2^{1/2} < \lambda v/H \leq 9,4/F_2^{1/2}$ - русло с прорванными побочными или излучинами; при $\lambda v/H > 9,4/F_2^{1/2}$ - осередковое русло или русло с русловой многоруканностью. Ширина русла v - полная ширина реки со всеми русловыми формами. Реализация первого или второго варианта (грядовый рельеф или форма русла) определяется величиной относительной длины форм L_v/v , которые закрепляются наилком и растительностью. При

$$\frac{L_v}{v} \leq 4,2 \lambda^{-1} \frac{H}{v} F_2^{-1/2}$$

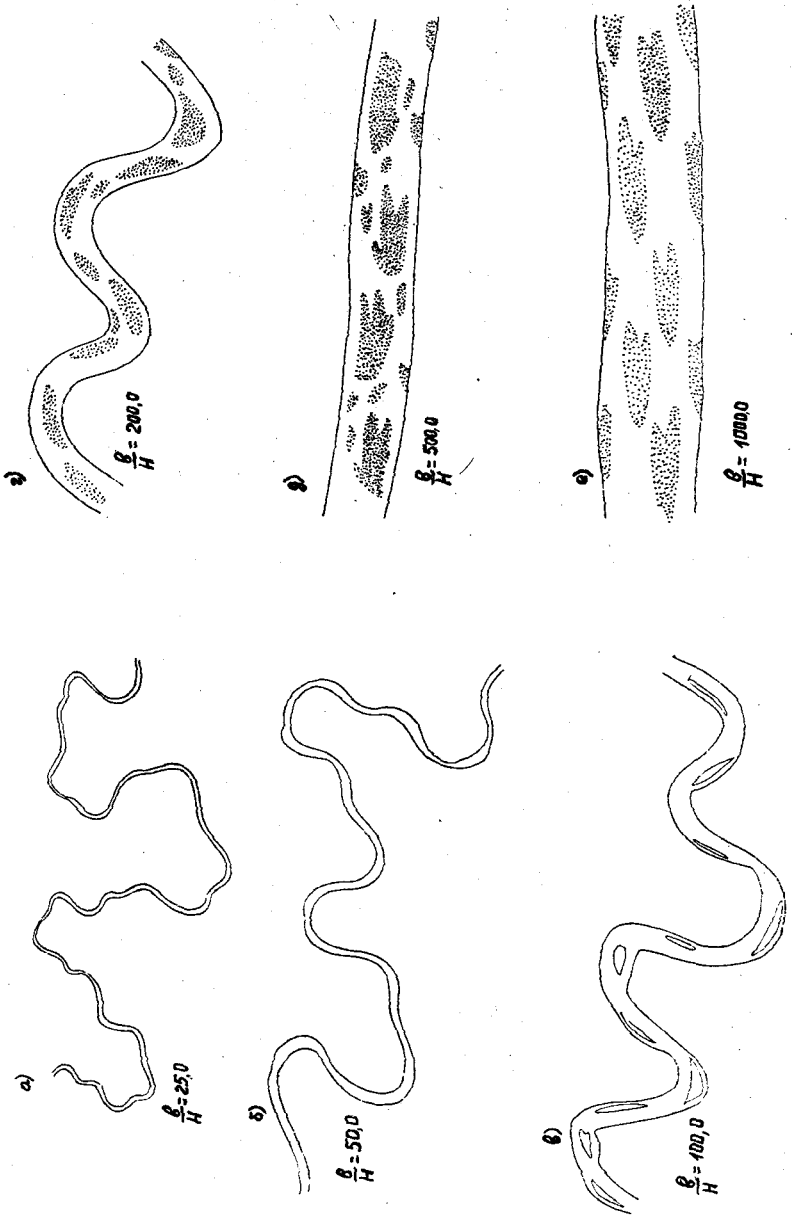
образуется русло меандрирующее, с прорванными излучинами, с русловой многоруканностью соответственно. При

$$\frac{L_v}{v} > 4,2 \lambda^{-1} \frac{H}{v} F_2^{-1/2}$$

в прямолинейном русле формируются побочни (ленточные гряды), прорванные побочни, осередки.

Простые критерии для определения морфологического типа русла внешне привлекательны, но несовершенны. Они не учитывают всю сложность иерархического комплекса русловых форм. Однако морфологический тип русла с учетом всех его составляющих можно оценить с помощью формул (4-1) - (4-3). Рассмотрим следующий набор параметров: $F_2 = 0,2$; $C_0 = 40,0$; $v/H = 25-500$; стабилизация русловых форм происходит при $L_{1v} = 5,0v$; морфология русла определяется большими грядами с $L_{1sr} = 1700,0H$; $L_{2sr} = 0,24L_{1sr}$ и расположенными на них средними грядами с $L_{1cr} = 500,0H$; $L_{2cr} = 0,24L_{1cr}$. При $v/H = 25$ относительные размеры русловых форм составляют: $L_{1sr}/v = 68$; $L_{2sr}/v = 17$; $L_{1cr}/v = 20$; $L_{2cr}/v = 5$. И большие, и средние гряды покрыты растительностью, определяют форму речного русла, река меандрирует. Так как извилины русла создаются и большими, и средними грядами, формируется сложноеандрирующее русло, с вложенными излучинами (рис. 4.2а). Такая же форма русла, но менее сложная, образуется при $v/H = 50$ (рис. 4.2б). С увеличением v/H до 100 относительные размеры русловых форм уменьшаются: $L_{1sr}/v = 17$; $L_{2sr}/v = 4$; $L_{1cr}/v = 5$; $L_{2cr}/v = 2$. На уровне больших гряд русло меандрирующее. Однако покрытые растительностью средние гряды часто отделены от берега побочными протоками, поэтому сложные меандры не образуются (рис. 4.2в). Относительная ширина русла $v/H = 200$ является критической для извилистого русла при заданных гидравлических параметрах, так как L_{2sr}/v становится < 2 . Такой относительной ширине соответствует меандрирующее русло с побочными и осередками (рис. 4.2г). При $v/H > 340$ боль-

Рис. 4.2. Изменение морфодинамического типа русла с изменением относительной ширины русла $\frac{b}{H}$ при $F_2 = 0,2$; $C_0 = 40$; и относительной длине зарастающих русловых форм $L_w/b = 5$.



шие гряды становятся меньше заданного критического размера 5δ , при котором происходит их стабилизация. В этом случае формируется прямолинейное русло с подвижным грядовым рельефом (рис. 4.2д,е). Если русло формируется в узкой долине, стесненной бортами, сложенными трудноразмываемыми породами, горизонтальные деформации будут заторможены. Тогда прямолинейное русло может сформироваться при меньших δ/H , в сложномеандрирующем русле редуцируются наиболее крупные излучины.

4.2. Географическая обусловленность формы речного русла.

Морфодинамический тип речного русла определяется с одной стороны гидравлически обусловленной структурой грядового руслового рельефа, а с другой стороны - ландшафтно-климатическими условиями на речном водосборе, от которых зависит стабилизация русловых форм и образование на их основе форм русла. Ландшафтно-климатическими факторами определяются видовой состав пионерной растительности, поселяющейся на речных отмелях, соотношение периодов максимальной подвижности активного слоя наносов на отмелях и сезонов укоренения растительности, мутность воды в реке в период затопления поймы, характер эволюционно-динамических рядов пойменной растительности, поемность и динамичность рельефа пойм. В результате различий этих условий скорости накопления пойменного аллювия изменяются от 1,0-1,5 м за 1000 лет в низовьях арктических рек до 1,0-2,0 м за 10 лет в низовьях Терека и Аму-Дарьи. В дельтах Енисея, Таза, Яны на основании сопоставления съемок середины 19 - начала 20 вв. с современными выявлены осередки, на которых растительность не поселилась за 60-130 лет. В то же время в низовьях южных рек, например Терека, период полного превращения осередка в остров не превышает 20 лет, а поселение пионерной растительности происходит в первые же годы после замедления перемещения осередка по реке. Большое количество сочетаний гидравлических и географических условий образования руслового рельефа сильно сужает область применения принципа ограниченности естественных морфологических комплексов. Это является объективной причиной отсутствия в настоящее время теоретической основы классификации макроформ (форм русел), что отмечено Н.С. Знаменской (1989) в ряду других нерешенных задач теории руслового процесса.

В этих условиях на одно из ведущих мест выдвигаются географические методы изучения форм русел. Разработки Н.И. Маккавеева (1955), Р.С. Чалова (1979) показали, что конкретные сочетания руслообразующих факторов в пределах ландшафтной зоны, геолого-геоморфологического района, речного водосбора и его части, данного

отрезка русла реки приводят к реализации вполне определенного морфодинамического типа русла и характера руслового режима реки. На основе территориальной общности факторов возможны региональные общие закономерности морфологии русел и характера русловых преформирований, локальные сочетания природных факторов приводят к местным особенностям руслового процесса.

На современном этапе развитие географического направления теории руслового процесса и ее прикладной составляющей предполагает выявление главных особенностей и форм проявления русловых процессов (морфологии и динамики речных русел) при конкретных сочетаниях природных и хозяйственных факторов по зонам страны, крупным регионам, в бассейнах больших рек и на отдельных реках. Для решения этой проблемы необходимо: совершенствовать структурно-динамическую модель речного русла, более полно обосновать гидравлическую структуру рельефа русла и выявить соотношения между ее элементами; установить количественные характеристики ландшафтно-климатических факторов, определяющих морфологию и динамику грядовых форм руслового рельефа, переходящих в элементы формы русла; установить комплекс форм проявления русловых процессов в различных природных условиях и определить интенсивности их деформаций; выявить характер и направленность изменений морфологии и динамики речных русел под влиянием хозяйственной деятельности на водосборе, в долине реки, на ее берегах и в русле. Конечной целью исследований является обоснование принципов учета руслоформирующей деятельности рек в различных природных условиях при различных видах хозяйственного использования рек и разработка генеральных схем рационального использования водных и связанных с ними земельных ресурсов на крупных реках с учетом общих и региональных особенностей русловых процессов, влияния местных и локальных природных и антропогенных факторов.

Глава 5. Принципы оптимального регулирования структуры руслового рельефа в целях рационального природопользования

Регулирование речных русел является одним из немногих примеров управления сложными динамическими системами неживой природы. Под оптимальным регулированием функционирования системы поток-русло понимается создание устойчивого режима работы хозяйственного объекта, расположенного в русле и на пойме в пределах зоны влияния потока, при максимальном использовании естественной направленности руслового процесса, минимальном ущербе природе и

другим хозяйственным объектам.

5.1. Редукция руслового процесса.

Редукция руслового процесса осуществляется либо путем армирования русла тяжелыми гидротехническими сооружениями, либо путем создания подпорных бьефов. В целом является эффективным способом регулирования русел. Известно большое количество приемов строительства берегоукрепительных сооружений, с появлением новых материалов и технологий они совершенствуются. Обычно осуществляется частичная редукция руслового процесса на одном из иерархических морфодинамических уровней руслового рельефа. Отдельные элементы стабилизации формы русла 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 иерархических уровней на одни и те же изменения в системе поток-русло. Так, стабилизация формы русла может привести к активизации русловых переформирований на уровне мезоформ. Стабилизация мезоформ - это уменьшение активной ширины русла, размыв вогнутых берегов, то есть активизация изменений формы русла. Одновременно увеличивается глубина русла и скорости потока, это приводит к увеличению размеров и скорости смещения донных форм. Стабилизация донных форм - создание искусственной шероховатости русла, может активизировать смещение частиц наносов.

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 основных ее составляющих. 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.

5.2. Активизация руслового процесса.

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 при конкретном сочетании руслоформирующих факторов. Технически активи-

зация руслового процесса - это спрямление изгибов русла; отторжение побочней 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, водорасслаивающих и наносоуправляющих сооружений; перекрытие рукавов в многорукавных руслах; периодическое уничтожение отмости на дне потока; изъятие наносов из зон интенсивной их аккумуляции по наносоотсасывающим прорезям и обводным каналам и т.п. Все эти мероприятия требуют знание тонкостей взаимодействия потока и русла для того, чтобы направить русловой процесс в необходимую сторону.

Общими принципами, которыми следует руководствоваться при применении метода активизации руслового процесса являются создание условий смещения зоны деформаций нежелательной направленности в другое место русла или стимулирование деформаций противоположного знака. Так, например, при активном размыве вогнутого берега излучины можно расположить вдоль берега наброску из тетраэдров для увеличения шероховатости и стимулирования аккумуляции наносов; создать системами струенаправляющих сооружений поперечную циркуляцию противоположного знака и также стимулировать аккумуляцию наносов; спрямить излучину и перенести процессы размыва в спрямляющий прокоп; осуществлять у вогнутого берега искусственный гидронамыв; осуществить подрезку выпуклого берега; создать зону аккумуляции у вогнутого берега системой бун и т.д. Столь большое разнообразие типов 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 уровнях изменится согласованно. При этом максимально может быть использован оптимальный путь управления системой - использование в целях выправления собственной энергии системы и возможность относительно 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 проектируемых русловых переформирований могут воз-

никнуть незапланированные и нанести значительный ущерб. Поэтому активизация руслового процесса на реках проводится осторожно, в несколько этапов, с последовательным достижением необходимого эффекта и исправлением сопутствующих выправлению ошибок.

5.3. Создание искусственных русел.

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. В каналах создается удобный для их эксплуатации русловой режим, который обеспечивает стабильность формы русла, локальную устойчивость мезоформ (в местах расположения водозаборных и т.п. сооружений) и максимально активное перемещение донных форм, 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. Целесообразно создание полого извилистого русла канала с частичным креплением вогнутых берегов излучин.

Извилистое русло обеспечивает предсказуемый режим переформирований мезоформ и активизацию перемещения донных форм. 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.

5.4. Проблемы регулирования русла в низовьях р.Терек методами активизации руслового процесса.

Наиболее эффективна активизация русловых процессов путем воздействия на форму русла, изменения как плановой конфигурации русла, так и формы продольного профиля. В этом случае русловой рельеф на всех иерархических ступенях организации будет изменяться согласованно. Такой способ руслового процесса эффективен на реках с большой интенсивностью русловых переформирований и сложной структурой руслового рельефа, и применяется, например, в низовьях р.Терека.

Традиционная мера борьбы с наводнениями в низовьях Тереканоса - сооружение противопаводковых дамб. В настоящее время обвалование существует по правому берегу реки до 83 км от Каргалинского гидроузла, по левому берегу - до 100 км (Аграханского полуостро-

ва). На участке 0-40 км валы обеспечивают пропуск 2000 м³/с воды, на участке 40-83 км - 1000-1800 м³/с. Однако обвалование не устраняет основной причины наводнений - аккумуляции наносов и размывов берегов. Более того, ограничение зоны разливов приводит к увеличению скорости роста поймы в межваловом пространстве и уменьшению живого сечения русла реки.

С середины 60-х годов в низовьях Терека начали применяться методы активизации русловых процессов. Для снижения уровней паводочных вод проведено спрямление крутых изгибов русла. В условиях низовьев Терека проложенные в тяжелых плавневых отложениях узкие прямолинейные прорезы устойчивы, постепенно разрабатываются саморазмывом до ширины основного русла. В настоящее время сооружено 11 таких спрямлений, из них в 10 проходит весь сток воды и наносов или большая его часть, и только одно занесено наносами. Длина русла уменьшилась на 4 км, максимальный уровень воды уменьшился у Кутан-Аула (67 км от устья) на 0,1 м, у Каргалинского гидроузла (104 км от устья) - на 0,7 м. С увеличением скоростей в спрямляющих прорезях уменьшились размеры формирующихся там мезоформ. Они быстро смещаются вниз по течению, в отличие от практически стабильных мезоформ основного русла Терека. Размеры микроформ здесь значительно больше во время паводка, чем в основном русле. В узких (шириной 30-50 м) прямолинейных каналах при глубинах 6-8 м и скоростях течения до 3,0 м/с формируются активные рифели и дюны. Интенсивность динамики иерархического комплекса русловых форм в спрямлениях существенно больше, чем в основном русле, что способствует отмиранию основного русла.

В нижней части русла Терека наиболее крупным спрямлением является канал-прорезь через Аграханский полуостров. В результате его сооружения длина Терека сократилась на 25 км (северный участок русла общей протяженностью 30 км был заменен каналом длиной 5 км). Уровень воды в голове прорези понизился на 3 м. На нижнем участке русла сформировалась кривая спада свободной поверхности воды с уклонами в прорези $8 \cdot 10^{-4}$. Началась интенсивная эрозия дна и берегов прорези и русла реки. Уже через месяц зона увеличения уклонов свободной поверхности воды и глубиной эрозии русла распространились на 20 км вверх по реке, через 13 мес. после открытия прорези - на 45 км. Область максимального размыва, соответствующая области максимального увеличения уклона поверхности воды, через год после открытия прорези располагалась в 10 км от устья реки (размыв здесь составил 2,1 м), через 2 года - в 15 км (2,3 м),

через 6 лет - в 20 (I м), через 10 лет - 26 км (0,4 м). В целом в русле Терека было размывто в 1973г. и с 1977 по 1987г. 4,54 млн. м³ наносов, из которых 3,94 млн.м³ было вынесено в море, а остальные переотложились в русле.

Активизация руслового процесса на всех структурных уровнях при сооружении спрямления через Аграханский полуостров резко снизила угрозу наводнений в низовьях реки. В период 1978-1989 гг. в низовьях Терека проходили паводки с максимальными расходами воды до 900 м³/с. Уровень Каспийского моря за этот период повысился на 1,3 м. Но прорывов валов и затоплений местности за эти годы не происходило.

Однако масштабная активизация руслового процесса, кардинальное изменение формы русла в устьевой области реки отрицательно сказались на экологической обстановке в регионе. Пример нижнего Терека показывает, что оптимальность крупномасштабных проектов активизации русловых процессов существенно уменьшается из-за вовлечения в сферу воздействия большого комплекса геоэкологических процессов, здесь требуется проведение компенсирующих природоохранных мероприятий.

ВЫВОДЫ.

1. В результате взаимодействия в динамической саморазвивающейся системе поток-русло появляется новое свойство: структурность. В потоке это макротурбулентность, в русле - русловой рельеф.

2. Основными элементами в комплексе руслового рельефа являются положительные грядовые формы. Форма русла также разбивается на морфологические элементы. По признаку сходства комплекса свойств элементы руслового рельефа объединяются в комплексы форм - структурные ячейки, и в комплексы структурных ячеек - структурные уровни. Методы объединения (кластеризации) могут основываться как на дискретизации исходного руслового рельефа, так и на его континуальном представлении.

3. Русловой рельеф упорядочен, организован наличием иерархических связей. Эти связи прослеживаются по вертикали: отдельные русловые формы - структурные ячейки - структурные уровни; и по горизонтали: иерархия русловых форм; иерархия структурных ячеек (рябь-рифели-дюны-заоструги-шалыги-песчаные волны-побочни, осередки, ленточные гряды-излучины, разветвления - серии излучин, параллельно-рукавные разветвления- пойменные разветвления); иерархия структурных уровней (ультрамикроформы - микроформы - мезоформы-макроформы-мегаформы). Эти иерархические ряды являются ос-

новой морфодинамической классификации руслового рельефа.

4. Грядовые русловые формы являются отображением в размываемом ложе потока квазистационарных макротурбулентных вихревых структур. Механизм этого отображения раскрывается с помощью метода малых возмущений. Чем более полная форма уравнений плановой гидравлики исследуется методом малых возмущений, тем более сложный спектр развивающихся донных волн получается в результате.

5. Уравнения плановой гидравлики Н.А.Картвелишвили учитывают как форму свободной поверхности потока, так и кривизну линий тока в горизонтальной плоскости. Их анализ методом малых возмущений с использованием ненулевых граничных условий приводит к решению в виде непрерывного спектра волн отметок дна, увеличивающих амплитуду во времени. В то же время выделяются обособленные области волн разного типа: 1) двумерные, вытянутые поперек потока самые малые гряды; 2) трехмерные малые гряды; 3) средние гряды; 4) овальные большие гряды; 5) вытянутые по потоку самые большие гряды. Характеристики этих гряд положены в основу составления гидравлически обоснованной структурной классификации руслового рельефа.

Сопоставление теоретически полученных неустойчивых донных волн разных типов и фактически существующих в речном русле устойчивых грядовых иерархически построенных русловых форм показывает их соответствие: ^{самым малым} грядам обычно соответствуют рифели; малым грядам - дюны, заструги; средним грядам - шалыги и др.; большим грядам - мезоформы и макроформы; самым большим грядам - мегаформы руслового рельефа. Это является основой гидравлического обоснования морфодинамических классификаций руслового рельефа.

6. Динамически устойчивый комплекс русловых форм обладает континуальными свойствами. Он образуется в результате действия единых для всех русловых форм законов гидродинамики. В то же время дискретные свойства и иерархическая организация структуры приводят к возникновению разных закономерностей развития русловых форм на разных структурных уровнях, разных типов связей морфологии русловых форм с определяющими факторами. Шаг самых малых, малых и средних гряд прямо зависит от глубины потока и величины числа Фруда. Шаг больших гряд также прямо зависит от глубины, но с кинетичностью потока связан обратной зависимостью. Кроме того, на размер средних и больших гряд влияет величина гидравлического сопротивления.

7. Теоретические, экспериментальные исследования и натурные

изыскания показывают, что грядовые формы разных размеров развиты в речном русле одновременно. Однако зависимости грядовых форм от гидравлических характеристик потока имеют две ветви - увеличения высот и уменьшения высот при увеличении превышения скорости потока над размывающей $U - u_n$. Начало смыва гряд разных типов происходит при разных пороговых значениях $U - u_n$; рифели начинают размываться раньше дюн, дюны - раньше заструг и т.д. В результате при разных гидравлических условиях в потоке могут наблюдаться иерархические комплексы грядового рельефа разной полноты.

8. Для иерархического комплекса грядовых форм руслового рельефа характерна взаимозависимость морфологии и динамики как отдельных гряд, так и их комплексов. В наибольшей степени эта взаимозависимость проявляется в изменчивости расхода влекомых наносов, перемещающихся в форме гряд, при изменении сложности иерархии гряд.

9. С увеличением размеров грядовых русловых форм увеличивается их инерционность и зависимость от гидрологических, геолого-геоморфологических и ландшафтно-климатических условий формирования. Морфология и динамика ряби и рифелей обычно полностью определяются местными гидравлическими характеристиками потока и грунтами ложа. На морфологию и динамику дюн часто существенно влияет характер внутригодичного гидрологического режима: на подъеме паводка дюны находятся в активной стадии развития, на спаде - в пассивной стадии. Морфология и динамика средних гряд и мезоформ определяется уже многолетней изменчивостью стока воды: в многоводные годы эти формы могут находиться в активной стадии развития, в средние и маловодные - в пассивной стадии. Морфология и динамика крупных грядовых форм сильно зависит от формы русла и долины реки, от литологического строения долины.

10. В наибольшей степени от географических условий формирования речных русел зависит морфодинамический тип русла. Иерархически построенная структура рельефа речного русла с формами определенных размеров и конфигурации обусловлена гидравликой потока. Ландшафтно-климатические условия определяют вероятность стабилизации пойменным наилом и растительностью грядовых русловых форм некоторого размера и, тем самым, оформления русла на определенном иерархическом уровне организации грядового рельефа. Чем ниже этот уровень, тем более морфологически сложное русло образуется при прочих равных условиях.

II. Географическая горизонтальная зональность руслообразующих факторов создает региональную общность форм проявлений законов образования структуры рельефа речного русла и его морфодинамики. На больших пространствах реки формируют русла одинаковых морфодинамических типов. Этому способствуют конвергентные свойства руслового рельефа, когда относительные морфометрические параметры русловых форм разных структурных уровней (и тем более, структурных ячеек) мало отличаются. В то же время возможных сочетаний воздействия на русло гидравлических и географических факторов - бесконечное множество, значительное своеобразие имеет история развития рельефа речных долин. Это приводит к большому разнообразию морфодинамических типов речных русел и к сложностям в разработке комплексной их классификации.

12. Многообразие морфодинамических типов речных русел и разнообразная хозяйственная деятельность человека в речных долинах создают необходимость регулирования режима русловых переформирований для обеспечения устойчивости инженерных сооружений в русле. Оптимальной, как с точки зрения уменьшения затрат на сооружение объекта, так и сохранение реки как природного объекта, является активизация руслового процесса, использование естественного хода руслового процесса для создания необходимой устойчивой морфологии русла. В то же время активизация руслового процесса на реках в крупных масштабах (как показывает пример по низовьям Терека) приводит к существенным геоэкологическим изменениям в связанных с рекой ландшафтных единицах и поэтому требует тщательной географической и экологической экспертизы.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Зависимость параметров речных излучин от крупномасштабных турбулентных возмущений. // Вестник Моск. ун-та, сер. геогр. - 1974 - № 5 - с.116-118.

2. Речные излучины и теория чередующихся вихрей (автореф. доклада, прочитанного 20.05.74). // Бюлл. МОИП, сер. геол. - 1975 - № 2.

3. Об определении верхней границы зоны взаимодействия вод суши и моря в устьевых областях рек. // Гидрохимия и гидрология юга Дальнего Востока, Владивосток - 1977 - с.143-151 (соавтор - В.А.Милошевич).

4. Спектральный анализ меандр. // Новые методы физико-географических исследований. М., Наука - 1980 - с.53-54 (соавторы - В.А.Милошевич, А.А.Зайцев).

5. Оценка возможных изменений морфологии водотоков и гидрографической сети дельты Енисея // Природа Арктики в условиях межзонального перераспределения водных ресурсов. Л. - 1980 - с.50-53 (соавторы - В.Н.Коротаев, В.А.Милошевич, В.Н.Михайлов, Р.С.Чалов).

6. Палеогеоморфологический анализ дельтовой равнины р.Енисей. // Вестник Моск. ун-та, сер. геогр. - 1981 - № 6, с.103-109 (соавторы - Л.М.Гаррисон, В.Н.Коротаев).

7. Перестройка продольного профиля русла р.Терека в условиях увеличения уклона водной поверхности. // Антропогенные процессы и охрана геологической среды в предкавказском регионе, Пятигорск - 1981 - с.147-174 (соавторы - А.С.Никулин, М.Я.Поволоцкий, Н.И.Алексеевский).

8. Структура потока и руслового рельефа. // Закономерности проявления эрозионных и русловых процессов в различных природных условиях. М. - 1981 - с.261-262.

9. Исследование водного и руслового режимов устьевой области Енисея. // Географические аспекты исследований и использование водных ресурсов в СССР. М. - 1962 - с.95-109 (соавторы - В.Н.Михайлов, В.Н.Коротаев, Р.С.Чалов, Д.Б.Бабич).

10. Защита земель от затоплений в низовьях р.Терек. // Межфакультетская научно-практическая конференция. "МГУ, сельскому хозяйству". М., Изд-во Моск. ун-та - 1962 - с.62 (соавторы - Н.И.Алексеевский, Б.Н.Власов, В.Н.Михайлов).

11. Распределение стока воды и взвешенных наносов в дельте

р.Енисей. // Методы оценки влияния изъятия стока на гидрометеорологический режим северных районов. Деп. ВИНТИ, № 4489-82. М. - 1982 - с.125-137 (соавторы - Г.М.Заец, В.А.Милошевич, А.Е.Михинов).

12. Руслловые деформации на перекатах в дельте р.Енисей. // Методы оценки влияния изъятия стока на гидрометеорологический режим северных районов. Деп. ВИНТИ, № 4489-82. М. - 1982 - с.147-159 (соавторы - В.Н.Коротаев, В.А.Милошевич).

13. Динамика руслового рельефа нижнего Нигера. // Изв. АН СССР, сер. геогр. - 1983 - № 4 - с.66-72 (соавтор - К.М.Беркович).

14. Современные процессы дельтообразования и этапы формирования дельты Енисея. // Эрозия почв и русловые процессы. - 1983 - вып. 9 - с.183-201 (соавторы - Д.Б.Бабиц, А.Л.Богомолов, Г.М.Заец, В.Н.Коротаев, Р.В.Лодина, В.Н.Михайлов, Р.С.Чалов).

15. Руслловой режим р.Нигера в районе металлургического завода у г.Аджаокута. // Эрозия почв и русловые процессы. - 1983 - вып. 9 - с.127-145 (соавторы - К.М.Беркович, Р.В.Лодина).

16. История формирования русла Каргалинского прорыва дельты Терека. // Палеогеография Каспийского и Аральского морей в кайнозое, к.1. М., Изд-во Моск. ун-та - 1983 - с.126-134 (соавторы - Н.И.Алексеевский, В.Н.Михайлов).

17. Методика расчета горизонтальных деформаций меандрирующего русла при изменении гидрологического режима реки. // Исследование русловых процессов для практики народного хозяйства. М., Изд-во Моск. ун-та - 1983 - с.113-115.

18. Прогноз русловых переформирований в низовьях р.Терека в связи с мелиоративными мероприятиями. // Исследование русловых процессов для практики народного хозяйства. М., Изд-во Моск. ун-та - 1983 - с.198-199 (соавторы - Н.И.Алексеевский, Б.Н.Власов, В.Н.Михайлов, Ю.А.Максимов, И.И.Черноусов).

19. Прогноз переформирований продольного профиля русла в низовьях р.Терек под влиянием водохозяйственной деятельности. // Исследование русловых процессов для практики народного хозяйства. М., Изд-во Моск. ун-та - 1983 - с.123-124 (соавтор - Н.И.Алексеевский).

20. Морфология и динамика рельефа русла нижнего Нигера. // Проблемы морфодинамики. М., ГО СССР - 1983 - с.21-36.

21. Структура рельефа речного русла. // Вест.Моск. ун-та, сер. геогр. - № 2 - 1984 - с.17-23.

22. Прогнозирование и предупреждение затоплений сельско-

хозяйственных земель пародковыми родами. // Актуальные вопросы эрозиоведения (ред. А.Н.Каштанов, М.Н.Заславский). М., "Колос" - 1984 - с.207-222.

23. Динамика грядового рельефа русла р.Нигер. // Гидрофизические процессы на реках и водохранилищах. М., Наука - 1985 - с.162-168.

24. Морфология и динамика руслового рельефа. Итоги науки и техники. сер. Гидрология суши. т. 5. М. ВИНТИ - 1985 - с.1-164 (соавтор - А.Е.Михинов).

25. Геоморфологическое районирование территории Европейской части СССР для оценки руслоформирующей деятельности рек. // Рельеф и климат. М., МОГО СССР - 1985 - с.62-75 (соавторы - К.М.Беркович, В.Н.Власов, А.А.Зайцев, А.В.Чернов).

26. Гидрологическое обоснование оптимального регулирования русла в низовьях р.Терек. // Вестник Моск. ун-та, сер. геогр. - 1985 - № 4, с.99-105 (соавторы - Н.И.Алексеевский, В.Н.Михайлов).

27. Географические проблемы защиты почв от эрозии и регулирования речных русел в свете задач научно-технического прогресса. Вестник Моск. ун-та, сер. геогр. - 1986 - с.9-15 (соавторы - М.Ю.Белоцерковский, М.Н.Заславский, Р.С.Чалов).

28. Морфология и динамика микроформ руслового рельефа. // Закономерности проявления эрозионных и русловых процессов в различных природных условиях. М. Изд-во Моск. ун-та - 1987 - с. 326-328.

29. Условия формирования разветвленного русла Верхней Оби. // Динамика русловых потоков - 1987 - вып. 98 - с.40-46.

30. Метод расчета переформирования разветвленного русла при изменении гидрологического режима. // Метеорология и гидрология - 1987 - № 10 - с.82-89 (соавтор - А.М.Алабян).

31. Изменение морфологии русла и руслообразующих наносов от истока до устья (на примере р.Терека) // Геоморфология - 1987 - № 1 - с.86-94 (соавторы - Р.В.Лодина, Д.В.Рашутин, Р.С.Чалов).

32. Структура руслового рельефа, ее связь с формами русла и определяющими факторами // Работа водных потоков. М. Изд-во Моск. ун-та - 1987 - с.114-120.

33. Процессы дельтообразования в устьевой области Терека. // Водные ресурсы - 1987 - № 5 - с.123-128 (соавторы - Н.И.Алексеевский, В.Н.Михайлов).

34. Прогнозная оценка изменения русловых процессов в мно-

горукавном русле при перераспределении водных ресурсов. // Моделирование и прогнозирование изменений природных условий при перераспределении водных ресурсов, Новосибирск - 1987 - с.14 (соавтор - К.М.Беркович).

35. Учение об эрозионных и русловых процессах: состояние, основные направления и задачи исследования. // Вестник Моск. ун-та, сер. геогр. - 1987 - № 2 - с.16-21 (соавторы - Г.А.Ларионов, Р.С.Чалов).

36. Процессы дельтообразования в устьевой области Енисея и влияние на них хозяйственных мероприятий // Вестник Моск. ун-та, сер. геогр. - 1987 - № 5, с.72-77 (соавторы - В.Н.Коротаев, В.Н.Михайлов).

37. Динамика структуры рельефа речного русла // Тр. 5. Всес. гидрол. съезда, т. 10 "Русловые процессы и наносы", кн. I Л. - 1988 - с.104-111.

38. Морфология речного русла и определяющие ее природные факторы. // Системный подход в геоморфологии. М. - 1988 - с.6-12.

39. Иерархия русловых форм: структура и динамика // Проблемы методологии геоморфологии. Новосибирск - 1989 - с.93-96.

40. Проблемы оптимизации функционирования системы поток-русло // Инженерная география (основные проблемы и направления), М. - 1989 - с.31-40.

41. Использование принципа симметрии в теории руслового процесса. // Теория геоморфологии. Тез. докл научных чтений памяти Н.А.Ф. лоренсова, Иркутск - 1989 - с.31-33 (соавтор - Б.В.Матвеев).

42. Развитие долины и русла р.Яны в зоне Куларского хребта в плейстоцене и голоцене // Четвертичный период: методы исследования, стратиграфия и экология. т. II, Таллинн - 1990 - с.79-80 (соавторы - В.Н.Коротаев, Б.В.Матвеев, А.В.Панин).

43. Морфология и динамика рельефа русла в нижнем течении Терека // Земельные и водные ресурсы. М., Изд-во Моск. ун-та - 1990 - с.87-95 (соавтор - Н.И.Алексеевский).

44. Разработка единой схемы районирования территории СССР по руслоформирующей деятельности рек. Изв. АН СССР, сер. геогр. - 1990 - № 2 - с.17-27 (соавторы - К.М.Беркович, А.М.Калинин, Р.С.Чалов, А.В.Черног).

45. Катастрофические скорости формирования флювиального рельефа // Геоморфология - 1990 - № 2, с.3-11 (соавторы - А.В.Панин, Р.С.Чалов).

46. О расчетах скорости смещения донных гряд и расхода влекомых наносов // Водные ресурсы - 1990 - № 5 - с.56-63.

47. Самоорганизация рельефа и системе "поток-русло" // Геоморфологические процессы и окружающая среда. Ч. I. Тезисы докладов международного симпозиума Казань-Волга, 21-30 июня 1991 - Казань - 1991 - с.87-88.

48. Об интенсивных направленных вертикальных деформациях русла горной реки (на примере р.Ала-Буки, Киргизия) // Динамика течений и литодинамические процессы в реках, водохранилищах и окраинных морях. М., Наука - 1991 - с.120-127 (соавтор - Р.С.Чалов).