

рость течения, касательная сила, приведенная к единице длины потока, и удельная мощность потока, могут быть представлены в виде про-

изведения некоторых констант и критериев динамического подобия. Область применения критериальных характеристик расширяется.

### Список литературы

1. Антроповский В. И., Минаева Г. Н. Фоновый прогноз переформирования перекатов на р. Вилуе в условиях зарегулированного стока // Тр. ГГИ. — 1974. — Вып. 216. — С. 52–64.
2. Антроповский В. И. Связь характеристик руслового процесса с критериями динамического подобия // Динамика русловых потоков: межвуз. сб. науч. тр. — Л.: Изд-во ЛПИ (ЛГМИ), 1987. — С. 96–102.
3. Антроповский В. И. Гидролого-морфологические закономерности и фоновые прогнозы переформирования русел рек. — СПб., 2006. — 216 с.
4. Гришанин К. В. Динамика русловых потоков. — Л.: Гидрометеиздат, 1974. — 311 с.
5. Кондратьев Н. Е., Попов И. В., Сниценко Б. Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. — Л.: Гидрометеиздат, 1982. — 272 с.
6. Ромашин В. В. Типы руслового процесса в связи с определяющими факторами // Тр. ГГИ. — 1968. — Вып. 155. — С. 56–63.
7. Россинский К. И., Кузьмин И. А. Речное русло // Гидрологические основы речной гидротехники. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1950. — С. 52–97.
8. Чалов Р. С. Морфодинамика русел равнинных рек / Р. С. Чалов [и др.]. — М.: ГЕОС, 1998. — 228 с.
9. Якунин И. И. Применение гидроморфологических зависимостей к оценке переформирований русла р. Иртыша под влиянием регулирования стока // Тр. ГГИ. — 1961. — Вып. 88. — С. 4–58.
10. Leopold L. B., Wolman M. G. River-channel patterns: braided, meandering and straight // U. S. Geolog. Surv. Prof. Paper. — № 282-B.

УДК 556.537: 551.435.11

**А. Ю. Сидорчук,**  
д-р географ. наук, ст. науч. сотр.,  
Московский государственный университет  
им. М. В. Ломоносова

### МЕТОД МАЛЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ТЕОРИИ РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА

### METHOD OF SMALL PERTURBATIONS IN THE CHANNEL PROCESS THEORY

*Методом малых возмущений проведен анализ начальной неустойчивости потока и размываемого дна на основе уравнений плановой гидравлики, записанных в криволинейной ортогональной системе координат с учетом эффектов динамического давления и поперечной циркуляции. Получены области неустойчивости донных волн пяти основных типов и теоретические зависимости размеров этих волн от гидравлических характеристик потока. Сравнение теории с эмпирическими данными по иерархическому комплексу русловых форм в реках и больших лотках показало возможность использования метода малых возмущений для создания теоретической классификации руслового рельефа.*

*The analysis of flow initial instability and erodible bottom is realized by the small perturbations method. It based on the planned hydraulics equations write down in curvilinear orthogonal co-ordinates and taking into account of the dynamic pressure effect and transverse circulation. Five base types of the bed wave instability and their theoretical relation on hydraulic characteristics are received. Taking into account of the channel forms hierarchy actual data in rivers and in a large flume are compared. It shows an opportunity to use the small perturbations method for the classification of the channel relief.*

*Ключевые слова: русловой процесс, поток, русло, донные волны, русловые формы, гидравлические характеристики потока.*

*Key words: river bed evolution, stream channel, ground waves, river bed shapes, hydraulic stream characteristics.*

**М**ЕТОДОМ малых возмущений проведен анализ начальной неустойчивости потока и размываемого дна на основе уравнений плановой гидравлики, записанных в криволинейной ортогональной системе координат с учетом эффектов динамического давления и поперечной циркуляции. Получены области неустойчивости донных волн пяти основных типов и теоретические зависимости размеров этих волн от гидравлических характеристик потока. Сравнение теории с эмпирическими данными по иерархическому комплексу русловых форм в реках и больших лотках показало возможность использования метода малых возмущений для создания теоретической классификации руслового рельефа.

В теории руслового процесса центральным является постулат М. А. Великанова о взаимодействии потока и русла. Наиболее близкие к современным воззрениям формулировки этого постулата находим у Н. И. Макавеева [3, с. 137]: «В наиболее общей форме процесс руслообразования можно определить как процесс “отображения” поверхностью твердой среды (т. е. грунтами, слагающими ложе) особенностей движения воды и перемещаемых ею наносов». Для описания этого явления предложено множество методов, но только метод малых возмущений, по выражению К. В. Гришанина [1, с. 62], «...поставил, наконец, решение этой проблемы на научную основу».

Анализ главных работ по использованию метода малых возмущений в теории руслового процесса приводит к следующим выводам:

1) метод предельно чувствителен к степени упрощения уравнений гидродинамики при выводе уравнений двумерной гидравли-

ки. При осреднении по глубине трехмерных уравнений необходимо максимально сохранить влияние таких эффектов, как динамическое давление и поперечная циркуляция;

2) форма уравнений должна быть такова, чтобы процедура линеаризации уравнений могла быть проведена с минимальной потерей членов;

3) геометрия малых возмущений гидравлических характеристик должна быть задана в максимально общей форме, чтобы спектр волн возмущений был непрерывен как в продольном, так и поперечном направлениях.

В наиболее общей форме интегрирование по глубине трехмерных уравнений движения и неразрывности потока в криволинейных ортогональных координатах провел Н. А. Картвелишвили [2]. Анализ малых возмущений потока и русла в рамках этих уравнений проводится в стандартной форме с дополнительным учетом неустойчивости размываемого дна. Компоненты скорости, отметки поверхности воды и дна, кривизна ортогональных координат записываются в виде суммы двух составляющих — для основного осредненного потока и русла, и для возмущения. Результирующая система уравнений для возмущений потока и русла линеаризуется — члены, содержащие произведения и степени компонент возмущений отбрасываются. Использование криволинейных ортогональных координат позволило сохранить при линеаризации члены, содержащие кривизну свободной поверхности, и элементы поперечного перемещения потока.

Как принято в линейной теории начальной неустойчивости, возмущения компонент скорости течения, отметок поверхности потока и дна считаются малыми и описываются

ся продольными синусоидальными волнами. Форма возмущений в поперечном направлении определяется из линеаризованных уравнений двумерной гидравлики. Их преобразования приводят к обыкновенному дифференциальному уравнению второй степени относительно функции, которая описывает изменение поперек потока возмущений свободной поверхности. Для этой функции граничные условия у берегов потока могут быть не равными нулю. Это определяет непрерывность спектра возмущений, как в продольном, так и поперечном направлениях. В таком случае дифференциальное уравнение второй степени имеет нетривиальные решения при всех действительных собственных значениях и сводится к дисперсионному линейному алгебраическому уравнению для комплексной скорости волн возмущений.

Дисперсионное уравнение решалось численно для широкого диапазона гидравлических характеристик потока, продольных и поперечных волновых чисел. При этом рассматривались только наиболее медленные неустойчивые волны, которые могут отображаться в рельефе речного русла. Выделено несколько областей неустойчивых волн дна русла (скорость роста амплитуды во времени положительна) с различными типами зависимостей между их длиной, шириной и гидравлическими характеристиками потока:

1. Область ультрамикроморм — двумерных и трехмерных коротковолновых возмущений с хорошо выраженным максимумом скоростей роста амплитуды волн при длинах порядка глубины потока. Ей соответствуют многочисленные данные экспериментов о характеристиках рифелей в больших лотках и на реках. Антидюны также соответствуют ультрамикромормам, так как антидюны фактически являются рифелями, которые формируются в потоках с высокой кинетичностью.

2. Область микроморм — трехмерных изометричных возмущений. Этой области в натуральных реках и лотках соответствуют дюны и застрugi. Они видны на спектрах отметок дна рек в виде локальных максимумов спектральной плотности. Такие максимумы отсутствуют на теоретическом спектре возмущений, в области микроморм нет пред-

почтительной длины волны с наибольшей скоростью роста амплитуды. Появление этих максимумов в донном рельефе реальных рек объясняется нелинейными эффектами взаимодействия потока и русла.

3. Область мезоморм — трехмерных вытянутых в плане возмущений. Степень вытянутости увеличивается с увеличением длины волны возмущения. В область мезоморм ложатся как крупные донные формы в реках — шалыги, так и русловые формы, влияющие на конфигурацию меженного русла, — песчаные волны, осередки и побочни. Граница между крупными донными формами и мелкими русловыми формами в естественных реках достаточно неопределенная. Для такого рода русловых образований важно определить верную номенклатуру, так как длина микроморм и мелких мезоморм увеличивается с увеличением кинетичности потока, а длина крупных мезоморм и макроморм уменьшается при увеличении числа Фруда.

4. Область макроморм — трехмерных возмущений с хорошо локализованным максимумом скорости роста амплитуды волны. Эти волны также вытянуты в плане, и степень вытянутости зависит от гидравлического сопротивления, кинетичности потока и интенсивности поперечной циркуляции. Области макроморм соответствуют крупным побочни и осередки, острова и излуины русла. Измерения на естественных реках показывают, что длина побочней, островов и меандров обычно меньше, чем длина волн наиболее вероятных возмущений в области макроморм. Скорость роста амплитуды макроморм определяется не только начальной неустойчивостью, но и вторичными нелинейными эффектами, влиянием ширины русла, размыва берегов и горизонтальных деформаций русел.

5. Область мегаморм — трехмерных длинноволновых возмущений со слабовыраженным максимумом скорости роста амплитуды. Характеризуются значительной вытянутостью по потоку. А в естественных руслах мегамормами может быть образована параллельная рукавность, выделяемая на Оби, нижней Лене и нижней Волге. Она формируется в широком и относительно неглубоком русле, когда на значительном расстоянии река про-

текает двумя (несколькими) рукавами, слабо связанными между собой лишь короткими поперечными протоками и разделенными цепью островов или пойменными массивами.

Метод малых возмущений позволяет показать, как континуум волн и вихрей в потоке «отображается» в размываемом русле в виде континуума русловых форм самых различных размеров, от ряби и рифелей до меандров и систем разветвлений рукавов рек. К. В. Гришанин [1, с. 47] полагает, что «неравномерный рост возмущений с различными длинами волн приводит к выделению доминирующей длины волны и тем самым преобразует широкий спектр возмущений скорости в узкополосный спектр возмущений поверхности дна». В некоторых случаях взаимодействие потока и русла приводит к сужению спектра русловых

образований относительно спектра структур потока — таково образование ультрамикроструктур. В других случаях широкому диапазону размеров структур потока соответствует также широкий диапазон длин русловых форм — таковы микроформы и мезоформы. Для этих русловых образований объективно сложно найти однозначные связи с гидравлическими характеристиками потока. Третий вариант процесса — макроформы. Здесь взаимодействие потока и русла приводит к преобразованию широкого спектра возмущений скорости в узкий спектр возмущений поверхности дна, однако нелинейные эффекты приводят к значительному смещению «линий» этого спектра. При этом наряду с первым внутренним масштабом, глубиной русла появляется второй внутренний масштаб — ширина потока.

#### Список литературы

1. Гришанин К. В. Устойчивость русел рек и каналов. — Л.: Гидрометеоздат, 1974. — 143 с.
2. Картвелишвили Н. А. Потоки в недеформируемых руслах. — Л.: Гидрометеоздат, 1973. — 279 с.
3. Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. — М.: Изд-во АН СССР, 1955. — 346 с.

УДК 556.535.6

**З. Д. Копалани,**  
канд. техн. наук., ст. науч. сотр.,  
Государственный гидрологический институт  
(Санкт-Петербург);

**М. М. Жук,**  
Государственный гидрологический институт  
(Санкт-Петербург)

#### К ПРОБЛЕМЕ ОЦЕНКИ СТОКА РУСЛОВОГО МАТЕРИАЛА В РЕКАХ

#### ON THE PROBLEM OF THE BED LOAD YIELD ASSESSMENT IN RIVERS

*Предложен метод оценки стока донных наносов на основе использования стандартной гидрометрической информации, получаемой на гидрологической сети Росгидромета. Для четырех гидрометрических створов Нижней Кубани получены региональные зависимости для расчета расхода и годового стока донных наносов, а также многолетние кривые зависимости годового стока донных наносов от годового стока воды.*