

На правах рукописи

Хон Алексей Валерьевич

**САМОРЕГУЛЯЦИЯ В ДИНАМИКЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
РЕЧНОГО ПОТОКА И РУСЛА**

25.00.25 – «Геоморфология и эволюционная география»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Томск - 2003

Работа выполнена в лаборатории самоорганизации геосистем
Института оптического мониторинга СО РАН

Научный
руководитель: доктор географических наук
профессор А.В.Поздняков

Официальные
оппоненты: доктор географических наук,
профессор Д.А.Бураков (ТГУ, Томск)
кандидат географических наук
А.А.Мистрюков (ИГ СО РАН,
Новосибирск)

Ведущая организация: Областное государственное унитарное
предприятие «Территориальный Центр
«Томскгеомониторинг»

Защита состоится 26 декабря 2003 г. в 14 час. на заседании
диссертационного совета Д 212.267.15 при Томском
государственном университете по адресу: 634050, Томск, пр.
Ленина, 36.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке ТГУ.
Отзывы и замечания, заверенные печатью, в двух экземплярах
просим направлять по указанному адресу.

Автореферат разослан «26» ноября 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат географических наук

Т.В. Королева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Главной задачей геоморфологии является изучение закономерностей пространственного перераспределения вещества и его рельефообразующих следствий. Решение этой задачи требует количественных оценок протекающих на земной поверхности процессов. Одним из главных агентов экзогенного рельефообразования служат водные потоки, а создаваемый ими комплекс русловых и долинных форм является наиболее устойчивым внешним проявлением их взаимодействия.

Развитие системы «водный поток – русло» происходит в условиях действия на нее множества хаотизирующих факторов. В частности, поступление воды в русловую сеть является неравномерным и в различной степени зависит от режима осадков и температуры. Количество и крупность продуктов разрушения горных пород вдоль водотока также не является регулярным и зависит от геологического строения речного бассейна и распределения уклонов на его территории. Наблюдаемая в этих условиях высокая степень устойчивости системы предполагает наличие у нее механизмов приспособления к пространственной и временной смене условий своего функционирования.

Таким образом, система «водный поток – русло» представляет собой естественным образом формирующийся природный автомат, действующий на основе обратных положительных и отрицательных связей, лежащих в основе процессов саморегулирования. Саморегулирование осуществляется через взаимообусловленные процессы деформации русла, вызываемые ими локальные изменения поля скоростей течения, перераспределение донных отложений и изменение морфологии русла в целом. При этом все русло приобретает сложное морфологическое строение, которое оказывает обратное действие на общую структуру скоростного поля и турбулентность.

Скоростное поле руслового потока определяет изменение морфологических параметров русла на уровне системы «плес-перекат» и отдельной излучины. На этом же уровне осуществляется взаимодействие руслового потока с инженерными сооружениями,

возводимыми в поле влияния русла: в самом в русле, на пойме, на речных террасах.

Этим определяется одна из главных задач исследования процесса русловой геоморфодинамики – изучение формирования поля скоростей течения в русловом водном потоке, вызываемого закономерными изменениями форм русла в поперечном и продольном сечениях. Не решая данную задачу, во-первых, нельзя добиться удовлетворительного прогноза русловых переформирований как в естественных условиях его развития, так и вследствие техногенных воздействий. Во-вторых, становится невозможной разработка управления системой «водный поток – русло».

Другой важной задачей в решении проблем русловой геоморфодинамики является изучение гранулометрической дифференциации аллювия, осуществляющейся в результате взаимодействия водного потока с отдельными частицами. Строгая теоретическая реализация ее имеет важное прикладное значение, и не только в отношении образования повышенных концентраций полезных минералов с большим удельным весом, но и с точки зрения дальности и скорости переноса обломочного материала и различных загрязнителей по руслу.

Решение данных задач имеет важное практическое значение, и этим определяется актуальность диссертационного исследования.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является взаимодействующие между собой водный поток и русло, которые образуют динамическое структурное единство – саморегулирующуюся систему, осуществляющую наиболее активное преобразование рельефа и играющую важную роль в хозяйственном освоении речных долин.

В качестве предмета исследования выступают механизмы саморегуляции в процессе развития речного русла, а также взаимовлияние морфологии русла и динамических характеристик водного потока.

Цель работы. Опираясь на теоретические и экспериментальные достижения в изучении динамики русловых потоков [Маккавеев В.М., 1961; Маккавеев Н.И., 1955, 1971; Чалов,

1984, 1998; Сидорчук, 1987, 1992], отразить влияние морфологии русла в динамике его взаимодействия с речным потоком.

Достижение этой цели предполагает решение ряда задач.

- Описать механизмы саморегуляции на различных уровнях системы «русло – поток».
- Дать количественную характеристику зависимости подвижности частиц донных отложений от их гидравлической крупности и формы.
- Разработать методику оценки скоростного поля водного потока на переходных участках с учетом продольного уклона водной поверхности и морфологических особенностей поперечного сечения русла.
- Описать механизм отрывных течений, определяющих морфологию донного рельефа в местах естественного и искусственного расширения поперечного сечения руслового потока.
- Охарактеризовать особенности формирования плесовой ложбины первоначально свободной струей, нагруженной обломочным материалом различной крупности.

Методы исследования. При выводе зависимостей, предложенных автором работы для расчета скоростного поля, использовался аппарат решения дифференциальных уравнений и учтены закономерности, полученные в рамках гидроморфологического подхода к описанию русловых процессов [Полянин, 1998; Кондратьев, Попов, 1982]. С целью моделирования движения воды на плесовом участке были применены зависимости из теории свободной турбулентности [Абрамович, 1960; Шлихтинг, 1974; Шваб, 1980; Михалев, 1971]. Для изучения особенностей эрозионно-аккумулятивной деятельности струйных течений проводились физические эксперименты на открытой гидравлической площадке.

Фактический материал. В основу диссертационного исследования положены результаты собственных натурных, экспериментальных, а также аналитических исследований, проводившихся по плановой тематике Института оптического мониторинга СО РАН №01.20.0001885 – «Теоретические и экспериментальные исследования атмосферных и экосистемных

изменений под воздействием природных и антропогенных факторов». Использованы также результаты исследований, проводившихся по темам РФФИ: трехгодичный (2001–2003 гг.) грант № 01-05-65151 – «Самоорганизация флювиогляциальных катастроф», гранты № 02-05-06333 и № 03-05-06513 – МАС: проведение экспериментальных исследований русловых процессов; а также по гранту ФЦП «Интеграция» Е 0242 – «Экспедиционные исследования русловых процессов и динамики рельефообразования».

Защищаемые положения:

1. Закономерное чередование сужений и расширений русла, образование излучин и формирование турбулентных струй, подобных свободным, являются взаимообуславливаемыми процессами.

2. Морфологические особенности русла, его динамика и эрозионно-аккумулятивная деятельность определяют пространственное положение динамической оси потока и градиенты скоростей течения.

3. Самоограничение расширяющейся струи, нагруженной обломочным материалом, происходит с сохранением характера распределения скоростей вдоль потока, что отражается в морфологических особенностях формирующихся струйным течением аккумулятивных образований.

Научная новизна и практическая значимость

1. Разработана методика оценки распределения скоростей в поперечном сечении руслового потока, учитывающая зависимость положения стрежня от шероховатости русла в данном сечении и от направления течения на вышерасположенном участке.

2. Доказана возможность применения теории Шлихтинга для определения местных, а не осредненных по глубине скоростей течения речного потока.

3. Установлено, что самоограничение струйных течений происходит с сохранением характера распределения скоростей течения по длине струи и в поперечном ее сечении.

4. Практическое значение имеют методы определения дальности перемещения обломочного материала в водном

русловом потоке за определенный промежуток времени при известных гидравлических условиях.

5. Результаты исследований позволяют прогнозировать динамику эрозионно-аккумулятивной деятельности речных потоков на участках техногенного воздействия.

Апробация. Основные результаты работы докладывались на научно-практической конференции «Гидрологические исследования в Сибири» (Томск, 1997), на первой региональной научно-практической конференции молодежи «Проблемы региональной экологии» (Томск, 1998), на III Межвузовской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Томск, 1999), на Международном конгрессе «Наука, образование, культура на рубеже тысячелетий» (Томск 1999), на Второй Байкальской школе по фундаментальной физике (Иркутск, 1999), на научно-практической конференции «Проблемы гляциогидроклиматологии Сибири и сопредельных территорий» (Томск 2002), а также на XXVI и XXVII Пленумах Геоморфологической комиссии РАН. Положительная оценка результатов исследований была дана экспертами Российского фонда фундаментальных исследований, присудившими гранты МАС за 2002 и 2003 гг. Основные результаты диссертационного исследования изложены в 14 опубликованных работах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 120 наименований. Работа изложена на 129 страницах, включая 20 рисунков и 14 таблиц.

Автор выражает глубокую и искреннюю благодарность научному руководителю доктору географических наук А.В. Позднякову, доктору технических наук А.И. Литвину – за консультации в разработке математических моделей, а также всем, кто своими замечаниями, советами и доброжелательным отношением содействовал проведению исследований, помогал в подготовке и оформлении диссертационной работы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава первая, «**Структурные элементы и механизмы взаимодействия речного потока и русла**», посвящена рассмотрению русловых потоков как сложных динамических систем. Необходимость такого рассмотрения отмечена в работах М.А. Великанова [1958, 1964], Н.И. Маккавеева [1955, 1971], А.В. Позднякова [1988, 2001, 2002], Н.С.Знаменской [1992] и др. Взаимозависимость динамики потока и системы русловых форм на любом участке естественного руслового потока подробно раскрыта в работах Р.С. Чалова [1979, 1984, 1998] и других научных сотрудников Лаборатории эрозии и русловых процессов МГУ.

Приводится обзор имеющихся на настоящее время способов расчета распределения местных скоростей по поперечному сечению в одномерной [Караушев, 1947, 1960; Гончаров, 1962] и двумерной [Рогунович, 1989] постановке задачи.

Волновой характер движения воды по руслу реки вызывает согласованные колебания глубины руслового потока и колебания направления струй потока в плане. Внешним отражением этих колебаний является закономерное чередование по длине речного потока участков уменьшения и увеличения глубины потока, а также формирование и самовоспроизведение излучин по длине реки. Источником энергии этих колебаний является потенциальная энергия гравитации.

Согласно определению, приведенному в работе И.В. Попова и Н.Б. Барышникова [1988], саморегулирующимися называются такие механические и природные системы, которые способны путем внутренней перестройки продолжать выполнение своих функций при ограниченных изменениях внешних условий, в которых они развиваются. Данное определение отражает процесс приспособления системы путем частичного изменения своей структуры, но не учитывает возможной нейтрализации природным объектом малых возмущений, выводящих его из состояния динамического равновесия без изменения структуры связей между элементами. Именно этот процесс снижения степени внешнего воздействия без структурных изменений понимается как саморегулирование. Самоорганизация же понимается как совокупность процессов, в ходе которых создается,

воспроизводится и совершенствуется структурная организация сложной динамической системы. Самоорганизация любой системы происходит за счет притока внешней упорядоченной энергии [Арманд, 1988; Поздняков, 1988; Черванев, Поздняков, 1996].

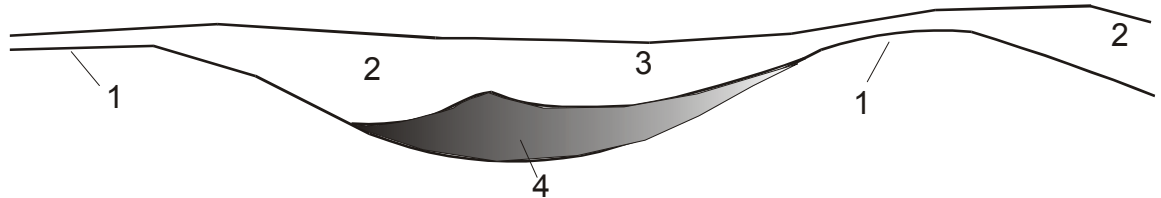


Рис. 1. Схема строения системы «плес-перекат». Продольный профиль русла в межень (р.Бирушка, Д.Восток) [Поздняков, 1988]. 1 – перекаты; 2 – плесы, образованные струей, формирующейся на перекате в паводок; 3 – плес, формирующийся в межень; 4 – аккумулятивное тело (осередок), формирующийся на дне плеса и дающий начало процессу бифуркации.

Самоорганизация на уровне отдельных излучин и составляющих эти излучины систем «плес-перекат» заключается в формировании турбулентных струйных течений в местах естественного сужения поперечного сечения руслового потока. Основной причиной, обуславливающей самопроизвольное сужение потока, является движение по руслу гряд и концентрация потока на изгибах в результате действия центробежной силы.

Динамика плеса, обусловленная образованием и самоограничением струйных турбулентных течений, выглядит следующим образом (рис.1). В паводок на участке переката формируется сжатая турбулентная струя, движущаяся на перекате безотрывно. Эрозионно-аккумулятивный процесс определяется соотношением донной V_d и неразмывающей V_n скоростей. Как только $V_d > V_n$ – начинается размыв дна и берегов, формируется углубление дна – плес. С этого момента водный поток, выходя на плесовый участок, становится ядром затопленной турбулентной струи с ясно выраженными параметрами свободной струи. Причем отрыв может происходить не только от дна, но и от берегов. Поле скоростей такого течения более адекватно будет моделироваться зависимостями теории свободных турбулентных струй. А гранулометрическая дифференциация взвешенного и влекомого

обломочного материала на плесе осуществляется в соответствии со скоростным полем. Таким образом, на участке плеса, сформированного паводковым потоком на спаде уровня и в межень, формируется аккумулятивное тело, которое образует вложенную морфологическую пару «плес-перекат».

При последующем снижении уровней и скоростей течения это аккумулятивное образование вызывает деление потока в плане на две самостоятельные струи, развивающиеся в меньшем масштабе по тем же закономерностям. Появление в русле островов предопределяет подпор и локальное повышение уровня, которое увеличивает уклон водной поверхности и скорость течения на нижележащем перекате, что инициирует развитие на следующем плесе подобного процесса.

Размываемость берегов становится причиной колебания руслового потока в плане путем формирования излучин. Увеличение угла подхода струи к подмываемому берегу происходит в результате действия положительной обратной связи. Случайно образующийся начальный выступ одного из берегов вызывает отклонение струй к противоположному берегу, и он размывается. Отступление подмываемого берега способствует увеличению кривизны русла, еще большему отклонению струй и дальнейшему нарастанию кривизны излучины. Формирование турбулентной струи происходит, когда эта струя подходит под углом к одному из берегов русла с повышенной скоростью. Выходящая из корыта переката под некоторым углом к берегу турбулентная струя, в результате размывая его и примыкающую к нему часть русла, формирует плесовую ложбину. В силу того, что скорость по длине струи закономерно падает, в нижней части плеса развивается аккумуляция влекомых наносов, что кладет начало формированию следующего переката. На этом перекате вновь происходит концентрация потока, формирование корыта и турбулентной струи.

Таким образом формируется один из самых главных динамических элементов руслового потока – система «плес-перекат». Параметрами этой системы являются: начальная скорость сформированного на гребне переката струйного течения (v_0), длина плесового участка и крупность донных отложений. Данная система начинается на гребне переката, включает в себя плесовую ложбину и напорный склон следующего переката (рис. 1).

Функцией системы «плес-перекат» в речном русле следует считать перевод части кинетической энергии движения в потенциальную энергию и ограничение области интенсивного размыва участком развития водоворотной зоны.

В динамике русла важное значение имеет дальность переноса обломочного материала, зависящая от его гидравлической крупности и пульсационной скорости на дне. Ими определяются процессы гранулометрической дифференциации обломочного материала по крупности и плотности, что имеет важное прикладное значение в раскрытии механизмов россыпеобразования. В работе получены количественные аналитические зависимости для определения дальности перемещения обломочных частиц за счет качения и сальтации.

Для оценки дальности сальтационного перемещения частиц в основу было взято уравнение

$$m \frac{dv}{dt} = F_n - P - c_R \frac{\rho(u_y - v)^2 \pi d^2}{8},$$

в котором учитывается подъемная сила, вес обломков известной плотности и сила сопротивления движению частицы.

Из решения уравнения получена зависимость для определения дальности L_c перемещения обломков за счет сальтации:

$$L_c = \int_0^{t_c} v dt = t_c (u_{y \max} - 1) + \ln \left| \frac{1 + \exp(2 b t_c - 2 u_d / a)}{1 + \exp(-2 u_d / a)} \right|.$$

Анализ формулы и численные эксперименты по определению величины перемещения обломочных частиц размером от 0,002 м до 0,07 м в диаметре позволили получить следующие выводы:

1. Увеличение диаметра частиц до некоторой величины вызывает увеличение длины скачка. Причем для различных скоростей течения эта критическая величина диаметра будет разной.

2. Дальнейшее увеличение поперечных размеров частицы приводит к снижению дальности перемещения вплоть до отсутствия сальтационного движения, в случае снижения скорости течения до значений ниже размывающей скорости для данной крупности.

3. Данные закономерности обусловлены более быстрым ростом подъемной силы за счет увеличения площади воздействия в первом случае и более значительным ростом массы частицы во втором случае.

Общий вывод, следующий как из зависимости, описывающей качение, так и из формулы для сальтационного движения, заключается в неравномерности движения частицы даже при постоянной скорости течения, а также в дискретном характере такого движения. Таким образом, при относительно небольших различиях в размере, одинаковых гидравлических условиях и плотности наносов, частица с меньшим диаметром переместится на меньшее расстояние. Вероятно, это обусловлено меньшей площадью гидродинамического воздействия потока на частицу. Последний вывод не распространяется, разумеется, на случай большой разницы в гидравлической крупности.

Изложенные в первой главе материалы позволяют сформулировать первое защищаемое положение – *закономерное чередование сужений и расширений русла, образование излучин и формирование турбулентных струй, подобных свободным, являются взаимообуславливаемыми процессами.*

Глава вторая, «Формирование перекатного участка русла и поля скоростей течения в поперечном сечении водного потока», посвящена раскрытию свойств распределения скоростей в живом сечении руслового потока при безотрывном движении. Раскрывается основная особенность саморегуляции речного потока и русла, которая заключается в установлении квазиравномерного режима движения потока по его длине на относительно прямолинейных перекатных участках.

Картина распределения местных осредненных скоростей течения в поперечном сечении является результатом воздействия на массы речной воды всех определяющих процесс стекания факторов. К этим факторам относятся: продольная составляющая силы тяжести, обусловленная падением отметок дна долины, а также наличие русловых форм, осуществляющих через создание дополнительных сопротивлений или локальное увеличение уклонов обратную связь подвижного русла с потоком. Тем не менее само поле осредненных скоростей представляет количественное выражение прямого воздействия речного потока на свое ложе, поскольку гидродинамическое давление на какое-либо твердое тело пропорционально квадрату скорости течения в окрестностях данного тела.

Рассмотрены особенности саморегуляции речного потока и русла на участках безотрывного течения. Плавно изменяющийся характер движения реализуется в русловых потоках благодаря созданию на дне и стенках турбулентного пограничного слоя, который состоит из множества локальных зон отрыва придонных струй и их присоединения. Вследствие наложения следов за различными выступами и их большого количества, изменения местных осредненных скоростей по длине нивелируются и становятся заметными только на некоторых расстояниях от данного створа, сравнимых с размерами мезоформ. Это позволяет нам воспользоваться уравнением равномерного движения [Маккавеев В.М., 1961]:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(A \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = -\gamma I, \quad \text{которое приводится к}$$

уравнению Пуассона с постоянной правой частью $\frac{\partial^2 U}{\partial \tilde{y}^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial \tilde{z}^2} = -2E$, с

учетом гипотезы В.М. Маккавеева, согласно которой коэффициент турбулентного обмена A пропорционален местной скорости:

$$A = \frac{\gamma h}{K C} v_x.$$

Рассматривается несколько путей расчета распределения скоростей по поперечному сечению реки. Один из них – деление поперечного сечения на области, в пределах которых картина распределения скоростей по глубине остается постоянной. Тогда допустимо использовать одномерное уравнение, решение которого получается в виде параболы:

$$U(z) = -E(z^2) + C_1(z) + C_2, \quad v(z) = V \cdot \sqrt{u(z)}, \quad (1)$$

где $E = \frac{M \cdot C \cdot I \cdot H_{\text{стр}}}{V^2}$; $C_1 = U_d + E - U_n$; $C_2 = U_n$; $M = 0.7 \cdot C + 6$; I – уклон водной поверхности на вертикали; C – коэффициент Шези; U_d, U_n – соответственно квадраты безразмерных величин придонной и поверхностной скорости на данной вертикали потока; $v(z)$ – значение скорости течения в точке с вертикальной координатой z , которая отсчитывается в данном случае от поверхности; V – средняя скорость течения на вертикали. Эта формула, в отличие от формулы А.В. Караушева, не использует априорного допущения о положении максимума скорости. Однако данный путь влечет большое количество измерений, которые не всегда возможно произвести.

Более обоснованным подходом к оценке скоростного распределения в поперечном сечении руслового потока следует считать разработку методики, которая отражала бы влияние морфологии поперечного сечения и плановых очертаний русла на движение водного потока. При этом требуется учесть следующие обстоятельства:

1. Движение водного потока на перекате в прибрежных областях происходит за счет движения более подвижных масс стрежневой области. Течение в стрежневой области в наибольшей степени определяется уклоном водной поверхности.

2. Положение стрежня в поперечном сечении потока в большей степени зависит от направления движения потока на вышележащем участке, а не только от шероховатости русла в данном сечении.

3. Действительное положение стрежня в поперечном сечении потока можно учесть отсчетом координат от динамической оси потока, а не от поверхности его ложа (дна и берегов русла), не все элементы которого влияют на общую картину распределения скоростей.

Учесть вышеописанные обстоятельства можно путем решения двумерного уравнения равномерного движения в виде многочлена, параметры которого должны определяться с использованием измеренных скоростей на стрежневой вертикали и вблизи поверхности ложа руслового потока.

Общее решение находилось в виде многочлена третьей степени.

Расчетная зависимость имеет вид:

$$U(\tilde{y}, \tilde{z}) = C_1(\tilde{y}^2 - \tilde{z}^2) + C_2(3\tilde{z} \cdot \tilde{y}^2 - \tilde{z}^3) + C_3(\tilde{y} + \tilde{z}) - \frac{E}{2}(\tilde{y}^2 + \tilde{z}^2) + U_1, \\ v = V \cdot \sqrt{|U(\tilde{y}, \tilde{z})|}, \quad (2)$$

где $U(\tilde{y}, \tilde{z})$ – безразмерная величина квадрата местной скорости в точке с безразмерными пространственными координатами \tilde{y} и \tilde{z} ($\tilde{y} = y/H_{\text{стр}}$; $\tilde{z} = z/H_{\text{стр}}$); $U = v^2/V^2$, где v – значение скорости течения в точке с координатами (y, z) . Постоянные интегрирования C_1 , C_2 , C_3 определяются исходя из граничных условий. В общем случае нахождение постоянных коэффициентов C_1 , C_2 и C_3 сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений:

$$\tilde{z}_{\text{стр}}^2 C_1 + \tilde{z}_{\text{стр}}^3 C_2 + \tilde{z}_{\text{стр}} C_3 = U_2 - U_1 + 0.5E \cdot \tilde{z}_{\text{стр}}^2; \\ \tilde{b}^2 C_1 + \tilde{b} C_3 = U_3 - U_1 + 0.5E \tilde{b}^2; \quad (3)$$

$$(\tilde{d}^2 - \tilde{h}_d^2)C_1 + (3\tilde{d}^2\tilde{h}_d - \tilde{h}_d^3)C_2 + (\tilde{d} + \tilde{h}_d)C_3 = U_4 - U_1 + \frac{E}{2} \cdot (\tilde{d}^2 + \tilde{h}_d^2),$$

где $E = \frac{M \cdot C \cdot I \cdot H_{стр}}{V^2}$; I – уклон водной поверхности в изучаемом створе;

C – значение коэффициента Шези, характерное для стрежневой вертикали; $\tilde{z}_{стр}$ – безразмерное значение вертикальной координаты точки на стрежневой вертикали, в которой измеряется придонная скорость (эта величина должна быть по возможности близкой к единице); $\tilde{b} = b/H_{стр}$ – безразмерное расстояние от стрежневой вертикали до берега по поверхности, нормированное на глубину стрежневой вертикали; \tilde{d} – безразмерное горизонтальное расстояние от осевой вертикали до берега по дну русла (в случае отсутствия или невыраженности перегиба линии смоченного периметра при переходе от дна к береговому склону, эту величину можно принять равной половине расстояния до берега по поверхности); \tilde{h}_d – безразмерное значение глубины потока на расстоянии \tilde{d} от стржня; $U(0,0) = U_1$ – квадрат безразмерной поверхностной скорости на стржне;

$U(0, \tilde{z}_{стр}) = U_2$ – квадрат безразмерной придонной скорости на стржне;

$U(\tilde{b}, 0) = U_3$ – квадрат безразмерной скорости течения на поверхности вблизи берега; U_4 – квадрат безразмерной величины скорости течения в точке (\tilde{d}, \tilde{h}_d) .

Поскольку скоростное поле речного потока, как правило, не является симметричным относительно стрежневой вертикали, то расчет параметров C_1 , C_2 и C_3 производится отдельно для обеих частей поперечного сечения.

В случае отсутствия четкого перегиба ложа потока от склонов берега ко дну русла четвертая точка выбирается на произвольном расстоянии от стрежневой вертикали. При этом в третье уравнение системы (3) подставляется вертикальная координата (глубина) именно этой точки. В целом алгоритм расчета параметров C_1 , C_2 , C_3 и местных скоростей потока не меняется. Если положение стржня не фиксируется визуальными наблюдениями (спокойное и медленное течение), его положение может быть найдено с помощью известных гидроморфологических закономерностей.

Таблица 1. Параметры потока в 9-м створе излуины р. Полометь

Область поперечного сечения	h, м	C, м ^{0.5} /с	I	b, м	d, м	v1, м/с	v2, м/с	v3, м/с	v4, м/с
Правая часть	3	19,6	0,00147	10	3,3	1,5	0,8	0,8	0,6
Левая часть	3	19,6	0,00147	8,5	6,8	1,5	0,8	0,8	0,8

В качестве материала для апробации предложенной зависимости привлечены результаты детальных съемок скоростного поля в сечениях р. Полометь у с. Зеленый Бор. Натурные исследования скоростного поля на различных участках излуины были проведены В.А. Виноградовым [1970]. Нами было взято поперечное сечение в 9-м створе. Параметры потока, требуемые для расчета, отражены в табл. 1, а значения постоянных коэффициентов – в табл. 2. Изолинии скоростей, рассчитанных по полиномиальной формуле, отражены на рис.3. Система линейных алгебраических уравнений решалась матричным методом с использованием пакета Mathcad.

Таблица 2. Значения постоянных коэффициентов в полиномиальной формуле

Область поперечного сечения	C ₁	C ₂	C ₃	$ \bar{\delta} $
Правая часть	0,4	-0,004	-0,056	7.1
Левая часть	0,4	0,04	-0,0167	9.5

Сравнение значений местной осредненной скорости, полученных путем расчета по формуле (2) с фактическими значениями местных

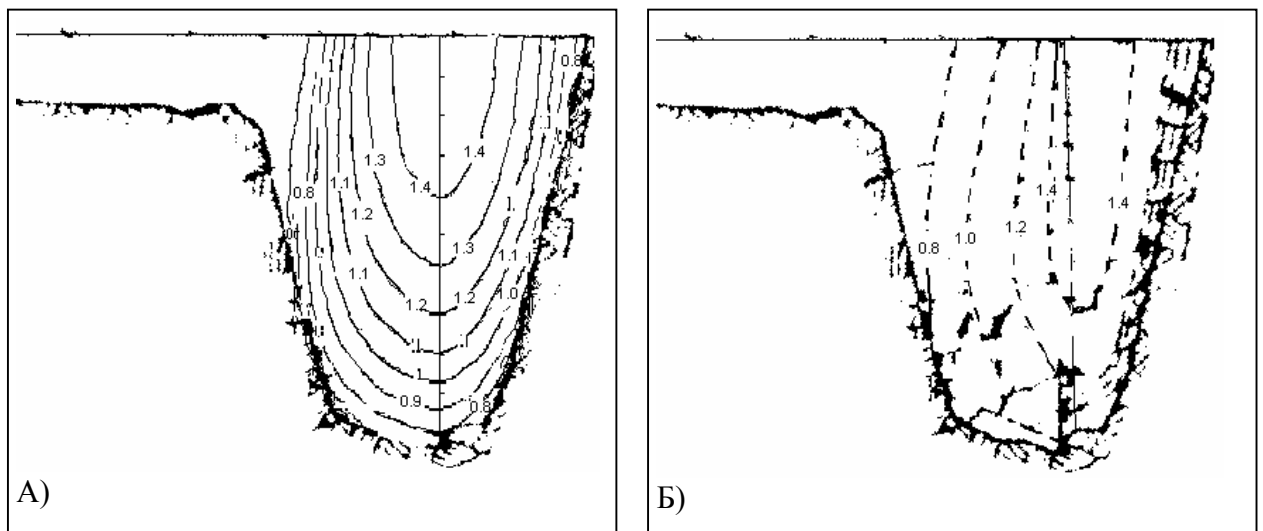


Рис. 2. Изолинии скоростей течения в русле р. Полометь – с. Зеленый Бор (9-й створ):
 А) – рассчитанные по полиномиальной зависимости; Б) – фактические скорости по измерениям Виноградова [1974]

скоростей (табл. 3, 4) обнаруживает удовлетворительное соответствие натурным данным как вблизи динамической оси, в области действия законов невязкой жидкости, так и вблизи твердых границ потока, где наблюдается их тормозящее влияние. Следует также отметить независимость вида формулы от параметров, характеризующих мелкие детали твердой границы потока.

Таблица 3. Отклонение рассчитанных значений скорости от фактического ее значения (правая часть поперечного сечения р. Полометь – с. Зеленый Бор)

Z, м	Y, м	u _ф , м/с	Δ, % от факт	Y, м	u _ф , м/с	Δ, % от факт	Y, м	u _ф , м/с	Δ, % от факт	Y, м	u _ф , м/с	Δ, % от факт
0,0	4,68	1,4	-2,7	8,3	1,2	-11,9	9,19	1,0	-3,5	10,0	0,8	0,0
0,3	4,81	1,4	-4,2	8,0	1,2	-11,2	8,35	1,0	2,1	9,6	0,8	3,6
0,6	4,68	1,4	-5,3	7,5	1,2	-9,7	8,35	1,0	-2,5	9,2	0,8	5,0
0,9	4,68	1,4	-8,0	6,6	1,2	-5,8	7,52	1,0	2,7	9,1	0,8	-2,8
1,2	4,18	1,4	-9,2	6,3	1,2	-8,4	7,01	1,0	1,9	8,2	0,8	5,9
1,5	3,67	1,4	-11,4	5,8	1,2	-10,5	6,7	1,0	2,9	7,4	0,8	9,1
1,8	3,34	1,4	-15,5	4,9	1,2	-10,9	5,85	1,0	2,7	6,7	0,8	7,6
2,1	0,0	1,4	-14,1	4,5	1,2	-16,7	5,01	1,0	5,1	6,0	0,8	3,3

Таблица 4. Отклонение рассчитанных значений скорости от фактического ее значения (левая часть поперечного сечения р. Полометь – с. Зеленый Бор)

Z, м	Y, м	u _ф , м/с	Δ, % от факт	Y, м	u _ф , м/с	Δ, % от факт	Y, м	u _ф , м/с	Δ, % от факт	Y, м	u _ф , м/с	Δ, % от факт
0,0	0,84	1,4	6,6	2,51	1,2	20,6	5,1	1,0	28,5	8,5	0,8	4,2
0,3	0,84	1,4	6,2	3,01	1,2	18,8	6,4	1,0	18,2	9,0	0,8	-2,0
0,6	0,84	1,4	5,1	3,34	1,2	16,8	6,7	1,0	17,1	9,8	0,8	-12,4
0,9	1,67	1,4	2,2	4,18	1,2	12,2	7,6	1,0	9,5	10,6	0,8	-22,5
1,2	2,0	1,4	-0,91	4,68	1,2	8,1	8,02	1,0	6,5	11,0	0,8	-19,2
1,5	1,5	1,4	-3,8	5,01	1,2	3,9	8,35	1,0	3,9	11,5	0,8	-17,8
1,8	1,67	1,4	-8,6	5,01	1,2	-0,2	8,35	1,0	3,1	11,0	0,8	0,43
2,1	0,0	1,4	-13,5	3,34	1,2	4,0	7,52	1,0	4,4	10,6	0,8	9,0

Таким образом, на участках с безотрывным движением речного потока поле местных скоростей течения воды в русле находится во взаимно обусловленной связи с параметрами шероховатости русла.

Учет свойств равномерного режима течения позволяет получить полиномиальные формулы, отражающие одновременное влияние вертикальной и горизонтальной удаленности заданной точки поперечного сечения от динамической оси. Расчет поля скоростей по этим формулам допускает использование интегральных характеристик шероховатости и не требует строгого деления русла на дно и склоны берегов.

Результаты, изложенные во второй главе, позволили сформулировать второе защищаемое положение – *морфологические особенности русла, его динамика и эрозионно-аккумулятивная деятельность определяют пространственное положение динамической оси потока и градиенты скоростей течения.*

В главе третьей, «Теория свободной турбулентности и возможность ее применения к расчету поля скоростей на плесах», описывается расчет скоростей в русловом потоке, где на струйные течения накладываются ограничения, связанные с наличием в естественных потоках берегов и дна. Доказывается, что главным условием применения теории турбулентных струй является отрыв основного потока от берегов или дна и поперечный разрыв в скоростях соседних слоев потока. Излагаются результаты экспериментальных исследований, проведенных автором и подтверждающих правомерность выводов, сделанных в работе.

На основе обзора существующих методик расчета распределения скоростей в течениях, подобных свободным турбулентным струям, показывается плодотворность применения формул Шлихтинга для определения поля скоростей в поперечных сечениях турбулентных струй и следов.

Скоростной профиль как плоской, так и осесимметричной струи может быть описан кривой Шлихтинга в виде:

$$v = v_{\max} \left[1 - \left(\frac{y}{L} \right)^{3/2} \right]^2, \quad \text{где } v_{\max} - \text{ скорость на оси струи в заданном}$$

сечении; y - поперечная координата, которая отсчитывается от оси струи; L - поперечный размер струйного течения в заданном поперечном сечении, равный полуширине области смешения для плоской струи и радиусу струи в случае осесимметричного струйного течения.

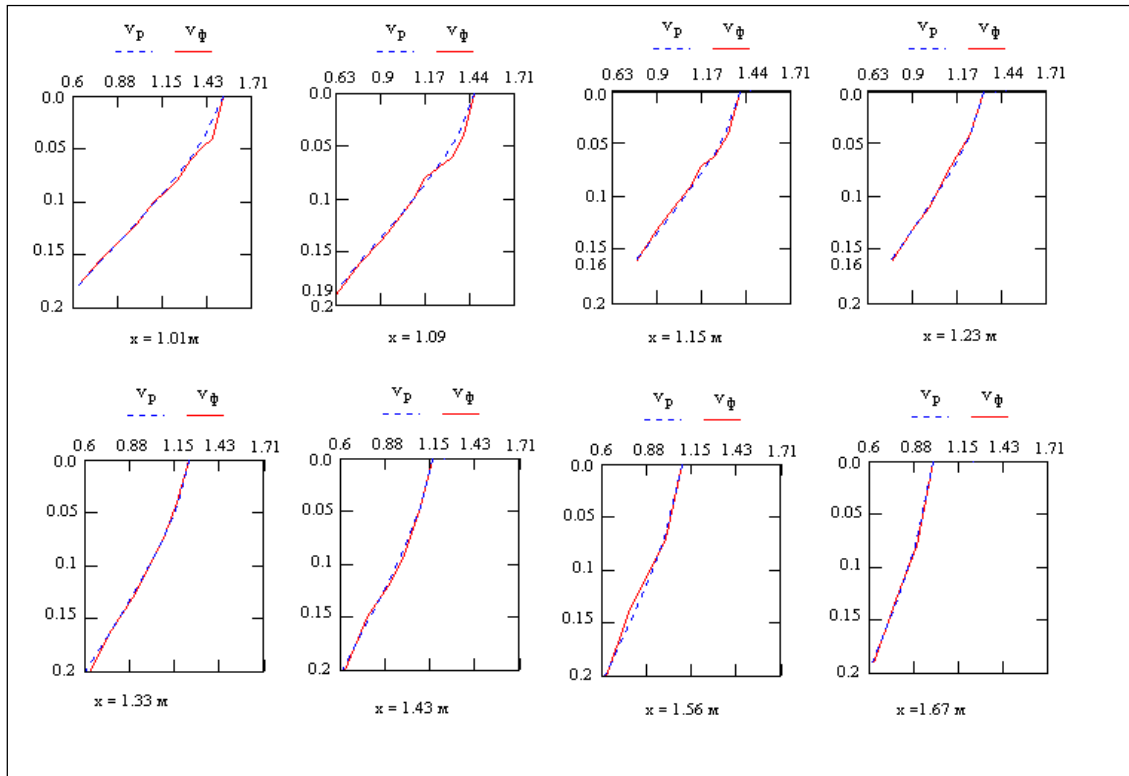


Рис. 3. Эпюры распределения местных скоростей по глубине на основном участке турбулентной струи

Выводы, полученные в этой главе, подтверждаются расчетами (рис. 3), проведенными на основе результатов физического эксперимента, поставленного в условиях, близких к естественным [Поздняков, 1984], и нашими экспериментами [Хон, Матвеев, 2002].

Проведенное нами экспериментальное изучение развития и самоограничения свободных турбулентных струй, нагруженных взвешенными и влекомыми наносами, показало:

- 1) сохранение основных черт падения осевых скоростей по длине потока, свойственных свободным струям;
- 2) возможность использования формулы Шлихтинга для описания скоростного поля в поперечном сечении потока в пределах плесовых лощин и при искусственно увеличенных размерах поперечного сечения русла.

Таким образом, раскрывается третье защищаемое положение – *самоограничение расширяющейся струи, нагруженной обломочным материалом, происходит с сохранением характера распределения скоростей вдоль потока, что отражается в*

морфологических особенностях формирующихся струйным течением аккумулятивных образований.

Выводы

1. Турбулентные струи, нагруженные взвешенными и влекомыми наносами, являются структурными элементами речного потока. Способность турбулентных струй двухфазного речного потока к растеканию и самоограничению лежит в основе образования в русле систем «плес-перекат».
2. Максимальная и средняя скорости в живом сечении в наибольшей степени определяются продольным уклоном водной поверхности. Морфологические параметры поперечного сечения русла и параметры его шероховатости в данном сечении определяют градиент скорости от стрежня к берегам, а плановые очертания русла задают положение стрежневой области в данном поперечном сечении. В этом состоит обратное влияние на турбулентный поток морфологических особенностей русла.
3. Наличие информации о скорости на оси струйного течения, а также о его поперечном размере в заданном створе руслового потока позволяет с большой степенью точности определять скоростное поле руслового потока на участке резкого увеличения площади поперечного сечения русла.
4. Струя жидкости, полностью прилегающая к твердой поверхности своего ложа, как и классическая свободная струя, являются предельными состояниями руслового потока. Естественный русловой поток не характеризуется преобладанием какого-либо из них по причине неустойчивости этих предельных состояний. Гораздо чаще можно наблюдать сочетание и чередование условий и закономерностей, пристеночного и свободного течений.
5. Существует дополнительный механизм пространственной дифференциации частиц влекомых наносов, который заключается в том, что окатанность крупных обломков и угловатость мелкого материала увеличивает разницу в гидравлической крупности и подвижности частиц донных отложений. Данная особенность транспорта влекомых наносов отражена в разработанной методике определения дальности перемещения отдельных частиц. Она учитывает

гидравлическую крупность обломков, силу инерции при подъеме мелкого материала со дна, неравномерность движения частиц даже в условиях равномерного движения потока.

6. Методы определения дальности перемещения обломочного материала в водном русловом потоке имеют практическое значение в раскрытии механизмов россыпеобразования. Результаты исследований позволяют прогнозировать динамику эрозионно-аккумулятивной деятельности речных потоков на участках техногенного воздействия.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Дементьева Т.В., Инишев Н.Г., Петров А.И., Хон А.В. Исследование режима стока малых заболоченных водосборов лесоболотной зоны // Проблемы геологии Сибири. (Тез. докл.). – Томск: Изд-во ТГУ, 1996. Т. 2. С.296-297.

2. Петров А.И., Хон А.В. Элементы водного баланса заболоченного водосбора р.Ключ - с.Полынянка // Гидрологические исследования в Сибири: Материалы науч.-практ. конф. – Томск: Изд-во ТГУ, 1997. С. 64-66.

3. Хон А.В. Динамика движения частиц донных наносов и жидкости в пограничном слое // Молодежь и наука: проблемы и перспективы: Докл. III межвуз. науч. конф. – Томск: Изд-во ТГПУ, 1999. Т. 1: Секц. физики и матем., естеств. наук, технол. и предприним. С. 195-200.

4. Хон А.В. Распределение скоростей по вертикали и живому сечению речного русла // Молодежь и наука: проблемы и перспективы: Докл. III межвуз. науч. конф. - Томск: Изд-во ТГПУ, 1999. Том 1: Секции физики и матем., естеств. наук, технол. и предприним. С.200-202.

5. Хон А.В. Уравнение динамики движения частиц донных наносов // Пробл. устойчивого развития региона: Шк.-семинар молод. ученых. - Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 1999. С. 33-34.

6. Хон А.В. О закономерностях движения воды и наносов в естественных русловых потоках // Взаимодействие излучений и полей с веществом: Материалы Второй Байкальской школы по

фундамент. физике. - Иркутск: СиЛаП, 1999. Т. 2: Статист. физика открытых неравновесных систем. С. 477-487.

7. Петров А.И., Инишев Н.Г., Хон А.В. Исследование залегания снежного покрова на Бакчарском болотном массиве (южно-таежная зона) // Проблемы региональной экологии. Вып. 6: Материалы I регион. науч.-практ. конф. молодежи. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. С. 86.

8. Хон А.В. Вид скоростных эпюр на различных участках речного русла // Междунар. конгресс “Наука, образование, культура на рубеже тысячелетий”: Труды Второй сибирской школы молодого ученого. - Томск: Изд-во ТГПУ, 2000. Т. I: Естествознание. С.40-45.

9. Поздняков А.В., Хон А.В. К проблеме генезиса алтайского феномена «гигантская рябь» // Геоморфология Центральной Азии: Материалы XXVI Пленума Геоморфол. комиссии РАН. – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2001. С. 181-185.

10. Поздняков А.В., Хон А.В. О генезисе «гигантской ряби» в Курайской котловине Горного Алтая // Вестник ТГУ. – № 274, сентябрь. 2001. С.24-33

11. Поздняков А.В., Хон А.В. Динамика речной эрозии в Чуйско – Катунском геоморфологическом узле // Геоморфология гор и предгорий: Материалы Всерос. школы-семинара. – Барнаул: Изд-во Алт. гос. ун-та, 2002. С. 242-244.

12. Хон А.В. К вопросу о саморегуляции в речном потоке // IV Сибирская школа молодого ученого: Материалы VII междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во ТГПУ, 2001. Т. 1: Естественные и точные науки. С. 72-76.

13. Хон А.В. Скоростной режим струйного течения на излучине р. Катунь в районе устья р. Чуи // География и регион: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Пермь: Изд-во Перм. гос. ун-та, 2002. Т. IV: Гидрология и охрана водных ресурсов. С.137 – 140.

14. Хон А. В., Матвеев Д. И. Экспериментальные исследования динамики самоограничения турбулентных струй руслового потока // Проблемы гляциогидроклиматологии Сибири и сопредельных территорий: Материалы науч.-практ. конф. – Томск: Изд-во Томского гос. ун-та, 2002. С.125-126.

15. Хон А.В., Поздняков А.В., Коханова Ю.С. Экспериментальное изучение эрозионно-аккумулятивной работы струйных течений и движения гряд как качения деформируемого тела

// Самоорганизация и динамика геоморфосистем: Материалы XXVII Пленума Геоморфол. комиссии РАН. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2003. С. 317- 321