

**Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова**  
**Географический факультет**

*Научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов*  
*им. Н.И. Маккавеева*

<http://makkaveev-lab@narod.ru>

## **МАККАВЕЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ – 2003**

(к 95-летию со дня рождения Н.И. Маккавеева)

Научный редактор – профессор Р.С. Чалов

Москва – 2004

**УДК 6.31.4: 55.3**

**Маккавеевские чтения – 2003.** Научный редактор – Р.С. Чалов. М. 2004. 100 с., илл.

**ISBN 5-89575-070-2**

Сборник содержит материалы научного семинара «Маккавеевские чтения», проведенного 5 декабря 2003г. на географическом факультете МГУ и посвященного 95-летию со дня рождения Н.И. Маккавеева и 35-летию Научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева.

Представляет интерес для географов, гидрологов, геоморфологов, почвоведов.

*Сборник подготовлен и опубликован по гранту президента РФ для поддержки ведущих научных школ (НШ – 1443.2003.5)*

Печатается по решению Межвузовского научно-координационного совета по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ

*Рецензенты:*

*доктор географических наук, профессор Н.Н. Назаров*

*кандидат географических наук, доцент А.В. Панин*

**УДК 6.31.4: 55.3**

**ISBN 5-89575-070-2**

© Научно-исследовательская лаборатория  
эрозии почв и русловых процессов  
им. Н.И. Маккавеева

© Коллектив авторов

## СОДЕРЖАНИЕ

<a href="#"><u>Предисловие</u></a> (Р.С. Чалов) .....	4
<a href="#"><u>Чалов Р.С.</u></a> Н.И. Маккавеев и развитие теории эрозионно-русловых систем .....	5
<a href="#"><u>Ларионов Г.А.</u></a> Гидрофизическая модель эрозии почв как развитие идей Н.И. Маккавеева .....	12
<a href="#"><u>Зорина Е.Ф.</u></a> Идеи Н.И. Маккавеева и современное овраговедение ..	23
<a href="#"><u>Литвин Л.Ф.</u></a> Идеи Н.И. Маккавеева в современной теории эрозионно-русловых систем .....	29
<a href="#"><u>Голосов В.Н.</u></a> Формирование стока наносов в эрозионно-флювиальных системах: состояние проблемы и перспективы исследований .....	41
<a href="#"><u>Беркович К.М.</u></a> Развитие идей Н.И. Маккавеева об антропогенных изменениях русловых процессов .....	56
<a href="#"><u>Сидорчук А.Ю.</u></a> Основные результаты палеогидрологических исследований палеорусел перигляциальной зоны последнего оледенения Русской равнины .....	62
<a href="#"><u>Коротаев В.Н.</u></a> Особенности геоморфологического режима низовий рек в работах Н.И. Маккавеева и концепция формирования речных дельт .....	71
<a href="#"><u>Алексеевский Н.И., Айбулатов Д.Н.</u></a> Соотношение общих и частных закономерностей развития дельты Волги .....	84
<a href="#"><u>Сведения об авторах</u></a> .....	93

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В начале мая 1983 г. ушел из жизни Николай Иванович Маккавеев. Но уже 6 декабря того же года в день его рождения, когда ему исполнилось бы 75 лет, состоялись первые «Маккавеевские чтения» – научный семинар созданной в 1969 г. Н.И. Маккавеевым научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов. С этого времени семинар проводится ежегодно, стал традиционным, привлекает к себе внимание не только сотрудников лаборатории, но и других подразделений факультета, ученых академических и отраслевых научно-исследовательских институтов и вузов Москвы. По сложившейся традиции на «Маккавеевские чтения» выносятся, как правило, доклады, подводящие итоги выполненных в лаборатории крупных научных тем, завершенных исследований молодых ученых лаборатории; на чтениях выступали представители других кафедр и лабораторий факультета, институтов Академии наук, как являющиеся учениками и последователями Н.И. Маккавеева, так и те, которые, не будучи таковыми, по достоинству оценивают вклад Н.И. Маккавеева в развитие отечественной и мировой науки, в том числе в своей научной деятельности.

5 декабря состоялись 20-е «Маккавеевские чтения», посвященные 95-летию со дня рождения Н.И. Маккавеева и 35-летию основания научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов, которая с 1998г. носит имя Н.И. Маккавеева (постановление об организации в МГУ лаборатории было подписано председателем Госкомитета по науке и технике СССР 2 января 1969г.). Эти две даты определили тематику чтений, на которые были вынесены доклады ведущих специалистов лаборатории, подводящие итоги работ за последние 5-10 лет и отражающие основные направления научных исследований лаборатории.

Впервые за 20 лет функционирования семинара «Маккавеевские чтения» было решено опубликовать заслушанные на нем доклады. В сборник включено также несколько статей – Л.Ф. Литвина, В.Н. Голосова, А.Ю. Сидорчука – ученых, которые возглавляют определенные направления исследований в рамках маккавеевской научной школы, но из-за регламента чтений не включенные в их программу. Хочется надеяться, что статьи, помещенные в сборнике, не только вызовут интерес у научной общественности, но и явятся стимулом того, чтобы публикации материалов «Маккавеевских чтений» стала такой же традицией, как и само их проведение.

*Профессор Р.С. Чалов*

[В Содержание](#)

## **Н.И. МАККАВЕЕВ И РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ЭРОЗИОННО-РУСЛОВЫХ СИСТЕМ\***

**Р.С. Чалов**

Н.И. Маккавеев пришел в Московский университет в 1953 г. В этом же году он защитил докторскую диссертацию «Эрозионно-аккумулятивные процессы и рельеф русла реки», а в 1955 г. на ее основе вышла из печати книга «Русло реки и эрозия в ее бассейне». Этот период можно считать началом становления и дальнейшего развития нового научного направления в географии, на стыке гидрологии, геоморфологии и почвоведения, которое со временем превратилось в научную школу «Эрозия почв на водосборах и русловые процессы». Будучи созданной Н.И. Маккавеевым, эта школа вот уже 20 лет развивается его учениками и уже учениками учеников.

Н.И. Маккавеев – выпускник Ленинградского университета – работал долгое время в производственных и отраслевых научно-исследовательских организациях почвоведом, гидрогеологом, гидрологом, инженером-гидротехником. Через решения прикладных вопросов и задач, связанных с работой на поверхности Земли водных потоков, он пришел к формулировке и обоснованию одной из фундаментальных проблем современной географии – взаимодействия водных потоков с подстилающей их поверхностью как ведущего геоморфологического процесса и как завершающего звена гидрологических процессов и явлений в их неразрывном единстве.

Запросы практики нередко выступают отправным пунктом для развития новой отрасли знаний. Если эти запросы связаны с использованием природных ресурсов или предотвращением неблагоприятных и опасных природных процессов, ее становление зачастую начинается в рамках разработки инженерно-технических или агротехнических проблем и лишь затем становится предметом исследования географических наук. Именно так возникли и интенсивно развиваются эрозионно- и русловедение. Они зародились во второй половине XIX века, первая – в связи с проблемой защиты почв от эрозии и необходимостью разработки научно обоснованных мер борьбы или предотвращения эрозии, вторая – как следствие бурного развития водных путей и необходимостью регулирования русел рек для обеспечения судоходных глубин, повышения надежности и безопасности водных путей. Но свое собственное название обе науки получили лишь 100 лет спустя, когда уже возникло и развивалось интегрирующее их маккавеевское учение о едином эрозионно-аккумулятивном процессе, причем и они, и учение оказались в цикле географических наук, хотя и тесно связанными с соответствующими направлениями в технических и аграрных науках. При этом долгое время исследования эрозии почв и русловых процессов, во-

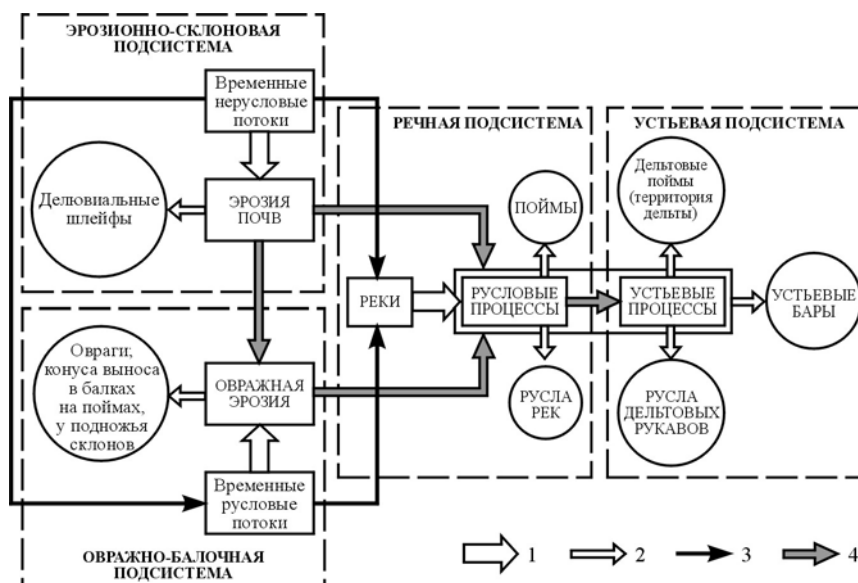
---

\* Выполнено по гранту Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (проект №НШ-1443.2003.5)

первых, сохраняли сугубо прикладной характер, обеспечивая запросы практики, во-вторых, развивались независимо друг от друга в разных, не связанных между собой отраслях науки – земледелии, гидротехнике и речной гидравлике. Первые обобщающие труды по русловым процессам вышли из-под пера инженеров-путейцев В.М. Лохтина и Н.С. Лелявского, которых по праву считают основоположниками будущего русловедения. Но уже в их работах намечается и четко выражен учет природных условий, естественных процессов и явлений, что предвосхищало последующее развитие учения о русловых процессах как гидролого-географической науки. Аналогичная ситуация сложилась при становлении эрозиоведения, в котором первые приемы по борьбе с эрозией почв обосновывал во второй половине XVIII века профессор земледелия М.И. Афонин; обобщающие труды появились уже в 40-е годы XX века и принадлежали также представителям сельскохозяйственной науки С.С. Соболеву и А.С. Козменко, хотя впервые на эрозию почв как природоведческую проблему внимание обратил еще В.В. Докучаев.

Разработка теоретических основ эрозио- и русловедения и становление их как наук географического цикла произошло в середине – начале второй половины XX века благодаря трудам Н.И. Маккавеева, Н.Е. Кондратьева и И.В. Попова (русловые процессы), опять – Н.И. Маккавеева, а также В.П. Лидова, Б.Ф. Косова, М.Н. Заславского, Г.И. Швевса (эрозия почв и овражная эрозия). Именно тогда монография Н.И. Маккавеева «Русло реки и эрозия в ее бассейне» [1955] впервые объединила в рамках единого учения об эрозионно-аккумулятивных процессах изучение работы всех водных потоков при их взаимодействии с земной поверхностью. Развитие учения об эрозионных и русловых процессах как географической науки привело к разработке ряда фундаментальных проблем. Были сформулированы общие законы эрозионно-аккумулятивных процессов, установлены внутрибассейновые соотношения, прямые и обратные связи между процессами в разных звеньях сети водных потоков, определены механизмы и формы переноса твердого вещества водными потоками и их роль в эволюции склонов, развитии оврагов, формировании речных русел в разных природных условиях. Следствием этого явилось создание теории эрозионно-русловых систем. Одновременно междисциплинарное объединение географического, агротехнического и инженерно-технического направлений исследований эрозии почв и русловых процессов в рамках единого учения позволило обеспечить, с одной стороны, проникновение в физическую сущность природных процессов и явлений, а с другой, учитывать региональную специфику их проявлений в зависимости от конкретных сочетаний природных факторов. Бассейновый и региональный подходы, в свою очередь, привели к разработке противоэрозионных мер, методов и приемов регулирования русел рек и управлению русловыми процессами, учитывающими взаимосвязи, взаимодействие процессов в разных звеньях водных потоков, форм и механизмов их проявлений. В результате определился

переход в использовании водных и связанных с ними земельных ресурсов на природосберегающие технологии и решение экологических задач. Совпав по времени с общим процессом экологизации наук, это привело к возникновению экологических направлений как в синтетическом учении о едином эрозионно-аккумулятивном процессе, так и в его составных частях – экологического эрозиоведения, экологического овраговедения, экологического русловедения.



**Рис. 1.** Структура эрозионно-аккумулятивных процессов и ее связь с типами водных потоков (1), создаваемых ими форм рельефа (2) и направление перемещения в них воды (3) и твердого вещества – наносов (4).

Вся совокупность эрозионно-аккумулятивных процессов, по Н.И. Макавееву, состоит из трех основных взаимосвязанных частей, соответствующих определенным типам водных токов. Каждая часть является источником наносов для последующей, имеет свое геоморфологическое проявление (рис. 1) и характеризуется присущими только ей закономерностями развития, механизмами функционирования и пространственно-временными соотношениями эрозии, транспорта и аккумуляции наносов. Этими тремя частями единой системы эрозионно-аккумулятивных процессов являются эрозия почв временными нерусловыми потоками, овражная (линейная) эрозия, связанная с деятельностью временных русловых потоков, и русловые процессы как совокупность явлений, обусловленных эрозионно-аккумулятивной деятельностью рек. Приведенный перечень дополняется четвертой частью – устьевыми процессами – завершающим звеном единой

системы, развитие которой происходит на фоне направленной аккумуляции наносов при втекании потока в приемный водоем.

Будучи взаимосвязанными, в своей деятельности, водные потоки разных звеньев отличаются специфическими механизмами взаимодействия с подстилающими грунтами, формой и дальностью перемещения наносов, своеобразием аккумулятивных накоплений. Это обуславливает правомерность и практическую целесообразность рассмотрения отдельных частей единого эрозионно-аккумулятивного процесса независимо друг от друга, хотя каждая является частью целого.

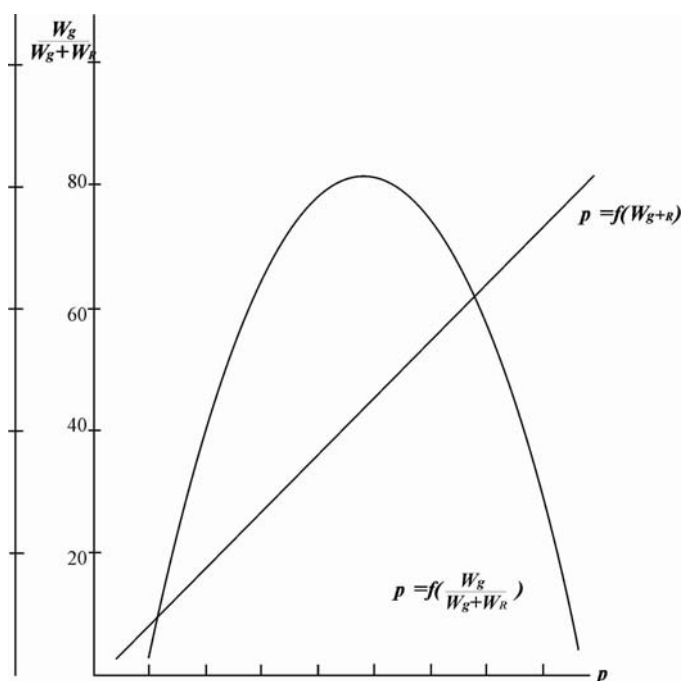
Эволюция географической среды, приводящая к трансформации стока и смене почвенно-растительного покрова, обуславливает изменения характеристик водного потока, свойств самой поверхности и соответственно ее реакции на это воздействие. Вместе с тем от свойств поверхности зависят интенсивность процессов в верхних звеньях потоков и объема смытого материала, что является важным фактором формирования стока наносов в реках. При прочих равных условиях, чем больше смыв почв и интенсивнее эрозия на водосборах, тем больше сток наносов рек, его бассейновая составляющая и доля стока взвешенных наносов в общем, стоке наносов. В степной зоне последняя составляет 80-90 %, а на такой реке, как Хуанхэ (в нижнем течении), достигает 99,9 %; основной сток наносов здесь формируется в пределах Лессового плато при глубине его эрозионного расчленения 200-300 м и интенсивности эрозии почв в 3700 т/км<sup>2</sup> в год. На юге таежной зоны она уменьшается до 55 %, а на реках более северных частей лесной зоны – до 30-40 %.

Различные условия поступления наносов (бассейновые за счет эрозии почв и русловые вследствие размывов дна и берегов рек) определяет, как и величина общего стока наносов и реализация транспортирующей способности потока, формы русла, их сложность, интенсивность деформаций, степень мелководности русла и т.д. (рис. 2). С одной стороны это происходит за счет стока наносов: чем он больше, а его величина соответствует или превышает транспортирующую способность потока, тем больше интегральная величина этих характеристик. С другой стороны, последняя возрастает за счет увеличения стока влекомых наносов в общем стоке наносов, но максимум достигается, когда практически вся транспортирующая способность потока реализуется за счет стока взвешенных наносов (таковы Хуанхэ, Амударья).

Таким образом, взаимосвязь эрозионно-аккумулятивных процессов, развивающихся в разных звеньях сети водных потоков, обуславливает существование и функционирование в природе эрозионно-русловых систем, представляющих собой совокупность взаимосвязанных форм рельефа и процессов, обусловленных воздействием водных потоков на земную поверхность. В функционировании эрозионно-русловых систем проявляется саморегулирование системы «бассейн – речной поток – русло». В свою очередь процессы, функционирующие в эрозионно-русловых системах и их



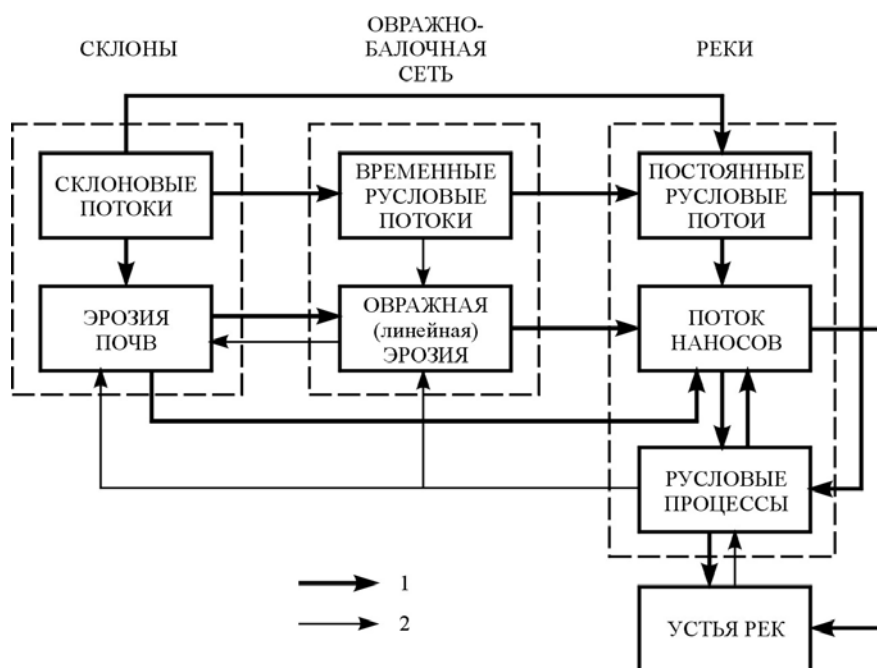
образующие, представляют собой единую цепь явлений, объединяющих эрозию, перемещение потоком наносов и их аккумуляцию. В разных звеньях системы (склоны – эрозия почв; овраги и балки – овражная эрозия; русла рек – русловые процессы; устья рек – аккумуляция наносов) составляющие эрозионно-аккумулятивных процессов развиваются во времени неразрывно, но пространственно, либо разделены друг от друга (на склонах, в оврагах и балках), либо проявляются только вместе (русла рек). Вблизи границ всей эрозионно-аккумулятивных систем, которую можно идентифицировать с бассейном реки, также можно выделить зоны абсолютного преобладания эрозии (верхняя часть приводораздельного склона) и аккумуляции наносов (устьевой бар реки); остальная часть системы (бассейна) есть область преимущественного транспорта наносов, в пределах которой в разных структурных уровнях и в разных пространственных соотношениях наблюдаются все составляющие эрозионно-аккумулятивные процессы явления, происходит размыв, перенос, накопление и переотложение твердого материала.



**Рис. 2.** Принципиальная схема зависимости интегрального показателя сложности формы русла, интенсивности горизонтальных деформаций и степени мелководности русел  $p$  от суммарной величины стока наносов ( $W_G + R$ ) и доли стока влекомых наносов в нем ( $\frac{W_G}{W_G + W_R}$ ;  $W_R$  – сток взвешенных наносов)

Единство эрозии, транспорта и аккумуляции наносов как составных частей и взаимосвязь эрозионно-аккумулятивных процессов в различных звеньях систем составляют два наиболее общих закона учения о едином эрозионно-аккумулятивном процессе, его методологическую основу. Сущность этих законов была впервые раскрыта Н.И. Маккавеевым [1955] в его монографии «Русло реки и эрозия в ее бассейне», уже само название которой отражало содержание одного из них. На фоне проявления этих наиболее общих законов, определяющих функционирование эрозионно-аккумулятивной системы, Н.И. Маккавеев установил еще пять универсальных для всей системы и совокупности составляющих их процессов законов, раскрывающих ход самих процессов во всех их звеньях, среди которых по своей значимости, наверное, следует выделить закон автоматического выравнивания транспортирующей способности потоков.

Взаимосвязи между структурными частями эрозионно-аккумулятивных систем могут быть прямыми и обратными (рис. 3). При прочих равных условиях прямые связи более значимы и, как правило, являются непосредственными, а обратные – замедленны, часто опосредованны и более сложны.



**Рис. 3.** Взаимосвязи между звеньями эрозионно-русловых систем:  
1 – постоянно проявляющиеся, значимые; 2 – опосредованные, периодические и слабо проявляющиеся

Прямые связи определяются формирующимся в процессе эрозии потоком наносов. Через формирование потока наносов в речных руслах эрозия почв на склонах и овражная эрозия воздействуют на русловые процессы. С другой стороны, русловые деформации являются важнейшим фактором формирования потока наносов в руслах, что определяет единственно значимую обратную связь во всей эрозионно-русловой системе.

Значимость связи «эрозия почв – овражная эрозия» определяется поступлением продуктов смыва почв в овраги и ручейковым характером склоновых потоков, благодаря чему любой ручеек можно рассматривать как потенциальную форму развития линейной эрозии и зарождения оврага. Обратная связь проявляется по мере развития прилегающих к оврагу склонов и формирования овражного водосбора.

На современном этапе учение об эрозионно-русловых системах (едином эрозионно-аккумулятивном процессе) организационно оформлено только в Московском государственном университете, где Н.И. Маккавеевым в 1969 г. была создана научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов. Однако в ряде академических и отраслевых институтов и других университетах России и стран СНГ, в первую очередь, «классических», оно успешно развивается как учениками, так и последователями Н.И. Маккавеева, выходят монографии и многочисленные статьи, в которых рассматриваются с географических, экологических и физических позиций эрозия почв, овражная эрозия и русловые процессы как раздельно, так и в их взаимосвязи с учетом природных условий и факторов, определяющих их развитие. При этом одно из важнейших направлений исследований связано с оценкой и учетом антропогенных воздействий как на эрозионно-русловые системы в целом и их составные части, так и на определяющие процессы факторы, изменения которых сопровождаются соответствующими трансформациями самих эрозионно-русловых систем, приводят к экологически неблагоприятным последствиям [Экология ..., 2002]. В то же время сложность функционирования систем и взаимосвязи внутри их обуславливают часто экологическую неоднозначность воздействий, особенно если учесть природные предпосылки возникновения и развития экологически неблагоприятной ситуации. В этих условиях именно интеграция междисциплинарных исследований эрозионных и русловых процессов в рамках единого учения может обеспечить при решении практических задач экологическую безопасность земельных и водных ресурсов, их рациональное использование.

#### ЛИТЕРАТУРА

Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: изд-во АН СССР. 1955.

Экология эрозионно-русловых систем России. М.: изд-во МГУ. 2002.

[В Содержание](#)

## **ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЭРОЗИИ И ТРАНСПОРТА НАНОСОВ КАК ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ УЧЕНИЯ Н.И. МАККАВЕЕВА \***

**Г.А. Ларионов**

Две характерные особенности Н. И. Маккавеева как ученого географа поражали всех без исключения, кто общался с ним лично или знаком с его научными работами. Прежде всего, его отличала необыкновенная широта кругозора не только в географии, но и во многих смежных областях знаний. На меня он произвел неизгладимое впечатление глубиной познания в такой достаточно далекой от геоморфологии и узкой области как водопроницаемость почв во время первой нашей короткой беседы. Впоследствии почти после каждой нашей встречи мои представления о сущности разнообразных явлений природы пополнялось новыми фактами и новыми идеями, которыми он щедро делился с коллегами.

Другой отличительной особенностью Николая Ивановича являлось умение использовать элементарный математический аппарат в приложении к решению географических задач. Многочисленные примеры такого рода можно найти почти на каждой странице его замечательной книги «Русло реки и эрозия в ее бассейне», изданной в далеком 1955 году. Благодаря обилию материала, множеству ссылок, россыпи интересных идей и изяществу решения многих задач, эта книга и по сей день представляет огромный интерес не только для людей, осваивающих азы географической науки, но также и для вполне сформировавшихся исследователей в различных отраслях географии. Именно под влиянием Николая Ивановича во мне окрепло убеждение в необходимости использования наиболее общих физических законов и элементарных математических построений для решения как частных задач в области эрозии почв, так и для разработки моделей эрозии, не противоречащих общеизвестным фактам. Непосредственное влияние на разработку модели эрозии и транспорта наносов оказали решающее влияние следующие представления и наблюдения Маккавеева:

1) транспортирующая и эродирующая способность потока пропорциональна его живой силе, которая является функцией куба скорости потока [Маккавеев, 1955; 1971];

2) частицы взвешенных наносов периодически опускаются на дно и в зависимости от ряда условий могут вновь вовлекаться в движение или покоиться на дне [Маккавеев, 1971];

3) донные наносы в зависимости от их твердости по отношению к породе, слагающей русло, могут замедлять или ускорять эрозию ложа потока [Маккавеев, 1971];

---

\* Выполнено по гранту Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (проект №НШ-1443.2003.5)

4) эродирующая способность потока возрастает, если на предыдущем отрезке пути он лишился наносов, например, пройдя через лесную полосу с густым растительным покровом (частное сообщение).

Кроме того, глубокое впечатление на меня произвело использование элементов теории вероятностей для объяснения сортировки материала на склонах с крутизной близкой к углу естественного откоса и существенно меньше его.

### Модель эрозии почв

Непосредственным поводом для начала работы над новой моделью эрозии послужило несоответствие между смывом, определенным методом почвенно-морфологического профилирования и рассчитанным по универсальному уравнению эрозии [Wischmeier, Smith, 1965]. Это уравнение в переработанном виде до настоящего времени широко используется для оценки интенсивности эрозии. Первый вариант универсального уравнения сильно завышал результаты на длинных пологих склонах. Последний вариант уравнения в меньшей степени, но все же завышал смыв на крутых склонах. Анализ известных теоретических моделей эрозии не прояснил ситуации. В связи с этим была начата разработка модели эрозии, основанной на общих законах физики с учетом ряда закономерностей, описанных в работах Н. И. Маккавеева.

Модель основана на трех посылах, которые формулируются следующим образом:

1) эрозия - работа водного потока, в физическом смысле этого слова, по отрыву и последующему транспорту сорванных частиц почвы, совершаемая за счет его кинетической энергии;

2) отрыв частиц совершается теми струями потока, скорость которых превышает некоторую пороговую величину;

3) в точке, где сорванная частица касается дна потока, отрыв другой частицы невозможен.

Последняя посылка не отражает всех аспектов представлений Н.И. Маккавеева. Они будут представлены при изложении результатов экспериментальных исследований по этому вопросу.

Элементарные математические построения показывают, что согласно первой посылке отрыв частиц почвы ( $W$ ) пропорционален кубу средней скорости потока, или живой силе, по Н. И. Маккавеву:

$$W = k \gamma u^3, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности,  $\gamma$  – объемный вес воды,  $u$  – средняя скорость плоского потока. Согласно второй посылке в области скоростей потока, близких к пороговым значениям, отрыв частиц могут производить только те струи потока, мгновенные значения скорости кото-

рых превышают пороговую величину. Частицы почвы различаются по крупности, по положению относительно других частиц, что в конечном итоге отражается в сопротивлении частиц почвы отрыву. В связи с этим отрыв частицы может осуществиться как при скорости выше пороговой величины, так и ниже ее, что зависит, соответственно, от того, выше или ниже средней величины сопротивление конкретной частицы отрыву. Поэтому отрыв частицы потоком в околороговой области скоростей имеет вероятностный характер, и определяется соответственно произведением вероятностей двух событий. С одной стороны, это - вероятность попадания мгновенных значений скорости потока в интервал, нижняя граница которого совпадает с нижней границей скорости, обеспечивающей, захват частиц с минимальным сопротивлением. С другой стороны, это - вероятность попадания величины сопротивления частиц почвы отрыву в интервал от минимального сопротивления до сопротивления, которое может быть преодолено при максимальных значениях мгновенной скорости потока, возможных при заданной средней скорости. Вероятность попадания случайной величины в заданный интервал определяется при помощи табулированного интеграла Лапласа. Для этого необходимо располагать такими сложно определяемыми сведениями о параметрах в приложении к рассматриваемой задаче как интервал, математическое ожидание и квадратическое отклонение. Все это осложняет определение вероятности отрыва частицы как в отношении сбора данных о необходимых параметрах потока и почвы, так и в отношении техники вычисления. Поэтому описание плотности распределения мгновенных значений скорости и сопротивления частиц почвы отрыву производится уравнениями логистических кривых, которые удовлетворительно описывают интегральные кривые распределения параметров, подчиняющихся закону нормального распределения.

Логистическое уравнение для описания интегральной кривой распределения пульсаций скорости в турбулентном потоке  $P_w$  имеет вид [Ларионов, Краснов, 1992]:

$$P_w = [1 + 10^{a(1-u/u_0)}]^{-1} \quad (2)$$

где  $u$  – средняя скорость потока;  $u_0$  – пороговое значение средней скорости;  $a$  – коэффициент, который подбирается таким образом, чтобы при  $u/u_0 \geq 1,6$   $P \rightarrow 1$ , так как, согласно данным Ц. Е. Мирцхулавы [1970], в мелководных склоновых потоках максимальная скорость пульсации превышает осредненную по времени скорость в 1,6 раза; соответственно, при  $u/u_0 \leq 0,4$   $P \rightarrow 0$ . Чтобы удовлетворять этому условию коэффициент  $a$  должен быть равным 4.

Для того, чтобы в уравнении отрыва частиц почвы иметь одну переменную, а именно – скорость потока, представим среднюю величину сопротивления частицы наносов в виде функции квадрата пороговой скоро-

сти, а силу воздействия потока на частицу в виде функции квадрата средней скорости потока. Тогда интегральная кривая плотности распределения сопротивления связного грунта отрыву [Ларионов, Краснов, 2000]  $P_s$  будет иметь вид:

$$P_s = [1 + 10^{b(1 - u^2 / u_0^2)}]^{-1}, \quad (3)$$

где  $b$  – коэффициент, зависящий от диапазона разброса сил сопротивления отрыву частиц почвы.

Теперь уравнение отрыва частиц почвы потоком (3) может быть переписано с учетом (2) и (3) в следующем виде:

$$W = k \gamma u^3 P_g P_n = k \gamma u^3 [1 + 10^{a(1 - u / u_0)}]^{-1} [1 + 10^{b(1 - u^2 / u_0^2)}]^{-1}, \quad (4)$$

где  $k$  – эродируемость почвы, выраженная в виде веса частиц сорванных в единицу времени с единицы площади и отнесенной к удельной мощности потока,  $\text{м}^2 \cdot \text{с}^2$ ; остальные обозначения прежние.

Верификация и параметризация модели отрыва частиц (размыва) почвы чистым (без наносов) потоком была проведена на экспериментальных установках по размыванию образцов почвы в потоках глубиной от 0,5 до 4 см при скоростях до 2 м/с [Кузнецов, Глазунов, 1985; Nearing et al. 1991; Ларионов, Краснов, 1997]. По результатам верификации уравнение было дополнено блоком, описывающим размыв почвы при скорости ниже пороговой величины [Ларионов, Краснов, 1997]. Отрыв частиц при этом происходит в результате размокания поверхностного слоя почвы и, соответственно, сильного ослабления межагрегатного сцепления, вследствие чего связный грунт переходит в состояние несвязного, который размывается при очень малых скоростях потока. Параметризация уравнения в свою очередь показала, что лучше использовать не среднюю скорость потока и не скорость на высоте выступов шероховатости, а скорость в придонном слое стандартной толщины. За такой слой был принят придонный слой толщиной в 1 см [Ларионов, Краснов, 1997]. С учетом этого уравнение (4) приняло вид:

$$W = 10^{-6} \gamma_c^3 \{k_1 [1 + 10^{a(1 - u_c / u_0)}]^{-1} + k_2 [1 + 10^{a(1 - u_c / u_0)}]^{-1} [1 + 10^{b(1 - u_c^2 / u_0^2)}]^{-1}\}, \quad (5)$$

где  $W$  – интенсивность отрыва частиц почвы (интенсивность смыва) потоком,  $\text{г} / \text{м}^2 \cdot \text{с}$ ;  $\gamma$  – объемный вес воды,  $\text{кг} / \text{м}^3$ ;  $u_c$  и  $u_0$  – скорость течения придонном слое воды толщиной в 1 см и ее пороговая величина, м/с;  $k_1$  и  $k_2$  – эродируемость почвы или грунта соответственно при скорости потока меньше пороговой величины и больше ее,  $\text{с}^2 / \text{м}^2$ ;  $a$  и  $b$  – коэффициенты, зависящие от дисперсии мгновенных значений скорости потока и сопротив-

ления частиц отрыву. Коэффициент  $a$  для склоновых потоков принимается равным 4. Величина коэффициента  $b$  для монозернистых грунтов (рассеянных образцов) равна 14, а для грунтов естественного сложения и пахотных почв равна 2. Коэффициенты детерминации высокие – 0,898-0,997.

Переход от средней скорости потока  $u$  к скорости в стандартном придонном слое глубиной 1 см  $u_c$  может быть рассчитан по зависимости [Избаш, Халдре, 1959], записанной в виде:

$$u_c = uH^{-0,333}, \quad (6)$$

где  $H$  – глубина потока, см. Пороговая скорость определяется по графику зависимости интенсивности размыва образца почвы от куба скорости в придонном слое толщиной 1 см. На графике зависимости отчетливо различаются 3 области, соответствующие двум прямым отрезкам, соединенным S-образной кривой. S-образная часть зависимости соответствует околопороговой области скоростей ( $0,4u_0 \leq u \leq 1,6u_0$ ). Ордината точки перегиба есть искомая величина  $u_0$ . Для монозернистых предварительно увлажненных и уплотненных почв величина пороговой скорости колеблется около 0,8 м/с. Для пахотного слоя чернозема она равна 0,3 м/с. Коэффициенты эродируемости ( $k_1$  и  $k_2$ ) пахотного слоя предкавказского чернозема равны 59 и 277 м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>, соответственно. Коэффициент  $b$  для гетерозернистых почв и грунтов может быть принят равным 2, а для монозернистых – 14. Коэффициент  $c$  для любых почв и грунтов может приниматься равным 2.

Согласно третьей посылке наносы замедляют интенсивность размыва почв и грунтов, однако при определенных условиях они могут способствовать эрозии. Н. И. Маккавеев [1955] отмечал, что наносы, твердость которых выше твердости породы, слагающей ложе реки, ускоряют размыв. Крупные обломки породы, благодаря коррадирующему действию, образуют котлы размыва в русле. В то же время донные наносы, состоящие из более мягких, чем русло, наносов замедляют скорость эрозии. Несложные построения, основанные на последней посылке показывают, что донные наносы, состоящие из почвенных агрегатов, приводят к относительному снижению интенсивности смыва по мере удаления от вершины склона [Ларионов, 1993]. Масштаб снижения смыва зависит от истираемости почвенных агрегатов: чем выше стойкость агрегатов к истиранию, тем больше их накапливается в потоке и тем заметнее относительное снижение скорости смыва. Однако количественная оценка влияния наносов на смыв почвы может быть получена только экспериментальным путем. Были проведены опыты по изучению донных и взвешенных наносов на размыв почвенных образцов на гидравлическом лотке.

Результаты исследований позволили дать количественную оценку влияния наносов на скорость размыва связных грунтов и почв. Искусственные наносы, изготовленные из эластичных материалов различного объемного веса, существенно снижают интенсивность размыва образцов почвы.



Слабо окатанный мелкий гравий, напротив, увеличивает скорость размыва. Интенсивность размыва снижается с увеличением наносов в потоке по экспоненциальной кривой. К такому заключению можно придти и из общих соображений. Действительно, с увеличением количества наносов в потоке поверхность дна будет покрываться наносами не пропорционально их количеству, а с некоторым замедлением, так как некоторая часть дна может покрываться не одинарным, а многорядным слоем. Из приведенных фактических данных и общих соображений следует, что скорости размыва грунта в потоке ( $W_n$ ), содержащем наносы различной твердости

$$W_n = We^{aC_m - bC_t}, \quad (7)$$

где  $W$  – интенсивность размыва почвы или грунта в потоке, не содержащем наносов, г/м<sup>2</sup>·с;  $e$  – основание натуральных логарифмов;  $C_m$  и  $C_t$  – количество наносов, соответственно мягких и твердых, приходящихся на единицу поверхности ложа потока, шт/м<sup>2</sup>;  $a$  и  $b$  – коэффициенты, значения которых зависят от физических свойств материала наносов. Для наносов, состоящих из мягкого материала, твердость которого меньше или равна твердости размываемой почвы или породы, коэффициент имеет отрицательное значение. В противном случае коэффициент принимает положительное значение. Вероятно, плотность наносов также должна играть существенную роль в исследуемом явлении. Очевидно, чем выше плотность материала частиц наносов, тем сильнее их механическое воздействие на ложе потока и меньше их влияние на замедление эрозии. Это подтверждается величиной коэффициентов в уравнении 7 (табл.1).

**Таблица 1.** Зависимость коэффициентов уравнения 7 от плотности и твердости наносов

Материал	Объемный вес, г/см <sup>3</sup>	Коэффициент уравнения (7)*	Ошибка коэффициента
Поролон	≈1,00	-0,00063	0,000069
Резина	1,21	-0,00048	0,000087
Провод в оболочке	2,36	-0,00016	0,00013
Кварц	2,65	0,00034	0,000073

\* Коэффициенты уравнения (7) для мягких наносов ( $a$ ) имеют отрицательные значения, для твердых ( $b$ ) – положительные.

Уравнение (7) удовлетворительно описывает результаты экспериментов. Коэффициент корреляции между рассчитанными и измеренными значениями интенсивности смыва при различных свойствах и количестве донных наносов составляет 0,81. Незначительное содержание донных наносов в несколько раз снижает или увеличивает в случае коррелирующих наносов интенсивность эрозии. Например, при концентрации мелкого

гравия около 1 г/л более чем в пять раз увеличивается темп размыва почвы.

Как не велика роль донных наносов в процессе размыва связных грунтов и почв, взвешенные наносы оказывают еще большее влияние на этот процесс, что было подтверждено экспериментально. Осмотр образцов, подвергшихся размыву потоком со взвешенными наносами в концентрации от 6 до 24 г/л, показал, что межагрегатные поры поверхностного слоя почвенной массы образца заполнены частицами взвешенных наносов. Это существенным образом увеличило сопротивление агрегатов отрыву, превратив точечно-контактные связи между агрегатами в сплошные, характерные для монолитного материала. В этом случае, по крайней мере, при сравнительно небольших для склоновых потоков концентрациях взвешенных наносов, эродирующая способность потока заметно не изменяется, а уменьшение интенсивности размыва испытываемых образцов связано с существенным снижением эродируемости верхнего слоя образца почвы с заиленными межагрегатными порами.

Получено уравнение для расчета влияния взвешенных наносов на эродируемость почвы:

$$\ln K_M = K_q - a(\ln M - b) \quad (8)$$

где  $K_q$  – эродируемость почвы в потоке чистой воды с незаиленными межагрегатными порами,  $\text{м}^2/\text{с}^2$ ;  $K_M$  – эродируемость почвы с заиленными межагрегатными порами в потоке воды со взвешенными наносами,  $\text{м}^2/\text{с}^2$ ;  $M$  – содержание взвешенных наносов в потоке, г/л;  $a$  и  $b$  – соответственно угловой коэффициент и свободный член. Угловой коэффициент  $a$  является функцией мутности:

$$a = 16,15 M^2 - 42,025 M + 26,441 \quad (9)$$

где  $M$  – мутность потока, г/л.; величина свободного члена зависит от плотности почвы. Зависимость может быть представлена верхней ветвью логистической кривой или асимптотой.

Таким образом, представления Н. И. Маккавеева об эродирующей способности потоков получили теоретическое подтверждение, а влиянию наносов на интенсивность эрозии дана количественная оценка.

#### **Уравнение транспорта наносов для склоновых потоков**

Одним из важнейших компонентов процесса почвенной эрозии является вынос сорванных потоком частиц почвы за пределы эродируемой части склона. Поэтому в физических моделях эрозии, которые были предложены в последние десятилетия, в том или ином виде принимается во внимание транспортирующая способность склоновых потоков. Между тем, несмотря на большое количество работ, посвященных изучению транспорта наносов, общепринятой модели транспорта наносов нет. Различия в посыл-

ках, положенных в основу моделей транспорта наносов, существенно сказываются на конечных результатах. Например, если наиболее известные уравнения транспорта донных наносов представить в виде степенной функции скорости, то показатель степени при скорости изменяется от 4 до 6 [Laurson, 1956]. Здесь следует заметить, что в экспериментах с монозернистым песком и гладким дном расход наносов может быть пропорционален скорости в степени 30 [Архангельский, 1974]. Упомянутое выше относилось к натурным наблюдениям и к лоткам со сравнительно большой глубиной, не типичной для склоновых не русловых потоков. Г. Говерс [Govers, 1990] провел серию экспериментов, более полно охватывающих диапазон гидравлических параметров, характерных для склоновых потоков. По результатам экспериментов он предложил эмпирическое уравнение для описания транспортирующей способности мелководных потоков, так как известные модели в приложении к его данным и данным других исследователей не дали удовлетворительных результатов. Хорошо зарекомендовавшая себя идея, положенная в основу гидрофизической модели эрозии, была использована для разработки модели транспорта наносов в мелководных потоках. Собственно захват рыхлых наносов в принципе мало отличается от отрыва частиц связного грунта. С целью определения возможности приложения идей, заложенных в гидрофизическую модель эрозии, было проведено исследование транспортирующей способности потоков глубиной до 5 см в диапазоне уклонов от 20 минут до 20 градусов. Эти материалы, а также некоторые данные В.Н. Гончарова [1954] послужили основой параметризации и верификации теоретического уравнения транспортирующей способности мелководных потоков.

Поскольку нет принципиальных различий между отрывом частицы связного грунта и захватом частиц рыхлых наносов, теоретически выведенное уравнение (3) может быть использовано и в модели транспорта наносов, но с заменой в при этом обозначения для отрыва частиц ( $W$ ) на захват частиц (3).

Очевидно, что при насыщении потока наносами до концентрации, соответствующей его транспортирующей способности, количество захваченных частиц будет равно количеству осевших зерен. При этом предельное насыщение потока наносами достигается на расстоянии равном средней длине траектории полета частицы от точки захвата ее потоком до точки оседания.

Разделим расстояние, на котором поток насыщается наносами до полной реализации транспортирующей способности, на множество элементарных отрезков и попытаемся получить выражение для количества наносов, транспортируемых потоком. Пусть  $T$ ,  $Z$  и  $O$ , соответственно, количество наносов, переносимых потоком над элементарным отрезком, захваченным потоком на элементарном отрезке и осевших на нем, а  $K$  - доля осевших на отрезке наносов от транспортируемой их массы. Если принять, что наносы, захваченные на отрезке не оседают на нем, что вполне допустимо

ввиду его малых размеров, тог на первом отрезке потоком будет захвачено 3 наносов, осядет на нем  $O_1 = 0$  и будет перенесено через него  $T_1 = 3$ . На втором отрезке будем иметь

$$O_2 = 3K, \quad T_2 = 3 + 3 - 3K = 3 + 3(1-K) = 3[1+(1-K)],$$

на третьем отрезке –

$$\begin{aligned} O_3 &= 3[1+(1-K)]K, \\ T_3 &= 3 + 3[1+(1-K)] - 3[1+(1-K)]K = 3 + 3[1+(1-K)](1-K) = \\ &= 3[1 + (1-K) + (1-K)^2], \end{aligned}$$

на четвертом отрезке –

$$\begin{aligned} O_4 &= 3[1 + [(1-K) + (1-K)^2]]K, \\ T_4 &= 3 + 3[1 + (1-K) + (1-K)^2] - 3[1 + [(1-K) + (1-K)^2]]K = \\ &= 3 + 3\{1 + [(1-K) + (1-K)^2]\}(1-K) = 3[1 + (1-K) + (1-K)^2 + (1-K)^3]. \end{aligned}$$

Очевидно, что для  $n$ -го отрезка выражение для количества наносов, проносимых над ним запишется в виде:

$$T_n = 3[1 + (1-K) + (1-K)^2 + (1-K)^3 + \dots + (1-K)^{n-1}].$$

Сумма членов в квадратных скобках имеет предел, равный  $K^{-1}$ . Тогда выражение для наносов, переносимых через малый отрезок на расстоянии от начала захвата наносов, превышающем предельную дальность траектории частицы, запишется как

$$T_n = 3K^{-1} \quad (10)$$

Из уравнения (10) следует, что транспортирующая способность потока пропорциональна интенсивности захвата частиц наносов и обратно пропорциональна интенсивности их оседания. С учетом (4) и принимая во внимание, что транспорт наносов может осуществляться путем влечения, сальтации и во взвешенном состоянии, уравнение транспортирующей способности мелководных потоков, может быть записано в следующем виде:

$$\begin{aligned} T &= \mu^3 \{k_1[1 + 10^{a(1-u/u_{01})}]^{-1}[1 + 10^{b(1-u^2/u_{01}^2)}]^{-1}[1 + 10^{-a(1-u/u_{02})}]^{-1} + \\ &+ k_2[1 + 10^{a(1-u/u_{02})}]^{-1}[1 + 10^{b(1-u^2/u_{02}^2)}]^{-1}[1 + 10^{a(1-u/u_{03})}]^{-1} + \\ &+ k_3[1 + 10^{a(1-u/u_{03})}]^{-1}[1 + 10^{b(1-u^2/u_{03}^2)}]^{-1}\}, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $T$  – удельная (на единицу ширины потока) транспортирующая способность мелководных потоков,  $\text{кгм}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$ ;  $k_1, k_2, k_3$  – коэффициенты транспорта наносов, соответственно, при движении наносов путем влечения, сальтации

и во взвешенном состоянии,  $\text{м}^{-1} \cdot \text{с}^2$ ;  $\gamma$  – объемный вес воды,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ;  $u$  – скорость потока,  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $u_{01}, u_{02}, u_{03}$  – пороговые скорости на высоте выступов шероховатости для движения наносов путем влечения, сальтации и взвешивания,  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $a$  и  $b$  – коэффициенты, зависящие от разброса значений мгновенных значений пульсационных скоростей и сопротивления частиц захвату водным потоком. Третьи блоки логистических уравнений в первом и втором слагаемом обращают их в 0, когда скорость потока настолько превышает соответствующую пороговую величину, что транспорт наносов осуществляется только сальтацией или только во взвешенном состоянии.

Экспериментальные данные использовались для параметризации и верификации уравнения (11). После параметризации уравнение транспорта наносов для мелководных потоков приняло вид:

$$T = \gamma^3 \{ 0,5[1 + 10^{4(1-u_{\Delta}/u_{\Delta 01})}]^{-1} [1 + 10^{6(1-u_{\Delta}^2/u_{\Delta 01}^2)}]^{-1} [1 + 10^{-4(1-u_{\Delta}/u_{\Delta 02})}]^{-1} + \\ + 1,37[1 + 10^{4(1-u_{\Delta}/u_{\Delta 02})}]^{-1} [1 + 10^{6(1-u_{\Delta}^2/u_{\Delta 02}^2)}]^{-1} [1 + 10^{-4(1-u_{\Delta}/u_{\Delta 03})}]^{-1} + \\ + 2,25[1 + 10^{4(1-u_{\Delta}/u_{\Delta 03})}]^{-1} [1 + 10^{6(1-u_{\Delta}^2/u_{\Delta 03}^2)}]^{-1} [1 + 10^{-4(1-u_{\Delta}/u_{\Delta 04})}]^{-1} + \\ + 2,54[1 + 10^{4(1-u_{\Delta}/u_{\Delta 04})}]^{-1} [1 + 10^{6(1-u_{\Delta}^2/u_{\Delta 04}^2)}]^{-1} \}, \quad (12)$$

Обозначения прежние. Коэффициенты корреляции между рассчитанными и измеренными значениями транспорта наносов высокие – 0,98-0,99. Примечательным является то обстоятельство, что для всех песчаных фракций и для флювиогляциального песка получены одинаковые для соответствующих форм движения наносов коэффициенты транспорта. Вероятно, и для других фракций песка и их смесей коэффициенты транспорта будут такими же, т.е. они являются универсальными. Это подтвердилось при описании некоторых серий экспериментов В.Н. Гончарова [1954] с наносами крупностью 5-7 мм и глубиной потока от 9 до 35 см. Возможно, предложенное уравнение пригодно и для крупных потоков. Во всяком случае оно лучше, чем уравнение В.Н. Гончарова, описывает упомянутые выше данные. Коэффициенты корреляции – 0,99 и 0,97, соответственно; относительные ошибки – 33,3 и 66,7%.

Н.И. Маккавеев [1955] полагал, что расход наносов в реке пропорционален расходу воды во время половодья в степени, существенно большей единицы, что не согласуется с нашим уравнением, так как  $u^3 \approx IQ$ . Однако это противоречие снимается, если учесть, что в околороговой области, в узком диапазоне скоростей вероятность захвата частиц наносов возрастает от 0 до 1. В этом диапазоне скоростей показатель степени в уравнении расхода наносов Н.И. Маккавеева, в котором расход наносов рассматривается как степенная функция расхода воды, показатели степени при расходе могут значительно превышать единицу. Например, если расходы наносов измерялись в диапазоне скоростей от пороговой величины до

скорости превышающей ее в 1,6 раза, показатель степени при расходе ( $m$ ) согласно уравнению (12) достигает 5.

Таким образом, основанные на идеях Н. И. Маккавеева модели эрозии и транспорта наносов позволили дать количественную оценку некоторым явлениям, изложенным в его трудах, а также вскрыть причину их изменчивости.

## ЛИТЕРАТУРА

*Архангельский М.М.* О вероятностной схеме движения в придонной области турбулентного потока // Взаимодействие поверхностного и подземного стока. Изд-во МГУ, М.: Вып. 2. 1974.

*Гончаров В.Н.* Основы динамики русловых потоков. Л.: Гидрометеоиздат, 1954.

*Избаиш С.В., Халдре Х.Ю.* Гидравлика перекрытия русел рек. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959.

*Кузнецов М. С., Глазунов Г.П.* Эрозия почв. М.: Изд-во МГУ, 1985.

*Кузнецов М. С., Григорьев В.Я.* О гидравлике потоков на склонах в связи со смывом почвы // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 5. М.: Изд-во МГУ, 1976.

*Ларионов Г. А.* Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. М.: Изд-во. МГУ, 1983.

*Ларионов Г. А., Краснов С.Ф.* Гидрофизическая концепция эрозии почв. Почвоведение. 1997. № 5.

*Ларионов Г.А., Краснов С.Ф.* Вероятностная модель размыва почв и связанных грунтов. Почвоведение. 2000. № 2.

*Маккавеев Н.И.* Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР 1955.

*Маккавеев Н.И.* Сток и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 1971.

*Мирицхулава Ц.Е.* Инженерные методы расчета и прогноз водной эрозии. М.: Колос, 1970.

*Govers G.* Empirical relationships for the transport capacity of overland flow // Erosion, transport and deposition Processes [Proc. of the Jerusalem workshop, March-April 1987]. IAHS Publ. 1990. № 189.

*Laursen E. M.* The total sediment load of streams. //Proc. Am. Soc. Civil Engrs. J. Hydraulics Div. 1956. № 84.

*Nearing M. A., Bradford J. M., Parker S. C.* Soil detachment by shallow flow at low slopes. //Soil Science Society of America Journal. 1991. Vol.55, № 2.

*Wischmeier W. H., Smith D. D.* Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains // Agric. Handbook, № 282. Washington, 1965.

[В Содержание](#)

## ИДЕИ Н.И. МАККАВЕЕВА И СОВРЕМЕННОЕ ОВРАГООБРАЗОВАНИЕ<sup>\*)</sup>

Е.Ф. Зорина

Основным природным объектом, которому выпала честь быть предметом исследований Николая Ивановича Маккавеева, была гидрографическая сеть во всех ее проявлениях, начиная от развития ее первичных форм на водосборе и кончая рекой, как транспортной артерией. Этот подход к изучению рек обусловил широкий комплекс рассматриваемых форм линейной эрозии развитие которых на речном водосборе во многом определяет его морфометрические особенности, режим стока, строение эрозионной сети.

Н.И. Маккавеев отмечал, что наличие овражно-балочной сети обязательно для большинства речных систем. В отличие от подавляющего количества исследователей овражной эрозии [Косов, 1978, 1981; Рожков 1981; Дедков и др., 1993], он рассматривал овраги, как естественные формы, на интенсивность появления и развития которых влияет антропогенный фактор [Маккавеев, 1955]. К таким «естественным оврагам» в первую очередь относятся склоновые, которые в процессе роста удлиняют эрозионную сеть и становятся одним из верхних ее звеньев. Овраги «вторичные», водосборами которых являются уже существующие лощины, ложбины и балки, не удлиняют линейную эрозионную сеть. Однако они способствуют углублению базисов эрозии склоновых водосборов и, соответственно, активизации оврагообразования по долинам рек и склонам балок и суходолов.

Подход к оврагообразованию как к естественному явлению, обусловленному комплексом природных факторов, на основе концепции Н.И. Маккавеева о единстве эрозионно-аккумулятивного процесса на водосборе, позволяет разработать принципиальную схему условий возникновения и роста оврагов. Она дает возможность получить закономерности и конкретные количественные характеристики для описания форм проявления овражной эрозии. Интерес к оврагам, как к линейным эрозионным формам в бассейне реки, возможно во многом обусловлен особенностью их «промежуточного» положения во времени и пространстве. Известно, что реки, балки, суходолы, лощины существуют многие сотни и тысячи лет оставаясь все той же формой рельефа. В свою очередь овраг, по мере выработки квазиравновесного профиля и зарастания превращается в линейную форму, которую многие исследователи считают возможным относить к балкам (собственно овражная фаза составляет 100-300 лет). Таким образом, овраг

---

<sup>\*)</sup> Выполнено по гранту Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (проект №НШ-1443.2003.5)

выпадает из структуры современной эрозионной сети, как он выпал тысячи лет назад после превращения крупных оврагов древних плювиальных эпох в формы, которые мы теперь относим к балкам. Как отмечалось выше, овраги занимают промежуточное положение как во времени, так и в пространстве. Большую часть своей «жизни» овраги выполняют роль зоны транзита для материала, размытого на водосборе и переносимого потоками талой и ливневой воды в более крупные звенья эрозионной сети. Овраг - это связующее звено между поверхностью бассейнов и долинами рек и балок. При этом он оказывает непосредственное влияние, как на эрозионные процессы на площади водосбора, так и на эрозионные и русловые процессы на реках и в днищах балок. Кроме того овраги в качестве зоны переноса участвуют в формировании бактериального и химического состава речной воды, прямо зависящих от состава удобрений на полях, стоков с дачных участков, гаражных городков и т.д.

Основополагающий труд Н.И. Маккавеева «Русло реки и эрозия в ее бассейне» [1955] является примером всестороннего анализа развития артерий стока с учетом комплекса процессов, сопровождающих водные потоки от их зарождения на склоне до формирования крупных рек. Единый эрозионно-аккумулятивный процесс объединяет в пределах водосбора сеть водотоков с совершенно разными закономерностями ее строения, своеобразными русловыми формами, а также характерными гидрологическими и гидравлическими параметрами. Разработанная схема анализа позволяет получить конкретные количественные характеристики для описания форм проявления линейной и, в частности, овражной эрозии для различных регионов и выявить общие, принципиальные закономерности, составляющие суть закона «саморазвития», эрозионных форм.

Образование оврага, как любой другой линейной эрозионной формы, происходит при наличии потока со скоростями, превышающими размывающие для грунтов, слагающих конкретный склон. Потоки формируются на склоновых водосборах, плановые морфометрические параметры которых мало отличаются от соответствующих характеристик бассейнов рек. Н.И. Маккавеев в своих работах предлагает единый вид зависимости между длиной эрозионной формы и площадью ее водосбора, которую в общем виде можно представить как:

$$L = B\sqrt{F}, \text{ км} \quad (1)$$

где  $L$  – длина эрозионной формы, км;  $F$  – площадь водосбора, км<sup>2</sup>;  $B$  – коэффициент, во многом характеризующий степень вытянутости водосбора. Он равен отношению длины водосбора к его ширине. Н.И. Маккавеев отмечает, что для оврагов и горных рек коэффициент  $B$  значительно меньше, чем для крупных равнинных рек. Однако, если использовать эту зависимость для характеристики водосбора овражной формы, необходимо учесть, что сам овраг на склоне существенно короче длины водосбора,



вершина оврага почти никогда не доходит до линии водораздела, в отличие от рек, исток которых, как правило, располагается близко к этой линии. Если в приведенной зависимости длину оврага представить как 0,7-0,8 длины водосбора, то коэффициент  $B$  будет близок к значениям этого параметра для речного водосбора. Действительно, для равнинных рек Китая, СССР, США Н.И. Маккавеев приводит зависимость (1), как  $L=2,9F^{0,5}$ , а для оврагов и горных рек, как  $l_{ov}=2,37F^{0,5}$ . Представив  $l_{ov}$  как долю длины водосбора, например 0,8  $L$ , получим  $0,8L=2,37F^{0,5}$ , откуда длина склонового водосбора ( $L$ ), на котором развивается овраг выражается зависимостью:

$$L = \frac{2,37}{0,8} F^{0,5} = 2,96 F^{0,5} \quad (2)$$

Таким образом, плановая конфигурация бассейнов рек и склоновых водосборов очень, близки.

Форма выработанного продольного профиля во многом зависит от конфигурации водосбора. Это означает, что при схожести плановых очертаний речных и овражных водосборов, близки и формы их продольных профилей. Известна зависимость изменения продольного уклона по длине реки, которую Н.И. Маккавеев [1955, 1971] представляет в следующем виде:

$$I = \frac{A}{h^n} : \quad (3)$$

где  $n=1,3$ . Исследования оврагообразования, проведенные на лабораторных установках [Экспериментальная геоморфология, 1978], показали, что для оврагов, находящихся на завершающей стадии развития, зависимость справедлива при  $n = 1$ .

Получение кривой продольного профиля для оврагов с близким к речным профилям характером изменения уклонов по длине является важным моментом для понимания ряда закономерностей. Это единство строения эрозионной сети, причины различия в структуре и порядках постоянных и временных водотоков, разнообразие современной гидрографической сети. Строение и плановый рисунок последней определялся комплексом природных факторов древних плювиальных эпох, количественные характеристики которых значительно отличались от современных.

Используя данные экспериментальных исследований для анализа закономерностей развития оврага, следует отметить, что именно Н.И. Маккавеевым была предложена идея так называемого «свободного» моделирования, когда моделируется не конкретный овраг, а «овражная форма», закономерности развития которой можно считать соответствующими и применимыми к определенному типу оврагов. В данном случае рассматривалось образование оврага на склоновом водосборе в широком диапазоне

гидрологических и геоморфологических параметров (осадки, глубина базиса эрозии, уклон и форма склона, площадь водосбора).

В монографии «Русло реки и эрозия в ее бассейне» [1955] Н.И. Маккавеев, анализируя эрозионный процесс в речном бассейне, уделил большое внимание моменту концентрации «распластанного» стока в единое русло. Именно тогда происходит увеличение глубины и скорости потока и снижение влияния выступов шероховатости, что совокупно приводит к повышению энергии потока, его размывающей и транспортирующей способности. Наличие мелкоручейкового стока и более крупных потоков, образующихся при слиянии эфемерных струй, Н.И. Маккавеев признает обязательным для большинства речных систем. Концентрация склонового стока в одном русле обычно предшествует началу активного оврагообразовательного процесса.

Н.И. Маккавеевым рассматриваются характерные особенности формирования стока воды и наносов склоновыми, в частности овражными, потоками. Он отмечает неустановившийся и исключительно неравномерный характер течения, наличие ежедневных «волн попуска», связанных с большими температурными колебаниями, а также образование заторов и «волн прорыва». Все эти причины влекут за собой возможность перемещения в русле крупных грунтовых фракций. Как один из факторов, благодаря которому сравнительно легко перемещаются крупнозернистые наносы, Н.И. Маккавеевым указывается значительный уклон склонов и, следовательно, уменьшение сопротивления частиц грунта сдвигающему усилию. В частности, он отметил, что удерживающая сила, которая должна быть преодолена потоком для начала движения частицы, на склоне крутизной  $10^0$  будет приблизительно в два раза меньше, чем на склоне крутизной в  $1^0$ . Факт уменьшения уклона склона, а следовательно и транспортирующей способности потока по мере развития эрозионной формы, был использован нами при составлении модели изменения интенсивности роста оврага во времени [Косов и др., 1978].

Анализ особенностей гидравлики овражных потоков, которые, помимо перечисленных выше особенностей, нередко характеризуются значительной турбулентностью и бурным течением ( $Fr > 1$ ), строго говоря, не позволяет применить для расчета их параметров зависимости, справедливые для потоков с равномерным течением. Однако, для получения величины коэффициента шероховатости возникла необходимость использования известных зависимостей Шези-Маннинга, что Н.И. Маккавеев считал допустимым для характеристики отдельных участков русла оврагов. Этот параметр зависит от комплекса сопротивлений и обуславливает скоростные характеристики водного потока при разных режимах его движения и разной насыщенности наносами. Натурные исследования стока воды и наносов на склоновом водосборе при реализации такого подхода позволили получить величины коэффициента шероховатости для участков оврага в различных по механическому составу породах [Веретенникова, 1998]. Также был

анализ зависимости между полученными характеристиками и скоростями течения на разных стадиях формирования стока воды и наносов. Для одних и тех же участков русла величины сопротивления движению потока изменяются не только под влиянием скорости и глубины. С глубинами потоков в оврагах интенсивно меняется коэффициент сопротивления, величина которого зависит от состояния бортов оврага, растительности и т.п. Большое влияние оказывает комплекс местных сопротивлений, крайне неравномерно рассредоточенных по днищу оврага.

Н.И. Маккавеевым [1955] была выполнена интересная работа по определению количества водосборов русловых систем относительно приемного бассейна. Им было обнаружено уменьшение количества овражных водосборов по мере удаления от берега Волги (на примере участка реки в Волгоградской области). Полученное изменение числа самостоятельных овражных водосборов практически повторяет подобное соотношение для морских побережий рек. Оригинальная методика, основывающаяся на расчетном определении соотношения между шириной и длиной водосбора была применена нами для определения количества оврагов, которые могут развиваться на склонах долин рек и балок. Однако для овражных водосборов, расположенных на склонах балок вырисовывается иная картина, связанная в первую очередь со значительными вариациями условий оврагообразования по длине балок: переменной длиной склоновых водосборов и глубиной местных базисов эрозии. Кроме того, количество оврагов не соответствует количеству водосборов, поскольку небольшие по протяженности бассейны, особенно в устьевых частях балок, не обеспечивают скоростей и расходов водных потоков, которых могли бы производить размыв и образовывать линейные эрозионные формы. В привершинной части балки, напротив, при наличии сравнительно длинных склонов значительно снижаются глубины базисов эрозии склоновых водосборов, а следовательно, образуются эрозионные формы, которые по своим морфометрическим параметрам ближе к промоинам, водоройнам и другим видам размывов на пахотных землях. То же относится и к водосборам, привязанным к тальвегу балки в ее средней части, расположенным между крупными оврагами и имеющим длину не достигающую до водораздела. Примененный к расчету количества водосборов и определению параметров, образующихся на них линейных эрозионных форм подход позволил предложить метод расчета потенциала овражной эрозии, как предельно возможного количества оврагов на склоновых водосборах, привязанных к тальвегу балки или пойме (урезу) реки [Зорина, 2003].

Учение о единстве эрозионно-аккумулятивного процесса в пределах речного водосбора явилось логическим обоснованием для выделения водосборов рек в качестве количественных ареалов при расчетном определении потенциала овражной эрозии на региональном уровне. Такой подход позволяет получать параметры изменения состояния речных систем под воздействием процессов эрозии и аккумуляции на водосборах и, наоборот,

прогнозировать возможное новое направление в эрозионно-аккумулятивном процессе на водосборе под влиянием изменений водности или направленности русловых процессов в разных звеньях речной сети.

Таким образом, можно утверждать, что кроме большой научной ценности по многим аспектам изучения эрозионно-аккумулятивных процессов на водосборах, работы Николая Ивановича Маккавеева имеют программный характер. Разработанные им методические приемы и новые подходы позволяют получить региональные характеристики параметров эрозионных форм; проанализировать общие черты и различия в развитии звеньев эрозионной сети, их структуре; обосновать комплекс связей между морфологическими особенностями водосборов потоков разных порядков и их гидрологическими характеристиками.

### Литература

*Веретенникова М.В.* Механизм овражной эрозии и динамика русловых форм // Геоморфология, №2, 1998.

*Дедков А.П., Рысин И.И., Чернышова Т.Н.* Овражная эрозия на пахотных землях Европы // Геоморфология. №2. 1993.

*Зорина Е.Ф.* Овражная эрозия: закономерности и потенциал развития М.: ГЕОС. 2003.

*Косов Б.Ф.* Рельефообразующая роль антропогенной овражной эрозии // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 1978. №5.

*Косов Б.Ф.* Рост антропогенной овражной сети в бассейнах рек Зуши, Труды, Плавы за 1908-1957 гг // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 1981, №4.

*Косов Б.Ф., Никольская И.И.* Экспериментальные исследования процесса развития оврага // Геоморфология. №3. 1974.

*Маккавеев Н.И.* Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955.

*Маккавеев Н.И.* Сток и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 1971.

*Рожков А.Г.* Борьба с оврагами. М.: Колос, 1981.

*Экспериментальная геоморфология.* Вып. 3. М.: Изд-во МГУ, 1978. С. 113-140.

[В Содержание](#)

## **ИДЕИ Н.И. МАККАВЕЕВА В СОВРЕМЕННОЙ ТЕОРИИ ЭРОЗИОННО-РУСЛОВЫХ СИСТЕМ**

**Л.Ф. Литвин**

Научные интересы Н.И. Маккавеева как ученого-географа охватили весь комплекс флювиальных процессов. Его необычайный аналитический талант и интуиция позволяли высветить наиболее глубокие коренные проблемы практически для всех категорий этих процессов, начиная от стока с единичного склона и завершая механизмом формирования пенеппена [Ларионов, Чалов, 1989]. В области теории и географии эрозионно-аккумулятивных систем такими основополагающими аспектами явились, в частности: а) разделение системы водотоков суши на отдельные звенья и его обоснование; б) проблема существования «пояса отсутствия» эрозии.

### **Классификация потоков суши**

Научную существенность проблемы дифференциации системы водных потоков Н.И. Маккавеев видел не только в неразрывности формирования и движения потоков веществ от склонов водосборов до устья реки, сколько в необходимости установить наличие/отсутствие качественных, а не «масштабных», различий «закономерностей развития потоков», принадлежащих к типичным звеньям гидрографической сети. Он считал подобное разделение фундаментом исследований бассейновой и русловой эрозии и аккумуляции – «... мы не могли считать собственные исследования обоснованными, пока не получили ответа на вопросы: действительно ли нет качественного различия закономерностей развития потоков, принадлежащих к различным звеньям сети?» [Маккавеев, 1955, стр. 32].

«Всю сложнейшую сеть потоков на поверхности суши можно разделить в первом приближении на три звена: верхнее звено – склоновые нерусловые потоки, среднее звено временные русловые потоки (овражно-балочная сеть) и нижнее звено – реки» [Маккавеев, 1955; стр. 32]. Само по себе это предложение не было принципиально новым – существовали разнообразные классификации более дробно дифференцирующие элементы внутри отдельных звеньев, например, классификация овражно-балочного звена [Козменко, 1954]) или верхнего склонового звена [Соболев, 1948]. Принципиально новым, на наш взгляд, было использование гидролого-гидравлических характеристик потоков и специфики перемещения наносов для обоснования качественных различий, а следовательно, и границ между звеньями.

К склоновому нерусловому стоку Н.И. Маккавеев относил «мелкие потоки, занимающие или всю поверхность склона, или отдельные небольшие ложбинки и рытвинки». Принципиальным для склонового звена потоков, по Н.И. Маккавееву, является огромная роль в формировании и транс-

порте наносов факторов, не связанных с динамической силой потока - разрушающее структуру почв и турбулизирующее поток воздействие дождевых капель, и факторов, обеспечивающих специфическое воздействие самого потока – соотношение между размерами перемещаемых частиц и глубиной потока, высокую долю непосредственного воздействия на частицы тангенциальной составляющей силы тяжести. Существенные признаки склоновых потоков - неустановившееся и неравномерное течение с частыми чередованиями зон подпора и спада, «причем на коротком расстоянии можно наблюдать смену турбулентного течения ламинарным и бурного потока – спокойным» [Маккавеев, 1955; стр. 33]. Эти изменения имеют место не только по длине склонового потока, но зависят и от морфологического типа склоновых микроручейков [Зорина, 2003], и от характера подстилающей поверхности [Зубкова, 1977], которая на начальных стадиях формирования стока служит ложем потоков. Последующие исследования подтвердили гидролого-гидравлическую специфику склоновых микропотоков. Так, экспериментально была установлена зависимость коэффициента шероховатости от скорости (в диапазоне последней до 10 см/с), увеличение выступов шероховатости с глубиной [Григорьев, Маккавеев, 1979]. Для мелких потоков, эродирующих русло, экспериментально установлены специфические изменения зависимости скорости от уклона и числа  $Ft$  от глубины потока [Gimenez, Govers, 2001].

Два нижних звена потоков отличаются от склонового звена наличием русла, которое вызывает ускорение стока благодаря снижению потерь энергии, затрачиваемой на перемещение водной массы. По Н.И. Маккавееву, основные условия, способствующие образованию русла, сводятся: а) к наличию площади водосбора, обеспечивающей глубину (скорость) потока, при которых поток может углубиться и вынести материал, поступающий в русло с водосбора; б) гидравлический уклон в среднем и нижнем течении должен быть меньше, чем уклон местности. Главным же разделительным признаком между средним и нижним звеном является постоянство или временность функционирования руслового потока, которое обуславливает различия в гидрологическом режиме потоков (форма гидрографа, волны паводка и т.д.), а также различия процессов выветривания и поступления в русло рыхлого материала и растительных остатков. Вторым разграничительным признаком этих звеньев принималась приуроченность потока к определенным флювиальным формам рельефа – оврагам и балкам (среднее звено) и речные долины (нижнее).

В природе существует масса объектов, формально не попадающих ни в одну из выделенных категорий, Описанию таких промежуточных между временными и речными водотоками посвящен целый раздел монографии Н.И. Маккавеева (1955). Однако он считал метафизическими рассуждения об отсутствии качественных различий между природными явлениями-объектами при наличии между ними постепенного перехода, т.е. «произвольности» границ между ними. «Правда, мы не всегда можем точно

определить момент перехода неруслового потока в русловой (добавим от себя, и временного в постоянный тоже - Л.Л.), но «неточность» и «произвольность» – категории различные» [Маккавеев, 1955, стр. 42]. Здесь мы сталкиваемся с и до сих пор нерешенной общегеографической проблемой. Так, Д.Л. Арманд [1968] говорит о «реальности» ландшафта (как таксона природно-территориального комплекса), поскольку он имеет ядро типичности и границы проведенные условно, и о его «нереальности», поскольку всегда можно выбрать другие критерии для проведения границ. В случае с классификацией мы имеем еще и дополнительные сложности в виде действительно наблюдаемой в природе «привязкой» потоков с определенными гидролого-гидравлическими характеристиками типа к определенным формам рельефа. На это обращал внимание А.С. Козменко [1954], выделив в своей классификации среднего звена категорию «суходолы второго порядка» – линейные формы, которые по площади водосбора могут быть отнесены к малым рекам [Михайлов, Добровольский, 1991]. Для таких форм характерны и геоморфологические признаки речных долин (поймы, террасы), а «многие из них в раннем и среднем голоцене представляли собой долины малых рек» [Бастраков и др., 1996]. В классификации эрозионного процесса Г.И. Швевса [1981] овражно-балочные и русловые потоки вообще объединены в одну категорию овражно-русловые виды, к сожалению, без подробного обоснования такого объединения.

Следует отметить, что на проблеме обоснования внутренних и внешних границ на качественном уровне «спотыкаются» и все современные классификации отдельных звеньев. Так, одни гидрологи считают, что к рекам относятся водотоки значительных размеров обычно постоянные, имеющие четко выраженное сформированное самими потоками русло, и площадь бассейна не менее 50 км<sup>2</sup> [Михайлов, Добровольский, 1991], а водотоки меньшего размера при аналогичных прочих характеристиках называют ручьями. Другие отмечают, что количественные критерии (длина реки, площадь водосбора и другие гидроморфологические характеристики), позволяющие выделить ее из совокупности рек конкретных территории, относительно условны и недостаточны. На основании анализа изменений гидрологических характеристик речных потоков с увеличением их «порядка» в качестве верхней границы категории малых рек предлагается выбрать постоянство отношения ширины потока к его глубине, а в целом относить к малым рекам – реки с площадью водосбора 10-10000 км<sup>2</sup> [Алексеевский и др., 1998]. Изменение характера зависимости расхода наносов от расходов воды и уклона русла на рубеже рек с площадью водосбора 9-10 тыс. км<sup>2</sup> для рек Украины и Молдавии установлены также Г.И. Швевсом [1974].

Не удовлетворительно и состояние вопроса о разделении русловых звеньев и «неруслового» склонового звена. Достаточно сказать, что отсутствует само общее определение русла как формы рельефа. Наиболее развернутое определение речного русла, данное Р.С. Чаловым [Экологический..., 1999], – «линейное сравнительно узкое углубление, по которому в

межень происходит сток воды», не достаточно для идентификации, с геоморфологической точки зрения, русел сухоходольной сети или микроручьев на склоне. Представляется, что для общего определения русла, оно должно быть дополнено генетической характеристикой – углубление «сформированное самим потоком» [Михайлов, Добровольский, 1991] и морфологической характеристикой – ограниченное береговыми откосами эрозионно-аккумулятивного генезиса. Русло – это линейно вытянутое углубление в земной поверхности выработанное потоком и ограниченное береговыми откосами эрозионного генезиса. В таком виде понятие подходит и к «сухим» руслам, и к руслам временных водотоков, и к «древним» руслам, и в то же время, позволяет отграничить русловые потоки от нередко встречающихся безрусловых крупных линейных потоков (потоки на пойме при ее неполном затоплении, на плоских задернованных днищах балок и лощин и т.п.). Р.С. Чалов справедливо обратил наше внимание на то, что нередко провести морфологические границы берегового откоса затруднительно, например, на выпуклых берегах излучин или в долинах горных рек, где береговые откосы постепенно переходят в пойму, в первом случае, и в склон коренного берега, во втором. Действительно эти границы могут быть нечетко выражены, если поступающие со склонов материал не успевает уноситься потоком или боковая эрозия ничтожна и крутизна коренного склона определяется свойствами скальных пород. Признавая справедливость этого замечания, хочется все же сказать, что такие же трудности встречаются при проведении границ большинства форм рельефа и ландшафтов, но не может быть формы без границ.

Другой характеристикой русловых потоков служит эффективность их гидромеханической деятельности. «К типу русловых следует отнести потоки, глубина, ширина и скорость течения которых настолько значительны, что основными динамическими факторами, определяющими главные закономерности эрозионно-аккумулятивной деятельности этих потоков, являются силы, возникающие при поступательном движении воды» [Маккавеев, 1955; стр. 41]. Как известно, для микропотоков на склонах обычно образование сети микроручейковых русел (водороин, размоин), которые в период снеготаяния (или вообще для потоков неливневого генезиса) обязаны своим происхождением и развитием, главным образом, поступательному движению воды. Об этом однозначно свидетельствует, в частности, сходство рисунка их сети с речной сетью. Из этого следует, что общая характеристика склонового звена как «нерусового» не может считаться удачной. Этот термин Н.И. Маккавеев, вероятно, употребил только в связи с отсутствием на склонах «отчетливо очерченных и постоянно поддерживаемых работой воды русел» [Маккавеев, 1955; стр. 32]. Но постоянные русла очень часто встречаются на склонах с естественной растительностью, а при большей глубине, когда их невозможно заровнять обработкой, и на пашне. Последние в отечественной литературе называют «промоинами» и чаще всего их относят уже к овражному, т.е. русловому звену. В обобщающих работах



нередко констатируется, что в отличие от оврагов продольные профили промоин повторяют «форму склонов» [Бутаков и др., 1996; Зорина, 2003]. Разграничение промоин и склоновых линейных форм обычно обосновывается только их размерами: глубиной, шириной или площадью сечения русла [Бутаков и др., 1996; Poesen, 1993; Imeson, Kwaad, 1980; Brice, 1966 и др.]. Известны и попытки разделение всех типов потоков: склоновых микроручьев (водороин, rill), промоин-оврагов (gully) и рек (river) на основе гидро-морфологических зависимостей – связи расходов воды с шириной русла [Poesen et al, 2003].

Представляется, что соотношение продольных профилей русла и «материнской» формы земной поверхности может служить основным разграничительным признаком склонового и русловых звеньев сети поверхностных потоков – «гидравлический уклон в среднем и нижнем течении потока, умноженный на коэффициент извилистости русла, должен быть меньше, чем средний уклон местности» [Маккавеев, 1955; стр. 45].

Таким образом, классификация сети потоков суши Н.И. Маккавеева продолжает использоваться и совершенствоваться. Плодотворными оказались заложенные в ней принципы – сочетания ландшафтных характеристик вмещающих потоки форм рельефа со спецификой эрозионно-аккумулятивной деятельности и гидролого-гидравлических свойств потоков. В частности может быть предложен ряд ландшафтных признаков для выделения оврагов как особой категории [Литвин, 2002]. Востребованность классификации будет неуклонно расти в связи с необходимостью проектирования экологических и природоохранных мероприятий, в ходе которых потребуются более четкие критерии деления потоков и возникнет интерес к объектам, обделенным ранее вниманием, как это уже случилось с малыми реками. Классификация поверхностных потоков имеет и непосредственно прикладное значение – например, эрозия почв на склонах, часто моделируется на основе закономерностей функционирования речных потоков, что приводит к необходимости вводить чисто эмпирические параметры в детерминированные модели и т. п.

#### **Гипотеза пояса отсутствия эрозии**

Н.И. Маккавеев [1953, 1955] обратил внимание на эту гипотезу, анализируя взгляды Р. Хортона на формирование склонового стока и смыва и на развитие гидрографической сети в целом. По Р. Хортону [1948] смыв и размыв склонов начинается в связи с ростом скорости потока, увеличивающейся вниз по склону, и только после достижения потоком пороговых (размывающих) скоростей; поэтому в верхней части любого склона имеется зона отсутствия эрозии. «Вследствие чего (по Р. Хортону) рельеф водоразделов неизменен и линии водоразделов постоянны» [Маккавеев, 1955, стр. 39]. Н.И. Маккавеев показал, что на процесс переноса наносов нерусловым склоновым потоком, кроме живой силы двигающейся воды, большое влияние оказывает «добавочная турбулентность», возникающая в результате

ударов капель дождя, а также взмучивающее дно потока и «разбрызгивающее» почву действие капель. Слой воды, образующийся на склоне, предохраняет почву от непосредственного воздействия капель, но максимальное «взмучивание» наблюдается при глубине 1-1,2 см, затухая при дальнейшем росте глубины «приблизительно пропорционально квадрату глубины» [Маккавеев, 1953]. Позднейшие лабораторные эксперименты дали несколько меньшие цифры - максимальное давление при ударе капли возникает при равенстве глубины слоя воды диаметру капли [Кузнецов и др., 1990], а при глубине равной трем диаметрам капли поток существенно защищает почву [Торнз, 1984] от их воздействия.

«Благодаря добавочной турбулентности наиболее интенсивный размыв нередко наблюдается там, где толщина слоя стекающей воды невелика, т.е. в верхних частях склона» [Маккавеев, 1955], а, следовательно, пояса «отсутствия эрозии» не существует. Последнее положение было им подтверждено собственными натурными экспериментами и полевыми наблюдениями, а также и экспериментами с дождеванием А.И. Спиридонова [1951]. Позднее на Северном Кавказе были проведены натурные измерения эрозионных последствий сильного ливня, вроде бы подтверждающие расположение зоны максимально интенсивной эрозии в верхней части склона [Маккавеев, 1981].

Воздействие дождевых капель на гидравлические свойства мелкого потока представляется достаточно сложным. Конечно, удары капель турбулизуют поток, но в то же время, и вследствие этого же, снижают средние скорости стекания, т.е. снижают транспортирующую способность потока. На физическом (гидромеханическом) уровне комплекс этих процессов изучен весьма слабо. Тем не менее ясно, что скорости стекания пластовых потоков недостаточны для размыва почв. Так, при дождевании малых площадок с параметрами дождя близкими к натурным (при диапазоне уклонов склона от 0,05 до 0,2 и интенсивности дождя 0,18-4,12 мм/мин) скорости пластовых потоков составляли лишь 0,01-0,07 м/с [Краснов, 1982]. Вместе с тем активизация эрозионной деятельности нерусловых склоновых потоков под воздействием ударов дождевых капель и степень этой активизации установлены многочисленными экспериментами как в России, так и за рубежом. Эффект «разбрызгивания» почвы достигает десятков тонн с гектара, а мутность пластовых и мелкоструйчатых нерусловых потоков за счет разрушения структуры почв каплями и добавочной турбулентности повышается на порядок величины [Ларионов, 1993]. Абсолютные значения мутности при дождевании пахотных почв различного генезиса и гранулометрического состава (серозем типичный, чернозема обыкновенный, бурая горно-лесная и др.) с помощью дождевальной установки «Эра-2», обеспечивающей близкие к естественным параметры ливневых осадков, достигала 30-40 г/л (до 60 г/л). Интенсивность смыва бурых горно-лесных почв за время дождевания достигала 5-16 тонн и более в пересчете на гектар (слой осадков 60 мм, крутизна склона 9° при длине склона 2,4 м). Конечно, эта

величина гораздо меньше той интенсивности смыва, которая могла бы быть зафиксирована при аналогичных параметрах дождей и водно-физическом состоянии почвы на склонах с протяженностью, обеспечивающей формирование сети микрорусел. Но и эту интенсивность нельзя признать «ничтожной», а, следовательно, для обрабатываемых склонов существование пояса «отсутствия эрозии» при выпадении ливней экспериментально не подтверждается (особенно, если оперировать геоморфологическим масштабом времени). Вообще говоря, теория Р. Хортон в этой своей части вызывает некоторые сомнения и не всегда находит экспериментальное подтверждение [Торнз, 1984].

Совершенно иной случай – эрозия, вызванная стоком талых вод. При снеготаянии сами нерусловые потоки имеют место только внутри снежников [Литвин, 2002]) в приграничном слое снег-почва. Средняя максимальная скорость стекания здесь не превышает нескольких см/с [Арманд, 1961], что несравнимо ниже размывающих скоростей как для мерзлого, так и для талого грунта. Почва же под снежниками всегда мерзлая с поверхности или сток не формируется вовсе. В научной литературе не описано случаев открытого пластового стока при снеготаянии. (Открытый сток довольно широкими «полосами» наблюдается иногда на склонах со сплошной ледяной коркой или в верховьях залуженных потяжин). Но, если и допустить его существование, эрозионный эффект будет ничтожен, поскольку интенсивность водообразования при снеготаянии на один-два порядка меньше, чем при выпадении ливней. Так, ее максимальная величина за 15 лет наблюдений на склонах в центре Европейской части России составила 50 мм/сутки [Литвин и др., 1998].

Таким образом, размыв мерзлой почвы под водораздельными снежниками и на некотором расстоянии ниже по склону практически невозможен, а вынос веществ в растворенном виде с избытком компенсируется их привносом из атмосферы – десятки и сотни кг на га. Следовательно, при снеготаянии пояс отсутствия эрозии вполне реальная вещь, но поскольку ливневая эрозия повсеместна – повсеместна и эрозия почв на водоразделах. Другое дело, что в областях преобладания талой эрозии смыв почвы на водоразделах может быть мало значим с хозяйственной точки зрения, а с точки зрения формирования рельефа может легко компенсироваться другими процессами перераспределения вещества в ландшафте.

Факты повсеместной приуроченности несмытых почв к водораздельным частям склонов (даже на старопашотных землях в областях с интенсивными ливнями), а также хорошая сохранность на водоразделах поверхностей выравнивания [Ермолаев, 2002] служат доказательством очень слабого проявления/отсутствия здесь эрозии. Однако нам представляется, что это кажущееся противоречие. Н.И. Маккавеев [1955, стр. 40], рассматривая закономерности «неруслового» стока и смыва, специально подчеркивал, что «наиболее интенсивно смывается верхняя часть повышенных элементов микро- и мезорельефа, ...если на склоне не образуется

русловых потоков», после появления которых закономерности размещения интенсивности смыва могут стать совершенно иными.

Какова же протяженность пояса плоскостного стока? Теоретически рассчитано, что снос почвы только под воздействием самих ударов капель, не считая усиления смыва за счет добавочной турбулентности, превышает смыв почвы самим потоком только на склонах длиной не более 10 м [Carson, Kirkby, 1972]. Правда, сам М. Киркби [1984] перечисляет ряд исключений: высокая инфильтрация или малая продолжительность интенсивного ливня, когда преимущество может распространиться и на более длинные склоны. Обширные натурные исследования распространения пояса плоскостного смыва, или «пояса капельно-дождевой деструкции» по терминологии их автора, провел в Среднем Поволжье О.П. Ермолаев [2002]. По его данным ширина этого пояса, фиксируемая по распространению водородин, варьирует от 0 до 250 м (до 700-800 м на главных водоразделах), а доля занимаемой площади бассейна – от 5 до 8%. Изменчивость связана с интенсивностью стока, категорией эрозии (талая/ливневая) и морфологией склонов. При этом термин капельно-дождевая деструкция призван подчеркнуть, что эрозия не проявляется здесь только в период снеготаяния. Наши визуальные наблюдения эрозионных последствий интенсивных ливней также свидетельствуют, что в большинстве случаев водородины формируются лишь в нескольких десятках метров ниже водораздельной линии или рубежа стока. Следует, однако, заметить, что использование подобных методов не дает информации о распределении интенсивности смыва в самом поясе «капельно-дождевой деструкции/невывявленной эрозии» и, следовательно, не может дать прямых доказательств.

Данные о постепенном ослаблении эрозии вниз по склону и смене ее аккумуляцией послужили Н.И. Маккавееву обоснованием гипотезы переформирования продольного профиля делювиального склона. «Если исходить только из особенностей механизма эрозии, вызываемой нерусловым стеканием во время дождя, то под действием таких потоков склон должен в конце концов сnivelироваться» [Маккавеев, 1955, стр. 41]. В последующем, на примере случая интенсивного смыва, было показано, что на прямом склоне, если точка, «где мощность слоя аккумуляции сравнялась с мощностью денудационного среза, приурочена примерно к середине расстояния от вершины до подошвы» [Маккавеев, 1981], такое нивелирование происходит без преобразования формы продольного профиля [Эрозия почв..., 1970, стр. 23]. Общее снижение отметок водораздела – прямое следствие эрозии водоразделов, но сохранение формы продольного склона не столь очевидно. Здесь просматриваются три допущения: 1) обязательное срединное положение «равновесной» точки; 2) равномерное увеличение интенсивности аккумуляции вниз по склону; 3) отсутствие зоны транзита между зонами смыва и аккумуляции.

О типичности срединного расположения «равновесной» точки можно судить по соотношению площадей почв, в разной степени преобра-

зованных эрозией/аккумуляцией. Так, например, на Украине намывные почвы занимают лишь 30% от площади преобразованных [Маккавеев, 1981], что свидетельствует о типичном для природных условий смещении равновесной точки к границе нижней трети склона. Однако это может быть и следствием первичной изогнутости продольного профиля. Возможно, лучшей аналогией будет распределение по склону зон эрозии и аккумуляции в случаях полива по бороздам со строго выдержанными уклонами [Краснов, Литвин, 1992]. Причины снижения транспортирующей способности вниз по поливной борозде здесь иные, чем в нерусловых потоках на склонах, но само снижение, также как и на склоне, пропорционально расстоянию от головной части потока. В опытах с поливом зона активной эрозии сменялась вниз по склону зоной аккумуляции, и было установлено отсутствие или малая величина (до 20м) равновесного транзитного участка. Длина зоны активной эрозии, в зависимости от расхода воды, уклона борозды, продолжительности полива и других факторов, составляла от 30 до 80 м, т.е. занимала от 30 до 100% длины опытной борозды. Таким образом, положение равновесной точки недостаточно стабильное и на прямом склоне близко, по-видимому, к нижней трети склона. С.Ф. Краснов [1982] предложив ряд уравнений, описывающих преобразования уклона и высотных отметок поливного склона, показал, что после выполаживания привершинной части, склон достигает стадии выработанного продольного профиля с одинаковой степенью денудации по всей длине. В результате этого рассчитано, что склон любой формы преобразуется в выпуклый, если его длина не превышает длину поливной борозды (соответственно, ширину пояса плоскостного смыва – *Л.Л.*). Для случаев дождевания расчеты дают тот же эффект, если мощность смытого слоя почвы убывает с длиной склона. Но при увеличении этой мощности, т.е. при развитой ручейковой эрозии, продольный профиль приобретает вогнутую форму. Таким образом, подтверждается положение Н.И. Маккавеева о «нивелировании» склона, но описанная им форма преобразования продольного профиля представляется частным случаем.

Все приведенные выше построения относятся либо к условиям достаточно интенсивного проявления «склоновой» эрозии природно-антропогенных типов, либо к очень большим промежуткам времени (к геоморфологическому масштабу времени). В то же время известно, что интенсивность естественной эрозии на порядок (порядки) величины ниже. Кроме того, растительность ослабляет или устраняет один из эффективных механизмов формирования склонового стока и эрозии – ударное воздействие капель. Вполне очевидно, что чем больше развита растительность, в частности, чем выше проективное покрытие, тем меньше интенсивности смыва и слабее должна быть тенденция ее снижения по склону. Так, в степях на юге Сибири на крутых склонах с невысоким задернением и проективным покрытием интенсивность смыва составляет от сотых и десятых долей миллиметра на пологих склонах до первых миллиметров на крутых

[Баженова и др., 1997]. Экспериментальные наблюдения в субтропиках с помощью малых лотков стокоуловителей, проведенные А.А. Ажигириным [1984] на крутых склонах ( $24-27^{\circ}$ ) в лесу и на лугу (проективное покрытие 100%), свидетельствуют о незначительной интенсивности плоскостной эрозии – 3-6 кг/га на лугу и 4-8 кг/га под лесом. Но при этом, однако, была зафиксирована ясная тенденция к снижению модулей стока воды и наносов вниз по склону. Аналогичная тенденция обнаружилась и при исследовании стока растворенных веществ и крипа, интенсивность которых превосходила смыл почвы на порядок величины. Естественно, что автор относит эффект «выполаживания рельефа сверху» именно за счет дефлюкции и оползания, а не эрозии [Ажигиров, 1984]. Преобладают процессы растворения над естественной эрозией и во влажном умеренном климате, где их интенсивность может составлять 0,1-0,01 мм/год [Киркби, 1984].

Для равнин со слабым и умеренным линейным расчленением важно наличие квазигоризонтальных водораздельных пространств с отсутствием в современных условиях поверхностного ливневого стока. Бессточность может определяться как малыми уклонами и высокой водопроницаемостью почв, так и развитием просадочных или карстовых процессов. В первом случае распашка территории сокращает площадь бессточных участков, хотя бы из-за снижения водоудерживающей способности почвы – для поверхностей лишенной растительности она составляет 10 мм, поверхности с травянистой растительностью – 50 мм, а для леса – 100 мм осадков [Carson, Kirkby, 1972]. Е.В. Болдаков [по Д.Л. Арманду, 1961] установил следующие средние значения поверхностного задержания: пашня и луг с редкой травой – 10 мм, луг с густой травой, мох, лес – 20, таежная растительность – 30 мм. Эти цифры значительно ниже, но и они, с учетом максимального суточного слоя осадков для ЕТР около 100 мм, свидетельствуют, что на современном этапе сток и смыл на плоских водоразделах отсутствуют или ничтожны. Действительно, в таежной зоне многие водоразделы заболочены. Здесь накапливается торф, и отметки земной поверхности даже возрастают.

Таким образом, гипотезы Р. Хортон и Н.И. Маккавеева не опровергаются, а дополняют друг друга. Преобладание выравнивания рельефа «сбоку» или «сверху» зависит от соотношения интенсивностей талой и дождевой эрозии, слоя осадков и водоудерживающей способности почвы, не говоря о первоначальной форме склона, которая могла сформироваться под воздействием нефлювиальных процессов.

Формат данной публикации не позволял обсудить современную судьбу других крупных идей Н.И. Маккавеева, а необходимость использовать в основном обобщающие работы могла привести к неточностям или ошибкам в приоритетах.

## ЛИТЕРАТУРА

- Ажигиров А.А.* Процессы современной денудации в субтропической зоне РСФСР. Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. М. 1984.
- Ажигиров А.А., Голосов В.Н., Добровольская Н.Г. и др.* Исследование стока воды и наносов на склоновых водосборах в бассейне р. Протвы. М.: ВИНТИ, № 6389-В87. 1987.
- Алексеевский Н.И., Евстигнеев В.М., Коронкевич Н.И., Ясинский С.В.* Малые реки как объект исследования // Малые реки Волжского бассейна. М.: Изд-во МГУ. 1998.
- Арманд Д.Л.* О реальности ландшафта // Проблемы методики ландшафтных исследований. М.: Изд-во АН СССР. 1968.
- Арманд Д.Л.* Физико-географические основы проектирования сети полевых лесных полос. М.: Изд-во АН СССР. 1961.
- Баженова О.И., Любцова Е.М., Рыжов Ю.В., Макаров С.А.* Пространственно-временной анализ динамики эрозионных процессов на юге Восточной Сибири. Новосибирск: Наука. 1997.
- Бутаков Г.П., Дедков А.П., Зорина Е.Ф. и др.* Эрозионный рельеф временных водотоков Восточно-Европейской равнины // Эрозионные и русловые процессы. Вып. 2. М.: Изд-во МГУ. 1996.
- Григорьев В.Я., Маккавеев Н.И.* Выбор коэффициента шероховатости при расчете склонового стока // Вестник МГУ. Сер. 5 География. 1979. №4.
- Зорина Е.Ф.* Овражная эрозия: закономерности и потенциал развития. М.: ГЕОС. 2003.
- Зубкова К.М.* Исследование гидравлических и морфометрических характеристик склоновых потоков // Сборник работ по гидрологии. Л.: Гидрометеониздат. №12. 1977.
- Киркби М. Дж.* Моделирование процессов водной эрозии // Эрозия почв. М.: Колос. 1984.
- Козменко А.С.* Основы противоэрозионной мелиорации. М.: Сельхозгиз. 1954.
- Краснов С.Ф.* Ирригационная эрозия и ее влияние на формирование рельефа. Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. М. 1982.
- Краснов С.Ф., Литвин Л.Ф.* Эрозионно-аккумулятивные процессы при орошении // Прогнозирование и предупреждение эрозии почв при орошении. М.: Изд-во МГУ. 1992.
- Кузнецов М.С., Григорьев В.Я., Хан К.Ю.* Ирригационная эрозия почв и ее предупреждение при поливах дождеванием. М.: Наука. 1990.
- Ларионов Г.А.* Эрозия и дефляция почв. М.: Изд-во МГУ. 1993.
- Ларионов Г.А., Чалов Р.С.* Теоретические и прикладные аспекты учения об эрозионно-аккумулятивных процессах // Вестник МГУ. Сер. 5. География 1989.
- Литвин Л.Ф.* География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. М.: Академкнига. 2002.

- Литвин Л.Ф., Голосов В.Н., Добровольская Н.Г. и др.* Стационарные исследования эрозии почв при снеготаянии в центральном Нечерноземье // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 11. М.: Изд-во МГУ. 1998.
- Маккавеев Н.И.* Некоторые особенности эрозионной деятельности нерусловых потоков // Метеорология и гидрология. 1953. №6.
- Маккавеев Н.И.* Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР. 1955.
- Маккавеев Н.И.* Некоторые особенности эрозионно-аккумулятивного процесса // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 8. М.: Изд-во МГУ. 1981.
- Михайлов В.Н., Добровольский А.Д.* Общая гидрология. М.: Высшая школа. 1991.
- Соболев С.С.* Развитие эрозионных процессов на территории Европейской части СССР и борьба с ними. Т.1. М.-Л.: Изд-во АН СССР. 1948.
- Спиридонов А.И.* Опыт изучения водной эрозии и денудации в лаборатории // Почвоведение. 1951. № 3.
- Торнз Дж. Б.* Процессы эрозии, вызываемые водным потоком, и их регулирование во времени и пространстве: теоретическая точка зрения // Эрозия почв. М.: Колос. 1984.
- Хортон Р.* Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов. М.: Изд-во иностр. л-ры. 1948.
- Швебс Г.И.* Формирование водной эрозии, стока наносов и их оценка. Л.: Гидрометеиздат. 1974.
- Швебс Г.И.* Теоретические основы эрозиоведения. Киев- Одесса: Вища школа. 1981.
- Экологический энциклопедический словарь.* М.: Ноосфера. 1999.
- Эрозия почв и сели в Кабардино-Балкарии.* Нальчик: Эльбрус. 1970.
- Carson A.M., Kirkby M.J.* Hillslope Form and Process. // Cambridge University Press. 1972.
- Gimenez R., Govers G.* Interaction between bed roughness and hydraulics in eroding rills // Water resources Research, Vol. 37, No. 3, March 2001.
- Poesen J., Nachtergaele J., Verstraeten G., Valentin C/* Gully erosion and environmental change: importance and research needs //Catena. 50. H. 2003.
- Poesen J.* Gully typology and gully control measures in the European loess belt //Wicherek S. (Ed.). Farm Land Erosion in Temperate Plains Environment and Hills. Elsevier. Amsterdam. 1993.
- Brice J.B.* Erosion and deposition in the loess-mantled Great Planis. Medicine Creek drainage basin. // Geological Survey Professional Paper 352H. Nebraska U.S. 1980.
- Imeson A.C., Kwaad F.J.P.M.* Gully types and gully prediction // KNAG Geografisch Tijdschrift. XIV 5. 1966.

#### [В Содержание](#)



## ФОРМИРОВАНИЕ СТОКА НАНОСОВ В ЭРОЗИОННО-ФЛЮВИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ: СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ\*

В.Н. Голосов

В своей классической монографии «Русло реки и эрозия в её бассейне» Н.И. Маккавеев [1955] убедительно показал тесную связь между процессами формирования речного русла и интенсивностью процессов перемещения наносов на речном водосборе. В частности в *Заключении* своей монографии он отмечает, что «...продольный профиль реки является чувствительным индикатором изменений ландшафтов водосбора, прямо или косвенно влияющих на жидкий и твёрдый сток, а также на средний уклон территории» (с. 322). Благодаря учению о едином эрозионно-аккумулятивном процессе, основные положения которого были сформулированы Н.И. Маккавеевым, перенос наносов в различных звеньях флювиальной сети стал рассматриваться как непрерывный механизм преобразования рельефа территории. Разработка и совершенствование количественных подходов к оценке интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов на речном водосборе, особенно ускорившиеся в последние десятилетия, позволяет всё более детально оценить особенности формирования стока наносов рек. Особенно это касается оценок доставки эродируемого со склонов междуречий материала в речные долины. Это произошло благодаря существенному расширению методической базы исследований, особенно в части оценок формирования стока наносов на склонах речных бассейнов. Существующие методы исследования могут быть разделены на 4 группы, из которых две объединяют методы прямых наблюдений, а две другие - методы косвенных исследований (рис.1).

Основной задачей данной статьи является обобщение некоторых достижений в области изучения особенностей формирования и перераспределения наносов в эрозионно-флювиальных системах и обсуждение перспектив исследований в этой области.

В ненарушенных условиях сток наносов равнинных рек формируется преимущественно за счёт размыва их берегов и русел, тогда как вклад бассейновой эрозии столь незначителен, что по существу не сказывается на стоке речных наносов. Среднегодовой модуль стока наносов равнинных рек незначительно отличается в различных ландшафтных зонах (табл.1). Для равнинных рек существует прямая зависимость стока наносов от площади водосбора, обусловленная увеличением энергии речных потоков с ростом их водности [Дедков, Мозжерин, 1984]. Наносы, формирующиеся при локальных случаях интенсивного смыва или формирования овражных

---

\* Работа подготовлена благодаря финансовой поддержке РФФИ (проект № 04-05-64215 и программы государственной поддержки научных школ, проект НШ-1443.2003.5

размылов, в большинстве случаев обусловленных пожарами, переоткладываются практически полностью на незначительном удалении от места их формирования [Панин и др., 1999].

**Таблица 1.** Соотношение модулей стока взвешенных наносов ( $r$ , т/км<sup>2</sup> в год) равнинных рек со слабо ( $r_{np}$ ) и сильно ( $r_{rp}$ ) освоенными бассейнами в различных природных зон мира  
(по данным А.П. Дедкова и В.И. Мозжерина, [1984])

Природная зона	Зональные реки площадью бассейна < 5 000 км <sup>2</sup>		
	$r_{np}$	$r_{rp}$	$r_{rp} / r_{np}$
Субнивальная	5,8	-	-
Тайга и смешанные леса	10	57	5,7
Широколиственные леса	7,4	140	18,9
Степь	4,4	29	6,6
Полупустыня	5,8	11	1,9
Субтропические леса	37	449	12,1
Саванна	(15)	54	(3,6)
Тропические леса	-	440	-

Интенсивная распашка земель способствует резкому усилению интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов. Обобщение опубликованных данных о количественной оценке перераспределения наносов на склонах и склоновых водосборах различной конфигурации, выявленное с использованием различных методов [Голосов, 2003], позволило оценить доли эродированного материала, аккумулирующегося в пределах пашни (табл.2).

**Таблица 2.** Доля наносов (%), аккумулирующихся на пашне, установленная различными методами (обобщённые данные)

Склоны или склоновые водосборы	Метод водорослей	Радиоизотопный метод, глобальный <sup>137</sup> Cs	Почвенно-морфологический метод	В среднем
Период оценки	Эрозионное событие	40-50 лет	Весь период распашки	
Водосбор ложбинный, с пологими склонами	34-39	40-45	25-63	41
Водосбор ложбинный, с крутыми склонами	-	20-40	15	22,5
Вогнутые склоны	50-60	80	-	68
Прямые склоны	35-45	25-65	13	29
Выпуклые крутые склоны	10	20	10,5	13,5
Выпуклые средней крутизны склоны	15-45	-	-	(30)
Выпуклые пологие или с высокой напашью у подножия	55-70	75	-	69
В среднем	39	49	(20)	39



Следует отметить, что, несмотря на различные временные рубежи, каждый из методов позволяет получить оценку доли наносов, переоткладывающихся внутри и на границе пашни. Различия в оценках, полученных для склонов одного типа разными методами невелики. Это указывает на доминирующее влияние морфологии склонов на перераспределение наносов. Безусловно, имеющийся банк данных о соотношении смыва и аккумуляции в пределах пахотных склонов ещё недостаточно обширен и должен пополняться. Результатом исследований будет определение эмпирических коэффициентов для склонов каждого типа, которые можно будет использовать при оценках перераспределения наносов в пределах речных водосборов различного порядка базируясь на уже широкодоступных трёхмерных моделях рельефа исследуемой территории. Имеющиеся к настоящему времени данные свидетельствуют о переотложении значительной части наносов в пределах пахотных склонов.

Данные продолжительных прямых наблюдений за темпами смыва почвы свидетельствует о том, что случаи экстремального склонового стока и смыва вносят доминирующий (более 75%) вклад в суммарную денудацию пахотных склонов как при ливневом [Чернышев, 1974; Edwards & Owens, 1991], так и при талом смыве [Литвин и др., 1998].

Экстремальные события в тёплое время года обусловлены сочетанием как минимум двух условий: выпадением интенсивных ливней со слоем осадков свыше 40 мм и низким проективным покрытием поверхности почвы в момент выпадения ливня. Поэтому даже на соседних полях, занятых различными культурами интенсивность смыва за одно эрозионное событие может различаться на два и более порядков. Мозаичность проявления ливневого смыва затрудняет оценку его влияния на формирование стока наносов в речном бассейне.

Различия в проективном покрытии полей в период снеготаяния также велики, но несколько меньше числа возможных вариантов проективного покрытия, и, что особенно важно, гораздо ниже различия в коэффициентах поверхностного стока воды для конкретного снеготаяния. В период снеготаяния для формирования экстремального смыва необходимо строго определённое сочетание метеорологических факторов. Для зоны с устойчивым снежным покровом и континентальным климатом, подтвердилась последующими наблюдениями схема, предложенная в середине 80-х годов (рис.2). К ней следует добавить, что смыв тем выше, чем выше неравномерность снежного покрова и чем более выровнена поверхность пахоты. Для территорий с морским или переходным к континентальному климатом, где снеготаяние часто сопровождается выпадением жидких осадков, максимальный смыв наблюдается при выпадении продолжительных осадков на оттаявшую с поверхности мёрзлую почву. Максимальные темпы смыва могут достигать более 30 т/га за эрозионное событие [Патат, 1984; Ouyarden, 1996; Жукова и др., 2000], что более чем в 20-30 раз превышает среднемноголетние величины талого смыва в этой зоне.



него по мере удаления от уступа, что указывает на усиление темпов аккумуляции (рис.3 ) [Panin et al., 2001]. Преобладание местного переотложения наносов, формирующихся за счёт развития донных оврагов в днище долин, выявлен также для семиаридных условий юго-запада США [Patton, Schumm, 1981] и влажных тропиков юго-востока Австралии [Melville, Erskine, 1986]. В последнем случае на основании детального исследования отложений было подсчитано, что за 150 лет с момента начала развития донного оврага, только 10% материала было вынесено за пределы водосбора, тогда как 90% вновь переотложилось в днище долины. Отсутствие зональных отличий показывает, что механизм перераспределения наносов, формирующихся за счёт регрессивного отступления донных врезов в днищах долин, характеризующихся отсутствием постоянного стока воды, обусловлен, главным образом, особенностями транспорта наносов, и в первую очередь морфологией самого днища [Schumm, 1969].

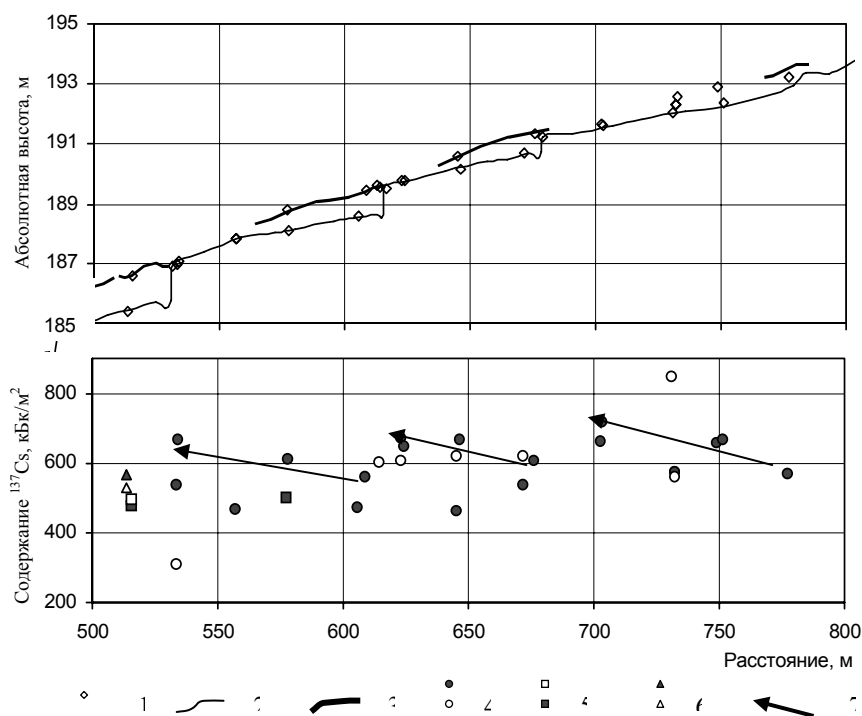
**Таблица 3.** Среднегодовые темпы прироста оврагов различного типа в Курской области за период 1957-1958 – 1977-1978 гг.  
(по данным В.Н. Солошенко, [1998]).

Тип оврага	Число оврагов, штук	Доля общего числа, %	Средняя площадь, м <sup>2</sup>		Темпы прироста, м <sup>2</sup> /год
			1957-1958	1977-1978	
Склоновые	97	55,8	4300	8600	215
Береговые	50	28,7	2300	4100	90
Вершинные	10	5,7	9000	13100	205
Донные	17	9,8	22500	30700	410

В то же время, как показали, например, исследования, выполненные в южном Забайкалье, резкие климатические изменения способны за очень короткий интервал времени многократно увеличить число оврагов (Табл.4), растущих с катастрофическими темпами, превышающими 50 м/год.

**Таблица 4.** Динамика заовраженности бассейнов малых рек в лесостепной части Забайкалья (Акшинский район, Читинская область)  
(по данным В.Н. Голосова и др., [1996])

Бассейн	Овраги , сформировавшиеся в период		Количество участков бедлендов
	1989-1991гг.	До 1989 г	
Падь Сусархай	13	3	1
р. Халанда	2	2	2
р.Бол. Джипкоша	20	3	4
р. Улacha	9	5	6
Падь Булуктуй	11	1	1
р. Западная Такеча	26	8	3
Всего	81	22	17

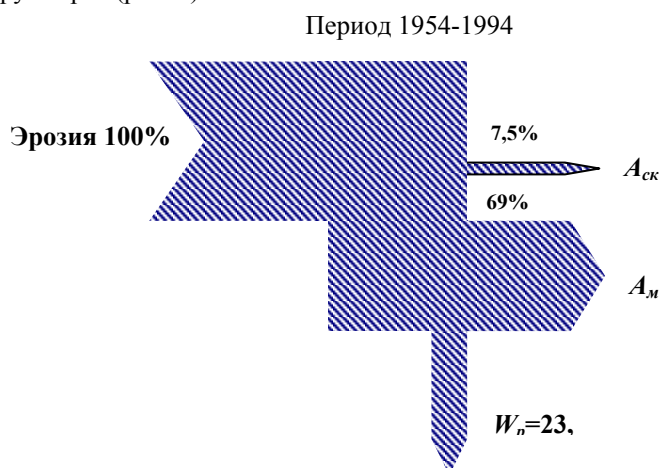


**Рис.3.** Продольный профиль дна долины водосбора Лапки (бассейн р. Локна) и измерения содержания изотопа  $^{137}\text{Cs}$  по длине. Условные обозначения: 1 – точки измерения; 2 – профиль дна; 3 – профиль террасы; Измерения содержания изотопа  $^{137}\text{Cs}$ : 4 – в аккумулятивной части дна; 5 – на террасе; 6 – транзитной части дна (точки тёмные – лабораторные измерения; точки светлые – измерения с помощью полевого детектора); 7 – тенденция изменения содержания изотопа  $^{137}\text{Cs}$  в аккумулятивной части дна на участках между уступами вторичных врезов.

Катастрофический характер роста большинства оврагов на начальной фазе их формирования объясняет достаточно редкую встречаемость данных мониторинговых наблюдений, фиксирующих экстремально сильный прирост оврагов в длину. Отдельные случаи, когда такие измерения были проведены [Баженова и др., 1997; Путилин, 2002; Рыжов, 1998; Рысин, 1998], только подтверждают правило. Остаётся нерешённым вопрос количественной оценки соотношения между суммарным выносом наносов из оврагов, и объёмом наносов, переоткладывающихся в конусах выноса, несмотря на единичные исследования, выполненные в различных регионах мира.

Одним из наиболее слабо изученных вопросов является количественная оценка переотложения материала в пределах нераспахиваемых подножий склонов и в днищах долин суходольной сети. Между тем, именно

достоверная оценка их буферной роли определяет точность определения вклада бассейновой составляющей в сток речных наносов. Следует отметить, что протяжённость днищ сухоходольной сети существенно возрастает в регионах с засушливым климатом, достигая своего апогея в пустынных районах, где постоянный сток имеют только крупные транзитные реки. Ограниченные данные о темпах аккумуляции наносов в днищах сухоходольных долин [Walling, 1990; Голосов, 1998] в различных регионах свидетельствуют о существенном увеличении темпов аккумуляции с ростом площади пашни. Они также указывают на то, что накопление наносов в днищах долин играет очень важную роль в суммарном балансе наносов, формирующихся и переоткладывающихся по пути транспортировки со склонов в русла рек (рис. 4).



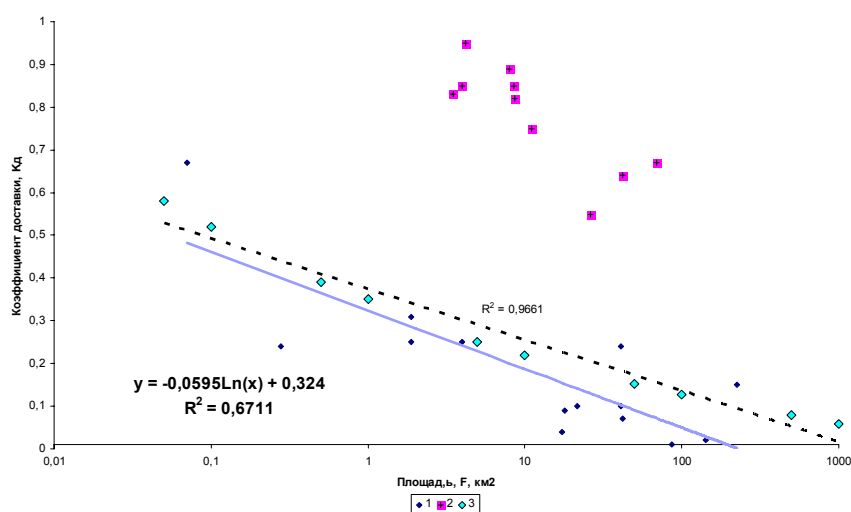
**Рис. 4.** Перераспределение наносов на водосборе Стёпин Рукав (бассейн р.Турдей, Тульская область) за период 1954 –1994 гг. Условные обозначения:  $A_{ск}$  – аккумуляция на задернованных частях склонах;  $A_m$  – аккумуляция наносов в днище долины;  $W_p$  – вынос наносов в долину Белоглинка

Известны случаи, когда за агрикультурный период происходило формирование крупных эрозионных форм и их последующее заполнение наносами [Bork, 1986]. В условиях значительной распашки территории наблюдается определённая цикличность, в соответствии с которой более продолжительный период накопления наносов в днищах сухоходольных долин сменяется этапом бурного развития вторичного врезания.

Наиболее общая закономерность перераспределения наносов в речных бассейнах заключается в сокращении доли доставляемого в речные русла материала по мере роста площади водосбора [Маккавеев, 1955; Дедков, Мозжерин, 1984]. Данная закономерность обусловлена увеличением протяжённости аккумулятивных литодинамических границ по мере роста



площади водосбора. Её универсальность подтверждается сравнительной близостью кривых связи площади водосбора с коэффициентом доставки наносов для интенсивно распахиваемых участков равнин Северной Америки и южного мегасклона Русской Равнины (рис. 5) [Golosov, 2002], несмотря на существенные различия в природно-антропогенных условиях формирования и интенсивности склонового смыва.



**Рис. 5.** Зависимость коэффициента доставки наносов ( $K_d$ ) от площади водосбора ( $F$ ) для: 1 – водосборов-накопителей; 2 – транзитных водосборов (по данным полевых исследований на малых водосборах южного мегасклона Русской равнины) и 3 – осреднённый вариант для Великих и Центральных равнин Северной Америки (по данным Mitchell, Bubenzer, [1980])

Данная зависимость характеризует долю наносов, выносимых за пределы водосборов определённой площади, при относительной стабилизации соотношения эрозионных и аккумулятивных процессов на водосборе. В этом случае для водосборов верхних звеньев флювиальной сети (до долин 4 порядка включительно) характерно переотложение в их пределах более 75% наносов, поступивших со склонов в днища долин, что позволяет говорить об их буферной роли или отнести к водосборам-накопителям [Симонов, Симонова, 1997].

Этапы стабилизации в развитии верхних звеньев флювиальной сети являются более продолжительными по времени в сравнении с этапами изменения соотношения между эрозией и аккумуляцией на водосборе в пользу первой и соответствуют относительному балансу между поступле-

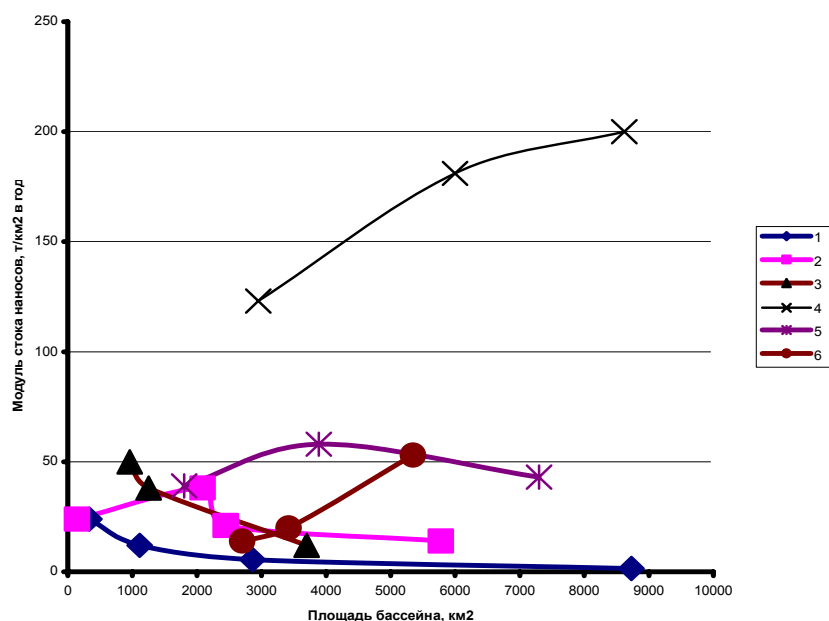
нием наносов с эродируемых элементов рельефа и их отложением на аккумулятивных элементах.

Другую группу составляют водосборы, находящиеся в стадии активизации вторичного врезания, распространившегося почти на всё днище. В результате они одновременно служат зоной транзита наносов со склонов междуречья и дополнительным источником наносов, поступающих в днище принимающей долины. При анализе соотношения между коэффициентом доставки наносов и площадью водосбора для малых водосборов южного мегасклона Русской равнины они выделяются в самостоятельную группу транзитных водосборов (рис. 5). В осреднённую зависимость  $K_d$  от площади водосбора  $F$ , используемую для бассейнов североамериканских равнин, включены, в том числе и транзитные водосборы, что, вероятно, и объясняет 10%-ную разницу между положениями кривых зависимостей  $K_d(F)$  для североамериканских равнин и Русской равниной (рис. 5).

В условиях равнин переход малого водосбора из группы водосборов-накопителей в группу транзитных водосборов чаще происходит при понижении базиса эрозии принимающего сток водотока за счёт антропогенного вмешательства. Например, искусственное спрямление и очистка от наносов русел рек Великих американских равнин привело к резкой активизации вторичного врезания на водосборах и поступлении значительного объёма наносов [Lohnes, 1997]. Неравномерное накопление наносов по длине днища долины также может способствовать смене знака преобладающего процесса, как это было выявлено на ряде водосборов центра Русской равнины [Голосов, Иванова, 2000]. Несомненно, что дальнейшие усилия должны быть предприняты для накопления данных о темпах аккумуляции наносов в суходольной сети и разработки моделей развития вторичных донных врезов, регрессивное отступление которых является основным механизмом вторичного переноса отложившихся в днище наносов по направлению к постоянным водотокам. Это вопрос особенно важен, поскольку совместно с наносами в днищах суходольных долин накопились значительные объёмы загрязнителей, поступление которых в постоянные водотоки может вызвать резкое ухудшение качества поверхностных вод.

Даже относительно небольшая доля наносов, выносимых с пахотных склонов в русла постоянных водотоков, протекающих на равнинах, способствовала увеличению модулей стока взвешенных наносов в 2-20 раз в различных ландшафтных зонах для рек с площадью водосборов более 5000 км<sup>2</sup> (табл.1). Наиболее резкое увеличение вклада бассейновой составляющей в сток наносов рек наблюдается на границе зоны широколиственных лесов и лесостепной зоны, где доля наносов, поступающих с водосбора, возрастает с максимума 60% в пределах интенсивно распаханых бассейнов юга лесной зоны до 80% в среднем для рек лесостепной зоны [Голосов, 1988]. Значительная доля наносов склонового происхождения в стоке наносов малых рек лесостепной и степной зон Восточно-Европейской

равнины подтверждается наличием отчётливой тенденции снижения модуля стока взвешенных наносов с ростом площади бассейна реки (рис. 6).



**Рис.6.** Зависимость модуля стока взвешенных наносов рек от площади бассейна для ряда рек степной зоны Русской равнины (1 – Терса; 2 – Миус; 3 – Кальмиус) и Великих равнин США (4 – Литл-Блу-Ривер; 5 – Салин; 6 – Ланс-Крик)

Однако для многих рек степной зоны, дренирующих интенсивно распаханые Великие и Центральные равнины США, характерно увеличение стока наносов с ростом площади бассейна (рис. 6), что указывает на значительный вклад русловой эрозии, превышающей вклад бассейновой составляющей. Причина кроется в резкой активизации врезания молодых речных систем в лёссовые толщи вследствие увеличения расходов воды в 10-50 раз после сельскохозяйственного освоения земель [Piest et al., 1976; Lohnes, 1997; Witter et al., 1997]. Например, русло р. Таркио за период 1845-1975 гг. за счёт углубления и расширения увеличило своё живое сечение в 14 раз. Столь интенсивное врезание помимо роста расходов воды обусловлено в 2,5 раза более низкой противоэрозионной устойчивостью грунтов, слагающих русло по сравнению с устойчивостью к эрозии поверхностных почв [Piest et al., 1976]. Именно значительный вклад русловой составляющей в сток наносов рек Северной Америки объясняет существенные различия в

модулях стока наносов рек с площадью бассейна менее 1000 км<sup>2</sup> в степной и лесостепной зонах равнин Европы и США (табл. 5).

**Таблица 5.** Соотношение средних и максимальных модулей стока наносов рек с площадью бассейна <1000 км<sup>2</sup> различных ландшафтных зон равнин Северной Америки и Русской равнины

Природная зона	Число водопостов	Средняя площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Модули стока наносов, т/км <sup>2</sup> в год				
			Среднее	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации, %	Разброс	Максимальный
Степи Северной Америки	8	313	509	278	54,6	728	832
Степи Русской Равнины	25	509	30	19,9	66,3	86,2	88
Соотношение 1/2			17				9,5
Леса широколиственные Северной Америки	26	437	71	27,8	39,2	96	140
Лесостепь и широколиственные леса Русской Равнины	21	397	64	69,9	88	243,2	250
Соотношение 4/5			1,1				0,5

Для того, чтобы вычленить вклад бассейновой составляющей в сток наносов рек степной зоны США, были проведены сравнения средних модулей стока наносов, исходя из оценок среднескользящих модулей склонового смыва и бассейновых составляющих, полученных с использованием кривых зависимости коэффициента доставки наносов от площади водосбора для рек различных ландшафтных зон (рис. 5). Выяснилось, что для рек зон лесостепи и широколиственных лесов (они объединены в одну группу, так как при распаханности более 70% различия между ними практически полностью скрадываются) расчётные бассейновые составляющие близки по величине с измеренными величинами модулей стока наносов рек как на Великих равнинах, так и на Русской равнине (табл. 6). Согласно расчётам вклад бассейновой составляющей для зоны широколиственных лесов составляет 30-45%, в лесостепной зоне 75-55%. Это несколько ниже имеющихся оценок для различных территорий [Дедков, Мозжерин, 1984; Голосов, 1989], но в целом, отражает имеющиеся тенденции. Различия связаны с использованием осреднённых величин темпов смыва и коэффициентов доставки наносов. Для степной зоны Русской равнины расчётная величина бассейновой составляющей оказалась выше фактически измеренного модуля стока наносов. Это можно объяснить

аккумуляцией части наносов в прудах и водохранилищах, расположенных в верхних звеньях флювиальной сети. Для рек США, напротив, измеренный модуль стока наносов в 5 раз превышает вклад бассейновой составляющей. Даже учитывая достаточно грубую оценку бассейновой составляющей, подобная разница подтверждает существенный вклад глубинной эрозии и размыва речных берегов рек, дренирующих Великие и Центральные равнины США и Канады. Прогресс, достигнутый в последние годы в количественной оценке перераспределения наносов в эрозионно-флювиальных системах, обусловлен расширением методической базы исследований в области изучения бассейновой эрозии. Однако накопленных к настоящему времени данных пока ещё недостаточно для перехода к инженерным расчётам перераспределения наносов в речном бассейне.

**Таблица 6.** Соотношение модулей стока наносов рек и вклада бассейновой составляющей для равнинных рек различных ландшафтных зон Восточной Европы и Северной Америки

Ландшафтная зона, число гидрологических постов	Модуль стока * наносов со склонов, т км <sup>-2</sup> в год	Средняя * площадь бассейна, км <sup>2</sup>	Коэффициент доставки наносов	Модуль стока наносов рек, т км <sup>-2</sup> в год
Восточная Европа				
Широколиственные леса, 69	400-600	1350	0,05	$\frac{77 \pm 29}{25 \pm 5^{**}}$
Лесостепь, 72	700-1000	932	0,06	$\frac{68 \pm 17}{51 \pm 10}$
Степь, 120	500-1000	1380	0,05	$\frac{35 \pm 7,8}{38 \pm 15}$
Северная Америка				
Широколиственные леса, 77	500-1000	879	0,05	$\frac{77 \pm 22}{37 \pm 12,5}$
Лесостепь, 8	1000-2000	484	0,08	$\frac{220 \pm 160}{120 \pm 25}$
Степь, 26	2000-3000	1840	0,03	$\frac{330 \pm 150}{75 \pm 15}$

\* – данные по фактически измеренным расходам взвешенных наносов

\*\* - числитель - по фактически измеренным расходам наносов в реке; знаменатель - расчётные оценки бассейновой составляющей по осреднённым величинам среднегодовых темпов смыва и кривым (отдельно для США и России) зависимости коэффициента доставки наносов от площади водосбора (рис.5).

## ЛИТЕРАТУРА

*Баженова О. И., Любцова Е.М., Рыжов Ю. В., Макаров С.А.* Пространственно-временной анализ динамики эрозионных процессов на юге Восточной Сибири. Новосибирск: Наука, 1997.

*Бутаков Г.П., Зорина Е.Ф., Никольская И.И., и др.* Тенденции развития овражной эрозии в Европейской России // Эрозионные и русловые процессы. Вып. 3. М.: Изд-во МГУ, 2000.

*Голосов В. Н.* Антропогенная эрозия почв в бассейне Верхней Оки. Автореф. дис. ... канд. географ. наук. М., МГУ, 1986.

*Голосов В.Н.* Аккумуляция в балках Русской Равнины // Эрозия почв и русловые процессы. . Вып. 11. М.: Изд-во МГУ, 1998.

*Голосов В.Н.* Влияние антропогенных факторов на сток наносов рек бассейна Оки // География и природные ресурсы. 1989. № 3.

*Голосов В.Н.* Эрозионно-аккумулятивные процессы в верхних звеньях флювиальной сети освоенных равнин умеренного пояса. Автореф. дисс. док. геогр. наук. М. МГУ, 2003.

*Голосов В.Н.* Эрозионно-аккумулятивные процессы и баланс наносов в бассейне р. Протвы // Вестник МГУ. Сер.5. География, 1988, № 6.

*Голосов В.Н., Иванова Н.Н.* Внутрибассейновое перераспределение наносов на речном водосборе: методика и проблемы изучения // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 12. М.: Изд-во МГУ, 2000.

*Голосов В.Н., Козловская М.Э., Пацукевич З.В.* Специфика эрозионных процессов в юго-западном Забайкалье // Вестник МГУ. Сер.5. География. 1996. № 4.

*Дедков А.П., Мозжерин В.И.* Эрозия и сток наносов на Земле. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1984.

*Жукова И.И., Цыбулька Н.Н., Черныш А.Ф., Тишук Л.А.* Математические модели водной эрозии почв и апробация их для условий Беларуси (на примере стационара «Стоковые площадки» // Почвоведение и агрохимия. . Вып. 31, 2000.

*Литвин Л.Ф., Голосов В.Н., Добровольская Н.Г. и др.* Стационарные исследования эрозия почв при снеготаянии в центральном Нечерноземье // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 11, М.: Изд-во МГУ, 1998.

*Маккавеев Н.И.* Русло реки и эрозия в её бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955.

*Панин А.В., Малаева Е.М., Голосов В.Н. и др.* Геолого-геоморфологическое строение и голоценовая история развития Берестовой балки (Ростовская область) // Геоморфология, 1998, № 4.

*Патат И.А.* Стокорегилирующая и противозерозионная роль полосного размещения культур на склоновых землях // Почвоведение. 1984. № 3.

*Путилин А.Ф.* Эрозия почв в лесостепной зоне Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002.

*Рыжов Ю.В.* Овражная эрозия в межгорных котловинах юго-западного Прибайкалья // Геоморфология. 1998. № 3.

*Рысин И.И.* О современном тренде овражной эрозии в Удмуртии // Геоморфология. 1998. № 3.

*Симонов Ю.Г., Симонова Т.Ю.* Структурный анализ типов функционирования и эволюции речных бассейнов // Гидрология и геоморфология речных систем. Иркутск: Изд-во СО РАН, 1997.

*Солошенко В.Н.* Потери от линейной эрозии в сельском хозяйстве и пути рационального использования заовраженных земель. Курск: 1998.

*Чернышев А.А.* Смыв почвы с овражных водосборов // Метеорология и гидрология. 1969. № 11.

*Bork H.-R.* Soil erosion during the past millennium in Central Europe and its significance within geomorphodynamics of the Holocene // Landforms and Landform Evolution in West Germany. Catena suppl. 1986. No. 15.

*Edwards W.M., Owens L. B.* Large storm effects on total soil erosion // J Soil & Water Cons. 1991. No.1.

*Golosov, V.N.* (2002) Temporal – spatial variations in the sediment delivery ratio of small drainage basins: the Russian Plain example // The Structure, Function and Management Implications of Fluvial Sedimentary Systems. IAHS Publ.No 276.

*Ionita I.* Sediment delivery scenarios for small watersheds // Vegetation, land use and erosion processes. Bucharest. Institute of Geography. 1999.

*Lohnes R.A.* Stream channel degradation and stabilization: the Iowa experience // Management of Landscapes Disturbed by Channel Incision: Stabilization, Rehabilitation, Restoration. University of Mississippi. 1997.

*Mitchell J.K., Bubenser G.D.* Soil loss estimation // Soil Erosion. Elsevier. 1980.

*Oygarden L.* Erosion and surface runoff in small agricultural catchments // Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives. IAHS Publ. 1996. No.236.

*Panin A.V., Walling D.E., Golosov V.N.* The role of soil erosion and fluvial processes in the post-fallout redistribution of Chernobyl-derived caesium-137: a case study of the Lapki catchment, Central Russia // Geomorphology. 2001. Vol. 40.

*Patton P.C., Schumm S.A.* Ephemeral-stream processes: implications for studies of Quaternary valley fills // Quat. Res. 1981. Vol. 15.

*Piest R. F., Elliott L.S., Spomer R.G.* Erosion of the Tarkio drainage system, 1845-1976. ASAE, St. Joseph. Michigan 49085. 1976.

*Schumm S.A.* A Geomorphic Approach to Erosion Control in Semiarid Regions // Transactions of the ASAE. 1969. Vol. 12.

*Walling D. E.* Linking the field to the river: sediment delivery from agricultural land // Soil Erosion on Agricultural Land. John Wiley. Chichester. 1990.

*Witter R.J., Keeney S.D., Eby D.R., LaGrone* Building banks on muddy creek with barbs. Management of Landscapes Disturbed by Channel Incision: Stabilization, Rehabilitation, Restoration. The Centre for Computational Hydroscience and Engineering. The University of Mississippi. 1997.

[В Содержание](#)

## РАЗВИТИЕ ИДЕЙ Н.И. МАККАВЕЕВА ОБ АНТРОПОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ\*

К.М. Беркович

Русловедение относится к научным дисциплинам, имеющим практическую направленность. Оно и возникло как инженерная дисциплина. Недаром часто русловые процессы относят к инженерной гидрологии или инженерной геоморфологии. Исследования русловых процессов и их прогноз необходимы при мелиоративном строительстве, возведении мостов, прокладке коммуникаций, в энергетике, водоснабжении, широко применяются на водном (речном) транспорте. И работы Н.И. Маккавеева часто были ориентированы на практику. Это отражено в таких крупных его трудах, как «Русловой режим рек и трассирование прорезей», «Русловые процессы и путевые работы в нижних бьефах гидроузлов», в статьях «Учение о русловых процессах на службе практики», «Русловые процессы в зонах переменного подпора».

Вместе с тем, инженерная деятельность на реках, необходимая для защиты от русловых процессов и их учета, меняла и сами реки. Н.И. Маккавеев достаточно рано обратил внимание на роль хозяйственной деятельности в формировании русел рек. Надо отметить, что в мировой литературе вплоть до 1950-1960-х гг. антропогенным факторам изменения окружающей человека среды не уделялось должного внимания. Что же касается влияния человека на русловые процессы и гидрологический режим рек, то эти аспекты становятся предметом внимания исследователей только в 1970-1980-е гг.

В своей монографии «Русло реки и эрозия в ее бассейне» Н.И. Маккавеев отмечал: «Ведущим фактором развития речных профилей (рек) является в настоящее время воздействие человека» (1955, стр. 232). Он связывал это с усиленной эрозией почв, которая началась со времени перехода человека от охоты к скотоводству и земледелию 3000-4000 лет назад. Повышение отметок дна рек, обусловленное аккумуляцией избыточного объема наносов, составляло до 1 м за тысячелетие на достаточно крупных реках Русской равнины (средняя Ока) и было значительно больше (несколько сантиметров в год) в верховьях речных систем. Таким образом, ко времени активизации антропогенного воздействия на реки (в России – середина XX века) продольные профили многих рек уже были в значительной степени изменены. В этой же книге он кратко анализирует косвенное влияние гидротехнических мероприятий, среди которых он выделяет землечерпание, спрямление излучин, лесосплав, создание водохранилищ. Объемы земле-

---

\* Выполнено по гранту РФФИ (проект № 04-05-64574) и программе «Университеты России. Фундаментальные исследования»



черпания в первой половине XX века были небольшими по сравнению, например, с 1980-и годами, но общая величина удаленного объема сравнима со стоком наносов Волги. Н.И. Маккавеев подчеркивал, что в результате регулярного землечерпания на Днепре, Волге, Северной Двине с конца XIX века заметно усложнилась форма перекатов вследствие образования значительного количества осередков, кос и ложбин, связанных со складированием отвалов из землечерпательных прорезей. Увеличилась длина перекатов за счет укорачивания плесов. Длина меженного русла многих судоходных рек Русской равнины уже тогда сократилась на 8-12% за 60-80 лет. Далее Н.И. Маккавеев обращал внимание на такое последствие создания водохранилищ как размывы в нижних бьефах и некоторые далеко идущие последствия изменения гидрологического режима рек. Так, например, он отмечал, что последствия изменений в ходе руслообразующих процессов на верхней Волге начинали проявляться спустя более 10 лет со времени создания Рыбинского водохранилища, считая причиной этого высокую стабильность русла (числа Лохтина) и замедленность русловых деформаций. Таким образом, он высказал идею о зависимости скорости и величины изменений руслового режима от степени стабильности (устойчивости) русла.

В последние 10-15 лет многие идеи Н.И. Маккавеева получили дальнейшее развитие и именно в направлении исследования последствий хозяйственной деятельности для речных русел. То, что было намечено отдельными штрихами, превратилось в самостоятельный раздел - экологическое русловедение. Значительно продвинулось исследование заиления и деградации русел малых рек. Не углубляясь далее в этот вопрос, отметим серьезные исследования В.Н. Голосова, Н.Н. Ивановой, А.В. Чернова.

Была разработана классификация видов инженерной деятельности по степени влияния на русловые процессы, отличающуюся от других, более утилитарных классификаций (Б.Ф. Сنيщенко, В.С. Боровков). Она может быть представлена в виде следующей схемы (табл.).

Косвенное влияние сказывается более заметно на руслах малых рек, в то время как русла крупных рек изменяются значительно под влиянием непосредственного, часто механического вмешательства. Это не исключает существенного механического изменения русел малых рек в некоторых регионах, выполненного в мелиоративных или других целях или при добыче полезных ископаемых и урбанизации. Водоохранилища занимают особое место: при затоплении речных долин русла и поймы рек исчезают, на их месте возникают водоемы, в которых развиваются процессы осадконакопления, переформирования берегов под действием ветро-волновых процессов и т.д. Важным явлением становится регрессивная аккумуляция в зонах переменного подпора и выше по течению на свободных участках рек.

Косвенное нарушение нередко распространяется на целые речные системы, большинство прямых нарушений действуют на участках рек, иногда довольно больших, или в отдельных створах. Оба вида нарушений

нередко действуют совместно, и это придает особую сложность анализу их последствий.

Региональное обобщение позволило создать карту антропогенных нарушений русловых процессов на реках России, в которую вошли данные по заилению и механической измененности русел малых рек и отражена степень изменения русловых процессов крупных рек в результате таких мероприятий как гидроэнергетическое строительство, разработка русловых карьеров, дноуглубительные работы.

Выявлено, что речные русла по-разному противостоят антропогенным нарушениям, т.е. обладают разной устойчивостью к антропогенной нагрузке. Выделяются некоторые показатели, характеризующие реакцию русел на нарушения: 1) пороговый уровень нарушения, 2) время запаздывания реакции русла, 3) время релаксации или адаптации, 4) пространственное распространение нарушения. Все эти показатели зависят как от величины нарушения, так и от исходной стабильности русла и размеров реки. Устойчивыми к какому-либо виду антропогенной нагрузки являются русла рек, в которых: а) после воздействия не возникает направленных деформаций; б) время запаздывания занимает длительное время, сопоставимое с природными изменениями русел; в) время релаксации (адаптации) короткое. Если при воздействии антропогенных факторов русло сохраняет исходную форму продольного профиля и морфодинамический тип русла, то оно устойчиво к данному виду нарушения.

Основными наиболее мощными видами инженерной деятельности на средних и больших реках в настоящее время являются: крупное гидротехническое строительство – создание водохранилищ, разработка русловых карьеров, дноуглубительные работы на водных путях, мелиоративное строительство. Было продолжено изучение механизма трансформации речных русел под влиянием этих видов инженерной деятельности. Выяснено, что последствия подобной деятельности зависят от конкретных природных условий, в которых сформировалось русло, его морфологии и стабильности.

К наиболее мощным видам нагрузки относится создание водохранилищ. Н.И. Маккавеев выявил основные закономерности развития русел под влиянием регулирования стока воды и наносов. Исследования в этом направлении были нами продолжены. В наибольшей степени это относится к деформациям русел в нижних бьефах, хотя не оставлены без внимания и процессы регрессивной аккумуляции.

В нижних бьефах гидроузлов складываются сложные прямые и обратные связи, объединяющие зарегулированный сток воды и наносов, морфологию и морфометрию русла и поймы, крупность наносов и современные процессы. В последние годы детально изучены процессы трансформации и нового формирования поймы ниже крупных гидроузлов. Характер протекания ведущего процесса – глубинной эрозии можно проследить по имеющимся сейчас многочисленным данным по российским и

зарубежным гидроузлам. Наиболее интенсивно эрозия протекает в первые несколько лет, особенно на реках с мелкопесчаным аллювием. По прошествии двух десятилетий темпы эрозии сокращаются и близки на реках с разным составом аллювия.

**Таблица.** Классификация видов инженерной деятельности, влияющей на русловые процессы

Влияние	Характер влияния	Виды деятельности по характеру реакции русла		
		эрозия	аккумуляция	разная
Косвенное	длительное	добавление стока	агротехнические мероприятия, сведение лесов, лесоразработки, изъятие стока	Урбанизация, горные разработки
Прямое	постоянное	нижние бьефы плотин, мостовые переходы, выправительные сооружения, дамбы обвалования	повышение базиса эрозии водохранилищами	
	длительное	спрямление и расчистка русел, русловые карьеры	изъятие стока (водозабор)	
	временное			землечерпательные работы, подводные переходы
Водохранилища	постоянное	исчезновение реки		

Подобная зависимость, но с большим разбросом точек, прослеживается и для смещения фронта глубинной эрозии.

Продолжено изучение механизма разрушения берегов в нижних бьефах гидроузлов. Во многих случаях интенсификация этого процесса обусловлена резкими суточными колебаниями уровня воды при попусках и возрастанием роли переменного увлажнения грунта береговых откосов. Детально этот процесс изучен в нижнем бьефе Рыбинского гидроузла.

Большое внимание в последние годы уделялось исследованию влияния разработки русловых карьеров на русловые процессы. Этот вид деятельности получил широкое развитие с начала 1950-х гг. и способствовал серьезнейшему изменению речных русел многих рек, в том числе судоходных. Долгое время на эти явления не обращалось должного внимания, пока не сложились критические ситуации для водопользователей на некоторых реках.

Разработка русловых карьеров сильнее всего меняет морфометрию русла. Увеличивается средняя и максимальная глубина, площадь поперечного сечения, иногда в десятки раз по сравнению с естественным руслом. Изменения морфометрии русла ведут к изменениям гидравлики потока, а удаление из русла значительных объемов аллювия – к возникновению дефицита наносов. Результатом разработки карьеров является резкое понижение уровней воды, особенно при низких меженных уровнях воды, и глубинная эрозия, которая распространяется как вверх, так и вниз по течению от карьеров. Вопросами влияния русловых карьеров на гидрологический и русловый режим рек занимались многие научные организации, в том числе с использованием физического и математического моделирования (ГГИ, РГГМУ, СПГУВК и др.). Однако прогноз и расчет явлений, связанных с этим видом нарушения русел, остается неразработанным. Сложность заключается в том, что на моделях можно имитировать одиночный карьер, в то время как карьеры чаще всего располагаются беспорядочно вдоль реки и зоны их влияния перекрываются. Кроме того на темп и характер развития эрозии влияют такие факторы как формирование отмостки, выходы связных пород, интенсификация эрозии берегов, влияние выносов притоков и инженерные сооружения.

Изменения уровней на многих реках обнаруживают корреляцию с объемами добычи (верхняя Ока, Белая, Томь). Вместе с тем, хотя в последнее десятилетие объемы добычи аллювиальных строительных материалов существенно сократились, в большинстве случаев посадка уровней носит незатухающий характер. В то же время выявляются различия в реакции русла на гравийно-галечных и песчаных участках русла, отличающихся степенью стабильности. Они видны не только в характере посадки уровней, но и в форме продольного профиля. На реках с галечным аллювием он становится ступенчатым, приобретая черты невыработанности (Томь, верхняя Ока).

Скорость глубинной эрозии на равнинных реках составляет обычно несколько сантиметров в год. Особенно велико понижение отметок дна, достигающее 2-3 м за 10 лет, непосредственно выше карьеров (перекаты Очковские горы и Мутеновский на верхней Оке, Чижовский на нижней Белой).

Разработка русловых карьеров на реках, являющихся водными путями, существенно затрудняет условия судоходства. Н.И. Маккавеев обосновал, и это – одна из самых значительных его идей, особый природоведческий, географический подход к инженерной деятельности на реках. Наиболее широкое применение он нашел на водном транспорте при работах по совершенствованию водных путей, где он лег в основу методики выправления русел. В современных условиях землечерпательные работы, традиционные на водных путях России, значительно снизились в объемах. Появилась возможность выявить пути и характер релаксации русел разных типов после их сокращения или прекращения. Кроме того, выявляется влияние регулирования стока и механического изменения русел многих рек на судоходные условия, что важно для прогнозирования состояния водных путей на будущее.

Важным моментом является выяснение влияния инженерной деятельности на изменения характеристик речного русла. Для этого можно применить предложенный Н.И. Маккавеевым коэффициент стабильности ( $K_s$ ). Относительная стабильность русла является очень важной интегральной характеристикой русла. В этом отношении коэффициент Маккавеева – очень удачная композиция из коэффициента устойчивости донных отложений М.А. Великанова и относительной ширины русла, полученная на основе глубокого знания сущности природных процессов. Интенсивность русловых деформаций ( скорость движения отмелей, размывы берегов, блуждания русла) обнаруживает зависимость от  $K_s$ ; тип форм руслового рельефа (побочни, осередки, косы) также зависит от этого коэффициента. Более того, коэффициент стабильности может служить для идентификации типа русла и его антропогенного изменения.

[В Содержание](#)

# **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПАЛЕОГИДРОЛОГИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПАЛЕОРУСЕЛ ПЕРИГЛЯЦИАЛЬНОЙ ЗОНЫ ПОСЛЕДНЕГО ОЛЕДЕНЕНИЯ РУССКОЙ РАВНИНЫ\***

**А.Ю. Сидорчук**

## **Введение**

Палеоруслы представляют собой морфологически и литологически выраженные целостные комплексы русловых образований (включающие собственно русла), которые сформированы рекой на предшествовавших современному этапах эволюции речной долины и обычно отделены от современного русла. В зависимости от целей исследования и выбранной протяженности современного этапа развития русла, в эту обширную категорию могут входить как сравнительно молодые старицы на пойме, так и остатки древних русловых комплексов, выраженных в рельефе, но практически потерявших связь с современной рекой.

Обычно различные этапы эволюции речной долины выделяются при изменении условий руслообразования. Привязанные к этим этапам палеоруслы имеют различный морфологический тип и/или различные размеры характерных элементов. Если природа таких изменений климатическая, то форма, размеры и аллювий палеорусел несут информацию о водоносности древних рек. В палеогидрологии это является основой морфогидрологического метода реконструкции палеостока рек.

## **Палеогидрологические исследования школы Н.И. Маккавеева**

Н.И. Маккавеев обратился к проблеме палеогидрологических реконструкций в 1962-1966 гг при исследовании развития речных излучин [Экспериментальная геоморфология, 1969]. Была поставлена задача: «...судя по характеру деформаций меандр определять, какие изменения произошли в стоке за определенный отрезок времени». Исследования были сконцентрированы на изменениях, происшедших в историческое время, но предполагалась возможность использовать эти методы при палеогеографическом анализе. Разработки Н.И. Маккавеева быстро нашли применение в основной им Проблемной лаборатории эрозии почв и русловых процессов. Автор этих строк выполнил реконструкцию стока воды в позднеледниковье и голоцене в дельтах Таза и Пура (в 1970 г, опубликовано позднее в [Коротаев и др., 1990]), в дельтах Яны [Сидорчук, 1975], Енисея [Гаррисон и др., 1981]. А.В. Чернов реконструировал эволюцию русла и водоносности верхней и средней Оби [Чернов, Гаррисон, 1981] в голоцене. Б.В. Матвеев, А.В. Панин и автор, выполнили анализ развития врезанных больших меандр

---

\* Выполнено по гранту Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (проект №НШ-1443.2003.5)

и определили систему признаков для выявления климатического сигнала в условиях ограниченных русловых деформаций [Матвеев и др, 1992, Matveev et al., 1994]. В ходе работы над картой русловых процессов на реках Европейской части СССР [Морфология ..., 1999] впервые была получена информация о широком распространении больших палеорусел на территории Русской равнины [Панин и др., 1992, Panin et al., 1999]. Это дало толчок исследованиям последнего десятилетия в рамках палеорусловедения [Чалов, 1996], основные итоги которых подводятся в данной статье. При этом не ставится задача дать анализ работ других палеогидрологических школ.

### **Большие позднеледниковые палеорусла в перигляциальной зоне Русской равнины**

Для Русской равнины характерно широкое распространение больших меандрирующих палеорусел (рис.1). Они обнаружены от лесотундры до сухой степи, в бассейнах всех морей, омывающих равнину [Панин и др, 2000,2001; Сидорчук и др, 1999, 2000а,б; Sidorchuk *et al.*, 1999, 2001]. Большие палеорусла редки только в зоне тундры, а также на территории, которая перекрывалась поздневалдайским ледником. В северной части равнины современные реки, как правило, имеют врезанные излучины. Фрагменты больших палеорусел располагаются здесь в пределах первой и второй надпойменных террас. Часто современная пойма реки совпадает с древним руслом и описывает большие изгибы, а ее ширина близка к ширине палеорусла.

В южной части Русской равнины врезания рек в голоцене в большинстве случаев не происходило. Здесь обширные древние поймы сохранили режим затопления и соответствующий ландшафт. Современные реки извиваются узкими лентами среди унаследованных пойм, изменяя древний рельеф в основном в пределах современного пояса меандрирования. Именно такие реки описывал В.В. Докучаев [1878], когда отмечал несоответствие размеров современной реки и выработанной ею долины.

Возраст больших палеорек Русской равнины определен лишь в небольшом числе речных долин по данным радиоуглеродного и пыльцевого анализов старичных отложений. В долине р. Хопра у п. Поворино большое палеорусло отмерло около 11 тысяч лет назад (здесь и далее, годы радиоуглеродные). Палеоизлучины на пойме р. Сейма у г. Льгова и на первой террасе р. Свапы у ее устья были отшнурованы от основного русла около 14 тыс. лет назад. В долине р. Протвы у г. Боровска отмирание большого палеорусла относится к 12-13 тыс. лет назад. Большая излучина р. Москвы у д. Остров была отчленена от реки в раннем дриасе, т.е. более 13 тыс. лет назад. Все эти палеореки характеризуются хорошо развитыми меандрами, часто омеговидными. Формирование таких излучин могло занимать не менее 1-2 тысячи лет. Поэтому активное руслообразование больших рек Русской равнины можно отнести к периоду 13-16 тысяч лет назад и ранее, т.е. к начальному этапу дегляциации.

Большие поздневалдайские реки формировали свои русла в условиях ландшафтов перигляциальной гиперзоны [Динамика..., 2002] – перигляциальной тундры в северной части равнины и перигляциальной лесостепи и степи в ее южной части. Сток талых ледниковых вод был направлен на север и на запад, и не мог участвовать в образовании крупных меандров рек Русской равнины. Источником воды для их формирования были осадки. На всей территории перигляциальной гиперзоны от края валдайского ледникового щита до 49° с.ш. была распространена многолетняя мерзлота. Водопроницаемость грунтов была минимальной, что приводило к малым потерям стока в период снеготаяния и практически к отсутствию грунтового питания рек в теплый период. Реки характеризовались коротким высоким половодьем и продолжительной низкой меженью. В таких условиях формировались большие речные русла, размеры которых соответствовали максимальным расходам воды периода половодья. Большую часть года во время межени эти русла были лишены воды, и песок на обширных песчаных отмелях перевевался ветром.

#### Палеогидрологические реконструкции

При палеогидрологических реконструкциях возможно использовать весь арсенал методов расчетов гидрологического режима малоизученных и неизученных рек. Наиболее эффективным показал себя метод, основанный на выборе региона-аналога и применении гидравлико – морфометрических зависимостей в сочетании с уравнением водного баланса. При этом практика палеогидрологических исследований показала, что необходимые исходные данные могут быть получены только при использовании для расчетов палеостока самых простых гидравлико – морфометрических зависимостей: связей ширины русла или показателей размера излучины (шага, радиуса кривизны и др.) с расходом воды. Обработка данных по 185 участкам меандрирующих широкопойменных рек Русской равнины и Западно-Сибирской низменности путем минимизации разности квадратов вычисленных и измеренных значений показала [Сидорчук и др, 2000], что среднегодовой расход воды  $Q_{cp}$  связан с шириной при уровне наполнения русла  $B_p$  зависимостью:

$$Q_{cp} = K_y B_p^{1,36}. \quad (1)$$

Коэффициент  $K_y$  величина переменная и обусловлена ландшафтом речного водосбора, поэтому зависимость (1) параметризована по величине внутригодовой изменчивости стока воды,

$$K_y = 0,012 y^{0,73}, \quad (2)$$

которая характеризуется отношением среднегодового и среднемаксимального  $Q_{max}$  расхода воды:

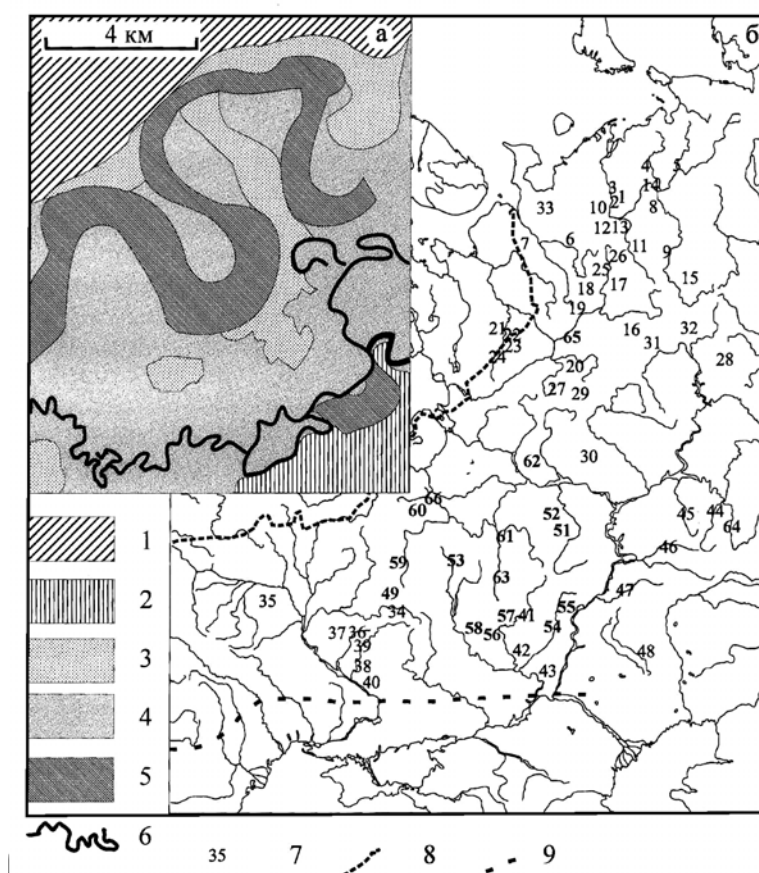
$$y = 100 (Q_{cp} / Q_{max}). \quad (3)$$



В бассейнах рек Европейской России внутригодовая изменчивость стока связана с размером водосбора реки  $F$  (км<sup>2</sup>) эмпирической зависимостью:

$$y = aF^{0,125} \quad (4).$$

Коэффициент  $a$  зависит от ландшафтных условий на водосборе и поддается географическому районированию. Он изменяется от 1.5-2.0 у рек зоны тундры, увеличивается в зоне тайги до 2.5-3.5 и снова уменьшается в зоне широколиственных лесов и лесостепи до 1.5-2.5.



**Рис. 1.** Большое поздневалдайское палеоруло р.Хопера у п. Пово-  
рино (а) и распространение хорошо сохранившихся фрагментов больших  
палеорусел на Русской равнине (б). Условные обозначения:

1 – высокие террасы Хопра; 2 – вторая терраса; 3 – 1 терраса; 4 – пойма; 5 –  
палеоруло; 6 – современное русло Хопра; 7 – номера больших палеорусел в таб.1  
(Сидорчук и др., 2000; Sidorchuk et al., 2001); 8 – граница поздневалдайского мате-  
рикового льда; 9 – южная граница вечной мерзлоты в поздневалдайское время.

Наличие в зависимости (4) коэффициента  $a$ , который определяется ландшафтными характеристиками водосбора, создает основу для применения в палеогидрологии принципа *палеогеографической аналогии* [Sidorchuk, Borisova, 2000]. Известно, что географическая аналогия, введенная в гидрологические исследования В.Г.Глушковым [1933], находит широкое применение при гидрологических расчетах для малоизученных и неизученных рек. В современной формулировке [Евстигнеев, 1990, с. 113] «принцип географической аналогии отражает целостность географических ландшафтов и взаимосвязь их элементов, что позволяет предположить близость характеристик стока для речных бассейнов со сходными физико-географическими условиями». Из этого следует принцип палеогеографической аналогии: характеристики стока для древних речных бассейнов близки характеристикам стока современных бассейнов с условиями, сходными с палеогеографическими.

На основе принципа палеогеографической аналогии для реконструкций стока подбирается современная область, которая по комплексу ландшафтно-климатических признаков является аналогом бассейна древней реки. Предполагается, что современный гидрологический режим рек в пределах области-аналога близок к гидрологическому режиму древних рек. Для современных рек региона-аналога рассчитываются значения параметра  $a$ , которые затем используются для расчетов параметра  $y$  по формуле (4). Среднегодовой расход воды тогда определяется по зависимостям (1)-(2), а среднемаксимальный расход воды по формуле (3). По данным для региона-аналога можно также установить характеристики гидрологического режима палеореки (параметры кривых распределения различных элементов стока), а также недостающие величины в уравнении водного баланса, такие как слой потерь или коэффициент стока (годовой и по сезонам). В результате для года и сезонов определяются слой стока и слой осадков для бассейна палеореки.

По формулам (1)-(4) были рассчитаны расходы и слой стока воды для 66 участков больших перигляциальных рек Русской равнины, для которых имеются фрагменты хорошо сохранившихся палеорусел (см. рис. 1). Реки тундры Европейской России были использованы в качестве аналога рек поздневалдайского времени. Эти оценки позволили составить карту годового слоя поверхностного стока поздневалдайского времени и оценить годовые объемы стока в основных речных бассейнах (табл. 1). На северном мегасклоне равнины сток воды составлял около  $380 \text{ км}^3$  в год, что в полтора раза больше современного с той же водосборной площади. Основное увеличение стока произошло в бассейнах Мезени и Печоры (почти в 2 раза). В бассейне Волги годовой сток составлял около  $585 \text{ км}^3$ , несмотря на некоторое уменьшение водосбора верхней Волги. Это более чем вдвое больше современного, и вполне объясняет высокий уровень позднехвалынского Каспия. Основной вклад в этот сток вносили Ока и Кама, сток которых был больше современного в 3-3.5 раза. Еще более – почти в 4 раза,

поздневалдайский сток превышал современный в бассейне Дона. Следует еще раз подчеркнуть, что в этом стоке ледниковое питание не участвует.

**Таблица 1.** Годовой объем стока поздневалдайских рек Русской равнины

Река	Площадь водосбора в позднем валдае, тыс. км <sup>2</sup>	Годовой объем стока в позднем валдае, км <sup>3</sup>	Современный объем стока, км <sup>3</sup> (с полного водосбора)
Сев. Двина	260	115	107
Мезень	78	45	20
Печора	322	220	126
Верхняя Волга (без Оки)	173	93	85
Ока	245	147	41
Кама	507	260	88
Средняя и нижняя Волга (ниже устья Камы)	249	85	40
Дон	422	110	28
Итого	2256	1075	535

#### Выводы и заключение

Выявление широкого распространения больших палеорусел на Русской равнине позволило завершить картину циркумполярного распространения этих форм руслового рельефа для северной Евразии [Сидорчук, 2001, Sidorchuk et al., 2003] и всего северного полушария Земли [Sidorchuk, 2003]. Определение их позднеледникового возраста, морфометрическая характеристика и анализ строения аллювия создали основу для объективной палеогидрологической реконструкции поверхностного стока на этой территории в позднеледниковое время.

Использование палеогеографической аналогии в качестве методологии палеогидрологических реконструкций в значительной степени реабилитировало применение здесь гидравлико – морфометрических зависимостей. Оно было ранее изрядно дискредитировано огромными величинами восстановленного стока воды [Н.И. Маккавеев в частных беседах довольно резко отзывался о результатах реконструкций Г. Дьюри в его классической работе [Dury, 1965]), так как не принималась во внимание необходимость районирования зависимостей и выбора для реконструкций только зависимостей, полученных для региона-аналога палеоландшафта. При выполнении этого достаточно очевидного требования и учете прохождения стока в перигляциальных условиях за короткий период снеготаяния, общий рассчитанный сток рек Русской равнины в поздневалдайское время получается лишь вдвое больше современного, что вполне объяснимо существенно меньшими потерями на испарение.

Тем не менее это очень большой поверхностный сток, и его обоснование вносит существенные коррективы в сложившиеся представления о природе перигляциального времени. Во-первых, климат начальной стадии деградации поздневалдайского оледенения считается сухим и холодным (см., например, сводку [Динамика..., 2002]). Данные о стоке воды показывают, что эта сухость была относительной: годовое количество осадков было не меньше, а скорее больше современного; однако эти осадки выпадали в основном в виде снега за долгую зиму, а лето было сухим и коротким. Во-вторых, для всего перигляциального времени предполагалось доминирование криогенных и склоновых процессов рельефообразования с преобладанием аккумуляции, а эрозионные сводились к склоновому смыву и формированию мелких оврагов [Бутаков, 1986]. Открытие больших палеорусел показывает, что на некотором этапе эрозионные и русловые процессы имели самое широкое распространение, реки были шире (до 15 раз) и глубже современных. К этим рекам были приурочены многочисленные крупные глубоко врезаемые линейные формы эрозии – современные балки и суходолы. В третьих, для объяснения высокого стояния Каспийского моря в хвалынское время привлекалась гипотеза об участии талых вод материкового ледника в поверхностном стоке вод в бассейне Волги [Квасов, 1975]. С учетом реконструкций стока больших рек перигляциальной зоны эта гипотеза (не подтверждаемая ныне и другими данными) является излишней. В четвертых, образование речных террас обычно связывается с врезанием рек. Исследование современной морфологии долин больших перигляциальных рек показывает, что первая надпойменная терраса здесь вышла из под уровня затопления только за счет значительного уменьшения размаха колебания уровня воды на этапе аккумуляции материала в днище речной долины при переходе от перигляциального к современному водному режиму.

Несмотря на продолжительную историю, палеорусловые и палеогидрологические разработки находятся лишь в начальной стадии. Но методологические принципы, предложенные Н.И. Маккавеевым и развиваемые его учениками и последователями, уже вошли в основной фонд этого научного направления и найдут применение при дальнейших исследованиях.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Бутаков Г.П.* Плейстоценовый перигляциал на востоке Русской равнины. Казань: Изд-во Казанского ун-та., 1986
- Гаррисон Л.М., Коротаев В.Н., Сидорчук А.Ю.* Палеогеоморфологический анализ дельтовой равнины р. Енисей // Вест. Моск. ун-та. Сер. Географич. 1981. № 6.
- Глушков В.Г.* Географический и гидрологический метод. // Известия Гос. гидрол. ин-та. Т. 57. 1933.
- Динамика ландшафтных компонентов и внутренних морских бассейнов северной Евразии за последние 130000 лет.* М.: Геос. 2002.

Докучаев В.В. Способы образования речных долин Европейской России. СПб: 1878.

Евстигнеев В.М. Речной сток и гидрологические расчеты. М., Изд-во МГУ, 1990.

Квасов Д.Д. Позднечетвертичная история крупных озер и внутренних морей Восточной Европы. Л.: Наука, 1975.

Кортаев В.Н., Сидорчук А.Ю., Тарасов П.Е. Палеогеоморфологический анализ речных дельт Тазовского эстуария // Геоморфология. 1990. №2.

Матвеев Б.В., Панин А.В., Сидорчук А.Ю. Развитие антецедентной долины р. Яны на участке пересечения Куларского хребта // География и природные ресурсы. 1992. № 1.

Морфология и динамика русел рек Европейской части России и сопредельных государств. М-б 1: 2000000. М.: ФСГК РФ. 1999.

Панин А.В., Сидорчук А.Ю., Чернов А.В. Макроизлучины рек ЕТС и проблемы палеогидрологических реконструкций. Водные ресурсы // 1992. №4.

Панин А.В., Сидорчук А.Ю. Геоморфологические свидетельства мощного стока рек Русской равнины в позднем Валдае. Геоморфология на рубеже XXI века. Труды 4-х Шукинских чтений. М: 2000.

Панин А.В., Сидорчук А.Ю., Баслеров С.В. и др. Основные этапы истории речных долин центра Русской равнины в позднем валдае и голоцене: результаты исследований в среднем течении р. Сейм // Геоморфология. 2001. № 2.

Сидорчук А.Ю. Основные этапы формирования рельефа дельты р. Яны. В сб.: Геоморфология и палеогеография Дальнего Востока, Хабаровск, 1975, с.166-180.

Сидорчук А.Ю., О.К. Борисова, Н.Н. Ковалюх и др. Палеогидрология нижней Вычегды в позднеледниковье и в голоцене // Вест. Моск.ун-та. Сер.географич. 1999. № 5.

Сидорчук А.Ю., Борисова О.К., Панин А.В. Поздневалдайские палеорусла рек Русской равнины // Изв. РАН. серия географ. № 6. 2000.

А.Ю.Сидорчук, А.В.Панин, А.В.Чернов и др. Сток воды и морфология русел рек Русской равнины в поздневалдайское время и в голоцене (по данным палеоруслового анализа). В кн.: Эрозия почв и русловые процессы, Вып. 12. М.: Изд-во МГУ. 2000.

Сидорчук А.Ю. Значительный сток воды в поздневалдайской перигляциальной криозоне Восточной Европы и Западной Сибири В кн.: Материалы Второй конференции геокриологов России. Том 3. Региональная и историческая геокриология. М.: Изд-во. МГУ. 2001.

Чалов Р.С. Историческое и палеорусловедение: предмет, методы исследований и роль в изучении рельефа // Геоморфология. 1996. №4.

Чернов А.В., Гаррисон Л.М. Палеогеографический анализ развития русловых деформаций широкопойменных рек в голоцене (на примере верхней и средней Оби) // Бюлл. МОИП, отд. геол. 1981, Т. 5. Вып. 4.

Экспериментальная геоморфология. Вып.2. М.: Изд-во МГУ. 1969.

Dury, G.H. Theoretical implications of underfit streams. US Geological Survey Professional Paper 452-B, Washington. 1965.

Matveev B., Panin A., Sidorchuk A. Rates of formation of forms in a river channel hierarchy: the case of the River Yana in northeast Russia. In.: IAHS Publ № 224. 1994.

Panin A.V., Sidorchuk A. Yu., Chernov A.V. Historical background to floodplain morphology: examples from the East European Plain // Floodplains: Interdisciplinary Approaches. London, Geological Society Special Publications, 163. 1999.

Sidorchuk A., Borisova O., Panin A. Paleohydrology of East European taiga. In. Boletín Goiano de Geografía. V.19 №1. 1999.

Sidorchuk A.Yu., O.K. Borisova, Method of Paleogeographical Analogues in Paleohydrological Reconstructions. Quaternary International. V.72. №1. 2000.

Sidorchuk A., O.Borisova A.Panin. Fluvial Response To The Late Valdai/Holocene Environmental Change On The East European Plain. Journal of Global and Planetary Changes 2001. V. 28. 1-4.

Sidorchuk A., O.Borisova, N.Kovalukh A.Panin. Lateglacial and Holocene palaeohydrology of the lower Vychegda river, western Russia. In: River Basin Sediment Systems: Arcives of Environmental Change. (Eds) Darrel Maddy, Mark G. Macklin & Jamie C. Woodward. Swets & Zeilinger B.V. 2001.

Sidorchuk A., A. Panin, O. Borisova The Late Glacial and the Holocene palaeohydrology of the Northern Eurasia. In: K.J.Gregory and G.Benito (eds). Palaeohydrology: Understanding Global Change. Wiley and Sons, Chichester. 2003.

Sidorchuk A. Floodplain sedimentation: inherited memories. Global and Planetary Change. 39. 1-2. 2003

[В Содержание](#)

## ОСОБЕННОСТИ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА НИЗОВИЙ РЕК В РАБОТАХ Н.И. МАККАВЕЕВА И КОНЦЕПЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЧНЫХ ДЕЛЬТ\*

В.Н. Коротаев

Научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов, вся её деятельность и тех, кто близко с ней связан, есть своеобразный памятник замечательному ученому. Все, кто работает в Лаборатории, - маленькие камушки, из которых сложен этот памятник. Самое удивительное в том, что почти каждый из этих камушков заложен одной рукой – Н.И. Маккавеевым. Так произошло и с *устьевым направлением*, которым как бы завершалась непрерывная цепь взаимосвязанных исследований Лаборатории в системе водосбор – река – устье.

Вопросам формирования речного русла в низовьях и устьях равнинных рек в научном наследии Н.И. Маккавеева уделено относительно небольшое внимание по сравнению с другими разделами учения об эрозионно-аккумулятивном процессе [Маккавеев, 1956, 1955; Маккавеев и др., 1958]. Именно это обстоятельство, очевидно, заставило Н.И. Маккавеева инициировать создание в структуре вновь организованной в МГУ Проблемной лаборатории нового направления, связанного с исследованием морфологии и динамики речных дельт. Привлеченный для этих целей небольшой коллектив специалистов начинал свои работы практически с нуля, хотя у руководителя этого направления был некоторый опыт изучения динамики устьев рек бассейна озера Иссык-Куль [Коротаев, 1966, 1967]. С 1969 г. был пройден долгий и не всегда легкий путь экспедиционных географических исследований в устьях крупных рек арктического побережья Сибири от Оби до Колымы; за последние 10 лет к ним прибавились дельты Волги и Кубани. Многолетний цикл стационарных натурных работ был связан с устьями рек бассейна озера Иссык-Куль [Коротаев, Богомолов, 1988; Коротаев, Султаналиев, 2000].

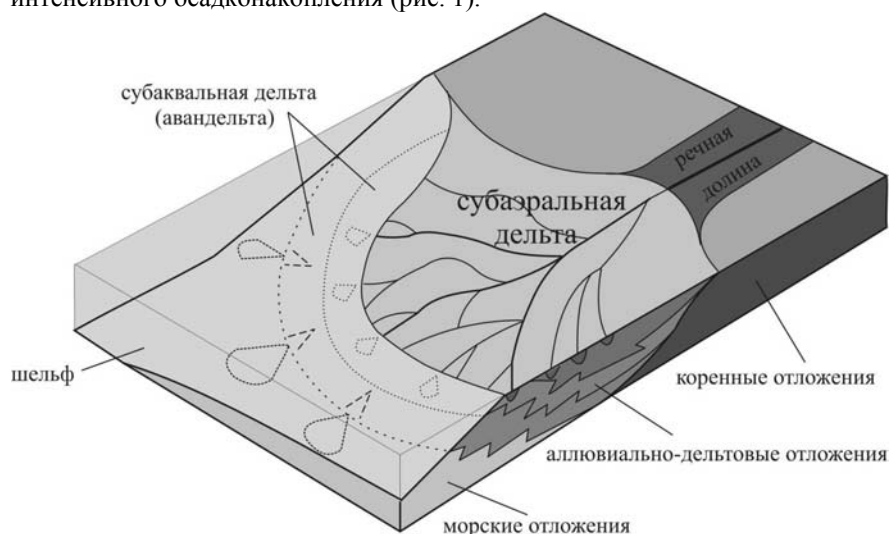
В общем процессе формирования и развития устьев рек *дельтообразование* занимает особое место, связанное с аккумуляцией наносов, накоплением толщи речных отложений, появлением субаэральных и субаквальных аллювиально-дельтовых образований и системы взаимосвязанных водотоков. В настоящее время наиболее известной и разработанной считается *гидролого-морфологическая концепция* развития устьевых областей рек. Её последователи относят к речной дельте *верхнюю надводную часть устьевого конуса реки и гидрографическую сеть, сформированные в результате современных процессов дельтообразования*. Устьевое взморье, где формируются устьевые бары (по определению В.Н. Михайлова – первое

---

\* Выполнено по гранту Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (проект № НШ-1443.2003.5)

морфологическое проявление отложения речных наносов, «зародыш» дельты), не входит в понятие дельты. Такое обособление мелководной субаквальной части устьевой области от внешнего края субазральной дельты имело гидрологические основания. Наибольшее развитие это направление получило в работах В.Н. Михайлова [1977, 1986]. Морфолито-динамические связи и генетическую основу дает геолого-геоморфологический подход в их изучении.

В этом случае речная дельта понимается как формы рельефа земной поверхности и геологическое тело, сформированное рекой в контактной зоне река-море, а затем уже как системы дельтовых водотоков. С позиций динамической геоморфологии к речной дельте следует относить *комплекс субазральных и субаквальных аллювиально-дельтовых и прибрежно-морских аккумулятивных и эрозионных форм рельефа, слагающие их отложения и систему взаимосвязанных водотоков с общим узлом разветвления (вершиной дельты), сформированных рекой и морем за определенный исторический интервал времени в пределах устьевых конуса выноса реки.* С этой точки зрения дельта имеет четкие геоморфологические границы и определенное стратиграфическое положение среди прибрежных фаций в контактной зоне континентального и шельфового седиментогенеза. В понятие дельты включается район распространения устьевых баров, так называемая *авандельта*, наиболее активная часть дельтового конуса и место интенсивного осадконакопления (рис. 1).

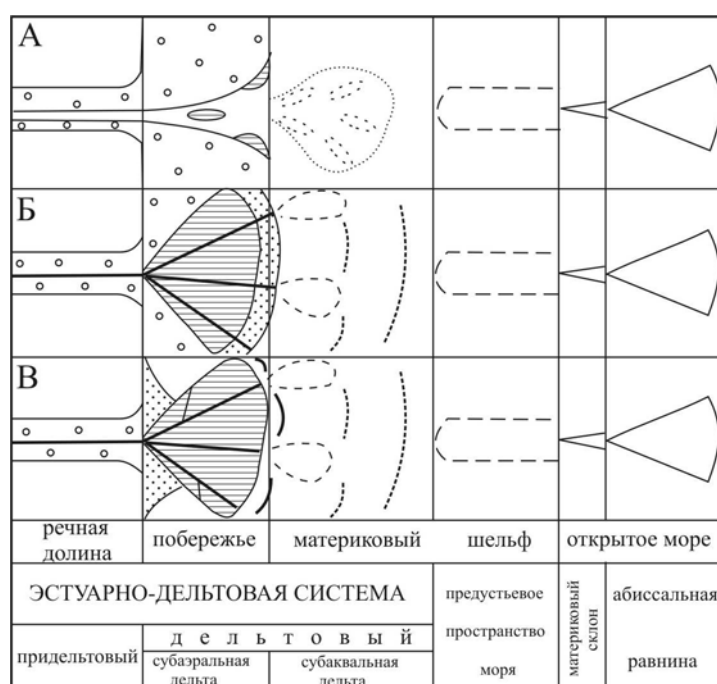


**Рис. 1.** Схема морфологических элементов речной дельты и слагающих ее отложений.

Гидрологическое определение границ устьевой области реки не совпадают с границами объекта геолого-геоморфологических исследований.



Предлагается ввести понятие *эстуарно-дельтовой геоморфологической системы*, которая позволит объединить субэральную дельтовую равнину (активную и отмершие её части), субаквальную мелководную платформу и мористый край прodelьты, где процессы формирования дельтовых фаций сменяются шельфовым седиментогенезом при этом в одном определении объединяются взаимосвязанные в масштабе геологического времени и по ведущему рельефообразующему фактору, но различные по возрасту и литологии части единой природной устьевой геосистемы (рис 2).



**Рис. 2.** Схема районирования эстуарно-дельтовой геоморфологической системы.

В качестве одного из наиболее ярких конкретных примеров различия понятий «устьевая область реки» и «эстуарно-дельтовая геоморфологическая система» используем данные последних исследований по Нижней Волге [Коротаев, Чернов, 2001; Нижняя Волга..., 2002]. Верхняя граница устьевой области Волги совпадает с вершиной современной дельты, а нижней служит внешний край устьевое взморья, оконтуренный 5-метровой изобатой [Устьевая область, 1998]. Эстуарно-дельтовая геоморфологическая система Волги включает в себя придельтовый участок долины Волги, собственно дельту и часть шельфа Северного Каспия, где кроме современ-

ных аллювиально-дельтовых отложений сохранились остатки волжских палео-дельт (рис. 3). Аккумулятивными аналогами позднехвалынских и новокаспийских палео-дельт в низовье Волги являются остатки древних пойм в пределах Волго-Ахтубинского участка долины Волги (ахтубинская, харабагинская, замьянская и астраханская), сформированные за последние 12-14 тыс. лет [Геоморфологическая..., 2002; Коротчаев, Чернов, 2001], а также древние плейстоценовые дельты, расположенные на внешнем крае шельфа Северного Каспия на глубине 25-50 м [Лохин, Маев, 1990].

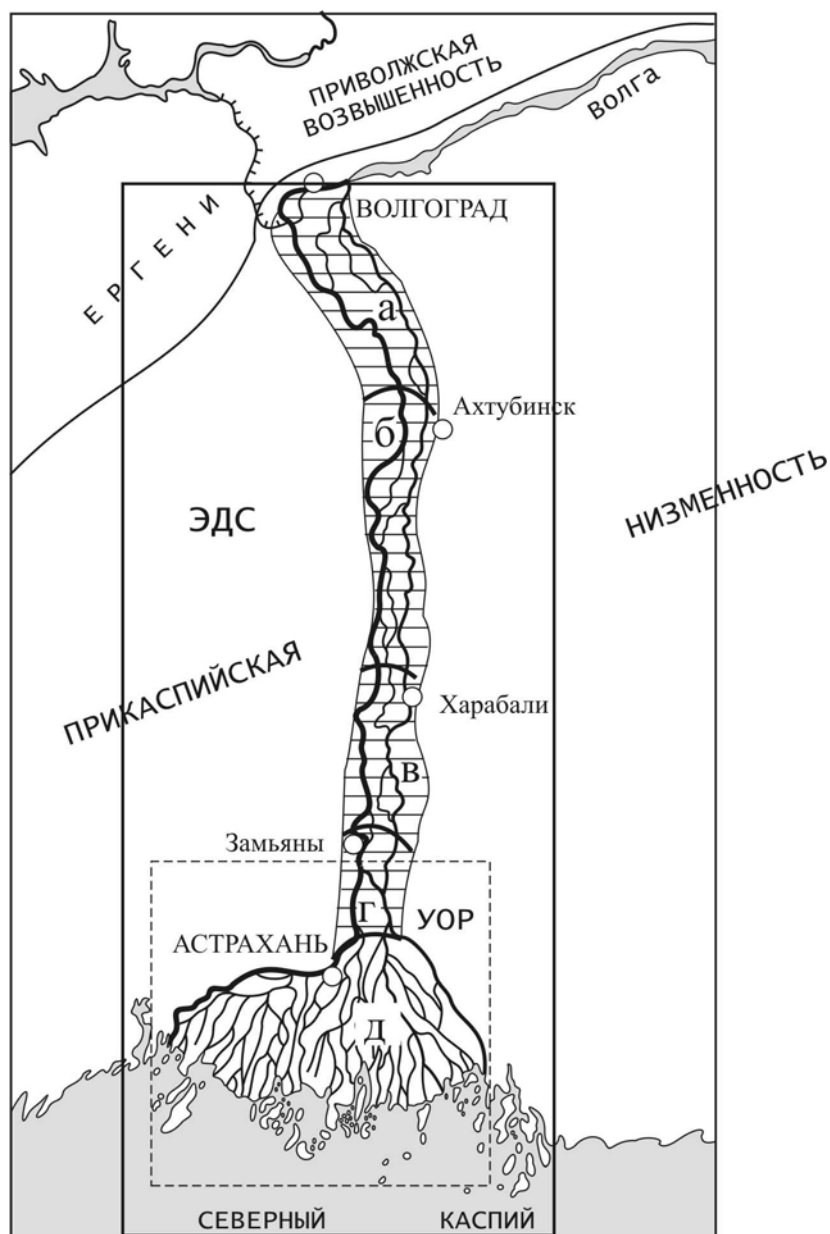
В основе **геоморфологической концепции** формирования эстуарно-дельтовых систем лежат положения о руководящей роли структурно-геологических условий побережья, колебаний уровня приемного водоема и эволюционном развитии речных дельт.

*Геологический и геоморфологический контроль* процесса формирования основных морфогенетических типов эстуарно-дельтовых систем проявляется в изрезанности береговой линии, топографии подводного склона и местных особенностях относительного колебания уровня приемного водоема.

Как правило, крупные речные долины во все геологические эпохи были приурочены к прогибающимся участкам земной коры, которые заливались морем в периоды преобладания на платформах морских условий. Трансгрессивное наступление моря прежде всего осуществлялось по речным долинам. В регрессивные фазы реки прокладывали путь на месте бывших морских заливов, продвигаясь вслед за береговой линией. Анализ материалов по многим рекам мира подтверждает тезис Б.Л. Личкова о взаимообусловленности положения и сопряженности развития аллювиальных равнин и морских заливов. Очевидно, и для эстуарно-дельтовых систем, являющихся конечным звеном в речной системе, присущи эти общие закономерности, т.е. полное соответствие речной сети складчатым и разрывным тектоническим структурам, которые определяют многие закономерности ее строения и развития. Крупные реки и их эстуарно-дельтовые системы, как правило, отражают направление основных структурных линий: глубинных разломов, крупных флексур и тектонически ослабленных обширных зон в пределах однородных по характеру развития и более устойчивых во времени геологических структур [Морфоструктурный..., 1979].

В.В. Докучаев и Г. Креднер еще в конце XIX века установили зависимость существования или отсутствия дельт на морском побережье от характера и знака вертикальных движений земной коры. Идеи Г. Креднера и сейчас находят поддержку у многих исследователей, которые наличие речной дельты связывают прежде всего с положительными тектоническими движениями.

В.В. Докучаев впервые высказал более рациональную и плодотворную мысль о том, что вертикальные движения могут только усложнить устьевые процессы, но не являются обязательным условием для образования дельты.



**Рис. 3.** Схема соотношения эстуарно-дельтовой геоморфологической системы (ЭДС) и устьевой области реки (УОР) в низовье Волги. А-Г – генерации Волго-Ахтубинской поймы и палео-дельт; Д – дельта Волги.

В упрощенном виде его идеи воплотились в работах В.Г. Рихтера, который образование дельт, их форму и дальнейшее развитие связывал с соотношением между интенсивностью и направленностью новейших тектонических движений и количеством выносимого рекой материала, выделяя два основных типа дельт – на поднимающихся и на опускающихся побережьях.

Современная береговая зона всех окраинных морей и открытых океанических побережий сформировалась в ходе послеледниковой трансгрессии Мирового океана. Большинство крупных рек 5-7 тыс. лет назад впадало в долинныя заливы (эстуарии, риасы), форма, размеры и глубины в которых зависели от рельефа затопленной суши, обусловленного в свою очередь структурно-тектоническими особенностями шельфа. Закономерным итогом этих событий явилось формирование на побережьях эстуарно-дельтовых систем по типу долинного залива или устьевой лагуны и различных модификаций дельт выполнения. Напротив, появление на современных побережьях дельтовых систем выдвижения свидетельствовало об аномальных причинах развития эстуарно-дельтовых систем, к которым можно отнести либо очень большой сток наносов (более 100 млн. т/год), либо преобладание в низовьях рек восходящих тектонических движений, нивелирующих эффект эвстатического поднятия уровня и создающих условия для впадения рек на открытом морском побережье (реки Эбро, Юкон, Колумбия, Лена и другие).

Если в пределах однотипного по морфологическому строению шельфа (например, арктического) крупные реки, имеющие примерно одинаковый сток воды и наносов (Лена и Енисей, Оленек и Яна, Колыма и Индигирка), формируют эстуарно-дельтовые системы различного типа, то это свидетельствует о неодинаковой направленности неотектонических движений и различиях в структурно-тектоническом строении территории. То-есть, речь идет о *геологическом контроле* основных морфогенетических типов эстуарно-дельтовых систем [Коротаев, 1991]. Так, в устьях рек, расположенных в зонах устойчивого и длительного прогибания (например, северная часть Западно-Сибирской низменности, Нижнеамурская депрессия, Днепровско-Донецкий прогиб), имеющих небольшие уклоны водной поверхности в низовьях (0,015-0,055 ‰), образовались далеко вдающиеся в сушу заливы, имевшие длину в максимум послеледниковой трансгрессии от 200 до 1000 км (Колымская, Енисейская, Обская и Печорская губы). В современном рельефе таким участкам побережья соответствуют хорошо разработанные террасированные долины рек, ингрессионные заливы и продолжающие их подводные долины до морских глубин 100-200 м, заканчивающиеся на океанических побережьях глубоководными конусами выноса (Амазонский, Конгский, Св. Лаврентия).

Иной облик имели устья рек, располагавшиеся в областях развития молодых складчатых сооружений, где побережье испытывало дифференцированные тектонические движения, а в низовьях рек уклоны водной по-

верхности составляли 0,15-0,9 ‰. Морские трансгрессии здесь в позднем плейстоцене имели ограниченное распространение: длина долинных заливов не превышала 100 км, а в некоторых случаях суженные участки долин прорыва через приморские хребты переходили непосредственно в устьевые расширения русел на открытом побережье (реки Лена, Оленек, Эбро, Колумбия).

Этим двум основным тектонически обусловленным типам сопряжения реки и моря соответствовали вполне определенные морфогенетические типы дельт: в первом – дельты выполнения заливов (эстуариев, риас, лиманов), во втором – дельты выдвигения на открытом взморье или дельты выполнения устьевых лагун. Сложная ритмика колебаний общей увлажненности материков и уровня Мирового океана в недавнем прошлом, перемещения блоков земной коры в зависимости от изостатической нагрузки (гляцио-, гидро-, седименто- и техногенная изостазия), многолетние колебания водности рек и неравномерность стока наносов, – все это затрудняет выделение собственно тектонического фактора из общего суммарного эффекта различных природных факторов, оказывающих влияние на формирование эстуарно-дельтовых систем. Поэтому показателем влияния геологических структур на морфологическое строение эстуарно-дельтовых систем могут быть только самые общие закономерности, отражающие наиболее крупные этапы их эволюции.

Тектоническая нестабильность района аккумуляции речных наносов на морском побережье является важным рельефообразующим фактором. Однако, в большинстве случаев не всегда возможно выявить прямую связь морфологического строения дельты и процессов дельтоформирования с интенсивностью и направленностью древних, новейших или современных тектонических движений. Конечный интегрированный результат взаимодействия в природной геосистеме «река-море-тектоника» зависит от соотношения размеров эстуарно-дельтовой системы, масштабов тектонической структуры и геологической истории развития, в пределах которой функционирует данная система. В пределах мегапрогибов, имеющих унаследованную тенденцию к опусканию, могут возникать локальные зоны новейших и современных поднятий, например, типа соляной тектоники, гляциоизостазии, разрывных нарушений – разломов, сбросов, трещин. Все это несомненно находит непосредственное выражение в направленности и интенсивности процессов дельтообразования. Так, например, вся плейстоценовая история Западно-Сибирской равнины – это история ее равномерного прогибания, выравнивания и погребения палеозойского и триасового рельефа под более поздними покровными осадочными толщами. Красной нитью через всю историю геологического развития Земли проходит идея унаследованности неогеновых и антропогеновых речных систем тектоническим структурам: главные долины Западной Сибири приурочены к отрицательным тектоническим структурам (мегапрогибам, рифтовым зонам, глубинным разломам). Ярким примером влияния тектоники на характер процессов

дельтоформирования является история развития голоценовой дельты р. Лены. Здесь грабенообразным понижениям на территории Приморской низменности соответствуют дельты выполнения долинных заливов вдоль Оленекской и Быковской протоков, а областям локальных поднятий – дельты выдвигания аллювиальных конусов выноса протоков Туматской, Трофимовской и Сардахской.

В целом следует согласиться с тезисом, что в развитии современной гидрографической сети большинства эстуарно-дельтовых систем новейшая тектоника значительной роли не играет вследствие несоизмеримости скорости русловых процессов и тектонических движений. Геологические условия в пределах эстуарно-дельтовых систем и в области континентального шельфа влияют на процессы дельтообразования в глобальном масштабе, определяя характер изрезанности береговой линии, уклоны подводного склона и местные особенности колебания уровня моря. Геометрические условия сопряжения устья реки и моря (залив, лиман, лагуна, открытое взморье), связанная с геологической историей развития региона, во многом определяет геоморфологический тип эстуарно-дельтовой системы и ее стратиграфию как геологического тела. От этого зависят общие закономерности циклического развития эстуарно-дельтовых систем, формирующихся либо как открытые системы дельт выдвигания, либо как закрытые (или полузакрытые) системы дельт выполнения эстуариев, долинных заливов, лиманов и устьевых лагун.

Второе положение концепции – о *гидрологическом контроле* проявляется в трансгрессивном или регрессивном характере развития эстуарно-дельтовых систем в зависимости от колебаний фонового уровня приемного водоема. При *стабильном* уровне на открытом побережье формируется выдвинутая дельтовая система. Размеры и форма дельтового конуса, геоморфологические структуры субаэральной части дельты и виды устьевого удлинения определяются характеристиками речного стока, уклонами подводного склона и активностью морских факторов (волнение, течения, приливы). Эстуарно-дельтовые, эстуарно-лиманские, эстуарно-лагунные системы и все модификации дельт выполнения являются естественным итогом развития устья реки в ходе трансгрессии моря. В этих условиях осуществляется коренная перестройка гидрографической сети, подтопление и разрушение морского края дельты и перемещение дельтового тела в сторону суши. Размеры долинных заливов определяются уклонами водной поверхности в низовьях рек. Регрессивный характер развития морских побережий связан с различными стадиями формирования дельт выдвигания. Особенности рельефа подводного склона (наличие реликтовой подводной долины) могут привести к формированию на определенной стадии снижения уровня дельты выполнения.

Влияние колебательных движений фонового уровня моря на геоморфологический режим низовий равнинных рек довольно детально исследовал Н.И. Маккавеев [1951], полемизируя с Дэвисом. Один из постулатов

теории Дэвиса о циклах речной эрозии декларирует прямую зависимость процессов аккумуляции и эрозии в речных руслах от относительного изменения базиса эрозии. Согласно ему, в руслах рек при поднятии базиса эрозии (трансгрессии) на значительном протяжении вверх по течению происходит аккумуляция и поднятие дна. При понижении базиса эрозии (регрессии) развивается глубинная эрозия также на значительном протяжении вверх по течению. Н.И. Маккавеев, подтверждая в целом тесную функциональную связь между изменениями базиса эрозии и геоморфологическим режимом низовья реки, не признавал универсальность идей Дэвиса.

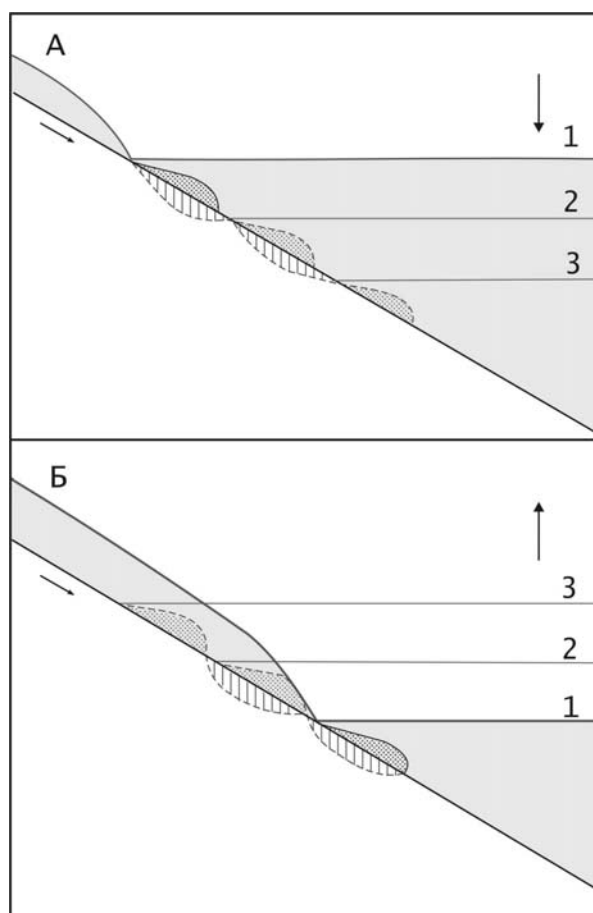
Многолетние наблюдения за динамикой продольного профиля Волги от Волгограда до авандельты и продольного профиля Терека на устьевом участке [Гидрология..., 1993; Нижняя Волга, 2002] показали, что процессы формирования низовий рек отличаются необычайной сложностью и во многом зависят от конкретных природных условий и местных факторов руслоформирования. Неустойчивость уровня Каспийского моря в историческое время позволяет довольно объективно оценить влияние изменений базиса эрозии на эрозионно-аккумулятивные процессы Нижней Волги, направленность которых во многом зависит от характера изменения местных факторов, влияющих на уклон водной поверхности.

В период длительного понижения уровня Каспийского моря (регрессии мангышлагская, дербентская и современная) наблюдалось устойчивое врезание Волги в русловые и прибрежно-морские отложения (рис.4А). Однако, вопреки схеме Дэвиса, глубинная эрозия не распространялась вверх по течению, а наоборот перемещалась вслед за понижавшимся уровнем Каспия. Во время каспийских трансгрессий (махачкалинская, все новокаспийские стадии и современная), когда море проникало далеко вверх по речной долине, происходила коренная перестройка продольного профиля, особенно на приустьевом участке реки, размыв и смещение дельты вверх по течению (рис.4Б). В результате подпорного влияния трансгрессирующего моря на придельтовом участке реки происходила аккумуляция наносов и поднятие дна в соответствии со схемой Дэвиса. В рассматриваемых случаях большое значение имеют уклоны дна в пределах авандельты: 1) при уклонах более 0,010-0,015 (в тангенсах) реакция продольного профиля реки на изменение базиса эрозии происходит синхронно колебательным ритмам фонового уровня моря; 2) при уклонах дна менее 0,0020-0,0025 наблюдается длительное запаздывание реакции речного русла на изменение базиса эрозии.

Третье положение геоморфологической концепции – об *эволюционном развитии эстуарно-дельтовых систем* – предусматривает постепенное усложнение их геоморфологического строения от простого аллювиального выступа до полигенетической аллювиально-дельтовой равнины.

Современные эстуарно-дельтовые осадочные и геоморфологические системы сформировались на побережьях Мирового океана за последние 5-7 тыс. лет в заключительную фазу послеледниковой трансгрессии.

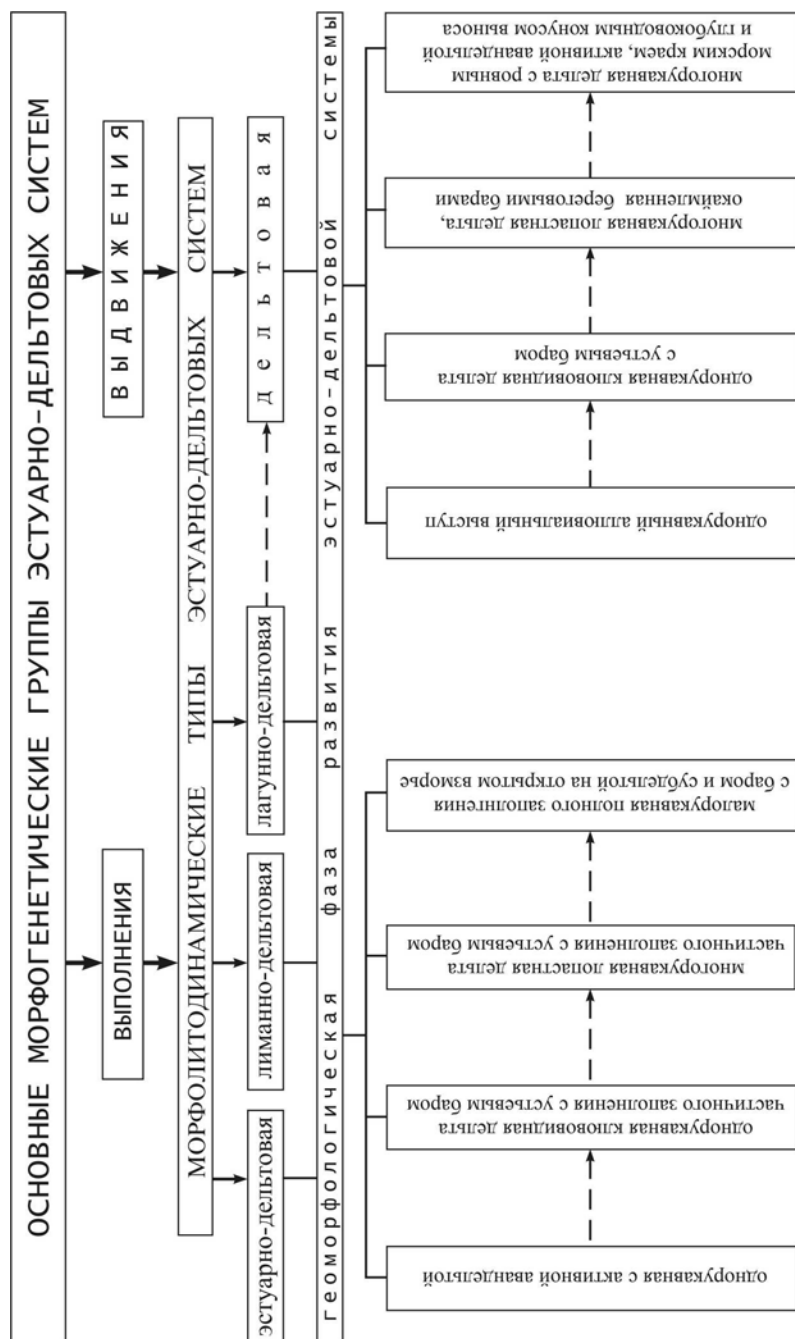
Поэтому наиболее распространенным типом эстуарно-дельтовых систем являются различные модификации *выполнения долинного залива или устьевой лагуны*. Одни реки успели создать в устьях разветвленную гидрографическую сеть, заполнить долинные заливы и выдвинуться в открытое море.



**Рис. 4.** Схема деформации продольного профиля реки на устьевом участке при изменении базиса эрозии. *А – уровень опускается; Б – уровень поднимается.*

Другие – только начинают формировать подводный устьевой конус выноса и сеть дельтовых водотоков. Несмотря на геологическую молодость современных эстуарно-дельтовых систем, с гидролого-морфологической и русловой позиций они представляют собой сложившиеся природные устье-





вые геосистемы, в которых интенсивность первичного дельтообразования (барообразования) менее заметна и ограничена приморской зоной дельт и акваторией устьевого взморья. Основные изменения в дельтах, за исключением процессов устьевого удлинения, определяются вторичными русловыми переформированиями. Стабилизация уровня океана в течение последних 1500 лет создала условия для создания относительно равновесных эстуарно-дельтовых систем на открытых побережьях. В относительно закрытых долинных заливах продолжается формирование современных дельтовых разветвлений и медленное заполнение эстуариев.

Идея эволюционного развития эстуарно-дельтовых геоморфологических систем может быть представлена в виде их морфогенетической классификации и стадийности формирования (рис.5). Сложившиеся на океанических и морских побережьях основные морфогенетические группы эстуарно-дельтовых систем (выполнения и выдвигения) и их морфолито-динамические типы (эстуарно-дельтовая, лиманно-дельтовая, лагунно-дельтовая и дельтовая) имеют внутри себя чрезвычайно разнообразные модификации, зависящие от сочетания природных факторов, контролирующих дельтообразование (речной сток, волновая активность, высота приливов, морфология шельфа и новейшая тектоника). Эти же причины определяют фазы и стадии развития эстуарно-дельтовых систем.

#### ЛИТЕРАТУРА

*Бабич Д.Б., Кортаев В.Н., Магрицкий Д.В., Михайлов В.Н.* Нижняя Индигирка: устьевые и русловые процессы. М.: ГЕОС, 2001.

*Геоморфологическая карта Волго-Ахтубинской поймы.* Москва-Утрехт (Нидерланды), 2002.

*Гидрология устьев рек Терека и Сулака.* М.: Наука, 1993.

*Кортаев В.Н.* Режим устьевых областей рек Иссыккульского бассейна // Изв. Киргизского географического об-ва. Фрунзе: Илим, 1966. Вып.6.

*Кортаев В.Н.* Береговая зона озера Иссык-Куль. Фрунзе: Илим, 1967. 155 с.

*Кортаев В.Н.* Геоморфология речных дельт. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1991.

*Кортаев В.Н., Богомолов А.Л.* Дельты малых рек как природные модели процессов дельтообразования. В кн. Физико-географ. исследования озера Иссык-Куль и его берегов. Фрунзе:Илим, 1988.

*Кортаев В.Н., Султаналиев Э.Н.* История формирования и современная динамика устьев рек бассейна озера Иссык-Куль // Эрозия почв и русловые процессы. Вып.12. М.: Изд-во МГУ. 2000.

*Кортаев В.Н., Чернов А.В.* Формирование Волго-Ахтубинской поймы и палео-дельт р. Волги в позднем плейстоцене и голоцене // Эрозия почв и русловые процессы. Вып.13. М.: Изд-во МГУ. 2001.

*Лохин М.Ю., Маев Е.Г.* Позднеплейстоценовые дельты на шельфе северной части Среднего Каспия / Вест. Моск. ун-та. Сер.5. География. 1990. №3.

*Маккавеев Н.И.* Особенности формирования русла в низовьях равнинных рек//Проблемы физической географии. Вып.16. 1951.

*Маккавеев В.Н.* Русло реки и эрозия в ее бассейне. – М.: Изд-во АН СССР, 1955.

*Маккавеев В.Н.* О влиянии снижения уровня Каспийского моря на судоходные условия в низовьях Волги и Урала. В кн. Русловые исследования для улучшения судоходных условий. М.: Речиздат, 1958.

*Михайлов В.Н.* Гидрологические процессы в устьях рек. М.: ГЕОС, 1997.

*Михайлов В.Н., Rogov В.В. и др.* Динамика гидрографической сети неприливых устьев рек. М.: Гидрометеиздат, 1977.

*Михайлов В.Н., Rogov В.В., Чистяков А.А.* Речные дельты (гидролого-морфологические процессы). Л.: Гидрометеиздат, 1986.

*Морфоструктурный анализ речной сети СССР.* М.: Наука, 1979.

*Нижняя Яна: устьевые и русловые процессы.* М.: ГЕОС, 1998.

*Нижняя Волга: геоморфология, палеогеография и русловая морфодинамика.* М.: ГЕОС, 2002.

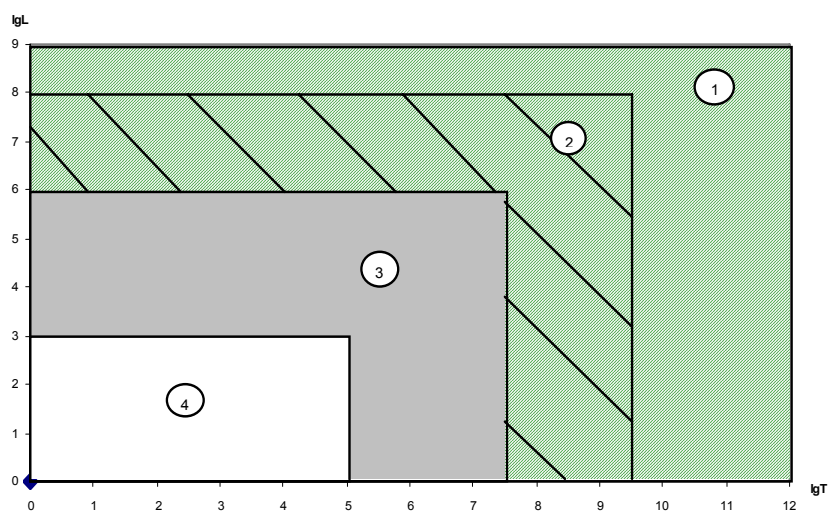
*Устьевая область Волги: гидролого-морфологические процессы, режим загрязняющих веществ и влияние колебаний уровня Каспийского моря.* М.: ГЕОС, 1998.

[В Содержание](#)

## СООТНОШЕНИЕ ОБЩИХ И ЧАСТНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАЗВИТИЯ ДЕЛЬТЫ ВОЛГИ\*

Н.И. Алексеевский, Д.Н. Айбулатов

Эрозионно-аккумулятивные процессы на склонах бассейнов, в сети временных и постоянных водотоков, в дельтах рек прослеживаются на коротких участках водотоков и за время, не превышающее 1 год, охватывают территории с радиусом 100 км и более и проявляются в многолетних, исторических и геологических масштабах времени (рис. 1). В зависимости от этого изменяется методология изучения процессов, закономерности эволюции гидрологических объектов. Использование одинаковых средств выявления этих закономерностей приводит к потере информации, связанной с излишней генерализацией изучаемых объектов и процессов или излишней детализацией, затрудняющей выявление тенденций их развития. Это положение справедливо для любых эрозионно-аккумулятивных систем. В частности, оно подтверждается анализом общих и частных закономерностей развития устьев рек.



**Рис. 1.** Дифференциация гидролого-морфологических процессов по их пространственной и временной изменчивости (геологические (1), вековые (2), многолетние и межгодовые (3), сезонные и внутрисезонные (4), текущие (5) масштабы времени)

\* Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект №03-05-64306), Гранта Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (НШ-1443.2005.5, Программы «Университеты России»)

Специфика гидролого-морфологических процессов в устьях рек четко увязана с соотношением пространственных и временных масштабов, в которых они прослеживаются. Она обусловлена зависимостью между характерными линейными размерами объектов в устьевой области реки, периодами времени  $T$  изменения их состояния и скоростью указанных изменений  $V_x = L/T$ . Транзит взвешенных частиц с диаметром  $\leq 1$  мм занимает интервал времени от 1-5 до  $10^5$  с. При этом  $V_x$  совпадает с величиной скорости потока воды. Для дельты, морской край которой отстоит от вершины на 100 км, он возрастает до 100 лет ( $T = 10^8$ - $10^9$  с). Характерная же скорость процесса изменится от 1 до 1500 м/год [Михайлов, 1971]. Устойчивые тенденции вертикальных и горизонтальных деформаций на участках дельтовых водотоков прослеживаются на интервалах времени  $T = 1 - 10^8$  с. Их скорость составляет несколько сантиметров и метров. Интервал  $10^5 < T < 10^7$  с соответствует циклическим переформированиям поверхности дна, связанным с движением грядовых форм руслового рельефа. Наиболее крупные из них перемещаются со скоростью 1-450 м/год [Чалов, 1979], а небольшие – со скоростью больше 1 м/сут. Гидролого-морфологические процессы относятся к внутрисезонным, если  $T < 10^6$ - $10^7$  с. Граница между внутрисезонными и сезонными изменениями в состоянии дельт соответствует условию  $T \approx 10^6$ - $10^7$  с. Они характеризуют динамику объема русловых отложений, темпы и направленность русловых деформаций, интенсивность устьевого удлинения русла. Межгодовая изменчивость морфологических процессов отражает тенденции активизации отступления участков морского края дельты.

В геологических масштабах времени эволюция дельты сопоставима с поведением материальной точки, динамика которой обусловлена балансом действующих на точку сил. Развитие дельты тесно связано с процессами трансгрессии и регрессии моря, вызывающими изменение положения вершины дельты в пространстве и во времени, а также аккумуляцией речных и морских наносов. Интенсивность смещения дельты контролируется соотношением речных, морских и геоморфологических факторов. В исторических и геологических масштабах времени решающее значение имеет также тектонический фактор. При исследовании многолетней динамики устьевых процессов роль всех этих факторов сохраняется. Одновременно существенно возрастает роль речных факторов. Они определяют направленность и интенсивность смещения морского края дельты в соответствующих масштабах времени. При этом роль транспорта отдельной частицы наносов не имеет особого значения. Процесс ее перемещения в данный момент времени имеет важное значение для местного изменения расхода взвешенных и влекомых наносов, который не приводит к решающему изменению тенденций развития русла отдельного водотока или его участка.

Методической основой изучения устьевых процессов в различных масштабах времени и пространственных уровнях реализации является анализ уравнения баланса и дисбаланса наносов [Алексеевский, 1998]. При

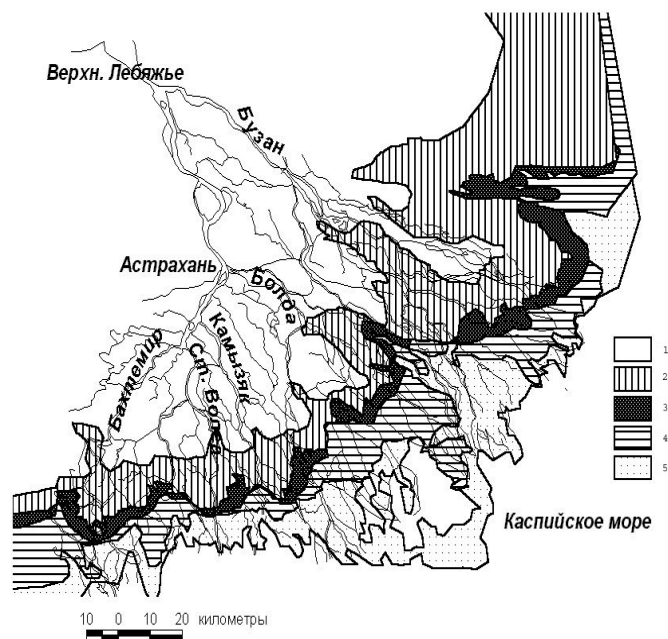
этом, независимо от масштабов времени эти уравнения связывают причины и следствия изменения стока наносов (при неизменном положении речной границы дельты). В частности, активное выдвигание дельты связано с результирующей баланса наносов, характеризующей разность между их стоком на морском крае дельты (МКД)  $W_2$  и в вершине дельты  $W_1$ .

$$\Delta W = W_2 - W_1 = -\Delta W_0 \quad (1)$$

Если  $\Delta W < 0$ , то в пределах дельты доминирует аккумуляция речных наносов  $W_a$ . В результате изменяется объем отложений в устье реки ( $\Delta W_0 > 0$ ) и дельта выдвигается. Такой механизм эволюции дельт называют активным [Михайлов, 1971]. Альтернативой этому механизму является пассивное выдвигание МКД. Оно связано с понижением уровня приемного водоема. В данном случае МКД смещается в сторону моря со скоростью, не зависящей от величины  $\Delta W$ , связанной с величиной понижения (или повышения) уровня водоема, морфологией устьевоего взморья. Соотношение между рассмотренными механизмами эволюции дельт весьма изменчиво. Оно зависит от наличия или отсутствия связи приемного водоема с Мировым океаном, мутности речных вод и других факторов. Для внутренних водоемов, отмелого устьевоего взморья и при небольшой мутности речных вод определяющей является роль морских факторов. Такая ситуация характерна, в частности, для устьевой области Волги.

Эволюция дельты этой реки [Айбулатов, 2003] показала (рис. 2), что в 1817-1868 гг. снижение уровня моря было небольшим (0,15 м). МКД при этом смещался в сторону моря со скоростью 0,1-0,3 км/год. Площадь дельты увеличилась в 1,5 раза. С 1868 по 1920 гг. уровень моря понизился на 0,64 м. Выдвигание дельты (0,10 км/год), тем не менее, замедлилось (в два раза по сравнению с предыдущим периодом). В 1920-1935 гг. понижение уровня моря ( $C_M = 0,026$  м/год) вызвало увеличение площади дельты на 170 км<sup>2</sup>. Выдвигание дельты оказалось квазиравномерным по всем направлениям (0,1 км/год). В 1935-1941 гг. уровень моря понижался со скоростью 0,19 см/год. Интенсивность выдвигания МКД также возросла (1,1 км/год). Максимальные скорости выдвигания дельты (1,8 км/год) были присущи восточному сектору дельты Волги, где уклон взморья достигал минимальных значений. Особенности рельефа устьевоего взморья при  $H = (-26,5) - (-27,8)$  м абс. (Михайлов и др., 1986) и темпы снижения уровня моря привели к тому, что скорость нарастания площади дельты во время снижения уровня моря в 1941-1978 гг. на 1,11 м уменьшилась в 1,5-2 раза по сравнению с предшествующим периодом. Выдвигание МКД происходило со скоростью 0,3 км/год. В 1978-1998 гг. подъем уровня моря на 2 м привел к уменьшению площади дельты примерно на 900 км<sup>2</sup>. Существенного изменения в положении МКД при этом не произошло, поскольку контуры дельты в повышенной зоне приморского района дельты определены предшествующей историей увеличения высоты поверхности дельты, а не подъемом

уровня моря в диапазоне  $(-29,0) - (-27,0)$  м абс. В пределах отмелого взморья Волги повышение отметок поверхности воды сдерживалось увеличением площади затопляемой территории.

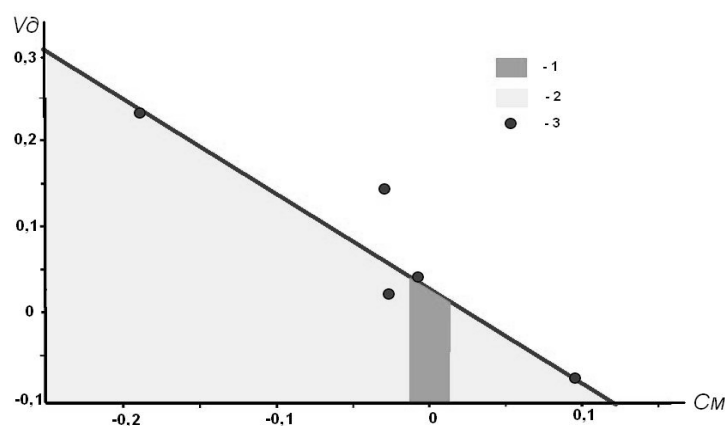


**Рис. 2.** Эволюция дельты Волги в 1817-2003 гг. Сформировавшиеся участки дельты: 1 – до 1817 г.; 2- за 1817-1868 гг.; 3 – за 1868-1920 гг.; 4 – за 1920-1941 гг.; 5 – за 1941-1978 гг.

В этих условиях средняя скорость выдвижения дельты Волги, равная отношению изменения ее площади  $\Delta F$  к средней длине МКД  $L_{cp}$  за период времени  $dt$ , т.е.  $V_D = \frac{\Delta F}{L_{cp} dt}$  зависит от сочетания механизмов

эволюции дельты. При малом изменении уровня моря ( $C_M = 0$ ) доминирует (рис. 3) активное выдвижение дельты. В среднем оно равно 0,02-0,03 км/год. При больших изменениях уровня ( $C_M > 0,035$  м/год) скорость выдвижения дельты определена механизмом пассивного увеличения ее площади. Если при  $C_M = -0,05$  м/год пассивное выдвижение обуславливает 70% годового смещения МКД, то при  $C_M = -0,15$  м/год его значимость достигает 90%. При повышении уровня моря ( $C_M > 0$ ) величина  $V_D$  характеризует уменьшение площади дельты вследствие затопления островов на устьевом взморье реки.

Одновременно с изменением площади дельты изменяется объем отложений в ее пределах  $W_0$ . Поскольку рельеф дна морского залива относительно стабилен, уровень Каспийского моря изменяется за большие промежутки времени  $T$  в среднем с одинаковой скоростью, то  $W_0 = aT + b$ , где  $a = 103$  млрд. т,  $b = 0,633$  млрд. т/год. Величина  $a$  характеризует объем послехвалынских отложений, сформировавшихся до 1817 г. В дельте Волги объем послехвалынских отложений с 1817 по 1978 гг. постепенно увеличивался (рис. 4). К 1998 г. он незначительно уменьшился вследствие трансгрессии моря.



**Рис. 3.** Зависимость скорости выдвижения дельты Волги ( $V_d$ , км/год) от изменения уровня Каспийского моря ( $C_m$ , м/год). 1 – при доминировании речных и 2 – морских факторов; 3 – фактические данные.

При переходе к анализу меньших масштабов пространственно-временной изменчивости устьевых процессов на первый план выходят процессы, связанные с неравномерностью развития отдельных районов дельты. Одни из них имеют большую скорость выдвижения, другие меньшую. Этот аспект характеризует изменение ширины водотоков на единицу площади дельты за разные интервалы времени. Степень развитости сети водотоков в устье можно оценить по отношению  $D = F_p/F$ , где  $F_p$  – суммарная площадь свободной поверхности всех рукавов, находящихся на площади дельты  $F$ . Увеличение  $D$  означает, что существовавшая ранее система водотоков была не способна пропустить поступающий сток без выхода воды на поверхность дельты. Возникающие при этом новые рукава обуславливали возрастание  $F_p$  и  $D$ . Сокращение суммарной ширины водной поверхности, уменьшение параметра  $D$  соответствовало концентрации стока в ограниченном числе рукавов. За 1920-1978 гг. (этап понижения уровня моря) параметр  $D$  значительно изменялся по пространству дельты. Причина изменения  $D$  заключалась в процессах перераспределения стока в системах рукавов. На этапе резкого (2,3 м) повышения уровня моря (1978-

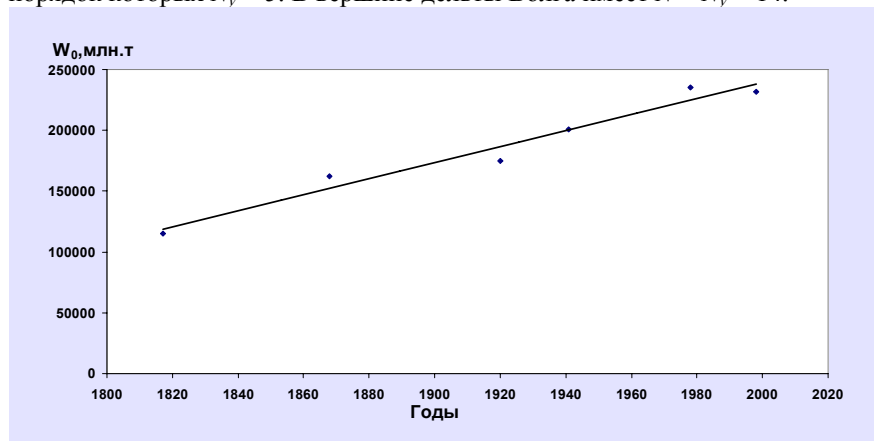


1995 гг) значительных изменений  $D$  не произошло. Зоны повышенных значений  $D$  сместилась ближе к МКД. Отсутствие реакции величины  $D$  на повышение уровня моря объясняется блокирующей функцией отмелого взморья Волги и доминированием речных факторов в изменении структуры дельтовых водотоков. Неравномерность развития дельты характеризует скорость выдвижения отдельных водотоков. За последние 500 лет это отразилось в изменении и тенденции развития различных их систем. Особые формы проявления устьевых процессов прослеживаются на уровне отдельных водотоков. Они определяются активизацией, заилинием или динамической стабильностью их русел. В дельте Волги на долю отмирающих, находящихся в устойчивом состоянии и активизирующихся (за последние 30 лет) водотоков приходится, соответственно, 65, 24 и 11% их общего числа. Увеличение размера водотока обычно соответствует повышению вероятности возникновения динамически стабильного состояния русла или его размыва. Чем меньше водоток, тем больше (в 1,5-2 раза) вероятность его отмирания (прочие условия равны). Наиболее часто в дельте отмирают водотоки, водоносность которых соответствует элементам русловой сети, имеющими местное название «ерики» и «протоки» [Русловые процессы..., 1997]. В настоящее время заливается 78 и 64% их общего числа. Количество активизирующихся малых водотоков в дельте Волги весьма мало.

Распределение водотоков (с разной тенденцией развития) по основным системам стока в дельте Волги неравномерно. В системах Бузана, Камызяка и Бахтемира количество активизирующихся водотоков больше, чем в системе Болды и Старой Волги. Если водотоки Болды и Старой Волги лишь в 3% случаев являются активизирующимися, то в системе Камызяка их число возрастает до 18%, что связано с особенностями перераспределения стока воды. Чем больше доля общего стока концентрируется в системе, тем больше процент активизирующихся водотоков в этой системе. Система Старой Волги и Болды включает максимальное число отмирающих водотоков - 73-82%. В системе Бахтемира водотоков с устойчивым руслом относительно мало (11%) и много (76%) заиляющихся водотоков. Возможно, это связано с искусственным углублением Бахтемира.

Из проведенного анализа следует, что специфика гидролого-морфологических процессов в значительной степени зависит от размера водотоков. Для его определения недостаточно качественного выделения в структуре водотоков таких элементов, как «рукав», «протока», «ерик», «банк» и т.п. Более того, их использование часто дает ошибочное представление о размере водотока. Для его объективной оценки необходимо использовать понятие "условный порядок водотока"  $N_y$ . Он соответствует [Русловые процессы..., 1997] порядку реки (в понимании Р. Хортон [1948]), имеющему расход воды или ширину русла  $B$ , совпадающие с аналогичными характеристиками дельтовых водотоков. Сопоставление существующих категорий водотоков и значений  $N_y$  позволяет обнаружить их соответствие.

В дельте Волги «рукава» имеют условный порядок, изменяющийся от 10 до 12. «Протокам» отвечает меньшая величина  $N_y = 7-9$ . Для «банков» характерно, что  $N_y = 5-6$ . Ерики - наименее водоносные элементы русловой сети, порядок которых  $N_y < 5$ . В вершине дельты Волга имеет  $N = N_y = 14$ .



**Рис. 4.** Изменение объема послехвалыньских отложений в дельте Волги вследствие ее активного и пассивного выдвигения

Следующим уровнем проявления устьевых процессов является совокупность русловых переформирований, свойственных различным морфодинамическим типам русла. В дельте Волги (табл.1) представлен весь спектр возможных морфодинамических типов русла.

**Таблица 1.** Распределение (%) типов русла по районам дельты Волги

Объект/район	Морфодинамический тип русла		
	прямолинейное	извилистое	разветвленное
Дельта	66	27	7
Верхний	54	28	18
Центральный	59	32	9
Приморский	78	20	2

В общем случае системы дельтовых водотоков относятся к пойменным разветвлениям (поскольку ширина долины  $B_d \rightarrow \infty$ , а отношение длины устьевого участка реки по главной системе к длине устьевого участка по второстепенным системам водотоков меньше 1). В этих системах на долю участков с относительно прямолинейным, извилистым руслом и руслом, разветвленным на рукава приходится соответственно 66, 27 и 7% суммарной длины русловой сети. Эта особенность не совпадает с распределением типов русла по длине речных систем (выше дельт обычно доминируют меандрирующие русла [Русловой режим..., 1994]). Максимальное количество прямолинейных русел характерно для системы Бузана (70%) и Бахтемира

(69%), минимальное для системы Болды - 59%. По-видимому, это связано с различиями в продолжительности существования систем водотоков. Системы Бахтемира и особенно Бузана более молоды (по сравнению с системой Болды). Максимальной извилистостью отличаются водотоки Болды и Старой Волги. В наименьшей мере это характерно для водотоков системы Бузана. В этой системе отмечается максимум (более 40%) русловых разветвлений.

Для верхней части Бузана мощность потока  $Q_{\phi}I = 2,0 - 2,8$  кВт/м, где  $Q_{\phi}$  – руслоформирующий расход воды,  $I$  - уклон. Это близко отвечает условиям формирования разветвленных русел рек (Чалов и др., 1998). В системе Бахтемира разветвленные русла отсутствуют, а в других системах их появление ограничено участками дельты, прилегающими к истокам Болды, Камызяка, Старой Волги. Здесь величина  $Q_{\phi}I$  изменяется от 0,3 до 2,8 кВт/м. Уменьшение  $Q_{\phi}$  вдоль систем водотоков сопровождается возникновением гидравлических условий, при которых более вероятно существование извилистых и относительно прямолинейных русел. Разветвления нетипичны для Бахтемира, хотя  $Q_{\phi}I = 2,3$  кВт/м. Это связано с высокой степенью антропогенных нагрузок на русло Бахтемира.

Максимальное развитие относительно прямолинейные русла получают в приморском районе дельты. Меандрирующие русла, наоборот, преобладают в центральном и верхнем ее районах. В приморском районе их доля минимальна (20%). Большая часть прямолинейных и извилистых участков русла в устье реки приходится на водотоки с условным порядком  $N_y = 1-8$  и средними расходами воды от 1 до 700 м<sup>3</sup>/сек. Меандрирующие русла не характерны для «банков» и основного русла Волги.. Разветвленным руслам соответствуют водотоки с  $N_y > 9$  ( $Q > 400$  м<sup>3</sup>/с и  $Q_{\phi}I > 0,48$  кВт/м). Для меандрирующих русел характерно, что  $N_y = 5 - 9$ ,  $Q = 50 - 400$  м<sup>3</sup>/с и  $Q_{\phi}I = 0,06 - 0,48$  кВт/м. Прямолинейные участки русла формируются при  $N_y < 5$ ,  $Q < 50$  м<sup>3</sup>/с и  $Q_{\phi}I < 0,06$  кВт/м.

Развитие устьевых баров соответствует иному механизму формирования вертикальной и горизонтальной неоднородности толщи отложений, по сравнению с другими участками русла дельтового водотока. Аккумулятивное образование (бар) в устье произвольного водотока достаточно устойчиво, поскольку его равновесное состояние соответствует некоторому соотношению осредненных гидрологических характеристик водотока, влияющих на скорость его выдвигания, и динамических процессов на взморье, препятствующих этому процессу. В зависимости от баланса наносов на устьевом баре дельты находится объем отложений в пределах бара:

$$W_{oy} = nW_p + mW_m, \quad (2)$$

где  $W_p$  – сток речных наносов,  $W_m$  – поступление морских наносов,  $W_{oy}$  – изменение объема устьевых баров,  $n$  и  $m$  – коэффициенты.

В межень бар представляет препятствие для втекающего на устьевое взморье водного потока. Обтекание бара водным потоком и распреде-

ление стока по баровым бороздинам подчиняется тем же законам, что и его распределение между конкурирующими системами рукавов в дельте. На побережье Каспийского моря основная доля стока воды часто концентрируется в водотоке, устье которого ориентировано в направлении, совпадающем с доминирующим направлением ветров [Гидрология, 1993; ]. Скорость выдвижения устьевых баров и удлинение рукавов зависит от соотношения созидательной роли выноса речных наносов и разрушительной функции волнового воздействия на устьевые аккумулятивные формы. Преобладание речных факторов приводит к выдвижению бара. В условиях мощного волнового воздействия бар может разрушаться или деформироваться [Михайлов, 1971; Полонский, 1979].

Таким образом, состав и механизмы устьевых процессов существенно зависят от размера изучаемых объектов и дискретности изучения изменчивости их состояния. В зависимости от специфики устьевых процессов должны использоваться различные методы их изучения: от сопоставления последовательных съемок дельты до математического моделирования русловых процессов на участках водотоков. Частные закономерности эволюция всей дельты, различных районов дельты, систем водотоков, отдельных водотоков и их участков, баров формируют сложную картину устьевых процессов, которую необходимо учитывать при изучении устьев рек.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Айбулатов Д.Н.* Соотношение пассивного и активного выдвижения морского края дельты Волги // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 2003. № 3.
- Алексеевский Н.И.* Формирование и движение речных наносов. М.: МГУ, 1998.
- Гидрология устьев рек Терека и Сулака.* М.: Наука, 1993.
- Михайлов В.Н.* Динамика потока и русла в неприливых устьях рек. М.: Гидрометеиздат, 1971.
- Михайлов В.Н., Рогов М.М., Чистяков А.А.* Речные дельты. Гидролого-морфологические процессы. Л.: Гидрометеиздат, 1986.
- Полонский В.Ф.* Возможность расчета основных характеристик устьевых баров и их типизация // Труды ГОИН. Вып. 143. 1979.
- Русловой режим рек северной Евразии.* М.: Изд-во МГУ, 1994.
- Русловые процессы в дельте Волги // Геоэкология Прикаспия.* Вып. 2. М.: Изд-во МГУ, 1997.
- Хортон Р.Е.* Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов. М.: ИЛ. 1948.
- Чалов Р.С.* Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во МГУ, 1979.
- Чалов Р.С., Алабян А.М., Иванов В.В., Лодина Р.В., Панин А.В.* Морфодинамика русел равнинных рек. М.: ГЕОС. 1998.

[В Содержание](#)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

### **Чалов Роман Сергеевич (1939)**

Доктор географических наук, профессор

Профессор кафедры гидрологии суши, зав. научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева

1966г., кандидатская диссертация «Сравнительный анализ русловых процессов на равнинных и горных реках», научный руководитель – профессор Н.И. Маккавеев; 1978г., докторская диссертация «Русловые процессы и особенности их проявления в различных природных условиях»

#### **Основные направления научной деятельности:**

Региональный анализ русловых процессов, исследования закономерностей и условий формирования русел рек разного морфодинамического типа. Картографирование русловых процессов. Обоснования методов регулирования русел и управления русловыми процессами с учетом региональной специфики руслового режима. Экологические оценки русловых процессов в естественных условиях и при антропогенном воздействии на реки. Разработка теории эрозионно-русловых систем.

#### **Основные научные труды:**

Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во МГУ. 1979. 232 с.

Русловые процессы (соавтор – Н.И. Маккавеев). М.: Изд-во МГУ. 1986. 264 с.

Русловые режимы рек Северной Евразии (коллектив авторов, под редакцией Р.С. Чалова). М.: Изд-во МГУ. 1994. 336 с.

Экологическое русловедение (соавторы – к.М. Беркович, А.В. Чернов). М.: ГЕОС. 2000. 232 с.

Речные излуины (соавторы – А.С. Завадский, А.В. Панин). М.: Изд-во МГУ. 2004. 371 с.

#### **Научно-общественная деятельность.**

Председатель Межвузовского научно-координационного совета по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ; вице-президент и академик-секретарь секции русловедения и восстановления рек Академии проблем водохозяйственных наук, член редколлегии журналов «Геоморфология» и «International journal of sediment research».

### **Зорина Екатерина Федоровна (1932)**

Доктор географических наук, старший научный сотрудник

Ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева

1965г., диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук «Исследование процесса транспортирования грунта речными землесосами» научный руководитель – профессор Н.И. Маккавеев; 2002г., докторская диссертация «Овражная эрозия: закономерности и потенциал развития»

#### **Основные направления научной деятельности:**

Исследования гидротранспорта высоконасыщенных смесей по трубопроводам речных землесосов. Изучение овражной эрозии в следующих направлениях: натурные обследования оврагов в разных природных регионах; количественные характеристики овражности и предпосылок развития процесса; разработка концепции потенциала овражной эрозии; развитие оврагов на урбанизированных территориях; формирование стока воды и наносов на овражных водосборах.

#### **Основные научные труды:**

Овражная эрозия: закономерности и потенциал развития. М.: ГЕОС. 2003. 170 с.

Экология эрозионно-русловых систем России. М.: Изд-во МГУ. 19???. 160 с. (коллектив авторов).

Овраги, оврагообразование и потенциал развития // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ. Вып. 12. 2000. с. 72-95.

#### **Научно-общественная деятельность.**

Член Межвузовского научно-координационного совета по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ; член-корреспондент Академии проблем водохозяйственных наук.

### **Литвин Леонид Федорович (1939)**

Доктор географических наук, старший научный сотрудник

Ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева

1971г., кандидатская диссертация «Развитие процессов эрозии в горных условиях (на примере южного склона Западного Кавказа)», научный руководитель – профессор Н.И. Маккавеев; 2000г., докторская диссертация «География и экологические аспекты эрозии почв сельскохозяйственной зоны России»

#### **Основные направления научной деятельности:**

Исследования зависимости территориального распределения типов и интенсивности эрозии почв от основных природно-антропогенных факторов. Разработка методов количественной оценки и картографирования современной эрозии и определяющих её условий. Ландшафтно-

генетическая классификация эрозии почв как природно-антропогенного явления. Морфо-энергетическая классификация склонов и исследование пространственных соотношений морфологии склонов и эрозионно-склоновых геосистем. Экспериментальные стационарные наблюдения земледельческой эрозии при снеготаянии. Экологические последствия эрозии и почвенно-эрозионное загрязнение водных ресурсов и окружающей среды в целом.

#### **Основные научные труды:**

География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. М.: Академкнига. 2002. 255 с.

Прогнозирование и предупреждение эрозии почв при орошении. М.: Изд-во МГУ. 1992. 205 с. (коллектив авторов).

Исследования стока воды и наносов на склоновых водосборах в бассейне р. Протва. М.: ВИНТИ. № 6389-В87. 10987. 1987. 175 с. (коллектив авторов).

Эрозия почв и сели в Кабардино-Балкарии. Нальчик: Эльбрус. 1970. 78 с. (коллектив авторов).

#### **Научно-общественная деятельность.**

Зам. зав. лаборатории по научной работе; член Президиума Межвузовского научно-координационного совета по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ; член-корреспондент Академии проблем водохозяйственных наук.

#### **Голосов Валентин Николаевич (1959)**

Доктор географических наук, старший научный сотрудник

Ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева

1987г., кандидатская диссертация «Антропогенная эрозия почв в бассейне Верхней Оки», научный руководитель – профессор Р.С. Чалов; 2003г., докторская диссертация «Эрозионно-аккумулятивные процессы в верхних звеньях флювиальной сети освоенных равнин умеренного пояса», научный консультант – профессор Р.С. Чалов

#### **Основные направления научной деятельности:**

Количественная оценка перераспределения наносов на малых водосборах земледельческой зоны за различные интервалы времени с использованием традиционных (почвенно-морфологического, коррелятных отложений, геоморфологического картографирования, погребённых почв и др.) и новых методов (радиоизотопных, DGPS и др.) исследования. Выявление источников поступления загрязнителей с площади бассейна в постоянные водотоки. Оценка трансформации полей радиоактивного загрязнения местности на участках интенсивного радиоактивного загрязнения. Изучение деградации малых рек в зоне интенсивной распашки земель. Исследование трансформации пахотных склонов различной конфигурации за период земледельческого освоения.

**Основные научные труды:**

Строение и история развития долины р. Протвы (под ред. Г.И. Рычагова и С.И. Антонова). М.: Изд-во МГУ. 1996. 130 с.

Tracers in Geomorphology (edited by I.Foster). John Wiley & Sons, UK, 1998, 560 p.

Малые реки Волжского бассейна (коллектив авторов под ред. Н.И. Алексеевского). М.: Изд-во МГУ. 1994. 236 с.

Applied Geomorphology: Theory and Practice (edited by R.J.Allison) // John Wiley & Sons, UK, 2002, 480 p.

Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides (edited by F/Zapata) // Kluwer Academic Publishers, 2002, 220 p.

**Научно-общественная деятельность.**

Вице-президент Международной комиссии по континентальной эрозии (ICSE) Международной Ассоциации Гидрологических наук (IAHS); член Международной комиссии «Геоморфология – вызовы XXI века» Международного Географического Союза; член президиума Российского Национального комитета географов.

**Беркович Константин Михайлович (1942)**

Доктор географических наук, старший научный сотрудник

Ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева

1970г., кандидатская диссертация «Сравнительная характеристика русловых процессов средней Оби и Амударьи», научный руководитель – профессор Н.И. Маккавеев; 1998г., докторская диссертация «Географический анализ антропогенных изменений русловых процессов»

**Основные направления научной деятельности:**

Антропогенные изменения русловых процессов

**Основные научные труды:**

Беркович К.М. Регулирование речных русел. М.: Изд-во МГУ. 1992. 101 с.

Беркович К.М., Чалов Р.С., Чернов А.В. Экологическое русловедение. М.: ГЕОС. 2000. 332 с.

Беркович К.М. Географический анализ антропогенных изменений русловых процессов. М.: ГЕОС. 2001. 164 с.

Русловые процессы и водные пути на реках Обского бассейна. Новосибирск: РИПЭЛПлюс. 2001. 300 с. (коллектив авторов).

**Научно-общественная деятельность.**

Зам. председателя Президиума Межвузовского научно-координационного совета по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ; академик Академии проблем водохозяйственных наук.



### **Сидорчук Алексей Юрьевич (1949)**

Доктор географических наук, старший научный сотрудник

Ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева

1975 г., кандидатская диссертация «Процессы дельтообразования в устьевой области реки Яны», научный руководитель – профессор Н.И. Маккавеев; 1992 г., докторская диссертация «Морфология, динамика и структура речного русла»

#### **Основные направления научной деятельности:**

Исследование геоморфологических и гидрологических процессов в устьевых областях рек. Анализ эволюции руслового рельефа на больших реках, проблем морфологии руслового рельефа, его структуры и механизма формирования, динамики и морфологии иерархического комплекса русловых гряд, их связи со стоком влекомых наносов. Изучение палеогидрологии и палеоседиментологии рек северной Евразии. Математическое моделирование рельефообразования в различных звеньях флювиального комплекса. Разработка теории единого эрозионно-аккумулятивного процесса.

#### **Основные научные труды:**

Морфология и динамика руслового рельефа. Итоги науки и техники, сер. "Гидрология суши", т.5, М., ВИНТИ, 1985 (с А.Е. Михиновым)

Структура рельефа речного русла. СПб, Гидрометеиздат, 1992

#### **Научно-общественная деятельность.**

Член Межвузовского научно-координационного совета по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ; член-корреспондент секции русловедения и восстановления рек Академии проблем водохозяйственных наук; член Европейского общества охраны почв; член комиссии «Флювиальные системы в условиях изменения климата и землепользования» проекта «Глобальные изменения в прошлом» Международной геосферно-биосферной программы; член комиссии «Международный банк моделей эрозии» программы «Глобальные изменения и экосистемы» Международной геосферно-биосферной программы; член комиссии «Глобальная континентальная палеогидрология» Международной ассоциации четвертичной геологии; член Международной организации охраны почв и почвоохранных технологий; член президиума комиссии «Палеорасходы рек Арктики», член рабочей группы «Исследования речного стока» Международной геосферно-биосферной программы; член рабочей группы по исследованию флювиальных систем Международного географического союза; член Российского национального комитета Международного географического союза.

### **Коротаев Владислав Николаевич (1937)**

Доктор географических наук, старший научный сотрудник

Ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева

1967г., кандидатская диссертация «Динамика и морфология береговой зоны озера Иссык-Куль», научный руководитель – профессор О.К. Леонтьев; 1990г., докторская диссертация «Морфология и динамика речных дельт и региональные особенности дельтообразования»

#### **Основные направления научной деятельности:**

Динамическая геоморфология эстуарно-дельтовых систем и морских побережий, русловые и дельтообразующие процессы в устьях рек и регулирование речных русел и устьевых баров, геохронология и палеогеоморфология аллювиально-дельтовых и прибрежно-морских отложений, гидролого-экологический мониторинг устьевых областей рек.

#### **Основные научные труды:**

Коротаев В.Н. Береговая зона озера Иссык-Куль. Фрунзе: Илим. 1967.155с.

Коротаев В.Н. Геоморфология речных дельт. М.: Изд-во МГУ. 1991. 224 с.

Нижняя Яна: устьевые и русловые процессы (коллектив авторов под ред. В.Н. Коротаева, В.Н. Михайлова и Р.С. Чалова). М.: ГЕОС. 1998. 212 с.

Бабич Д.Б., Коротаев В.Н., Магрицкий Д.В., Михайлов В.Н. Нижняя Индигирка: устьевые и русловые процессы. М.: ГЕОС. 2001. 202с.

Нижняя Волга: геоморфология, палеогеография и русловая морфодинамика (коллектив авторов под ред. Г.И. Рычагова и В.Н. Коротаева). М.: ГЕОС. 2002. 242 с.

Геоморфологическая карта Волго-Ахтубинской поймы (коллектив авторов под ред. Г.И. Рычагова и В.Н. Коротаева). Москва-Утрехт (Нидерланды).2002. 1 лист (на русском и английском языках).

#### **Научно-общественная деятельность.**

Член Президиума Межвузовского научно-координационного совета по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ; член-корреспондент Академии проблем водохозяйственных наук, член Ученого совета географического факультета МГУ.

### **Алексеевский Николай Иванович (1950)**

Доктор географических наук, профессор

Профессор кафедры гидрологии суши, заведующий кафедрой гидрологии суши.

1981 г., кандидатская диссертация «Русловые процессы в устьях рек с большим стоком наносов (на примере Терека), научный руководитель – профессор Н.И. Маккавеев, профессор В.Н.Михайлов; 1994 г., докторская диссертация «Формирование и движение речных наносов»

**Основные направления научной деятельности:**

Речной сток, гидроэкология, русловые и устьевые процессы, формирование и движение речных наносов

**Основные научные труды:**

Формирование и динамика наносов в речной сети и береговой зоне водоемов//Итоги науки и техники. Гидрология суши. М.: ВИНТИ. 1991. т.8. 184 с. (соавтор – А.Е.Михинов)

Гидрология устьев рек Терек и Сулак (соавторы – В.Н.Михайлов, М.В.Михайлова, А.Ю.Сидорчук). М.: Изд-во Наука. 1993.160 с.

Сток наносов и русловые деформации (соавтор Р.С. Чалов). М.МГУ.1997.170 с.

Малые реки волжского бассейна (под редакцией Н.И. Алексеевского). М.: МГУ, 1998.–234 с.

Формирование и движение речных наносов М.: МГУ, 1998.–202 с.

Проблемы гидрологии и гидроэкологии (под редакцией Н.И. Алексеевского) . Вып.1. М.: МГУ. 1999.399 с.

**Научно-общественная деятельность.**

Член национального комитета по международной гидрологической программе. Член президиума Межвузовского научно-координационного совета по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ; действительный член Академии проблем водохозяйственных наук. Эксперт ряда министерств и фондов.

**Айбулатов Денис Николаевич (1975)**

Кандидат географических наук.

Младший научный сотрудник кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ.

2000 г., кандидатская диссертация «Гидролого-морфологические процессы в дельте Волги» , научный руководитель – профессор Н.И. Алексеевский

**Основные направления научной деятельности:**

Устьевые процессы, ГИС в гидрологии.

**Основные научные труды:**

Русловые процессы в дельте Волги (коллектив авторов). “Геоэкология Прикаспия. М.: МГУ, 1997.– Вып. 2.

Оценка гидроэкологической безопасности в устьях рек с учетом гидрологических условий (соавторы – Н.И.Алексеевский , Д.В Магрицкий)// Метеорология и гидрология. 2003. №4. С.91-101.

Научное издание  
**Маккавеевские чтения – 2003.**

*Подготовка оригинал-макета – С.Н. Ковалев*  
*Графические иллюстрации – Н.В. Анисимова*

ЛР №021098 от 28.02.97  
Подписано в печать . . . 2004 Формат 60х90/16  
Офсетная печать. Усл. печ. л. – 6,3 Тираж экз.  
Заказ №

Типография ордена "Знак Почета" Издательства МГУ 119899, Москва.  
Воробьевы горы