

Поступила в редакцию 27.10.2014

THE MAIN REGULARITIES OF THE RATIO BETWEEN RIVERBED AND BASIN COMPONENTS OF EROSION AND SUSPENDED SEDIMENT FLUX IN THE NORTHERN EURASIA'S RIVER BASINS

A.V. GUSAROV

Summary

Suspended sediment flux is one of the objective and sufficiently accurate measures of the erosion activity in river basins. Using the database for mean monthly values of water and suspended sediments runoff created for 460 rivers of the territory of the former USSR, the ratio of channel and basin components of erosion was analyzed. For this purpose the author proposed the special hydrological method (published early). For all analyzed river basins the share of riverbed erosion (δr) calculated by suspended sediment fluxes doesn't exceed 15%. It amounts to $10.4 \pm 1.5\%$ for the plain (lowland) rivers, to $4.9 \pm 0.9\%$ for the low-altitude mountain rivers, and to $4.0 \pm 0.8\%$ for the middle-altitude mountain rivers. The average δr for the whole Northern Eurasia is $7.2 \pm 0.8\%$.

The ratio of channel and basin (δb) components depends distinctly on the landscape-climatic conditions, especially on latitudinal zoning. Thus, within the plains of Northern Eurasia the biggest δr occurs in the zones of tundra, taiga and mixed forests – more than 15–16% ($15.0 \pm 9.6\%$ in the tundra zone, $16.6 \pm 3.1\%$ in the zone of taiga and mixed forests). In arid zones this value on the average does not exceed 5% ($4.5 \pm 1.3\%$ in the steppes, 0.8% in the semi-deserts). Intermediate areas have a share of channel products of 5 to 10% ($8.9 \pm 2.0\%$ in the zone of broad-leaf forests, $5.2 \pm 1.6\%$ in the forest-steppe zone). The same trend is observed in the low mountains but less distinctly than in the plains. There is a hyperbolic relationship between a total suspended sediment flux and its riverbed component. This dependence is clearly pronounced in the plains of the Northern Eurasia, but diminishes with increasing elevation of river basins. It's shown also that the lithological factor (surface rocks' composition) doesn't play a significant role in the spatial variability of the $\delta b/\delta r$ ratio.

Keywords: erosion, suspended sediment flux, river, riverbed, riverbed erosion, river basin, structure of erosion, Northern Eurasia.

doi:10.15356/0435-4281-2015-4-3-20

УДК 551.435.13

© 2015 г. Р.С. ЧАЛОВ

О ПРОГНОЗАХ РУСЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ¹

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
географический факультет, Россия; rschalov@mail.ru*

Введение

Исследования русловых процессов своей конечной целью, наряду с выявлением определяющих факторов, механизмов, закономерностей, форм проявления и решения практических (инженерных) задач, имеют обоснование прогнозов развития, изменения русел, пойм, берегов, перекатов, получение количественных и качественных оце-

¹ Выполнено частично при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-05-03752) и РНФ (проект № 14-17-00155), в рамках программы Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (проект № 14-17-00155) и научных тем кафедры гидрологии суши и научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ имени М.В. Ломоносова.

нок ожидаемых переформирований на разные временные интервалы. Особенно важны они при решении задач, возникающих при водохозяйственном, гидротехническом и строительном освоении рек и приречных территорий, использовании их водных и минеральных ресурсов, развитии и совершенствовании водных путей. По существу вся история становления и развития учения о русловых процессах (русловедение) связана с разработкой методов прогноза и учета русловых деформаций. Однако полноценная классификация прогнозов, как и оценка современного их состояния практически отсутствует, хотя попытки это осуществить предпринимались неоднократно.

Н.И. Маккавеев [1] сформулировал основные задачи прогнозных исследований флювиальных, в том числе русловых, процессов и показал их зависимость от гидрологических прогнозов (водности и стока наносов), знания механизмов развития самих процессов, стадийности в эволюции русловых форм и периодичности, обусловленной как внутренней структурой процесса (саморегулирование речного русла), так и колебанием стока воды и наносов, а также наложением обеих причин, от качества и полноты исходной информации, поставленных перед ним задач, а также времени, на которое они разрабатываются (краткосрочные, или текущие, и долгосрочные, близкой и дальней перспективы). При этом он отметил, что с удлинением временного уровня оправдываемость прогноза снижается.

Б.Ф. Сنيщенко [2] классифицировал прогнозы русловых процессов, разделив их по общецелевому назначению (научно-познавательные, инженерные, природоохранные), генезису водотока (естественные, искусственные), виду реки (равнинная, горная, в особых условиях – мерзлота, карст и др.), характеру взаимодействия инженерных сооружений с русловыми процессами, времени предвычисления (стадийности и цикличности развития русловых форм), методам прогноза (гидроморфологические, гидравлично-морфометрические, моделирование). По К.В. Гришанину [3], прогнозы русловых деформаций (долгосрочные и краткосрочные) выполняются на основе геоморфологического анализа русловых переформирований и выявления тенденций развития русловых форм, путем моделирования (в то время – на физических моделях размываемого русла) и посредством расчета баланса наносов или решения уравнения деформаций.

Приведенные подходы свидетельствуют об определенных разночтениях, в т. ч. терминологических и, за исключением формулировок Н.И. Маккавеева, о временных ограничениях прогнозов рамками нормативных сроков службы сооружений или воздействия выполненных мероприятий. Поэтому задача настоящей статьи заключается в обобщении существующих представлений о прогнозах русловых деформаций, их систематизации и учете новых задач прогнозных исследований, которые возникают в условиях глобальных изменений водности рек и стока наносов, в т.ч., вследствие крупномасштабных комплексных антропогенных нагрузок. Кроме того, не менее важным представляется оценка применимости тех или иных методов прогнозирования в зависимости от заблаговременности прогнозных оценок или расчетов. Это стало возможным благодаря многолетним исследованиям русловых процессов, целью которых была разработка прогнозов русловых деформаций на различные временные интервалы для решения как многообразных задач, так и получения представлений об ожидаемых переформированиях и их масштабах в соответствии с различными сценариями глобальных гидроклиматических изменений на малых, средних и больших равнинных и горных реках в разных природных зонах и регионах, отличающихся по особенностям водных режимов, стоку наносов и антропогенному воздействию.

Результаты исследований

Прогноз русловых переформирований в зависимости от поставленных задач разрабатывается:

1) для участков рек значительной протяженности (при воднотранспортном освоении рек и обосновании генеральных схем судовых ходов; при оценке изменений

руслового режима выше и ниже водохранилищ, сказывающихся на состоянии всех отраслей экономики, связанных с реками; при массовой разработке русловых карьеров стройматериалов; на реках урбанизированных территорий; для обоснования комплексов мер по предотвращению опасных и неблагоприятных проявлений русловых процессов и т. д.);

2) для отдельных форм русла – излучин, разветвлений или их серий (при проектировании берегозащитных мероприятий, возведении инженерных сооружений на берегах, водозаборов, разработке одиночных русловых карьеров, трассировании капитальных землечерпательных прорезей при коренном улучшении условий судоходства;

3) для отдельных форм руслового рельефа или элементов форм русла – перекатов, рукавов, крыльев и привершинных частей излучин.

В конкретных условиях на первый план выдвигается та или иная сторона русловых деформаций, хотя прогнозирование изменений русловых форм разного порядка должно проводиться на общем фоне развития всего русла, т. е. его фоновых деформаций [4]. В конечном счете прогноз переформирования русла должен включать в себя: 1) определение направленности и темпов изменений русла; 2) установление длительности отдельных циклов и характера местных деформаций; 3) выявление связи русловых деформаций и форм русла с основными определяющими факторами – руслоформирующими расходами воды, устойчивостью русла, строением поймы, условиями ее затопления, формой и строением коренных берегов, а также сезонными и многолетними колебаниями водности и стока наносов; 4) выявление периодических многолетних годовых и сезонных деформаций, взаимосвязей между ними и факторами, их определяющими.

Содержание прогноза зависит от поставленных задач. Однако во всех случаях его целью служит необходимость получения ответов на вопросы [1]: 1) каковы темпы переформирования русла, условия для его естественного углубления или обмеления, вероятность спрямления излучин, развития или обмеления рукавов; 2) как сказываются последствия переформирования на объектах хозяйственной инфраструктуры; 3) какова эффективность рекомендуемых мероприятий; 4) насколько вероятны осложнения, снижающие эффективность регулирования русла и связанные с природными и природно-антропогенными факторами. Наличие прогноза является основой для разработки технико-экономической части проекта и разделов по оценке воздействия на окружающую среду (ОВОС).

В прогнозных оценках особое место занимают определение стадии процесса (развития форм русла и форм руслового рельефа) и периодичности в его развитии [1]. Границы между стадиями отмечают смену направленности вертикальных (врезания/аккумуляции наносов) или горизонтальных деформаций (размывов/намывов берегов), темпов развития форм русла и руслового рельефа, изменение гидравлических характеристик и кинематики потока, перестройку действующих факторов, проявляясь в трансформации количественных параметров, характеризующих формы русла, руслового рельефа и интенсивность процесса на каждой стадии их развития. Но переход от одной стадии процесса к другой осуществляется постепенно, проявляясь в последовательном накоплении происходящих количественных изменений, которые в конечном итоге приводят к качественному изменению русла. Таковы, например, превращения сегментной пологой излучины в сегментную развитую, сегментную крутую и, наконец, в петлеобразную излучину, каждая из которых отличается определенным набором и количественными значениями параметров [5]. Для каждой из стадий процесса характерны различные тенденции развития. Сроки смены стадий зависят как от внутренних закономерностей процесса, так и от конкретных условий формирования русла. Развитие процесса на каждой стадии подготавливает начальные условия для перехода в последующие стадии, т.к. все они взаимосвязаны.

Периодичность процесса может быть вызвана либо колебаниями во времени активного фактора (например, водности потока) и некоторыми особенностями механиз-

ма самого процесса (например, развития излучин или разветвлений). Обычно возникает сложная периодичность, обусловленная наложением обеих причин, на что указывал Н.И. Маккавеев [1]. Поэтому определение периодичности процессов – одна из первоочередных задач прогнозных исследований.

Влияние периодических изменений водности реки сказывается во многих проявлениях русловых процессов. К многоводным годам обычно приурочены спрямления излучин, углубление и расширение прямых и более коротких рукавов, вынос наносов из плесов. В маловодные годы, наоборот, подвергаются усиленному размыву вогнутые берега излучин (что увеличивает их кривизну), углубляются изогнутые рукава, заиляются глубокие плесы. От водности зависит многолетний и сезонный режим перекатов. Именно это определяет зависимость точности руслового прогноза от качества гидрологического.

Периодичность, связанная с внутренними особенностями русловых процессов, обусловлена тем, что формы русла и руслового рельефа воздействуют друг на друга, сами русла имеют различную устойчивость, неодинаковую крупность аллювиальных отложений, отличаются по уклонам, меняющимся в разные фазы режима, на плесах и перекатах, а также по другим местным гидравлическим характеристикам потока. Например, смещение по длине участка реки крупных побочней сопровождается их надвиганием на относительно стабильные перекаты, находящиеся на том участке русла, где имеются гидравлические условия для местного снижения транспортирующей способности потока и аккумуляции наносов, вследствие чего происходит периодическое обмеление последнего; смещающиеся побочни периодически надвигаются на заходы в рукава в узлах разветвления и вызывают перераспределение расходов воды между рукавами и развитие то одного из них, то другого. Если острова образуют сопряженные системы разветвлений, переход главного течения возле первого острова вызывает изменения во всей цепочке нижерасположенных разветвлений.

Выявление периодичности процесса позволяет либо своевременно принимать меры к снижению возможных неблагоприятных последствий русловых переформирований, либо разрабатывать такой комплекс мероприятий по регулированию русла, который обеспечит его стабилизацию в оптимальном для решения той или иной хозяйственной задачи (расположения водозабора и водовыпуска, стабилизации трассы судового хода и т. д.) состоянии.

Вызванная разными причинами периодичность в развитии форм русла и руслового рельефа, прохождение ими в ходе эволюции нескольких стадий, каждой из которых соответствуют свои значения параметров и их соотношений с показателями определяющих факторов [6], накладываются друг на друга и вызывают своеобразную “интерференцию” (по выражению Н.И. Маккавеева [1]) процессов, активизируя или задерживая их проявления во времени и пространстве. В свою очередь, прогнозирование осложняется направленными или долговременными колебаниями факторов, охватывающими многие десятилетия и столетия, т.е. временные интервалы, во много раз превосходящие и нормативные сроки эксплуатации гидротехнических объектов, и продолжительность стадий и периодов развития самих русловых форм.

В зависимости от уровня и временных масштабов проявлений русловых процессов, изменений природных факторов и антропогенных воздействий прогнозы русловых деформаций могут быть: 1) текущими, 2) сезонными, 3) многолетними, 4) долгосрочными и 5) перспективными.

Текущие прогнозы составляются обычно для перекатов на основе выполнения регулярных промерно-съемочных работ или сведений службы пути о происходящих изменениях глубин. Их задача – определить вероятность снижения последних ниже гарантированных и необходимость разработки эксплуатационных дноуглубительных прорезей.

Сезонные прогнозы основываются на выявлении закономерных сезонных деформаций перекатов или возможных переформирований разветвлений второго или третьего порядка в многорукавном русле в течение одного гидрологического года. Их зада-

ча – заблаговременно предусмотреть возможные изменения в морфологии перекатов, развитие или отмирание протоков в течение, как правило, навигационного периода. Эти прогнозы обычно связаны с решением водно-путевых задач, но могут иметь важное значение при проектировании водозаборов и других береговых сооружений.

Многолетние и долгосрочные (долговременные) прогнозы рассчитаны на срок от нескольких лет до их десятков. Они охватывают перекаты, перекатные участки, отдельные формы русла и комплексы взаимосвязанных форм (излучин, разветвлений) и призваны оценить возможные изменения русла, связанные со стадийностью развития его форм, периодичностью переформирований, колебаниями водности и антропогенными воздействиями. Разработка таких прогнозов связана с планированием мероприятий по использованию водных и минеральных ресурсов рек, освоением приречных территорий, развитием и совершенствованием водных путей, предотвращением опасных проявлений русловых процессов, могущих создать аварийные ситуации и выход из строя инженерных сооружений. Реализация соответствующих проектов должна обеспечить техническую и гидроэкологическую безопасность водопользования на длительные сроки эксплуатации объектов, стабилизацию русла и снижение вероятности риска их разрушения.

Перспективные прогнозы составляются для оценки изменений русла, направленности и темпов русловых деформаций вследствие глобальных изменений водности и стока наносов рек, в т.ч. при реализации крупных водохозяйственных проектов.

Все виды прогнозов взаимосвязаны и, в зависимости от положения каждого из них в общей цепочке, должны учитывать те изменения, которые происходят в русле на более высоком структурном уровне проявлений русловых процессов (фоновые прогнозы). При разработке сезонных прогнозов перекатов следует учитывать их многолетние деформации, которые, в свою очередь, осуществляются на фоне направленных переформирований русла и испытывают определенные изменения благодаря увеличению/уменьшению водности рек или регулированию стока гидроузлами.

Прогнозные оценки изменений русла складываются из нескольких методов и приемов. Основными среди них являются: 1) гидролого-морфологический анализ речных русел, заключающийся в выявлении зависимостей между характеристиками потока и русла, с одной стороны, и показателями факторов руслоформирования – стоком воды и наносов, с другой; 2) построение QI -диаграмм, на которых точки, соответствующие различным морфодинамическим типам русла, занимают определенное поле относительно разделяющих их линий, что позволяет оценивать условия их формирования в зависимости от водности потока (Q – расход воды) и уклона I ; 3) сопоставление разновременного картографического (планового) материала, фиксирующего состояние русел на определенные временные срезы, в увязке выявленных русловых деформаций с изменением в промежутках между ними гидрологических характеристик и антропогенных воздействий на реки (метод тенденций); 4) получение гидроморфометрических зависимостей, связывающих между собой ширину, глубину и площадь поперечного сечения с расходами воды, скоростями течения, уклонами; 5) расчеты по эмпирическим формулам; 6) палеорусловые построения на основе палеогидрологических и палеогеографических интерпретаций рельефа пойм; 7) использование баланса наносов, кривых связей расходов воды и уровней $Q = f(H)$ или соответственных уровней на смежных гидрологических постах, а также других расчетных методов (например, предложенных К.В. Гришаниным [7]), применение которых ограничивается сравнительно небольшими отрезками времени или конкретными техническими задачами. При этом, “составляя прогноз русловых деформаций, не следует отдавать предпочтение какому-нибудь одному методу, а нужно их комбинировать в соответствии с участком реки и целями прогноза” [7, с. 187]. Одни из методов позволяют определить плановые (горизонтальные) переформирования русла, другие – изменения отметок дна русла – вертикальные деформации (врезание реки или аккумуляция наносов).

Гидролого-морфологические зависимости [7], связывая между собой параметры форм русла с показателями водности реки, применяются для оценки их изменений при увеличении или уменьшении водности, которые сопровождаются ростом или снижением параметров и, как следствие, направленности и темпов размыва/намыва берегов, смещения и спрямления излучин, развития одних и отмирания других рукавов и т.д. Они позволяют установить тенденции происходящих переформирований русел и экстраполировать их на отрезки времени, в пределах которых ожидается изменение факторов русловых процессов (водности, стока наносов).

Связь параметров русла с показателями водности рек обычно применяется для определения характеристик стока воды на различных этапах развития русла. Однако русловые деформации осуществляются в течение отрезков времени различной продолжительности. Так, период развития излучин от сегментной пологой формы до ее спрямления на реках даже со слабоустойчивым руслом охватывает несколько столетий, тогда как наблюдения за расходами воды начались в основном с конца XIX – первой половины XX в. Картографические и плановые материалы, позволяющие оценить параметры русла, ограничены таким же отрезком времени, либо отличаются малой точностью (карты XVIII – первой половины XIX в.), по ним возможны только качественные оценки. Поэтому, чтобы выявить закономерности эволюции форм русла, необходимы не только материалы наблюдений за деформациями, но и их следы, запечатленные в рельефе поймы. Эта проблема решается с помощью аэро- и космических снимков, на которых дешифрируются сохранившиеся в рельефе поймы следы древних русел и формы, образовавшиеся в ходе их эволюции. Их исследования, дополненные определением возраста выполняющих их отложений, позволяют оценить сток воды в прошлом. Такие методы являются *палеорусловыми* и заключаются в реконструкции палеогидрологической обстановки времени формирования русел; зная соотношение параметров русла и водности можно восстановить водный режим реки на разных этапах эволюции ее русла.

А.Ю. Сидорчук [8] гидролого-морфологические связи для меандрирующих рек Европейской территории России параметризировал по внутригодовой изменчивости стока воды и получил зависимость

$$Q_{cp} = 0.012y^{0.173}b_p^{1.663},$$

где b_p – ширина русла в привершинной части излучины; $y = aF^n$; a и n зависят от гидроклиматических условий на водосборе; F – площадь бассейна реки. Если известно соотношение ширины современного и древнего русла, по космическим снимкам сравнительно просто установить отношение средних расходов воды, современных и прошлых эпох. Используя его и приведенную зависимость, можно, зная прогнозную оценку увеличения/уменьшения Q_{cp} , дать оценку возможных изменений параметров русла в будущем.

И.Н. Каргаполова [9] установила связи между водностью и параметрами излучин р. Вычегды. Аналогичные гидролого-морфологические связи были получены Е.А. Львовской [7] для разветвленных русел больших рек севера ЕТР. Благодаря экстраполяции полученных связей на прогнозируемый период были определены параметры русел (излучин, разветвлений) при соответствующих характеристиках водности реки в будущем. Таким образом, гидролого-морфологический анализ, дополненный палеорусловыми и палеогидрологическими построениями, позволяет определять возможные изменения морфологии русел при увеличении (уменьшении) водности реки. Однако их можно применять только для прогнозных оценок переформирований русел конкретных рек, при необходимости – для условий глобальных гидроклиматических изменений или крупномасштабных антропогенных воздействий на реки (ниже водохранилища или при межбассейновых перераспределениях стока).

Такую же роль для долгосрочных и перспективных прогнозов играет *метод QI-диаграмм*, впервые предложенный Л. Леопольдом и М. Вольманом [10] для анализа

условий формирования русел разных типов: в поле *QI*-диаграммы поля точек, соответствующие участкам рек с определенным типом русла, разделяются граничными линиями. Последующие исследования [7, 11] показали, что при смене условий развития русла, связанных как с естественными изменениями природных факторов, так и антропогенными, по диаграмме можно установить возможную смену морфодинамического типа русла или его усложнение благодаря смещению точки в поле диаграммы, соответствующей данному гидрологическому посту. В первом случае это происходит в результате повышения или понижения водности реки; во втором (при массовой разработке русловых карьеров строительных материалов или вследствие размывов русла в нижних бьефах гидроузлов) – благодаря изменению уклона русла. Например, если для рек севера принять сценарий изменения климата, при котором произойдет общее повышение водности рек в течение XXI в. на 10–15%, то в одних случаях ожидается усложнение разветвлений (трансформация односторонних разветвлений в параллельно-рукавные), в других – смена морфодинамического типа русла: формирование разветвлений на относительно прямолинейных участках, массовое спрямление петлеобразных и крутых сегментных излучин и образование на их месте относительно прямолинейного русла [7].

Метод тенденций (К.В. Гришанин [3] назвал его геоморфологическим) основывается на сопоставлении разновременных планов и карт русел рек, аэро- и космических снимков, позволяющих получить представление о развитии горизонтальных русловых деформаций (по планам и картам русел – от принятого срезочного уровня). Последовательное сопоставление этих материалов (с учетом их неодинаковой точности) позволяет выявить пространственно-временные тенденции в развитии форм русла, установить направленный или периодический их характер, скорости и тенденции их изменений, спрямление и смещение излучин, развитие одних и отмирание других рукавов, смещение вдоль русла побочней и осередков, темпы размыва и наращивания берегов и т. п., найти корреляционные зависимости и воспользоваться ими для составления прогнозов, в т. ч. при заданных изменениях факторов русловых процессов. Совмещение карт и планов дает возможность определить объемы деформаций (размыва/аккумуляции), их суммарный результат и среднюю скорость за весь период, охваченный съемками русла.

Дальнейшая детализация руслового анализа проводится с помощью сопоставления планов перекатов. Она позволяет выявить не только изменения взаимного расположения отдельных морфологических элементов перекатов от года к году (что в значительной мере уточняет данные анализа карт), но и установить режим сезонных и многолетних изменений глубин на их гребнях. Совмещение планов перекатов позволяет определять объемы деформаций (размыва/аккумуляции наносов) за разные временные срезы.

Опираясь на крупномасштабные планы русла в пределах перекатов, метод тенденций применим при разработке текущих прогнозов деформации перекатов для своевременного производства эксплуатационных дноуглубительных работ. Нередко он опирается на данные о ежесуточных изменениях глубин на перекатах, позволяющие определять необходимость проведения самих промерно-съемочных работ и получения планов русла. Анализ планов перекатов, составленных в разные фазы водного режима и за разные годы, дает возможность выявить их состояния и основные закономерности многолетних переформирований, подготовить прогнозы изменений в зависимости от водности реки, определить условия размыва или аккумуляции наносов, смещения побочней, формирования осложняющих кос в их ухвостьях, найти оптимальные для состояния глубин положения морфологических элементов (побочней, корыта и т. д.).

Используя карты рек с конца XVIII – начала XX в., а для малых рек – межевые планы екатерининских времен и выявляя по ним происходящие переформирования русел с учетом изменений водности рек за эти же временные интервалы, можно экстраполировать полученные соотношения между состоянием русла и характеристиками водности на перспективу и в первом приближении давать прогнозные оценки рус-

ловых деформаций. В то же время привлечение многолетних данных по стоку рек за время, охваченное съемками русла, позволяет установить зависимость тех или иных изменений в морфологии и динамике русла, от периодических колебаний водности, которые происходят на отдельных этапах переформирования.

При использовании метода тенденций для долгосрочных прогнозов имеет значение оценка изменений параметров форм русла и руслового рельефа и достижения ими критических значений, после чего могут произойти коренные их переформирования. Такими критическими параметрами являются соотношения:

$$l/L, l_{\text{рук1}}/l_{\text{рук2}}, l_{\text{поб}}/L_{\text{поб}} = 1.4-1.7,$$

где l – длина русла по излучине, L – ее шаг, $l_{\text{рук1}}$ и $l_{\text{рук2}}$ – соответственно длины рукавов, огибающих остров или островной массив, $l_{\text{поб}}$ – длина потока (по стрежню), огибающего побочень, $L_{\text{поб}}$ – шаг побочня. При его превышении возникает потенциальная возможность спрямления излучины (при прохождении руслоформирующего расхода $Q_{\text{ф}}$ в условиях затопленной поймы или наличии протоки или ложбины, спрямляющей шпору излучины, в которой концентрируется пойменный поток), развития более прямого рукава или отторжения побочня. Зная скорости русловых деформаций (в т.ч. определенные по сопоставлению карт), легко определить время, через которое форма русла достигнет критических соотношений параметров.

Гидроморфометрические зависимости, связывая между собой параметры русла и гидравлические элементы потока, позволяют дать представление о той предельной форме русла, к которой оно стремится в процессе деформаций (она является оптимальной в данных условиях). Они используются в прогнозах при проектировании различных гидротехнических сооружений и мероприятий как устойчивые соотношения, когда практически прекращаются направленные изменения русла, но могут сохраняться периодические деформации, определяемые эволюцией форм русел, многолетним и сезонным их режимом. Таким образом, гидроморфометрические зависимости, отражая устойчивые соотношения между параметрами русла (его шириной, глубиной, площадью поперечного сечения), характеристиками потока (расходом воды, скоростью потока, ее поперечными составляющими и т.д.) и стока наносов, представляют собой важнейшие элементы расчета русловых деформаций, являясь их конечным результатом. Поэтому их получение для каждой реки или ее участка с учетом морфодинамического типа русла, его устойчивости, особенностей водного режима и режима стока наносов, выявление универсальных связей и региональных различий всегда было одной из задач русловых исследований и обоснования оптимальных параметров русел при их выправлении (регулировании) или сооружении самотечных каналов.

Применение гидроморфометрических зависимостей, разработанных М.А. Великановым, С.И. Рыбкиным, К.В. Гришаниным, В.Н. Михайловым (их анализ содержится в [12]), позволяет решать многие задачи регулирования русел для воднотранспортных целей, при крупном водозаборе, защите берегов от размыва, сооружении самотечных каналов. Наряду с ними расчет русловых деформаций производится *по эмпирическим формулам* (эти методы К.В. Гришанин [3] также относил к геоморфологическим). Эти формулы и условия их применения приведены в руководствах и рекомендациях по учету русловых деформаций при возведении инженерных сооружений на берегах, водозаборов, переходов через реки и т.д. Они опираются на изменчивость глубин русла вдоль вогнутого размываемого берега излучины (таковы формулы Н.Е. Кондратьева [13]) или на соотношения параметров излучин русла – угла разворота или радиусов кривизны (формулы В.Н. Замышляева [14]), причем во всех подходах они включают скорости поперечного смещения излучин (отступление вогнутого берега в привершинной части излучины), что требует постановки специальных наблюдений или наличия одновременных съемок русла.

В отличие от гидроморфометрических зависимостей, по которым определяются вертикальные деформации русла (врезание/аккумуляция), увеличение/уменьшение его

глубины, изменение формы и площади поперечного сечения, применение эмпирических формул рассчитано на оценку горизонтальных русловых деформаций – размывов вогнутых берегов излучин. В этом ряду особое место занимают формула Н.И. Маккавеева [12]

$$C_6 = A \left(\frac{V - V_{кр}}{V_{кр}} \right)^n \frac{QI}{H_6^m}$$

и ее модификация К.М. Берковичем [15]

$$C_6 = k \frac{Q^2 I}{dH_6},$$

в структуре которых отсутствуют показатели, характеризующие извилистость русла (здесь C_6 – скорость отступления берега (м/год), Q – среднегодовой расход воды, м³/с; I – уклон; d – средний диаметр донных наносов, мм; H_6 – высота подмываемого берега над меженным уровнем, м; $V_{кр}$ – критическая скорость потока, при которой начинается размыв отложений, слагающих берег, м/с; V – фактическая скорость потока при руслоформирующем расходе воды, м/с; $m = 3$; $n = 2$ (из условий размерности); A – эмпирический коэффициент, разный на конкретных реках; k – коэффициент размерности (м³/с)⁻¹, значения которого установлены по фактическим (измеренным) величинам размыва берегов в зависимости от водности рек и ширины их русел.

Для оценки интенсивности размыва берегов рек Европейской территории России Е.В. Камаловой под руководством К.М. Берковича [16] были разработаны номограммы, связывающие размывы берегов с уклоном для рек разной водности и их аналитические выражения: $C_6 = 2.38I^{0.68}$ для рек с $Q_{ср} < 50$ м³/с; $C_6 = 4.26I^{0.90}$ для рек с $Q_{ср} = 50-100$ м³/с; $C_6 = 2.89I^{0.50}$ для рек с $Q_{ср} = 100-300$ м³/с; $C_6 = 22.5I^{0.52}$ для рек $Q_{ср} = 500-1000$ м³/с.

Расчетные методы прогноза могут применяться для оценки многолетних переформирований русла вплоть до десятилетий (“близкой перспективы” по Н.И. Маккавееву [1]).

Метод баланса наносов является наиболее строгим при расчете вертикальных русловых деформаций, однако он также рассчитан на ограниченные отрезки времени. В его основе лежат неравенства стока наносов и транспортирующей способности потока $W \neq W_{тр}$, приводящие либо к размыву русла, либо к аккумуляции наносов. В наиболее общем виде он представлен уравнениями [3]

$$\frac{\partial W}{\partial x} + \rho_n \frac{\partial \omega}{\partial t} = 0 \text{ или}$$

$$\frac{\partial W}{\partial x} + (1 - \varepsilon) \frac{\partial \omega}{\partial t} = 0$$

(здесь ρ_n – плотность наносов; ε – коэффициент пористости донных отложений), которые иногда называют универсальными уравнениями русловых деформаций. Согласно им, интенсивность изменения расхода наносов по длине участков реки W равна скорости приращения площади живого сечения потока ω с течением времени t , взятой с обратным знаком.

Существует большое количество вариантов применения метода баланса наносов к расчетам и прогнозам русловых деформаций (в том числе, принадлежащих К.В. Гришанину). Многие из них были разработаны в связи с необходимостью предвычислять размывы русла в нижних бьефах гидроузлов, которые связаны с регулированием стока и перехватом водохранилищами стока наносов (таковы подходы А.В. Караушева, И.И. Леви, А.Б. Векслера и В.М. Доненберга). Они вошли в соответствующие нормативные документы и широко используются в инженерных расчетах.

Для выявления направленных вертикальных русловых деформаций, как естественных, так и вызванных антропогенными воздействиями (в нижних бьефах гидроузлов, при разработке русловых карьеров), и их прогнозной оценки широко применяют анализ кривых связей уровней и расходов воды $Q = f(H)$ и соответственных уровней на смежных гидрологических постах. Смещение кривых связей на графиках вверх и вниз за многолетний период обычно принимается равным понижению/повышению отметок дна. Однако это действительно для условий межени или устойчивых (особенно врезанных русел) ширина которых почти не изменяется при подъеме уровней (но до затопления поймы) [17]. Еще одно условие применимости метода – отсутствие влияния на русло компенсирующих сооружений, стесняющих его или оказывающих подпорное воздействие, вследствие чего понижение уровня воды оказывается существенно меньше, чем отметок дна. Экстраполируя на перспективу тенденцию изменения кривых $Q = f(H)$ или, что то же самое, но при фиксированном меженном расходе воды, $H = f(T)$, где T – годы, можно давать прогнозные оценки размывов русел/аккумуляции наносов. Сложнее обстоит дело с применением кривых соответственных уровней, поскольку смежные гидростаты могут находиться в разных условиях врезания/аккумуляции наносов.

На основе расчетов русловых деформаций разрабатываются краткосрочные прогнозы при строительстве мостовых переходов, прокладке трубопроводов через реки, возведение других сооружений в руслах и на берегах рек. Их временные рамки ограничиваются условиями достижения такого соотношения между потоком и руслом, при котором дальнейшие трансформации последнего прекращаются (например, из-за формирования при размыве аллювиальной отмости или снижения скоростей потока при уменьшении уклона до значений неразмывающих). Выполнение таких расчетов и, соответственно, прогнозов является обязательным при проектировании инженерных объектов, т.к. от их результата зависит глубина заложения под руслом трубопровода, заглубление опор мостов, фундаментов береговых сооружений и т. д.

Заключение

Прогнозы русловых процессов – важная составная часть их исследований, особенно прикладных, связанных с водохозяйственным и транспортным использованием рек, прокладкой через них коммуникаций, строительством на берегах, разработкой русловых карьеров и т.д. Вместе с тем не меньшее значение имеют фоновые прогнозы, как правило, долгосрочные и перспективные, которые призваны оценить возможные трансформации речных русел при направленных глобальных изменениях природной среды и климата, в т.ч. при крупномасштабных антропогенных воздействиях на реки и их бассейны. От сроков, на которые разрабатывается прогноз, зависит его точность и возможность применения расчетных методов. При краткосрочных прогнозах (особенно текущих и сезонных) далеко не всегда возможно применение расчетных методов из-за чрезвычайно быстро происходящих переформирований (особенно на перекатах рек с неустойчивым и слабоустойчивым руслом). В таких случаях точность прогноза может обеспечиваться лишь качественным мониторингом процессов, позволяющим иметь для его осуществления достаточный плановый материал. При любых обстоятельствах качество прогноза обеспечивается знанием механизмов русловых процессов и их проявлений на конкретной реке при определенном состоянии водности, стока наносов и других факторах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маккавеев Н.И. Некоторые задачи прогнозных исследований в области флювиальных процессов // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 1978. Вып. 6. С. 5–19.
2. Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Сущенко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 272 с.

3. Гришанин К.В. Теория руслового процесса. М.: Транспорт, 1972. 216 с.
4. Барышиников Н.Б., Исаев Д.И. Русловые процессы. СПб.: РГТМУ, 2014. 504 с.
5. Чалов Р.С., Завадский А.С., Панин А.В. Речные излуины. М.: Изд-во МГУ, 2004. 371 с.
6. Завадский А.С., Каргаполова И.Н., Чалов Р.С. Стадии развития свободных излуин и их гидролого-морфологический анализ // Вест. МГУ. Сер. 5. География. 2002. № 2. С. 17–22.
7. Львовская Е.А., Чалов Р.С. Методические аспекты прогнозирования русловых процессов при изменении водоносности рек // Геоморфология. 2013. № 3. С. 78–88.
8. Сидорчук А.Ю. Основные результаты палеогидрологического исследования палеорусел перигляциальной зоны последнего оледенения Русской равнины // Маккавеевские чтения – 2003. М.: Геогр. ф-т МГУ, 2004. С. 62–70.
9. Каргаполова И.Н. Реакция русел рек на изменения водности и антропогенное воздействие за последние столетия: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2006. 27 с.
10. Leopold L.B., Wolman M.G. River channel patterns – braided and straight // U.S. Geological Survey Professional Paper. 282-B. 1957. P. 1–85.
11. Львовская Е.А. Условия формирования русел разных типов на реках севера Европейской территории России // Общие и методические проблемы эрозии- и русловедения. М.: Планета, 2012. С. 189–196.
12. Маккавеев Н.И., Чалов Р.С. Русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 1986. 264 с.
13. Кондратьев Н.Е. Русловые процессы рек и деформации берегов водохранилищ. СПб.: ГТИ, 2000. 258 с.
14. Замышляев В.И. Математическая модель плановых переформирований речных русел // Тр. ГТИ. 1983. Вып. 288. С. 53–72.
15. Беркович К.М., Власов Б.Н. Особенности русловых деформаций на реках Нечерноземной зоны РСФСР // Вест. МГУ. Сер. 5. География. 1982. № 2. С. 28–34.
16. Камалова Е.В. Географические закономерности процессов разрушения берегов на малых и средних реках бассейнов Волги и среднего Дона: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 1988. 22 с.
17. Сергутин В.Е., Радюк А.Л. О морфометрии русел и сечении каналов. Красноярск: Изд-во Красноярск. ун-та, 1984. 152 с.

Поступила в редакцию 28.04.2015

ON THE CHANNEL DEFORMATIONS FORECASTING

R.S. CHALOV

Summary

There are three levels of forecasting channel deformations: for rivers' reaches of considerable length, for some forms of the channel, and for the local forms of the channel topography. Author suggests classification of forecasts depending on the time scales of the processes, on natural factors and anthropogenic pressures (current, seasonal, multi-year, long-term, perspective forecasts). Among the methods and techniques of the forecasting there are hydrological-morphological analysis of river channels, construction of QI-charts, identifying trends in the development of channels by comparison of the different age mapping plans, maps, and satellite images, obtaining hydromorphometric dependencies, calculations by empirical formulas, paleochannel reconstruction, using the sediment balance and water discharge/water level curves. For each type of forecasts their accuracy and the source material were characterized, the possible applications were substantiated. The time limitations of the calculations by the analytical formulas were shown.

Keywords: channel deformations, classification of forecasts, hydrological-morphological analysis.

doi:10.15356/0435-4281-2015-4-20-30