

УДК 556.53; 550.3

Н. И. АЛЕКСЕЕВСКИЙ, К. М. БЕРКОВИЧ, Р. С. ЧАЛОВ, С. Р. ЧАЛОВ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ РУСЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ
НА РЕКАХ РОССИИ**

Дана оценка пространственно-временных изменений русловых процессов на реках России, установлены причины вертикальных (врезание или направленная аккумуляция наносов) и горизонтальных (смещение форм русел) деформаций, показано распространение русел рек различных морфодинамических типов и с разной интенсивностью переформирования. Выявлены условия, при которых происходит во времени смена типов русла. Особое место занимает анализ пространственно-временных изменений русел, обусловленных антропогенными нарушениями факторов и непосредственным техногенным вмешательством в жизнь рек (гидроузлы, русловые карьеры, дноуглубление на водных путях).

Ключевые слова: русловые процессы, вертикальные и горизонтальные деформации, размывы русел, аккумуляция наносов, трансформация русел, антропогенные нарушения.

We assess the spatiotemporal changes in channel processes on rivers of Russia, determine the causes for vertical (incision or directional sediment accumulation) and horizontal (displacement of channel forms) deformations and show the distribution of stream channel of different morphodynamical types and with a different reconfiguration rate. The conditions are revealed, under which the channel types change over time. Particular emphasis is placed on the analysis of spatiotemporal changes in channels caused by anthropogenic disturbances and by direct technogenic interferences in the life of rivers (hydroelectric schemes, quarries in the river channels, and waterway dredging).

Keywords: channel processes, vertical and horizontal deformations, channel erosion, sediment accumulation, channel transformation, anthropogenic disturbances.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Русловые процессы — совокупность явлений, связанных с взаимодействием потока и грунтов, слагающих ложе реки, эрозией, транспортом и аккумуляцией наносов, проявляющихся в развитии различных форм русел и форм руслового рельефа, режиме их сезонных, многолетних и вековых изменений [1]. В зависимости от их направленности различают вертикальные и горизонтальные деформации.

Вертикальные деформации русла сопровождаются изменением отметок поверхности дна, которые повышаются в условиях аккумуляции наносов, что соответствует увеличению объема отложений на участке речной долины. Снижение отметок дна происходит в результате врезания реки. Эти процессы захватывают всю реку или значительную часть ее длины. Их следствие — трансформация продольного профиля всей реки или его значительной части.

Горизонтальные деформации сопровождаются смещением русел рек в плане, размывом и/или наращиванием берегов. Развиваясь непрерывно в течение длительных интервалов времени, эти процессы (как и вертикальные деформации) соответствуют направленным русловым деформациям. Их противоположность — периодические деформации, характеризующиеся знакопеременными изменениями отметок дна и положения береговой линии.

Направленность и интенсивность вертикальных и горизонтальных деформаций зависит от определяющих факторов, тесно связанных с природными особенностями территорий и техногенными нагрузками на реки и их бассейны. Детерминированное или случайное изменение этих факторов во времени обуславливает изменения направленности и темпов русловых деформаций в разных регионах в зависимости от сезона года, цикла колебаний стока воды и наносов [2].

Климат и речной сток, геоморфологическое строение и свойства покровных отложений, почвенно-растительный покров территории, современные тектонические движения и колебания базисов эрозии — основные естественные факторы русловых процессов. С ними связаны различия в формах их проявления, интенсивности и направленности развития в различных физико-географических ус-

ловиях, поскольку водные потоки отличаются по водоносности, водному режиму и стоку наносов. При прочих равных условиях увеличение стока наносов и доли в нем влекомой составляющей приводит к формированию морфологически более сложного, мелководного и менее устойчивого русла.

Рельеф и литология горных пород в пределах речных водосборов оказывают большое влияние на морфологию дна долин, уклоны и форму продольного профиля реки, состав русловых отложений и речных наносов, определяют устойчивость русла, связанную с противоэрозионными свойствами горных пород и отложений, свободные или ограниченные условия развития русловых деформаций, соответствующие распространению широкопойменных или врезанных русел [3].

На естественные условия формирования русла накладываются антропогенные факторы, изменяющие водность и сток наносов, непосредственно (механически) вмешивающиеся в жизнь рек, создавая водохранилища, разрабатывая русловые карьеры, возводя различные инженерные сооружения в руслах и на берегах рек, забирая (реже — добавляя) часть стока и т. д. В результате русловые процессы представляют собой природно-антропогенные явления, а система поток—русло природно-антропогенную систему. В то же время огромная территория и большое разнообразие природных условий России, а также хозяйственное освоение водосборов и самих рек, которое неодинаково в пределах страны, определяют пространственно-временную изменчивость русловых процессов на малых, средних, больших и крупнейших реках.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ РУСЕЛ РЕК РАЗНЫХ ТИПОВ

В России и сопредельных странах горные, полугорные и равнинные типы русла распространены на, соответственно, 3,9 %, 21,6 и 74,5 % протяженности рек с длиной $L \geq 500$ км. Для русел горных типов в основном характерна небольшая интенсивность русловых деформаций вследствие преобладания ограниченных условий их развития. В несколько меньшей мере это свойственно и для полугорных рек (соответственно 84 % длины горных и 62 % длины полугорных рек) [4]. Равнинные водотоки характеризуются преимущественно свободными условиями развития русловых деформаций (см. таблицу). Они утрачиваются на участках врезанного (оба берега коренные, пойма узкая — $B_p < b_p$) или отсутствуют у адаптированного (один берег сложен коренными породами, $b_p < B_p < 3-5b_p$) русла равнинных рек.

Сравнительная характеристика условий развития русловых деформаций на равнинных реках России [4]

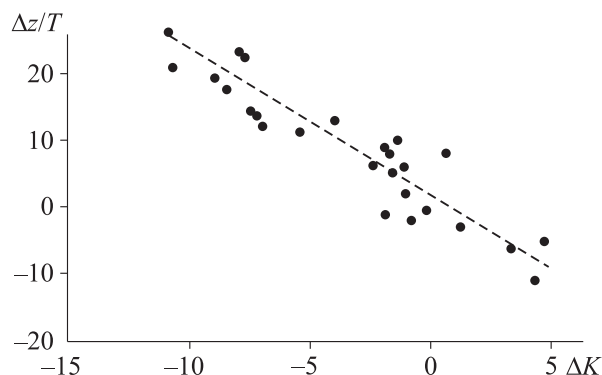
Разновидности равнинных русел	Для территории РФ	Для областей с разными условиями		
		свободные	ограниченные	переходные
Врезанные	30,6	4,1	74,8	44,6
Широкопойменные	64,8	92,3	20,9	47,3
Адаптированные	4,8	3,6	4,3	8,1

Специфика русловых деформаций на равнинных, полугорных и горных реках в существенной степени зависит от морфодинамического типа русел: относительно прямолинейного неразветвленного, извилистого (меандрирующего), разветвленного и их разновидностей. Большая часть длины русел представлена излучинами, испытывающими продольное и поперечное смещение. Доля относительно прямолинейных неразветвленных русел и русел с одиночными разветвлениями больше по сравнению с долей разветвлений остальных типов, морфологически более сложных. Широкопойменные русла равнинных рек извилистые (77 %), около 14 % их длины — неразветвленные, относительно прямолинейные, 8 % — разветвленные. Для врезанных русел прямолинейная форма характерна для 30 % их длины, излучины — для 58 %, разветвления — для 12 % [4].

НАПРАВЛЕННЫЕ ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ

На равнинных широкопойменных реках России направленные вертикальные деформации связаны с вековыми, охватывающими сотни и тысячи лет, изменениями водоносности рек и стока наносов, колебаниями базиса эрозии, устьевым удлинением рек и тектоническими движениями. Их интенсивность мала, составляя доли — первые миллиметры в год, вследствие чего они проявляются в морфологии дна долин на протяжении исторических и геологических отрезков времени. Природные колебания сто-

Рис. 1. Соотношение интенсивности отметок дна ($\Delta z/T$) и изменения водности (ΔK) рек центра европейской части России.



ка воды и наносов, охватывающие десятилетия, обуславливают соответствующую временную изменчивость знака и темпов вертикальных деформаций.

Для большинства российских рек до середины 1970-х гг. была характерна фаза пониженной водности. В последующий период она сменилась фазой повышенного стока воды [5, 6]. Для отдельных рек страны, главным образом на юге, сток воды уменьшился (Дон, Урал). Многолетние колебания водности рек — естественная причина изменения транспортирующей способности потоков и, следовательно, направленных деформаций русел рек. Длительность и интенсивность направленных повышений/понижений отметок дна зависит от изменения средней величины нормированных отклонений стока ΔK за характерные фазы колебаний водности рек T :

$$\Delta K = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{i=T} \left(\frac{Q_i}{Q_0} - 1 \right),$$

где Q_i и Q_0 — соответственно средний годовой расход воды в i -й год фазы повышенной или пониженной водности и средний многолетний расход воды за весь период наблюдений; T — продолжительность фазы колебаний водности реки.

Результаты сопоставления изменений средних отметок продольного профиля дна некоторых рек России $\Delta z/T$ (z — отметка поверхности дна) с величиной ΔK показывают, что они коррелятивно связаны между собой (рис. 1). Величина $\Delta z/T$ представляет собой убывающую функцию величины ΔK . Она характеризует не только влияние изменений стока воды на продольный профиль дна рек, объем русловых отложений, но и продолжительность такого воздействия. Скорость этих процессов зависит от устойчивости русловых отложений к размыву. Чем она выше, тем меньше скорость многолетних изменений отметок дна при $\Delta K = \text{const}$ [7].

В первом приближении изменение средних отметок дна и водности рек центра европейской части России описывает линейная зависимость

$$\Delta z/T = -2,13\Delta K + 5,67,$$

из которой следует, что направленные вертикальные русловые деформации положительного знака (повышение отметок дна) приобретают опасный характер, если $\Delta K < -2,0$, поскольку при этом темпы заиления русла $\Delta z/T > 10$ см/год [8]. Опасные понижения отметок продольного профиля дна соответствуют условию $\Delta K > 7,4$, характеризующему значительное увеличение водоносности рек.

Направленные вертикальные деформации на реках России нередко связаны с антропогенными изменениями стока воды. Они могут возникать вследствие межбассейнового или внутрибассейнового перераспределения водных ресурсов, что характерно для южных регионов европейской части России,

где решаются проблемы обводнения территорий и орошения сельскохозяйственных земель. Перераспределение части стока Кубани в р. Егорлык привело к увеличению водных ресурсов Егорлыка в семь раз (с 5,3 до 34,5 м³/с) [9, 10], транспортирующей способности потока и понижению отметок продольного профиля дна реки. За пять первых лет (1948–1953 гг.) последние понизились за счет

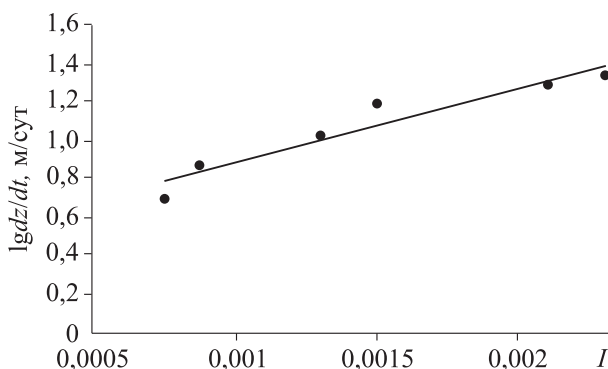


Рис. 2. Зависимость между интенсивностью понижения отметок продольного профиля дна р. Егорлык и уклонами водной поверхности I (по данным [11]).

размыва на 3,75 м. Интенсивность размыва среднесуглинистых связных отложений на разных участках отрезка реки длиной 260 км контролировалась ее уклонами, нелинейно возрастающая на участках с большими уклонами (рис. 2). К 1961 г. процессы размыва русла в целом прекратились за счет уменьшения уклонов реки, появления местных базисов эрозии и формирования аллювиальной отмости.

ТРАНСФОРМАЦИЯ РУСЕЛ РЕК ПРИ ЕСТЕСТВЕННЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ ФАКТОРОВ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Изменения водности рек могут приводить к смене морфодинамического типа русла. Его закономерная смена по длине рек определяется последовательным увеличением их водоносности, уменьшением уклонов, снижением крупности руслообразующих наносов. В общей форме реки России, берущие начало в горах (Обь, Енисей, Лена, Терек, Кубань, Урал, Кама и др.), имеют в верхнем течении горные русла, при выходе в предгорную область — полугорные и затем равнинные. На равнинных территориях происходит последовательная смена вниз по течению прямолинейного русла извилистым, крутых излучин более пологими, развитие прорванных излучин, смена простых разветвлений более сложными, вплоть до раздвоенного русла в низовьях крупнейших рек (Обь, Волга). Эта закономерность нарушается как из-за геоморфологических условий, определяющих формирование на протяженных участках врезанных русел, галечно-валунных руслообразующих наносов (реки Восточной Сибири — Енисей, верхняя и средняя Лена, Алдан, Амур и др.), так и вследствие проявлений местных особенностей.

В этом отношении показательна смена морфодинамических типов широкопойменного русла Оби от слияния Бии и Катунь до устья (среднегодовой расход воды увеличивается от 1150 до 12400 м³/с). Ниже слияния резкое уменьшение уклона (более чем в два раза) приводит к формированию сложного разветвленного русла. От слияния с Чарышом и до Новосибирского водохранилища русло тяготеет к коренным берегам (в основном левому) и является прямолинейным либо осложненным односторонними (вдоль поймы) разветвлениями. Там же, где река отходит от коренного берега, русло меандрирует. Ниже г. Новосибирска русло разветвленное (одиночные и сопряженные разветвления). Начиная от устья Томи (несмотря на увеличение водоносности почти в два раза) повышение устойчивости русла обуславливает его меандрирование, и лишь ниже г. Колпашево (устье р. Кети), когда $Q_{\text{ср.год}}$ возрастает до 4200 м³/с, русло становится разветвленным, сохраняясь таковым до устья. Причем здесь преобладает раздвоенное русло с пойменной многорукавностью, где два основных рукава протягиваются на десятки и сотни километров (Бол. и Мал. Обь в нижнем течении).

Обратная картина прослеживается в дельтах рек при рассредоточении стока по рукавам [11]. Например, на Волге выше дельты и в ее верхней части преобладает русловая многорукавность. Ниже по течению направленное рассредоточение стока по рукавам дельты сопровождается постепенным увеличением длины рукавов с относительно прямолинейным руслом. Если в верхней зоне дельты Волги их протяженность составляет около 54 % суммарной длины дельтовых рукавов, то в приморской зоне она достигает 78 % [11]. Меандрирующие русла преобладают в центральной и верхней зоне дельты. В приморской зоне их доля минимальна (20 %). Разветвления рукавов в приморской зоне дельты встречаются редко, что связано с уменьшением удельной мощности потоков при дроблении их на все более мелкие рукава.

Изменение типа русла по длине рек сопровождается их постоянными переформированиями. На меандрирующих реках наблюдаются продольное и поперечное смещения излучин, их спрямление. Обычно это происходит при $l/L \sim 1,7-2,0$ и условия глубокого затопления поймы, либо благодаря встречному размыву берегов на крыльях омеговидных излучин. Однако за 100–200 лет (с середины XVIII в.) на участках рек длиной в несколько сотен километров произошло спрямление всего от 2–3 до 5–8 излучин (Выгегда, Сысола, Вилюй, Обь, Чулым).

На реках, разветвленных на рукава, в зависимости от типа разветвления и устойчивости русла переформирования заключаются в периодическом развитии и обмелении рукавов, происходящими в течение периода от 8–10 до 50–80 лет. На многорукавном участке русла р. Лены (выше устья Алдана) до 1970-х гг. преобладали сопряженные разветвления, в которых большая часть стока сосредоточивалась последовательно в левом, правом и снова левом рукавах каждого следующего звена. Русловые деформации приводили к перераспределению стока между рукавами и развитию ранее маловодных рукавов. Эти переформирования в конце XX–начале XXI вв. совпали с многоводным периодом, что

привело к временной трансформации сопряженных разветвлений в параллельно-рукавное, более сложное по морфологии и по режиму деформаций, но отличающееся примерно равноценной водностью обоих рукавов. В дальнейшем сопряженные разветвления восстановились, но большая часть стока воды стала проходить в рукавах в противоположной зоне русла, соответственно правом, левом и снова правом, что совпало уже с маловодным периодом лет.

Пример упрощения морфологии русла дает Обь ниже Новосибирского гидроузла [12]. Срезка пика половодья вследствие регулирования стока при перехвате водохранилищем транзитного стока наносов привела к трансформации разветвленного русла (сопряженные разветвления) в извилистое (рис. 3): обмелели последовательно правый, левый и снова правый рукава, вследствие чего острова присоединились к противоположным берегам. На нижнем Дону после сооружения Цимлянского гидроузла [13] излучины с большими радиусами кривизны трансформировались в излучины с малыми радиусами. Количество их возросло, а сам процесс сопровождался активизацией размывов берегов.

Изменение стока наносов — одна из основных причин трансформации русел рек России. При изменении объемов поступающих в реки наносов она наблюдается даже на больших реках. Так, на Северной Двине во второй половине XVIII в. стала активно размываться гора Толоконная — сложенный песками массив среднечетвертичных аллювиально-дельтовых отложений. В результате появления такого мощного источника поступления наносов (длина фронта размыва — около 5 км, высота размываемого берега — 25–30 м, глубина плесовой ложины возле него — 10–15 м, скорость отступления берега — до 15–20 м/год) ниже по течению перед сужением дна долины прямолинейное неразветвленное русло трансформировалось в параллельно-рукавное разветвление. Аналогичные явления, связанные с местным поступлением наносов, описаны А. Б. Клавленом и др. [14] на р. Поломети (спрямление и выполаживание излучин), Селенге, Зее (смена меандрирования разветвлением).

На малых и средних реках России русловые деформации часто возникают вследствие антропогенного изменения стока наносов при сведении лесов, распашке земель, инженерном преобразовании водосборов, проведении горных работ. Если при отсутствии хозяйственной деятельности модуль стока взвешенных наносов в разных ландшафтно-климатических зонах на территории России не превышал 15 т/км²-год, то к середине второй половины XX в. он колебался в широких пределах, достигая 100 т/км²-год [15]. Антропогенное увеличение стока речных наносов привело к тому, что в балках, ручьях и руслах малых рек южной части России с начала XVII в. отложилось приблизительно 86 млрд м³ наносов, в руслах средних и крупных рек — соответственно 6 и 1,2 млрд м³ [16].

Следствием этого процесса стало полное заиление водотоков первых порядков. Сокращение протяженности малых рек степной зоны волжского бассейна за 100 лет составило 30 % для его правобережной части и 50 % для левобережной [17]. В зависимости от степени антропогенного увеличения стока наносов оно сказалось в морфологических изменениях русел средних рек. Например, русло верхней Оки в районе г. Орла (120 км от истока) в начале XX в. ежегодно повышалось на

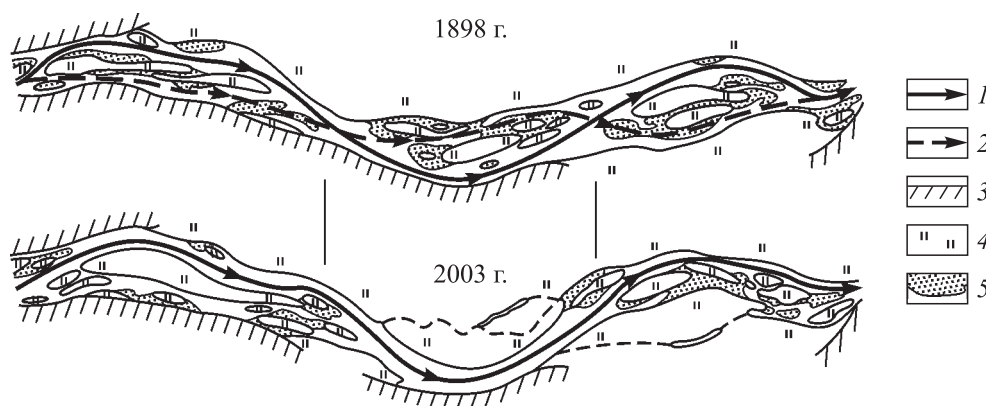


Рис. 3. Трансформация сопряженных разветвлений р. Оби ниже Новосибирского гидроузла в излучины русла.

Положения главного течения реки: 1 — в 1898 и 2003 гг., 2 — во второй половине XIX в. (реконструкция); 3 — коренные берега; 4 — пойма; 5 — прирусловые отмели.

1,5–2 см, в г. Белеве (260 км) скорость этого процесса с конца XIX в. до начала 40-х годов XX в. составляла 0,6 см/год [18]. Ежегодное повышение отметок дна в среднем на 0,4 см прослеживалось в тот же период и в г. Калуге в 400 км от истока [19].

В то же время большинство русел малых и средних рек России, расположенных на севере европейской части, в Западной и Восточной Сибири, на Дальнем Востоке, сохранились в естественных условиях руслового режима из-за относительно малого хозяйственного преобразования их бассейнов (рис. 4), кроме районов разработки россыпных месторождений и крупных промышленных регионов.

Интенсивность размыва русел рек России ниже гидроузлов из-за аккумуляции большей части взвешенных и всех влекомых наносов в водохранилищах изменяется в зависимости от наносодерживающей способности водохранилища, типа русловых отложений (ил, песок, галька, валуны, скальные породы), расстояния от плотины (от 0,3 до 2,0 м). При этом процессы размыва продолжаются, хотя скорость их снизилась до 1 см/год. Одновременно изменяется морфология русла, ширина, глубина и площадь поперечного сечения русел рек. Скорость распространения зоны размыва и соответствующего понижения отметок дна изменяется от 0,6 до 25 км/год. Скорость трансгрессивной эрозии дна рек $C_{эп}$ зависит от размываемости русловых отложений K_p , наносодерживающей способности водохранилищ μ , соотношения максимальной глубины водоема (H_B) и русла h ниже плотины, т. е. $C_{эп} = (H_B \cdot \mu \cdot h^{-1} \cdot K_p^{-1})$.

Выявление функционального характера этой зависимости в настоящее время затруднено вследствие отсутствия фактических данных. Однако можно говорить об увеличении скорости распространения фронта трансгрессивной эрозии при возрастании отношения H_B/h , величины μ и уменьшении K_p . На р. Оби ниже Новосибирского водохранилища, например, морфологические изменения русла прослеживались на участке длиной до 9 км в первые годы после начала эксплуатации ГЭС (1957–1961 гг.) — скорость эрозии достигала 10–12 см/год. В дальнейшем (1961–1972 гг.) участок размыва русла достиг 19 км, а скорость эрозии снизилась до 6 см/год. После 1975 г. понижение отметок дна на верхних 9 км нижнего бьефа сократилось, но продолжилось ниже по течению со скоростью до 4 см/год. Среднее приращение ширины русла составило 1,3 раза, средней глубины — 1,4, а приращение площади поперечного сечения русла — 1,74 раза [8].

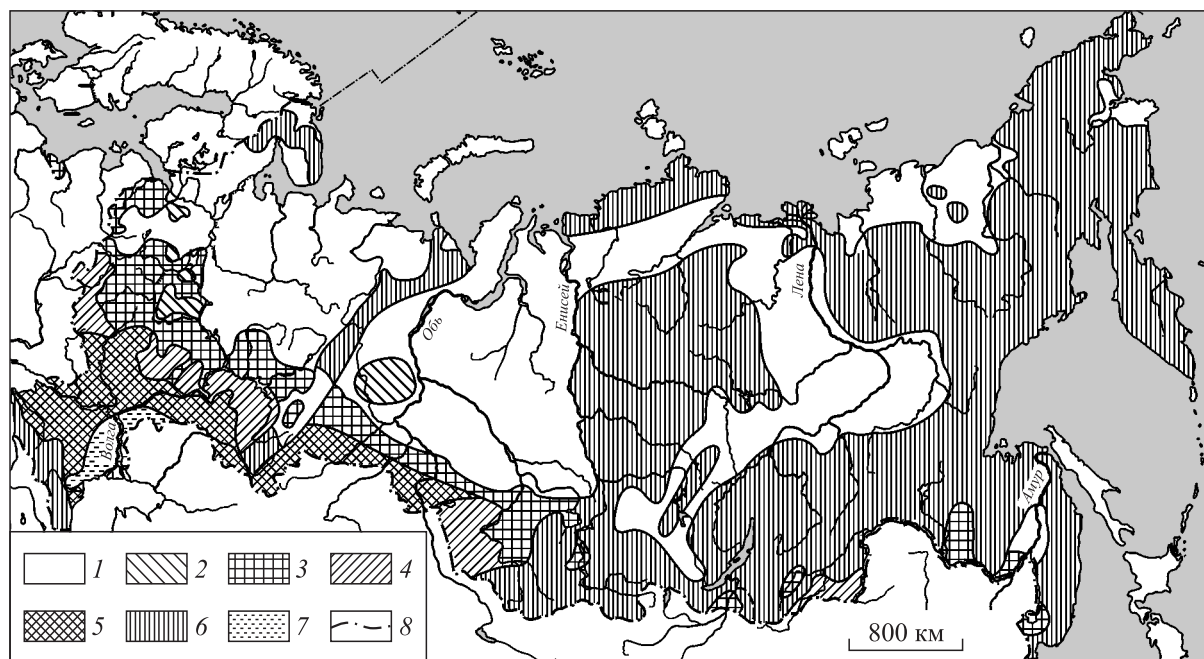


Рис. 4. Карта морфологических изменений русел малых рек России.

1 — преобладание в естественном состоянии; 2 — чередование заиленных рек и рек в естественном состоянии; 3 — реки с заиленными верховьями; 4 — полностью заиленные реки; 5 — реки горных и предгорных территорий в естественном состоянии; 6 — заиленные реки в зонах проведения горных работ и промышленного освоения; 7 — районы отсутствия речной сети (кроме транзитных рек). 8 — государственная граница.

Направленные вертикальные деформации дна рек России возникают и при уменьшении $W_{тр}$ (сток наносов неизменен) в связи с повышением местных и общего базисов эрозии. В качестве местных базисов могут выступать сужения долин и русел рек, конусы селевых выносов, заломы, места слияния с крупными притоками. Они приводят к неравенству $W_p > W_{тр}$ и направленным русловым деформациям — аккумуляции наносов. Относительно небольшое повышение общего базиса — уровня воды в окраинных морях России (1–2 мм/год) — практически неощутимо для продольных профилей устьевых участков рек. Примерно такие же последствия характерны для низовий рек Кубань и Дон, впадающих в Азовское море, сказываясь лишь в течении геологических отрезков времени. Но они существенны для рек, впадающих в Каспийское море (Терек, Сулак) и имеющих приглубое устьевое взморье [20]. В этом случае повышение уровня моря в 1978–1995 гг. на 2,4 м привело к повышению отметок дна на величину, обратно пропорциональную расстоянию от моря и падению уровня воды. На нижних 25 км устьевом участке Терека подъем уровня Каспийского моря на 1,14 м (1978–1987 гг.) вызвал повышение отметок дна на 2,6 м в 7 км от морского края дельты. Выше по течению реки повышение отметок дна постепенно уменьшалось до нуля вследствие затухания волны регрессивной аккумуляции. На нижних 5-ти километрах русла Сулака изменение отметок поверхности дна Δz синхронизировано с колебаниями уровня Каспийского моря $\Delta H_{км}$:

$$\Delta z = 1,32\Delta H_{км}^2 + 0,75\Delta H_{км} + 0,08.$$

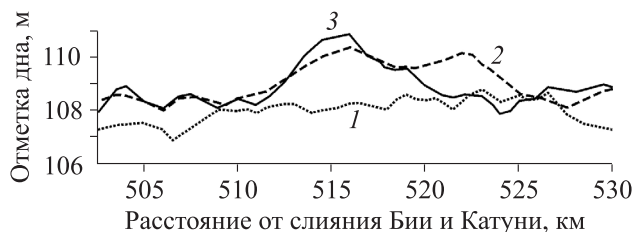
При одинаковом повышении общего базиса эрозии повышение отметок дна тем меньше, чем больше уклон водной поверхности, мощность потока и расстояние от морского края дельты. Эта закономерность нарушается при отмелом типе устьевом взморья, характерном, например, для устья Волги. В этом случае уменьшение падения уровня $\Delta H_{км}$ оказывается меньше по сравнению с сокращением длины устьевом участка реки Δx . В результате при увеличении (или неизменности) уклона водной поверхности в условиях повышения общего базиса эрозии не возникают ожидаемые аккумуляция наносов и повышение отметок продольного профиля дна. Аналогичная ситуация возникает при понижении базиса эрозии в условиях отмелого взморья, что приводит к значительному устьевому удлинению. Именно поэтому понижение уровня Каспия (до 1978 г.) сопровождалось аккумуляцией наносов в нижнем течении Урала и Эмбы, вплоть до отрыва последней от приемного бассейна.

Волны регрессивной аккумуляции возникают выше водохранилищ, которые представляют собой особый тип местных базисов эрозии. При этом уровень водохранилищ существенно меняется в течение года (до 8 м и более), что приводит к образованию протяженных зон переменного подпора, длина которых на некоторых реках достигает 200 км. Уменьшение уклонов водной поверхности выше плотин вследствие формирования кривой подпора снижает транспортирующую способность потоков, вызывает аккумуляцию наносов в зоне переменного подпора и смещение фронта аккумуляции вверх по течению реки. Скорость повышения отметок дна в этой зоне прямо пропорциональна стоку речных наносов и обратно пропорциональна средней многолетней величине изменения уровня воды в водохранилище [21].

Среди рек России, на которых созданы крупные водохранилища, наибольшая мутность (0,68 кг/м³) характерна для Кубани. Выше Краснодарского водохранилища, созданного в 1973 г., колебания уровня в зоне выклинивания подпора достигают 8 м. В водохранилище осаждается до 95 % наносов, приносимых рекой. Аккумуляция наносов распространилась почти на 100 км вверх по течению. Выше Цимлянского водохранилища (р. Дон) мутность воды равна 0,15–0,20 кг/м³, ежегодное повышение отметок дна на верхней границе зоны переменного подпора достигало 12–14 см, а скорость регрессивного (вверх по течению реки) смещения фронта аккумуляции наносов — 5–7 км/год. В зоне переменного подпора Новосибирского водохранилища на р. Оби (средняя годовая мутность 0,35 кг/м³) интенсивность осадконакопления составляла (1960–1970-е гг.) не более 5 см/год. В настоящее время скорость аккумуляции здесь уменьшилась до 3 см/год, а фронт регрессивной аккумуляции за 45 лет продвинулся вверх по течению на 150 км (рис. 5).

Рис. 5. Изменение отметок дна р. Оби в зоне выклинивания подпора Новосибирского водохранилища (150–180 км от плотины).

1 — 1966 г.; 2 — 1979 г.; 3 — 2006 г.



В устьях рек направленная аккумуляция наносов является также следствием их устьевого удлинения. Вследствие этого процесса возрастает длина участка реки и уменьшается уклон водной поверхности. В результате величина фактического уклона оказывается меньше «устойчивого» уклона и вертикальные деформации русла приобретают аккумулятивную направленность. Активное формирование русла Терека в пределах Аграханского залива сопровождалось повышением отметок дна на устьевом участке реки (гидропост Аликазган) (при расходе воды $Q = 200 \text{ м}^3/\text{с}$ на 1,14 м в 1939–1947 гг., на 2,63 м в 1947–1962 гг., на 0,77 м в 1962–1973 гг., на 0,19 м в 1973–1976 гг.).

На этом фоне кратковременные спрямления русла реки в 1973 г., а затем в 1978 г., которые привели к сокращению длины устьевого участка на 25 км и увеличению уклона водной поверхности, сопровождались регрессивной эрозией с максимальной интенсивностью 2,1 м/год, уже через год продвинувшейся на 10 км от берега моря, через 2 года — на 15 км (1,15 м/год), через 6 лет — на 20 км (0,17 м/год), через 10 лет на 26 км (0,04 см/год) [21]. Очень медленная аккумуляция наносов (доли мм в год), вызванная заполнением заливов — губ, в которые впадают реки арктического побережья, распространяется почти на все нижнее и среднее течение Северной Двины, Печоры, Оби, Енисея [5].

На многих реках России проводятся дноуглубительные работы, связанные с удалением части отложений с фарватера и их перемещением в периферические части русла. К концу 1980-х гг. объем землечерпания на водных путях страны (протяженность до 100 тыс. км) превышал $3000 \text{ м}^3 \cdot \text{год}^{-1}$ с километра водного пути. Тем не менее, в большинстве случаев это не привело к заметным изменениям морфологии русел, но обеспечило повышение их устойчивости, снижение скоростей переформирования (Лена, Обь, Северная Двина, Вычегда), а иногда и упрощение морфологии, особенно разветвленных русел. На Оби в сопряженных разветвлениях ранее происходившие через 10–15 лет изменения положения главного течения реки по рукавам прекратились, и оно было закреплено в одной системе рукавов: левом—правом—левым. На Вычегде разработка прорезей в рукавах вдоль коренного берега превратила несколько одиночных разветвлений в односторонние. На Северной Двине в Телеговском сопряженном разветвлении после выполнения капитальных дноуглубительных работ два верхних звена превратились в односторонние, а нижнее функционирует как одиночное.

В большей мере изменения русел связаны с добычей песка и гравия из русловых и пойменных карьеров. Она производилась с начала 1950-х гг. и к 1990-м гг. достигла максимальных масштабов. На некоторых реках объем изъятых песчано-гравийного материала на один-два порядка превысил объем стока влекомых наносов. На верхних 250 км р. Оки разработано 26 крупных русловых карьеров средней длиной 5,5 км. Ежегодный объем добычи песчано-гравийного материала составлял 1800 тыс. м^3 (при естественном расходе влекомых наносов 150–200 тыс. $\text{м}^3/\text{год}$). В нижнем течении р. Белой (приток Камы) на участке длиной 100–120 км средний годовой объем добычи песчано-гравийного аллювия составлял в 1960–1990-е гг. около 4000 тыс. м^3 (при суммарном стоке наносов 2300 тыс. т в год, из которых на песок и гравий приходится не более 10 %). За период 1979–1994 гг. сток наносов, частично компенсирующий объем изъятия, не превышал 7 % этого объема. В результате среднее понижение отметок дна превысило 1,0 м, максимальное — 3,0 м.

Добыча песка и гравия сопровождается формированием глубоких ложбин, часто занимающих всю ширину русла. Их глубина намного превышает максимальную глубину участков рек. При малом стоке наносов эти ложбины заполняются очень медленно, хотя перехватывают значительную часть расхода наносов. Разработка и заполнение карьеров сопровождается эрозией выше и ниже участков их расположения. Средняя скорость регрессивной эрозии — около 5 см/год, трансгрессивной — 3 см/год.

На р. Томи ниже г. Томска «скрыты» не только перекаты, но и небольшие острова, вследствие чего уровни воды понизились более чем на 2,5 м. Это привело к тому, что выше по течению на дне реки препарировалась скальная гряда, образовался порог, превративший сквозное судоходство по реке. Большие карьерные разработки, которые сопровождались посадками уровней, были на Енисее в районе г. Красноярска, на Амуре возле г. Хабаровска, Вятке у г. Кирова, Оби у г. Новосибирска.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Большая территория России, огромная протяженность рек, разнообразие природных условий и различные виды и масштабы антропогенных воздействий на реки обусловили распространение практически всех возможных форм проявления русловых процессов как в отношении направленности и темпов вертикальных деформаций, так и формирования русел рек разных морфодинамических типов, неодинаковой устойчивости и различной уязвимости к техногенным нагрузкам. Большинство водо-

токов сейчас представляет собой природно-антропогенные системы, русловые процессы которых зависят не только от естественных природных факторов, но и от их изменения под влиянием хозяйственной деятельности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (09-05-00339, 12-05-00348), программы Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ (НШ-79.2012.5) и гранта Правительства РФ для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в 15 российских вузах (11.G.34.31.0007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Маккавеев Н. И., Чалов Р. С.** Русловые процессы. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. — 264 с.
2. **Чалов Р. С., Алабян А. М., Иванов В. В. и др.** Морфодинамика русел равнинных рек. — М.: ГЕОС, 1998. — 288 с.
3. **Чалов Р. С.** Географические исследования русловых процессов. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. — 232 с.
4. **Русловой режим рек Северной Евразии** / Ред. Р. С. Чалов. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1994. — 336 с.
5. **Водные ресурсы России и их использование** / Ред. И. А. Шикломанов. — СПб: Изд-во Гос. гидрол. ин-та, 2008. — 600 с.
6. **Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования** / Ред. Н. И. Алексеевский. — М.: ГЕОС, 2007. — 585 с.
7. **Алексеевский Н. И., Ободовский А. Г., Самохин М. А.** Механизмы изменения уровней воды в реках // Эрозионные и русловые процессы. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. — Вып. 4. — С. 216–237.
8. **Беркович К. М., Чалов Р. С., Чернов А. В.** Экологическое русловедение. — М.: ГЕОС, 2000. — 332 с.
9. **Карасев И. Ф.** Русловые процессы при переброске стока. — Л.: Гидрометеоздат, 1975. — 287 с.
10. **Лурье П. М., Панов В. Д., Саломатин А. М.** Река Маныч: гидрография и сток. — СПб: Гидрометеоздат, 2001. — 160 с.
11. **Alekseevskiy N. I., Aibulatov D. N.** Evolution of the Volga delta for the last 200 years// The Caspian region: Environmental Consequences of the Climate Change. — М.: Faculty of Geography, 2010. — P. 38–41.
12. **Беркович К. М., Виноградова Н. Н., Завадский А. С. и др.** Нижний бьеф Новосибирской ГЭС в прошлом, настоящем и будущем (опыт исследования формирования природно-техногенной системы) // Эрозия почв и русловые процессы. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008. — Вып. 16. — С. 132–147.
13. **Серебряков А. В.** Русловые процессы на судоходных реках с зарегулированным стоком. — М.: Транспорт, 1970. — 128 с.
14. **Клаffen А. Б., Виноградов В. А., Костюченко А. А.** Неравновесные процессы в формировании речных русел // Маккавеевские чтения—2004. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. — С. 8–25.
15. **Дедков А. П., Мозжерин В. И.** Эрозия и сток наносов на Земле. — Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1984. — 264 с.
16. **Сидорчук А. Ю., Чернов А. В.** Антропогенное изменение эрозионного ландшафта Европейской территории СССР за период активного сельскохозяйственного освоения // Геоэкология: региональные аспекты. Материалы к 9-му съезду Географ. об-ва СССР. — Казань; Л.: Изд-во Казан. ун-та, 1990. — С. 141–143.
17. **Малые реки волжского бассейна** / Ред. Н. И. Алексеевский. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. — 234 с.
18. **Маккавеев Н. И.** Русло реки и эрозия в ее бассейне. — М.: Изд-во АН СССР, 1955. — 543 с.
19. **Беркович К. М.** Русловые процессы и русловые карьеры. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. — 109 с.
20. **Гидрология устьев рек Терека и Сулака** / Ред. В. Н. Михайлов. — М.: Наука, 1993. — 160 с.
21. **Беркович К. М.** Географический анализ антропогенных изменений русловых процессов. — М.: ГЕОС, 2001. — 164 с.

Поступила в редакцию 15 февраля 2012 г.