

К.М.Беркович, А.Ю.Сидорчук 

Оценка устойчивости русел рек Европейской России

Экологическая напряженность в эрозионно-аккумулятивных системах, т.е. в сети разнопорядковых рек, может создаваться как природным развитием процессов, так и техногенно-обусловленных явлений, так как использование рек и их водосборных бассейнов в различных хозяйственных целях нередко столь сильно изменяет речные русла и протекающие в них процессы, что это приводит к возникновению ряда опасных явлений и ситуаций для инженерных сооружений, коммуникаций, населенных пунктов. Естественные размывы берегов рек, обмеление водозаборов, акваторий портов, водных подходов к береговым объектам и судоходных трасс при движении русловых форм относятся к наиболее ярким неблагоприятным проявлениям естественных русловых процессов.

В то же время русла многих рек подвержены широкомасштабному антропогенному воздействию. На Европейской территории России наиболее мощными видами воздействия на русла крупных и средних рек являются гидротехническое строительство - создание гидростанций, каскадом которых охвачено практически все течение Волги, Кама и ряд других рек; разработка карьеров строительных материалов, строительство водозаборов для коммунального, сельскохозяйственного и промышленного водоснабжения, прокладка через них различных коммуникаций. Русла малых рек подвержены деградации и часто полной морфологической трансформации из-за изменения характера землепользования на их водосборах. Режим стока воды и наносов изменяется из-за сведения естественной растительности и распашки водосборов, а это приводит к заилению и иссушению малых рек.

Устойчивость русел крупных и средних рек

Методика оценки устойчивости

Скорость развития русловых процессов определяют природные факторы, такие как гидрологические характеристики реки, геологическое строение дна и берегов, геоморфологические особенности дренируемой территории. Основой прогноза развития русловых процессов, играющих роль в создании экологической напряженности, может служить оценка степени устойчивости русла. В данном случае устойчивость русла трактуется традиционно - как способность русла длительное время сохранять неизменной свою форму и размеры поперечного сечения (Гришанин, 1974). Собственно, степень устойчивости (неустойчивости, подвижности) можно сопоставлять со временем, за которое происходит

заметное изменение формы русла и размеров поперечного сечения - направленные или периодические. Если такие изменения происходят за один или несколько лет, русло считается неустойчивым или слабо устойчивым, наоборот, если изменения можно заметить лишь за столетия - русло устойчиво. Направленные деформации, особенно вертикальные (Чалов,1983) на равнинных реках, к которым относится подавляющее большинство рек Европейской части России, в естественных условиях крайне медленные, по этому признаку реки являются в целом устойчивыми. По характеру же горизонтальных деформаций, которые и влияют на экологическое состояние территорий и функционирование инженерных сооружений, реки достаточно резко рознятся. Скорость развития горизонтальных деформаций - размывы берегов, приводящие к смещениям русла в плане, движение крупных форм руслового рельефа - также являются показателем степени устойчивости русла. Однако, получение таких данных по большому числу рек не всегда возможно, поэтому целесообразно использовать косвенные показатели, которые носят название коэффициентов устойчивости русла. В литературе существует большое количество таких коэффициентов, большинство из которых соотносит живую силу потока с крупностью частиц руслообразующего аллювия, нередко включая в себя элементы морфометрических характеристик русла - ширину или глубину. Одним из самых простых коэффициентов устойчивости такого рода является число Лохтина, представляющее собой отношение диаметра частиц руслообразующих наносов (d) к среднему уклону участка реки (H), выраженному в м/км (‰): $L = d/H$. Хотя этот коэффициент имеет размерность, он все же свободен от априорного задания превалирующей роли какой-либо из морфометрических характеристик (глубины, как коэффициент Н.А.Ржаницына, или ширины, как коэффициент Н.И.Маккавеева) в интенсивности русловых деформаций. Кстати, установлено, что сами морфометрические характеристики (например отношение ширины русла к его глубине) связаны с коэффициентом устойчивости в выше приведенном виде (Маккавеев,1955), т.е. в сущности с устойчивостью донных отложений (аллювия). Коэффициент устойчивости русла позволяет определить степень опасности, которой подвержены размещенные в русле и на его берегах инженерные сооружения, водозаборы, переходы, населенные пункты.

Характеристика устойчивости русел крупных и средних рек в естественных условиях

На средних и крупных реках (длиной более 100 км) низкой устойчивости русла соответствуют скорости размыва берегов, превышающие 10 м/год, обычно таким скоростям деформаций сопутствует быстрое перемещение форм руслового рельефа - более 300 м/год. Коэффициенты Лохтина для таких рек составляют менее 2 (табл. 1)

Таблица 1

Соотношение устойчивости речных русел и характера их деформаций

			Возможная интенсивность природных процессов		
Оценка устойчивости	Коэффициент устойчивости, Л	Геолого-геоморфол. условия	Средние скорости размыва берегов, м/год	Характер горизонтальных деформаций	Скорость смещения форм руслового рельефа, м/год
Устойчивое	более 10	ограниченные	0	отсутствуют	0
Среднеустойчивое	5 - 10	Чередование свободных и ограниченных	менее 2	постепенные (столетия)	менее 50
Слабоустойчивое	2- 5	Свободные	2 - 10	постепенные (десятилетия)	50 - 300
Неустойчивое	менее 2	Свободные	более 10	пороговые (годы и сезоны)	более 300

Эти реки протекают в свободных геолого-геоморфологических условиях по территориям, сложенным рыхлыми породами, резкие изменения планового положения русла могут осуществляться в течение сезона и носят нередко пороговый характер, т.е. резко интенсифицируются в многоводные периоды и сезоны. Слабоустойчивые русла также наблюдаются у рек, протекающих в свободных геолого-геоморфологических условиях, однако интенсивность переформирований их несколько ниже - на средних реках (длиной до

400 км) скорости размыва берегов составляют в среднем 1-5 м/год, а на крупных реках - 2-10 м/год. Периодичность проявления интенсивных деформаций исчисляется десятилетиями. К среднеустойчивым относятся русла рек, протекающих в условиях частичного ограничения русловых деформаций геолого-геоморфологическими факторами, при чередовании по длине рек свободных и ограниченных условий (например, рыхлых и связных пород). Периодичность процессов в этих случаях исчисляется столетиями. Наконец, устойчивые русла, практически недеформируемые, наблюдаются у рек, протекающих в условиях полного ограничения русловых деформаций геолого-геоморфологическими факторами.

На территории Европейской части России трудно выделить районы, где бы русла средних и крупных рек отличались однородной степенью устойчивости. В целом преобладают реки с среднеустойчивым руслом. Выделяются три региона, где чаще всего распространены реки с устойчивым руслом: запад, северо-запад и отчасти восток территории (реки Нарва, Великая, Волхов, Ловать, реки Карелии и Кольского полуострова, Онега, верховья Печоры, Белой, Урала, Вишера, Чусовая, Уфа). Кроме того, к устойчивым относятся русла рек, протекающих через Смоленско-Московскую и Средне-Русскую возвышенности: Молога, верховья Волги, Оки, Дона, Днепра.

Среднеустойчивыми руслами в преобладающем большинстве отличаются реки центральной части Русской равнины в бассейнах средней и нижней Волги и Дона. Вместе с тем, слабоустойчивые русла встречаются в средних и нижних течениях наиболее крупных рек территории как на ее севере, так и на юге: Мезень с Вашкой, Северная Двина, низовья Оки, Дона, Волги.

Неустойчивыми руслами отличаются на Европейской территории России только реки Предкавказья : низовья Кубани, Терек и ряд других.

Устойчивость русел крупных и средних рек в условиях антропогенной нагрузки

Антропогенные факторы, определяющие экологическое состояние рек, по разному сказываются на руслах больших и средних рек с разной природной устойчивостью. Речные русла отличаются неодинаковой способностью воспринимать антропогенную нагрузку и сопротивляться ей. При одних видах нагрузки русла рек практически не меняются, при других - становятся качественно иными. С другой стороны, при одном и том же виде нагрузки одни русла остаются неизменными, а другие резко меняются. Поэтому можно говорить о степени устойчивости русел рек к антропогенной нагрузке (УАН) в отличие от природной устойчивости. Устойчивость русел к антропогенной нагрузке можно определить

как свойство сохранять при нагрузке свои основные морфометрические и динамические характеристики. Механические изменения их русел, происходящие в результате строительства инженерных объектов на берегах и в самих руслах, выправления и дноуглубления для нужд судоходства, разработки карьеров стройматериалов до определенной степени не вносят существенных изменений в природные характеристики русла, особенно на реках с относительно слабой устойчивостью русла - последствия вмешательства быстро ликвидируются самой рекой. нередко при этом степень устойчивости русла возрастает. Наоборот, на реках с устойчивым и среднеустойчивым руслом механические изменения русла сохраняются длительное время, накапливаются, в результате русло теряет исходные характеристики, что сказывается на уровненом режиме реки, интенсификации горизонтальных и вертикальных деформаций. Независимо от степени устойчивости русла большие изменения в русловой режим рек вносит использование речных русел в качестве водоприемников сбросных (коллекторных) вод, пересечение пойм коммуникациями, их застройка и т.п. Это также проявляется в активизации размывов берегов и дна рек, увеличении площади их живого сечения, понижении уровней воды, обсыхании или обмелении периферийных участков.

Последствия существования на реках крупных гидроузлов в сравнительно небольшой степени зависят от степени устойчивости речного русла, т.к. в любом случае из-за глубокого изменения факторов природные характеристики русла меняются. Разница заключается в скорости трансформации русла.

Устойчивость русел малых рек

Методика оценки устойчивости и устойчивость малых рек в естественном состоянии

Главным критерием устойчивости малых рек по отношению к заилению является их транспортирующая способность (ТС). Для расчета ТС имеется значительное количество формул. В настоящем исследовании в качестве опорной принята формула Е.М.Замарина (1951). Эта формула калибрована по данным о транспортирующей способности потоков с алевритовыми и мелкопесчаными наносами, наиболее обычными в малых реках. Формула Замарина имеет вид:

$$R = 0,022 * Q \left(\frac{U}{\omega} \right)^{1,5} \sqrt{HI} .$$

Здесь R - транспортирующая способность потока в кг/с; Q - расход воды в м³/с; U -скорость течения в м/с; ω -гидравлическая крупность в м/с, формула справедлива в диапазоне 0,002-0,008; H -глубина потока в м; I -уклон.

Нежиховским (1971) на основании обработки большого гидрометрического материала получены следующие гидролого-морфометрические зависимости для рек длиной >10 км:

$$B = 14,8 * Q^{0,51};$$

$$H = 0,8 * Q^{0,25};$$

$$I = \frac{A_3}{F^{0,35}}.$$

Здесь B - ширина русла в м; F - площадь водосбора в км²; A_3 составляет 0,0142 для возвышенностей; 0,0085 для увалов; 0,0036 для холмистых равнин и 0,0014 для низменностей.

Принимая во внимание, что

$$Q = F * M$$

и

$$U = \frac{Q}{BH}$$

формула (1) записывается в виде:

$$R = k_1 * Q^{1,5} * I^{0,5} \quad (2)$$

или

$$R = k_1 * (M * F)^{1,5} * I^{0,5} \quad (3)$$

или

$$R = k_2 * M^{1,5} * F^{1,3} \quad (4)$$

Значения коэффициентов k_1 и k_2 зависят от крупности наносов и ландшафта водосбора (табл.2).

Таблица 2.

ландшафт					
крупность наносов		возвышенности	увалы	холмистые равнины	низменности
к ₁		к ₂			
крупный алеврит	5,29	0,075	0,045	0,019	0,0074

тонкий песок	0,66	0,0094	0,0056	0,0024	0,0009
--------------	------	--------	--------	--------	--------

В силу нелинейности формулы (4) с показателем степени при площади водосбора >1 транспортирующая способность рек длиной >10 км, протекающих в единых ландшафтно-климатических условиях, увеличивается с увеличением площади водосбора. При отсутствии изменений на водосборе у этих рек всегда имеется потенциал для самоочищения от наносов, поступающих на данный участок реки и эти реки обладают абсолютной устойчивостью в естественных условиях.

В то же время верховьям рек вблизи их истоков, а также рекам длиной менее 10 км присущи самые большие уклоны (больше, чем следует из зависимости Нежиховского). Это показано Ржаницыным (1985) при обобщении большого морфометрического материала по рекам Европейской России (табл.3).

Таблица 3. Обобщенные морфометрические и гидравлические параметры равнинных малых рек Русской равнины (по Н.А.Ржаницыну)

Порядок реки	Площадь водосбора км ²	Длина км	Расход м ³ /с	уклон	Расход наносов кг/с	Модуль стока наносов т/га
1	0,39	0,8	0,0039	0,134	0,38	310
2	1,20	1,5	0,011	0,0492	0,19	50
3	3,60	2,8	0,03	0,20	0,12	10
4	10,5	5,1	0,088	0,0089	0,10	3
5	30,7	9,3	0,25	0,0042	0,10	1
6	89,0	16,9	0,71	0,00216	0,11	0,4
7	262,0	31,0	2,0	0,00114	0,13	0,16
8	770,0	57,0	5,65	0,00063	0,19	0,08
9	2260,0	104,0	16,0	0,00036	0,30	0,04

На этих реках и ручьях (с 1 по 5 порядок) транспортирующая способность потока уменьшается с увеличением размера водотока в связи с быстрым уменьшением уклона. Подобное распределение уклонов и расходов воды по длине рек в их верховьях приводит к

абсолютной неустойчивости водотоков 2-5 порядков в естественных условиях. Эти водотоки могут транспортировать наносы в меньшем количестве, чем в них поступает из верхних звеньев гидросети, и здесь аккумулируются наносы и повышаются отметки продольного профиля даже без изменения ландшафтно-климатических условий на водосборе.

Следует учитывать, что в табл. 3 вынесены обобщенные морфометрические и гидравлические параметры малых рек. Морфометрические характеристики мелких водотоков, постоянных и временных, гораздо более разнообразны и существенно зависят от местных особенностей ландшафта. Поэтому в конкретных условиях абсолютная устойчивость или неустойчивость малых рек зависит от изменения уклона и водности по длине сети конкретных водотоков

Устойчивость русел малых рек в условиях антропогенной нагрузки

Критерием уязвимости малых рек по отношению к заилению в условиях антропогенной нагрузки и ускоренной эрозии на водосборах является их относительная транспортирующая способность - отношение транспортирующей способности малой реки в данном створе к стоку наносов, поступающему в реку с водосбора (ОТС). По ОТС можно определить направленность и интенсивность развития продольного профиля. При $ОТС > 1$ происходит углубление реки и очищение ее от наносов. Такие участки реки устойчивы по отношению к заилению, и степень устойчивости тем больше, чем больше ОТС. При $ОТС < 1$ происходит аккумуляция наносов в реке, повышение поймы и русла. Такие участки реки неустойчивы по отношению к заилению, и степень неустойчивости тем больше, чем меньше ОТС.

В последней графе таблицы 3 приведен модуль стока наносов с водосбора: который соответствует транспортирующей способности потока.

Если модуль стока наносов в ходе ускоренной эрозии на водосборе (с учетом коэффициента доставки наносов в реку) превышает указанный в таблице 3 для данной категории рек, то $ОТС < 1$, и река на данном участке неустойчива по отношению к заилению. Чем меньше ОТС, тем больше вероятность того, что при увеличении стока наносов на водосборе малая река начнет заиливаться. В Европейской части России средняя интенсивность эрозии с водосборов обычно превышает 2-6 т/га в год (Белоцерковский и др, 1990). В этих условиях равнинные малые реки длиной 30-100 км, для которых коэффициент доставки наносов составляет 0,1-0,5, не могут транспортировать все поступающие с водосбора наносы и являются неустойчивыми. Это справедливо для гидрологических

параметров, приведенных в таблице 3. Фактическая степень этой неустойчивости при одинаковой антропогенной нагрузке определяется величиной транспортирующей способности потока и зависит от географического распределения малых рек по уклонам и водности.

Отличия в транспортирующей способности рек близких размеров (с одинаковой площадью водосбора) определяются модулем стока воды M и уклоном реки I (если исходить из близкой крупности взвешенных наносов). Степень неустойчивости малых рек устанавливается по диаграмме 1 (составленной по формуле (3) для рек длиной 50 км, несущих крупные алевриты). С помощью этой диаграммы по данным о модуле стока и уклонах рек длиной 50 км составлена карта неустойчивости малых рек по отношению к заилению (рис).

Анализ современного состояния малых рек показывает, что при $M > 400$ мм и $I > 0,001$ вероятность начала процесса заиления малых рек мала и такие реки можно считать устойчивыми. К категории устойчивых рек относятся малые реки горного и полугорного типов. В Европейской части России они распространены на территории Мурманской области и на севере Карелии, на Урале и Сев. Кавказе (в горной части).

Слабо неустойчивые малые реки выделяются в области северного и северо-западного мегасклонов Русской равнины в зоне высокой водности рек и холмистого рельефа. Это левобережье Печоры, бассейны Мезени, Б.Северной Двины ниже Вычегды, Балтийского моря.

Средне неустойчивые реки также развиты на северном мегасклоне Русской равнины в бассейнах Вычегды и Сухоны, а также на севере южного мегасклона в верховьях Камы и Вятки.

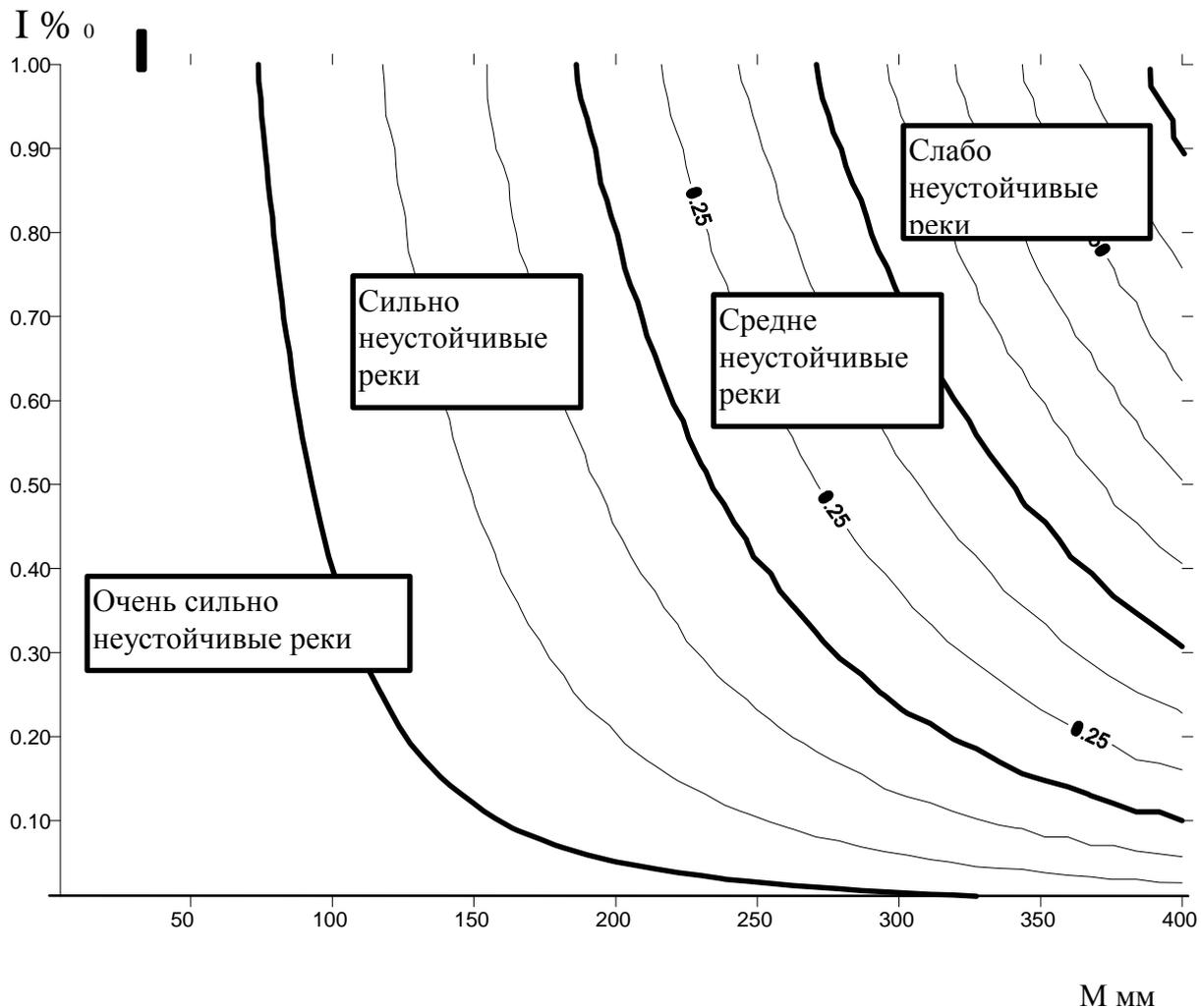
Сильно неустойчивые реки в Европейской части России занимают территорию южного мегасклона Русской равнины в лесной и лесостепной зонах. Их размещение здесь обусловлено уменьшением водности рек. Локально в этом регионе могут встречаться более устойчивые реки в областях холмистого рельефа.

Очень сильно неустойчивые реки в Европейской части России распространены в степи и южной степи, их уязвимость обусловлена в основном малой водностью рек, где малое количество осадков сочетается с малыми уклонами рек.

В целом ведущим фактором, определяющим устойчивость или неустойчивость рек по отношению к заилению в условиях ускоренной эрозии на водосборе, является уклон

водотоков. Разделение неустойчивых водотоков по степени их неустойчивости в основном определяется их водностью.

Диаграмма для определения степени уязвимости по отношению к заилению малых рек длиной 50 км со взвешенными наносами алевритового состава по уклону русла I и модулю стока воды M .



Современное состояние ручьев и малых рек Европейской России, особенно на южном мегасклоне, близко к катастрофическому. Интенсивная склоновая и овражная эрозия на водосборах на протяжении более 300 лет активного сельскохозяйственного использования земель привели к выносу в балочно-русловую сеть почти 100 млрд. т наносов. Из них лишь 6-7% достигли низовьев рек, большая часть переотложилась в руслах и на поймах малых рек. Мощности отложений достигают 5,0-6,0 м, и очень часто составляют 2,0-4,0 м.

Главная причина деградации малых рек - эрозия на их водосборах. Основным методом борьбы с деградацией малых рек должно быть широкое распространение почво-

водоохранных технологий землепользования. Необходимо создание государственной службы охраны почв от эрозии и малых рек от заиления.

Литература

Белоцерковский М.Ю., Жаркова Ю.Г., Кирюхина З.П., Ларионов Г.А.,

Литвин Л.Ф., Пацукевич З.В. Эрозионноопасные землм Европейской части СССР. В сб.: Земельные и водные ресурсы. Противоэрозионная защита и регулирование русел. М., Изд-во Моск.ун-та, 1990, с. 3-20

Нежиховский Р.А. Русловая сеть бассейна и процесс формирования стока воды Л., Гидрометеиздат, 1971, 476 с.

Ржаницын Н.А. Руслоформирующие процессы рек. Л., Гидрометеиздат, 1985, 263 с.