

УДК 551.435.13→551.312.3(282.2)

© 2017 г. К.М. БЕРКОВИЧ, Л.В. ЗЛОТИНА, Л.А. ТУРЫКИН

**ЕСТЕСТВЕННЫЕ И АНТРОПОГЕННЫЕ
НАПРАВЛЕННЫЕ ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ РУСЕЛ РЕК**

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
географический факультет, Москва, Россия
e-mail: berkovich@yandex.ru, zleonora@yandex.ru, filigorod@list.ru*

Направленные вертикальные деформации — это систематическое врезание или отложение наносов на значительном протяжении реки, в процессе которого происходит повышение или понижение высотного положения продольного профиля реки и изменение его формы.

Современные деформации происходят во временном интервале, документируемом историческими материалами и непосредственными наблюдениями, который охватывает несколько столетий, развиваются под влиянием человека или имеют чисто антропогенное происхождение, хотя известную роль играют естественные деформации, обусловленные тектоникой и изменениями климата.

Для анализа динамики процесса вертикальных деформаций русла использованы, кроме литературных источников по ряду рек Мира, материалы исследований участков р. Оби выше и ниже Новосибирского водохранилища, участка нижнего бьефа Воткинского гидроузла на р. Каме, участков рек Томи, Оки, Белой с массовыми русловыми карьерами, на которых авторами выполнялись и выполняются в настоящее время исследования русловых процессов. Постройка плотин и создание водохранилищ, а также добыча строительных материалов из русел рек наиболее заметно способствуют развитию вертикальных деформаций.

Анализ материалов показал, что как процесс врезания ниже плотин и на участках русловых карьеров, так и процесс регрессивной аккумуляции выше водохранилищ описывается экспоненциальной зависимостью, отражающей асимптотический характер понижения или повышения дна. Коэффициенты зависимости зависят от подвижности русла. В ходе врезания русло реки становится все менее подвижным, и его восстановление может происходить в другой гидрологической и геоморфологической обстановке.

Ключевые слова: русловые процессы, продольный профиль реки, антропогенные нарушения.

Поступила в редакцию 01.11.2016

Принята к печати 20.06.2017

DOI: 10.7868/S0435428117040010

**NATURAL AND ANTHROPOGENIC IRREVERSIBLE
VERTICAL RIVERBED DEFORMATIONS****K.M. BERKOVICH, L.V. ZLOTINA, AND L.A. TURYKIN**

*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia
e-mail: berkovich@yandex.ru, zleonora@yandex.ru, filigorod@list.ru*

S u m m a r y

Irreversible vertical deformation implies the systematic incision or sediment deposition within a considerable length of the river, in the course of which rise or lowering of river long profile and change of its general shape occur. Contemporary deformations occur in time intervals documented by historical materials and direct observations, that span several centuries, develop under the human influence or have a purely

anthropogenic origin, although natural deformations due to tectonics and climate change play some role as well.

To analyze the dynamics of the riverbed vertical deformations process, published sources for several rivers over the World were used as well as authors' own studies in a number of rivers: Ob river upstream and downstream of Novosibirsk reservoir, Kama river downstream of the Votkinsk dam, Selected reaches in rivers Tom', Oka, Belaya Rivers with a large scale in-stream mines. Dam construction and creation of reservoirs as well as in-stream extraction of building materials most notably contribute to the development of vertical deformations.

Results show that both the process of incision downstream of dam and in sections with in-stream mines and the process of regressive accumulation upstream of the reservoirs are described by an exponential relationship reflecting the asymptotic nature of the lowering or rise of the riverbed. The relationship coefficients depend on the mobility of the channel. In the course of incision, riverbed becomes less movable, and its recovery may occur in other hydrological and geomorphological setting.

Keywords: channel processes, river long profile, anthropogenic disturbances

Received 01.11.2016

Accepted 20.06.2017

Введение

С конца XIX в. известны три фактора, определяющих характер русловых процессов, меняющихся в пространстве и во времени. Это – водоносность потока, уклон поверхности, по которой он течет, прочность грунтов, с которыми он взаимодействует в процессе движения. Первый и второй факторы определяют запас энергии, которой водный поток располагает для выполнения работы по собственному перемещению и транспорту наносов, третий характеризует силы сопротивления дна и берегов воздействию потока. В постулате В.М. Лохтина [1] в явном виде отсутствует сток наносов, как фактор развития русла, однако он подразумевается, т.к. нет рек, которые не переносили бы наносы, поступающие в реку вследствие эрозии на водосборе, склоновых процессов, привноса притоками, размыва берегов и дна.

Направленные вертикальные деформации – это систематическое врезание или отложение наносов на значительном протяжении реки, в процессе которого происходит повышение или понижение высотного положения продольного профиля реки и изменение его формы.

Вертикальные деформации различаются по масштабу, как пространственному, так и временному и отражают один из фундаментальных постулатов теории русловых процессов: автоматического выравнивания транспортирующей способности по длине реки [2]. Периодические [3] вертикальные деформации, такие как чередование размыва и аккумуляции в системе плес-перекатного устройства речного дна происходят ежегодно и обусловлены сезонными колебаниями водности реки. Они охватывают участки реки длиной, не превышающей 5–10 ширин русла. Прохождение экстремальных половодий и паводков, особенно на фоне четковидности дна речных долин вызывают деформации, которые имеют более редкую повторяемость, охватывают участки рек длиной в десятки километров. Их последствия ликвидируются рекой в течение нескольких лет, за которые продольный профиль реки возвращается в исходное состояние. Главный гидрологический признак отсутствия направленных деформаций – это относительное постоянство кривой связи расходов и уровней воды на гидрологических постах за многолетний период.

Значительное изменение факторов формирования русла, иногда кратковременное, но мощное, чаще растягивающееся на длительный период, и постепенное, приводит к возникновению направленных вертикальных деформаций: врезанию или отложению наносов, которые выражаются, соответственно, в понижении или повышении продольного профиля реки обычно на большом расстоянии и на долгое время.

Современные деформации – это те, которые можно наблюдать в настоящее время, а точнее во временном интервале, документируемом историческими материалами и непосредственными наблюдениями, охватывающим несколько столетий. В течение всего этого периода происходило усиление воздействия человека на факторы русловых

процессов и сами русла рек. Поэтому современные вертикальные деформации часто развиваются под влиянием человека или имеют чисто антропогенное происхождение. Это отчетливо проявляется в изменении скорости русловых деформаций, если их рассматривать в разных масштабах времени. Так, скорость врезания в среднем течении р. Рейна за последние 10 тыс. лет оценивается в 1 мм/год, тогда как в последние столетия она составляла 5, а в последние десятилетия – 10 мм/год [4].

С физической точки зрения вертикальные деформации возникают в силу двух основных причин: 1) изменения транспортирующей способности потока, его энергии; 2) изменения противоэрозионной устойчивости русла. Различают два направления деформаций: врезание и аккумуляция. Врезание развивается в результате увеличения уклона и расхода воды, а также неравномерности стока [2]; к врезанию также приводят уменьшение расхода наносов и размера несвязного материала, стеснение потока, уничтожение растительного покрова. Аккумуляция обычно связана с уменьшением водности, увеличением стока наносов и подпором потока.

Направленные деформации, вызванные естественными причинами

Среди природных факторов, приводящих к возникновению направленных деформаций выделяются: активная тектоника, катастрофические события, изменения климата, определяющие колебания стока воды и наносов, изменение высоты базиса эрозии, устьевое удлинение реки.

Роль активной тектоники в современной трансформации продольных профилей рек выявить достаточно сложно. Там, где она может проявляться, не проводятся соответствующие наблюдения, а там, где наблюдения ведутся, обычно велика роль антропогенных факторов. Активная тектоника – главная причина направленных деформаций (чаще всего врезания) в горных регионах. В результате тектонических деформаций, прежде всего, увеличивается или уменьшается уклон. В самом общем виде уклон продольного профиля пропорционален скорости тектонического поднятия и обратно пропорционален устойчивости субстрата [5]. Скорость врезания сложным образом зависит от водоносности конкретной реки, режима стока, прочности связанных горных пород или крупности аллювия, темпов тектонических движений [6]. Интенсивность врезания рек в различных условиях изменяется в широких пределах. В твердых породах в условиях горного рельефа она составляет 2–4 мм/год, в рыхлых отложениях превышает 10 см.

На основании анализа речных террас А.А. Никонов [7] выяснил, что средние за последние 3–50 тыс. лет скорости врезания рек горных районов Средней Азии составляют 1–3 и достигают 7 мм/год. Почти такие же скорости у рек того же региона выявлены О.П. Щегловой [8] путем анализа кривых связи уровней и расходов воды, согласно которому средняя годовая величина врезания равна 7–10 мм. На одной из рек Ирана скорость углубления русла равна 2 мм/год [9]. В горном регионе северо-восточного Тибета притоки Хуанхэ в верхнем течении за последние 1000 лет врезались со скоростью от 1 до 10 мм/год [10].

В естественных условиях горного рельефа, паводочного режима реки и широкого развития легко размываемых грунтов возможна более высокая скорость направленных вертикальных деформаций. Так, А.Ю. Сидорчук и Р.С. Чалов [11] обнаружили, что р. Алабуга (приток Нарына) за последние 200 лет врезалась в среднем на 0.4–30 см/год, а только в 1983–1992 гг. – на 6 м без существенного изменения внешних условий. На реках польских Карпат средняя скорость углубления русел за последнее столетие составила 1.3–3.8 см/год [12]. Интенсивное врезание одной из рек на северо-западе США последовало за извержением вулкана, поставившим в русло огромное количество крупнообломочного материала. В течение 10 лет река врезалась на 20–30 м на протяжении 10 км [13].

Реки, берущие начало в горах, попадают в предгорья и на равнины, где скорость поднятия территории на порядок величины меньше или же поднятие сменяется

опусканием. Вместе с тем, уклон крупных рек невелик, и относительное его приращение может оказаться достаточно большим, чтобы врезание развивалось и в этих условиях. Кроме того, на развитие продольного профиля начинают оказывать влияние климатические и ландшафтные факторы. Поэтому в предгорьях и на равнинах часто наблюдается сложное чередование участков с сохраняющейся тенденцией к врезанию и участков аккумуляции наносов и повышения дна долин [14]. Подобное явление наблюдалось в 1980–1990-е гг. в нижнем течении Рейна [4].

Изменение гидрологических факторов, которые связаны с климатическими изменениями, оказывает существенное влияние на развитие вертикальных русловых деформаций. С одной стороны, они непосредственно влияют на величину стока воды и его неравномерность, с другой стороны они определяют ландшафтные условия водосбора, которые в свою очередь оказываются очень важными для формирования стока воды и наносов. Направленные деформации, связанные с изменением гидрологических факторов, подчиняются цикличности, свойственной климатическим изменениям. Так, во время малого ледникового периода (XVI–XIX вв.) обычным процессом на многих реках Европы была аккумуляция [15]. В верхнем и среднем течении Оби направленные деформации увязываются с 1800-летними периодами колебания увлажненности климата Северного полушария [16]. При ее увеличении и повышении водности реки в верхнем течении (ниже слияния Бии и Катуня) активизируются процессы врезания. Согласно данным о стоке наносов скорость врезания составляет около 0.8 мм/год. В последние 45 лет прослеживается заметное снижение минимальных уровней воды на гидропосту Фоминское (8 км ниже слияния Бии и Катуня – истока Оби), составляющее до 10 мм/год.

Аккумуляция обычно связана с уменьшением водности реки, особенно если при этом растет расход наносов. Наиболее яркое проявление аккумуляции характерно для нижнего течения Хуанхэ, где она является естественным фоном и связана с недостаточным стоком воды для транспорта наносов в частности из-за интенсивного водопотребления, достигающего сейчас половины годового стока реки. Четверть годового стока наносов из 1.6 млрд т откладывается на участке длиной 780 км, дно реки поднимается на 1 м в десятилетие [17]. Обратный процесс – врезание – связан с увеличением водности реки на фоне уменьшения расхода наносов.

В большинстве случаев естественные направленные деформации русел равнинных рек имеют небольшую скорость – мм/год, и часто их трудно выявить, так как они затушеваны на фоне периодических деформаций. Так более 50% рек США в 1950–2011 гг. испытывали направленные деформации продольного профиля, скорость которых в среднем составляла ± 0.5 см/год, хотя за историческое время скорости деформаций были в несколько раз больше, например, русло р. Миссури с середины XIX по середину XX в. врезалось на 4 см/год [18]. Скорость аккумуляции в середине XX в. на нижней Рио-Гранде и верхней Миссисипи составляла 6–7 см/год [17].

Анализ уровневого режима ряда российских рек за последнее столетие показал, что смена фазы пониженного стока, продолжавшейся до середины 1970-х гг., фазой повышенного стока сопровождалась сменой направленности вертикальных деформаций. В периоды повышенной водности отметки дна понижаются, наоборот происходит в периоды пониженной водности, причем размах направленных деформаций на реках центра Европейской части России составляет в среднем ± 2 см/год в зависимости от величины нормированных отклонений стока [19]. При этом преобладает врезание со средней скоростью 1.4 см/год. Исследование кривых связи расходов воды и уровней для более, чем 40 гидрологических постов верхнего Днепра и Дона [20] за последние 60–70 лет показали, что средняя величина врезания равна примерно 1 см/год (Десна в Брянске врезается почти на 2 см/год). В то же время углубление русла р. Северной Двины в нижнем течении за тот же период составляло 4–7 мм/год [21]. Средняя скорость врезания р. Лены в первой половине XX в. была около 0.5 см/год [22]. Это подтверждается почти двукратным увеличением мутности реки на расстоянии 2400 км

между пос. Качуг и с. Табага. Хотя деформации положительного знака встречаются реже, их средняя величина больше — 2.6 см/год (максимальная 5 см/год).

Разнообразие направленности и скорости вертикальных деформаций объясняются влиянием региональных факторов, таких как средняя годовая температура, годовое количество осадков, их интенсивность и сезонное распределение, амплитуда паводков, характер рельефа, покровных пород и растительности. Кроме того, следует иметь в виду хозяйственную деятельность в речных бассейнах и руслах равнинных рек, роль которой в направленных деформациях русел очевидна, хотя и трудно выявляется.

Изменение высоты базиса эрозии приводит к развитию направленных вертикальных деформаций на приустьевых участках рек. Повышение уровня Каспийского моря на 2.4 м в 1978–1995 гг. существенным образом сказалось на продольных профилях рек, впадающих в него. Оно привело к повышению отметок дна реки на расстоянии в несколько десятков километров [23].

Рост расхода наносов и уменьшение расхода воды под влиянием катастрофических событий может приводить к значительным скоростям трансформации продольного профиля. Локальная аккумуляция может возникать ниже впадения крупных притоков, выше схода мощных оползней. Дно р. Брахмапутры в первые годы после землетрясения 1950 г. повышалось со скоростью до 30 см/год на участке длиной более 100 км [24].

Направленные деформации, связанные с деятельностью человека

В современных условиях направленные деформации часто связаны с деятельностью человека, включающую изменение использования земель в речных бассейнах, создание водохранилищ, регулирование русел, добычу полезных ископаемых. Деятельность человека на реках и в их бассейнах разнообразна, она вносит значительный, зачастую решающий вклад в возникновение и развитие вертикальных деформаций. В результате хозяйственных мероприятий изменяются как факторы формирования русла, так и морфология самого русла. Ряд мероприятий нарушает непрерывность движения воды и наносов вдоль реки или взаимосвязь русла и поймы. Часто на реке можно наблюдать комплекс антропогенных нарушений, усиливающих или, наоборот, ослабляющих воздействие друг друга. В ряде случаев деятельность человека сказывается преимущественно на малых реках, тогда как крупные реки остаются в естественном состоянии; в других случаях, наоборот, влияние различных гидротехнических сооружений и мероприятий распространяется на крупные реки при сравнительно слабом нарушении водосборных бассейнов и, соответственно, русел малых рек.

Один из наиболее древних и распространенных видов воздействия человека, который непосредственно сказывается на вертикальных направленных деформациях, это сведение лесов и распашка земель на водосборе. Так, вычислено, что сток наносов р. Арно в Италии в период активного освоения ее бассейна в XVII–XVIII вв., увеличился в четыре раза по сравнению с естественными условиями, господствовавшими до XVI в. [25], что привело к аккумуляции по всей длине реки. Скорость аккумуляции в верхнем течении Миссисипи с середины 1960-х гг. достигала 4 см/год [26]. Отчетливая аккумуляция развивалась в конце XIX — первой половине XX в. в верхнем течении р. Оки и на ряде ее притоков как реакция на широкую распашку и вырубку лесов. К середине XX в. аккумуляция распространилась, по меньшей мере, на 400 км течения реки, а ее скорость составляла от 0.6 до 2 см/год. В освоенных густо населенных регионах этот древний вид деятельности служит фоном для действия других нарушений.

Существенную роль в развитии вертикальных деформаций играют регулирование русла для разных целей с созданием сооружений и дамб обвалования вплоть до канализации русел; спрямление излучин; добыча полезных ископаемых. Например, спрямление излучин Миссисипи привело к углублению русла реки за 10 лет на 4 м, понижение дна распространилось на 65 км [26]; спрямление и расчистка русел в центре США способствовало врезанию на 10–20 см/год [13]. Врезание со скоростью

2.5 см/год, в результате регулирования русла, наблюдается в последние 60 лет на голландском участке Рейна [4].

Широкомасштабные разработки месторождений золота, олова и других минералов в руслах рек разных регионов приводили к быстрой аккумуляции, распространявшейся вниз от мест добычи. Причина аккумуляции заключалась в перегрузке речных потоков наносами в результате их сброса при гидравлической добыче, а ее скорость составляла от 6 до 60 см/год [26].

Вертикальные деформации русел рек Оби, Камы, Томи, Белой, Оки

Постройка плотин и создание водохранилищ, а также добыча строительных материалов из русел рек — широко распространенные в Мире виды воздействия, способствующие развитию вертикальных деформаций. Создание водохранилищ и разработка русловых карьеров, внося очень быстрые изменения в сток наносов и морфологию русла, являются “стрессом” для реки. Для анализа динамики процесса вертикальных деформаций русла использованы материалы исследований участков р. Оби выше и ниже Новосибирского водохранилища (с учетом литературных источников по ряду рек Мира), участка нижнего бьефа Воткинского гидроузла на р. Каме, участков рек с массовыми русловыми карьерами, на которых авторами выполнялись и выполняются в настоящее время исследования русловых процессов: р. Томи в районе Томска, р. Белой ниже г. Уфы, р. Оки между г. Калуга и Коломна, а также в районе Рязани. В ходе исследования анализировался многолетний ход изменений отметок дна и водной поверхности при фиксированном расходе или минимальных уровнях за период открытого русла. Если для нижних бьефов ГЭС хорошие результаты дает анализ отметок дна, то понижение дна реки на участках с русловыми карьерами не отражает интенсивности врезания, так как в значительной степени определяется активностью добычи, в ходе которой аллювиальный материал искусственно удаляется в количествах, не компенсируемых поступлением наносов сверху по течению реки. Поэтому более объективным является анализ минимальных уровней воды.

Для анализа и возможного прогноза развития вертикальных деформаций использовался подход, предложенный для прогноза развития вертикальных деформаций при мощном и быстром «стрессовом» одноразовом нарушении с последующей выработкой продольного профиля реки в соответствии с гидрологическими и геоморфологическими условиями (стоком воды, расходом наносов, их крупностью) [13].

Установлено, что процесс врезания описывается экспоненциальной зависимостью:

$$\frac{z}{z_0} = a + be^{-kT}, \quad (1)$$

в которой коэффициент a представляет собой безразмерную отметку дна в момент, когда дно стабилизируется; коэффициент b равен изменению относительной отметки на тот же момент; показатель степени k отражает скорость изменения отметки; z — отметка дна после деформаций; z_0 — исходная отметка дна; T — время. Эту зависимость до сих пор не применяли для оценки динамики процессов эрозии и аккумуляции, обусловленной влиянием больших плотин (водохранилищ) и русловых карьеров. Вместе с тем, полученный в ходе исследований материал по морфологии русла и составу донных наносов позволил оценить энергию потока в виде влекущей силы, выраженной числом Шильдса в безразмерном виде:

$$\tau_* = \frac{\rho ghI}{(\rho_s - \rho)gd}, \quad (2)$$

где ρ и ρ_s — плотность воды и наносов; g — ускорение свободного падения; h — глубина; I — уклон; d — средний диаметр донных наносов. Число Шильдса меняется от величин <0.04 для рек с валунно-галечными наносами до величин >1 для рек с тонким песчаным аллювием [27]. Предельной величиной τ_* для равнинных рек с песчано-гравийными

наносами, отражающей отсутствие движения частиц донных наносов является 0.045. Отношение реального числа Шильдса к его предельному значению характеризует степень подвижности русловых наносов при данном уклоне и крупности наносов

$$\left(\varphi = \frac{\tau_*}{\tau_c} \right).$$

Соотношение между природными и антропогенными вертикальными деформациями

Влиянию водохранилищ на трансформацию продольных профилей рек и через нее на эколого-гидрологические условия дна речных долин посвящена обширная литература. При этом основное внимание уделялось процессам, происходящим ниже плотин. Вместе с тем не менее важными могут быть последствия процессов, развивающихся на свободных участках рек выше водохранилищ.

К таким процессам относится регрессивная аккумуляция, приуроченная к участкам рек, расположенным выше крайней точки выклинивания подпора водохранилища. Механизм этого процесса рассмотрен Н.И. Маккавеевым и др. [28], которые обнаружили, что дальность распространения аккумуляции линейно связана с накоплением наносов в точке выклинивания максимального подпора. Регрессивная аккумуляция наиболее заметна в тех случаях, когда уровень водохранилища мало меняется в течение года (или нескольких лет в случае многолетнего регулирования) и в районе выклинивания подпора формируется отчетливая гряда (бар). В таких условиях находятся, например, р. Нил выше оз. Насер (Египет), р. Колорадо выше оз. Мид (США), р. Днестр выше Дубоссарского водохранилища (Молдавия). Скорость продвижения волны аккумуляции на этих реках составляет 1–3 км/год. Аккумуляция развивается и в других условиях, но этот процесс в целом слабо изучен. Наибольшая интенсивность регрессивной аккумуляции (в среднем до 15 см/год) наблюдалась на р. Хуанхэ и ее притоке Вэньхэ. Спустя 45 лет после создания водохранилища Саньмэнься, в 100–150 км выше точки выклинивания подпора слой аккумуляции составил 5–6 м [29]. На других реках Китая, также как Хуанхэ отличающихся высокой мутностью, отмечались скорости регрессивной аккумуляции до 6 см/год при продвижении вверх по течению до 1 км/год.

Выше Новосибирского водохранилища процесс регрессивной аккумуляции развивался достаточно интенсивно и выделялся характерными чертами. Хотя водохранилище отличается значительной сработкой, на участке выклинивания максимального подпора (165–180 км от плотины) за время эксплуатации сформировалась небольшая гряда. Если обратиться к данным гидрологического поста, расположенного более, чем в 100 км выше по течению, то там за период существования водохранилища происходила быстрая аккумуляция со скоростью до 5 см/год. Ход аккумуляции в 1955–1985 гг. убедительно описывается зависимостью (1) с достаточно большой скоростью процесса. Снижение темпа аккумуляции в конкретной точке реки обусловлено увеличением уклона, что восстанавливает транспортирующую способность потока при более высоком уровне дна. Асимптотический характер кривой аккумуляции (рис. 1) говорит о том, что деформации русла не прекращаются окончательно, а лишь до минимальных значений снижается их скорость. Действительно, данные по уровням р. Оби за 2001–2015 гг. выявили тенденцию к аккумуляции, но с темпом вдвое меньшим.

Подобный подход можно применить к оценке врезания ниже плотин. Причина его развития – перехват наносов водохранилищем, сопровождающийся часто изменением режима стока воды. Скорость врезания, очевидно, определяется составом донных отложений, геологическим строением дна реки, степенью изменения режима стока воды (сокращения или увеличения водности, перераспределения стока во времени и пр.).

Средняя скорость врезания на реках Мира в этих условиях составляет 0.25, а максимальная – 0.8 м/год. Средняя скорость перемещения волны эрозии вниз по

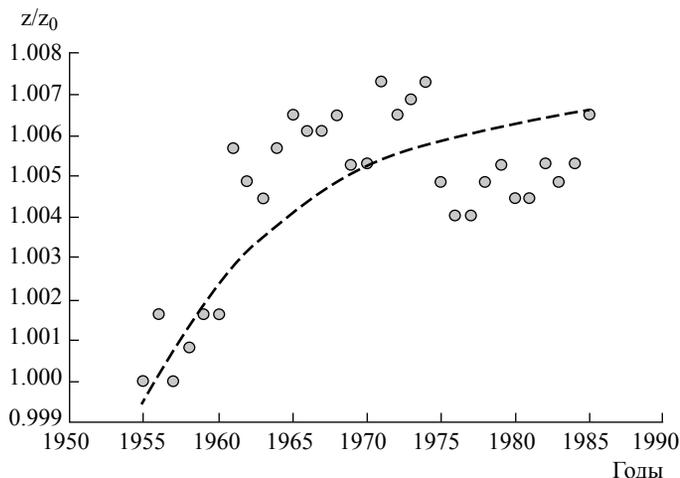


Рис. 1. Кривая многолетнего хода уровня р. Оби в относительных отметках в 290 км выше плотины Новосибирского гидроузла
Пунктир – аппроксимирующая кривая по формуле (1); коэффициенты: $a=1.007$, $b=-0.0075$, $k=-0.096$; отметки дна: z_0 – исходная, z – после деформаций

по величине понижения отметки продольного профиля водной поверхности, которое максимально у плотины, но практически не заметно (<0.1 м) на расстоянии 110 км от плотины. Кроме того, можно отметить, что к этому створу реки подвижность русла, минимальная у плотины ($\varphi=0.6$), приближается к ее значению, характерному для естественного состояния ($\varphi>12$).

Еще одним видом деятельности, приводящим к возникновению интенсивных направленных вертикальных деформаций, в последнее столетие является добыча песчано-гравийных материалов из русел рек. Он широко распространен во всем мире. Его развитие

течению – 5.5 км/год. Однако средние скорости развития процесса врезания не отражают реальной его динамики. Анализ показывает, что врезание развивается, постепенно затухая, но окончательной остановки процесса не происходит. На рис. 2 показано понижение уровня воды р. Оби в 30 км ниже плотины Новосибирского гидроузла за период около 50 лет, отображающее асимптотический характер развития процесса врезания. Величина врезания уменьшается не только во времени, но и вниз по течению реки.

Это можно обнаружить

в начале XX в. потребности в строительных материалах. Считается, что время трансформации русла сравнительно короткое (15–20 лет) и совпадает со временем добычи, а средняя скорость врезания составляет в разных регионах мира от 10 до 40 см/год [30]. Максимальные величины врезания достигают 5–9 м и более [25]. Анализ ряда участков российских рек, подверженных этому виду деятельности, показал, что процесс понижения отметок продольного профиля также

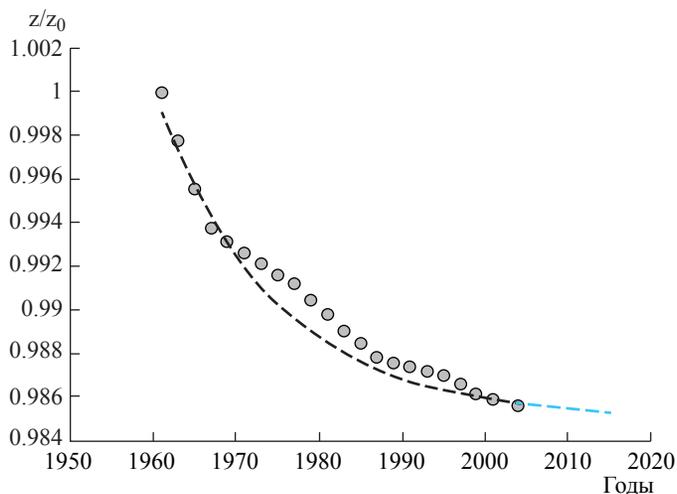


Рис. 2. Понижение уровня р. Оби в относительных отметках за время существования плотины
Коэффициенты: $a=0.985$, $b=0.014$, $k=-0.070$

подчиняется зависимости (1). На верхней Оке между Калугой и Коломной за 1950–2014 гг. объем добычи составил не менее 60–70 млн м³, в нижнем течении Томи превысил 100 млн м³, на нижней Белой между Уфой и Бирском в 1964–1995 гг. добыто 125 млн м³. Эти цифры в десятки раз превышают объем стока наносов. Анализ хода годовых минимальных уровней летне-осеннего периода р. Томи в Томске в относительных отметках (рис. 3) показывает отчетливую тенденцию постепенного сокращения темпа врезания. Подобные построения выполнены для участков нижнего течения р. Белой, верхнего и нижнего течения р. Оки. Они выявили как разную величину понижения уровня (и отметки продольного профиля дна), так и разную скорость понижения дна.

Результаты расчетов содержатся в таблице, в последнем столбце которой приведены величины, характеризующие степень подвижности русла в настоящее время после длительного периода направленных деформаций. Для полноты картины в последних строках приведены данные, относящиеся к нижним бьефам Новосибирского и Воткинского (р. Кама) гидроузлов. Наибольшая величина понижения продольного профиля среди изученных рек с русловыми карьерами (коэффициент b) отмечается на р. Томи при относительной невысокой скорости деформаций (показатель степени k). Для верхней Оки характерна большая скорость деформаций, тогда как скорость деформаций русла р. Оки в районе Рязани оказалась наименьшей среди рек с карьерами. Для сравнения укажем, что скорость деформаций в нижних бьефах гидроузлов значительно больше, чем на реках с карьерами. Однако следует отметить, что в рассмотренных нижних бьефах в начальный период регулирования активно разрабатывались русловые карьеры.

Обращает на себя внимание тот факт, что при подобном характере развития врезания рек с русловыми карьерами наблюдается большое разнообразие результирующей подвижности русла. Наибольшая подвижность среди рек с карьерами отмечается на участке р. Оки в районе Рязани, она практически не изменилась по сравнению с естествен-

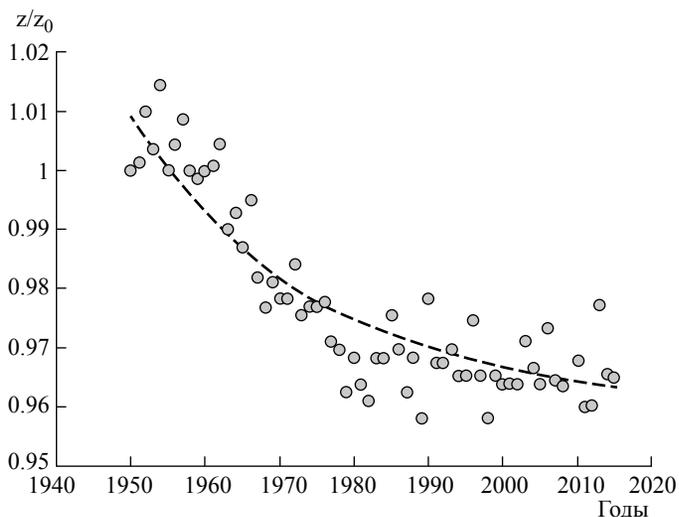


Рис. 3. Понижение минимального уровня р. Томи в относительных отметках за период разработки русловых карьеров
Коэффициенты: $a=0.96$, $b=0.049$, $k=-0.04$

Коэффициенты зависимости (в формуле 1) и подвижность русла исследованных рек

Река	Годы	Участок	b	k	φ
Белая	1964–1995	Уфа	0.020	-0.040	1.94
Томь	1950–2014	Томск	0.049	-0.040	0.55
Ока	1950–2015	Калуга	0.014	-0.056	3.30
Ока	1950–2015	Кашира	0.019	-0.050	2.60
Ока	1974–2015	Рязань	0.020	-0.036	11.4
Обь	1956–2005	НовГЭС	0.019	-0.075	0.63
Кама	1962–2006	ВотГЭС	0.020	-0.070	1.22

Параметр Шильдса

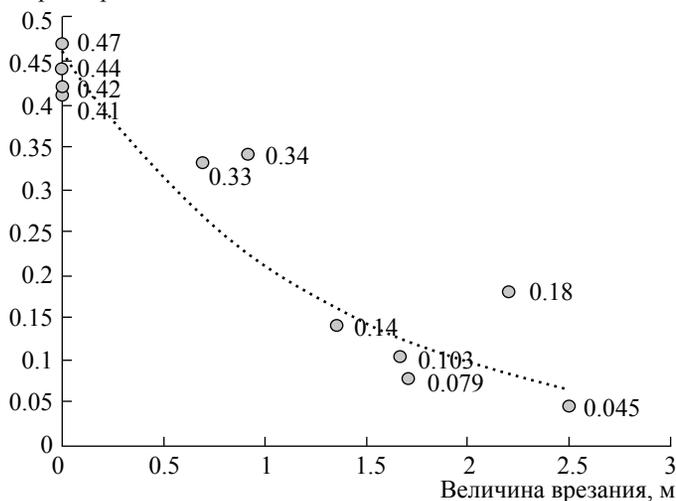


Рис. 4. Зависимость влекущей силы потока от величины врезания рек России с карьерами и в нижних бьефах плотин

бломочного материала сформировалась также в нижнем бьефе Новосибирского гидроузла, где подвижность русла исключительно низкая.

Наблюдается характерная закономерность изменения энергии потока, выраженной влекущей силой, на фоне врезания русла рек в нижних бьефах плотин и на участках массовых русловых карьеров: с увеличением величины врезания влекущая сила уменьшается. На рис. 4 показана зависимость влекущей силы от величины суммарного врезания. При величине врезания более 2.0–2.5 м влекущая сила приближается к предельному значению для среднего диаметра частиц донных наносов. Эта зависимость отражает тот факт, что по мере врезания русло реки становится все менее подвижным (для данного состава донных наносов), и его восстановление может происходить в другой гидрологической и геоморфологической обстановке.

Выводы

Современные вертикальные деформации в основном обусловлены деятельностью человека.

Естественные тенденции вертикальных деформаций, отличаясь малыми темпами — до 1 см/год, проявляются, главным образом, в случаях катастрофических природных событий.

Деформации, обусловленные деятельностью человека, имеют темпы, на один–два порядка большие, чем естественные, и поэтому выявляются в масштабе столетий и десятилетий.

Врезание, обусловленное деятельностью человека, отличается уменьшением скорости с течением времени на фоне уменьшения эрозионной и транспортирующей способности речного потока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лохтин В.М. О механизме речного русла. СПб: 1897. 80 с.
2. Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 347 с.
3. Чалов Р.С. Главные виды русловых деформаций, формы их проявления и особенности соотношений в различных природных условиях // Докл. секции русловых процессов Научн.

ным состоянием, хотя величина врезания достаточно велика. Это связано с малой крупностью аллювия, представленного песком, тогда как на участках верхней Оки и р. Белой, в наносах которых содержится большое количество гравийно-галечной примеси, по мере врезания донные наносы укрупняются при одновременном уменьшении уклона. Наименьшей подвижностью отличается русло реки Томи, где при большой крупности аллювия произошло значительное уменьшение уклона и формирование отмоски. Отмоска из крупнооб-

- совета “Комплексное использование и охрана водных ресурсов”. ГКНТ. Вып. 2. Общие вопросы теории русловых процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1986. С. 100–113.
4. *Dröge B., Engel H., and Gölz E.* Channel erosion and erosion monitoring along the Rhine River // Erosion and Sediment Transport Monitoring Programs in River Basins. Oslo: IAHS Publ., 1992. No. 210. P. 493–503.
 5. *Whipple K.X. and Tucker G.E.* Dynamics of the stream-power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs // *J. Geophys. Res.* 1999. Vol. 104. P. 661–674.
 6. *Маккаеве Н.И., Мандыч А.Ф., Чалов Р.С.* Влияние восходящего развития рельефа на глубинную эрозию и твердый сток рек Западной Грузии // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География.* 1968. № 4. С. 52–58.
 7. *Никонов А.А.* Определение скорости врезания реки // *Геоморфология.* 1973. № 1. С. 24–35.
 8. *Шеглова О.П.* Формирование стока взвешенных наносов и смыв с горной части Средней Азии. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 228 с.
 9. *Schumm S.A.* Alluvial river response to active tectonics // National Research Council. Active Tectonics: Impact on society. Washington, DC: The National Academies Press, 1986. P. 80–94.
 10. *Harkins N., Kirby E., Heimsath A., Robinson R., and Reiser U.* Transient fluvial incision in the headwaters of the Yellow River, northeastern Tibet, China // *J. of geophysical res.* 2007. Vol. 112. P. 1–21.
 11. *Сидорчук А.Ю., Чалов Р.С.* Врезание горных рек: скорости и причины // *Природа.* 1996. № 12. С. 36–45.
 12. *Wyźga B.* A review on channel incision in the Polish Carpathian Rivers during the 20th century // *Gravel-Bed Rivers VI: From Process Understanding to River Restoration.* Amsterdam: Elsevier, 2008. P. 525–555.
 13. *Simon A.* Energy, time, and channel evolution in catastrophically disturbed fluvial systems // *Geomorphology.* 1992. No. 5. P. 345–372.
 14. *Назаров Н.Н., Чалов Р.С., Чалов С.Р., Чернов А.В.* Продольные профили, морфология и динамика русел рек горно-равнинных областей // *Географический вестник.* 2006. № 2. С. 40–52.
 15. *Babiński Z.* Współczesne procesy korytowe dolnej Wisły // *Prace Geogr.* 1992. 157. 185 s. (Contemporary riverbed processes of lower Vistula River // *Geographical Works.* 1992. Iss. 157. 185 p.).
 16. *Маккаеве Н.И., Чалов Р.С.* Некоторые особенности дна долин больших рек, связанные с периодическими изменениями нормы стока // *Вопр. геогр. Сб. 79. Ритмы и цикличность в природе.* М.: Мысль, 1970. С. 156–167.
 17. *Gray J.R., Osterkamp W.R., and Xu Jianhua.* Effects of Water Use Diversion Regulation and Conservation on Sediment Transport in China’s Yellow River with Comparisons from the United States // 12th ISCO Conference. Beijing 2002. P. 565–569.
 18. *Slater L.J. and Singer M.B.* Imprint of climate and climate change in alluvial riverbeds: Continental United States, 1950–2011 // *Geological Society of America.* 2013. Vol. 41. No. 5. P. 595–598.
 19. *Алексеевский Н.И., Ободовский А.Г., Самохин М.А.* Механизмы изменения уровня воды в реках // *Эрозионные и русловые процессы.* Вып. 4. М: МГУ, 2005. С. 216–237.
 20. *Колтунова М.А.* Кривые расходов воды в анализе вертикальных русловых деформаций // *Эколого-географические исследования в речных бассейнах / Мат-лы IV Всерос. науч. – практ. конф. Воронеж: ВГПУ, 2014. С. 42–45.*
 21. *Русловые процессы и водные пути на реках бассейна Северной Двины.* М.: “Журнал РТ”, 2012. 492 с.
 22. *Борсук О.А., Чалов Р.С.* О врезании русла р. Лены // *Изв. ВГО.* 1973. Т. 105. Вып. 5. С. 452–456.
 23. *Алексеевский Н.И., Беркович К.М., Чалов Р.С., Чалов С.Р.* Пространственно-временная изменчивость русловых деформаций на реках России // *География и природные ресурсы.* 2012. № 3. С. 13–21.
 24. *Singh S.K.* Erosion and weathering in the Brahmaputra River System // *Large Rivers Geomorphology and Management.* Ed.A. Gupta. John Wiley & Sons Ltd, 2007. P. 373–391.
 25. *Billi P. and Rinaldi M.* Human impact on sediment yield and channel dynamics in the Arno River basin (central Italy) // *Human Impact on Erosion and Sedimentation (Proceedings of Rabat Symposium S6, April 1997).* IAHS Publ, 1997. No. 245. P. 301–311.
 26. *Torres W.F. and Jain S.* Aggradation and degradation of alluvial-channel beds // *PIHR report.* Iowa. 1984. No. 274. 135 p.
 27. *Church M.* Bed material transport and the morphology of alluvial river channels // *Annual review of Earth and Planetary Sciences.* 2006. Vol. 34. P. 325–354.

28. Маккавеев Н.И., Белинович И.В., Хмелева Н.В. Русловые процессы в зонах переменного подпора // Русловые процессы. М.: Изд-во АН СССР, 1958. С. 318–337.
29. Wang Zhaoyin and Hu Chunhong. Interaction between fluvial systems and large-scale hydro-projects // Proceedings of the Ninth International Symposium on River Sedimentation. Yichang, China. 2004. P. 46–64.
30. Rinaldi M., Wyzga B., and Surian N. Sediment mining in alluvial channels: physical effects and management perspectives // River research and applications. 2005. Vol. 21. P. 805–828.

REFERENCES

1. Lohtin V.M. *O mehanizme rechnogo rusla* (On river channel mechanisms). Sankt-Peterburg, 1897. 80 p.
2. Makkaveyev N.I. *Ruslo reki i erozia v ee bassejne* (Riverbed and erosion within its watershed). M.: Izd-vo AN SSSR (Publ.), 1955. 347 p.
3. Chalov R.S. Main types of riverbed deformations, their phenomenon and correlation in various natural condition, in *Doklady sektsii ruslovykh protsessov Nauchnogo soveta "Kompleksnoe ispolzovanie i ohrana vodnykh resursov"* (Reports of riverbed processes Section "Water resources complex use and conservation"). Iss. 2. Leningrad: Gidrometeoizdat (Publ.), 1986. P. 100–113.
4. Dröge B., Engel H., and Gölz E. Channel erosion and erosion monitoring along the Rhine River. *Erosion and Sediment Transport Monitoring Programs in River Basins*. Oslo, IAHS Publ., 1992. No. 210. P. 493–503.
5. Whipple K.X. and Tucker G.E. Dynamics of the stream-power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs. *J. Geophys. Res.* 1999. Vol. 104. P. 661–674.
6. Makkaveyev N.I., Mandych A.F., and Chalov R.S. Relief rising development impact on erosion and sediment yield of West Georgia's Rivers. *Vestn. Mos. Univ. Ser. 5. Geogr.* 1968. No. 4. P. 52–58. (in Russ.)
7. Nikonov A.A. River incision rate determination. *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 1973. No. 1. P. 24–35. (in Russ.)
8. Shcheglova O.P. *Formirovanie stoka vzheshennykh nanosov i smyv s gornoj chasti Srednej Azii* (Suspended sediment yield formation and erosion in Middle Asia mountain Area). Leningrad: Gidrometeoizdat (Publ.), 1972. 228 p.
9. Schumm S.A. Alluvial river response to active tectonics. *National Research Council. Active Tectonics: Impact on society*. Washington, DC: The National Academies Press, 1986. P. 80–94.
10. Harkins N., Kirby E., Heimsath A., Robinson R., and Reiser U. Transient fluvial incision in the headwaters of the Yellow River, northeastern Tibet, China. *Journal of geophysical research*. Vol. 112. 2007. P. 1–21.
11. Sidorchuk A.Yu. and Chalov R.S. The incision of the rivers of mountain: rates and causes. *Priroda*. 1996. No. 12. P. 36–45. (in Russ.)
12. Wyzga B. A review on channel incision in the Polish Carpathian Rivers during the 20th century. *Gravel-Bed Rivers VI: From Process Understanding to River Restoration*. Elsevier, Amsterdam, 2008. P. 525–555.
13. Simon A. Energy, time, and channel evolution in catastrophically disturbed fluvial systems. *Geomorphology*. 1992. No. 5. P. 345–372.
14. Nazarov N.N., Chalov R.S., Chalov S.R., and Chernov A.V. Rivers longitudinal profiles, riverbed morphology and dynamics in mountain and plain areas. *Geogr. Vestn.* Iss. 2. 2006. P. 40–52. (in Russ.)
15. Babiński Z. Współczesne procesy korytowe dolnej Wisły. *Prace Geogr.* 1992. Vol. 157. 185 s. (Contemporary riverbed processes of lower Vistula River. Geographical Works. 1992. Iss. 157. 185 p).
16. Makkaveyev N.I. and Chalov R.S. Some features of large river valley bottom related to the periodical changes of the rate of flow, in *Voprosy Geografii* (Geographical Issues). Vol. 79. Moscow: Mysl' (Publ.), 1970. P. 156–167.
17. Gray J.R., Osterkamp W.R., and Xu Jianhua. Effects of Water Use Diversion Regulation and Conservation on Sediment Transport in China's Yellow River with Comparisons from the United States. *12th ISCO Conference Beijing*. 2002. P. 565–569.
18. Slater L.J. and Singer M.B. Imprint of climate and climate change in alluvial riverbeds: Continental United States, 1950–2011. *Geological Society of America*, 2013. DOI: 10.1130/G34070.1
19. Alekseevski N.I., Obodovski A.G., and Samohin M.A. Water level changes mechanisms in Rivers, in *Eroziya i ruslovye protsessy* (Erosion and riverbed processes). Iss. 4. Moscow, MSU (Publ.), 2005. P. 216–237.

20. Koltunova M.A. Water discharge curves by vertical riverbed deformation analysis, in *Ecologo-geograficheskie issledovaniya v rechnykh basseynakh* (4th All-Russia scientific practical conference Materials). Voronezh. 2014. P. 42–45
21. *Ruslovye protsessy i vodnye puti na rekah bassejna Severnoj Dviny* (Riverbed processes and waterways on the rivers of North Dvina catchment). Moscow: Zhurnal RT, 2012. 492 p.
22. Borsuk O.A. and Chalov R.S. On the Lena River channel incision. *Izv. VGO*. Vol. 105. iss. 5. 1973. P. 452–456. (in Russ.)
23. Alekseevski N.I., Berkovich K.M., Chalov R.S., and Chalov S.R. Spatial and temporal riverbed deformation changeability in Russia's Rivers. *Geogr. Prir. Resur.* 2012. No. 3. P. 13–21. (in Russ.)
24. Singh S.K. Erosion and weathering in the Brahmaputra River System, in *Large Rivers Geomorphology and Management*. Ed. by A. Gupta. John Wiley & Sons Ltd, 2007. P. 373–391.
25. Billi P. and Rinaldi M. Human impact on sediment yield and channel dynamics in the Arno River basin (central Italy) *Human Impact on Erosion and Sedimentation* (Proceedings of Rabat Symposium S6, April 1997). IAHS Publ. 1997. no. 245. P. 301–311.
26. Torres W.F. and Jain S. Aggradation and degradation of alluvial-channel beds. *IHDR report* No. 274. Iowa, 1984. 135 p.
27. Church M. Bed material transport and the morphology of alluvial river channels. *Annual review of Earth and Planetary Sciences*. 2006. Vol. 34. P. 325–354.
28. Makkaveyev N.I., Belinovich I.V., and Khmeleva N.V. Riverbed processes within backwater zones, in *Ruslovye protsessy* (Riverbed processes). Moscow: Izd-vo AN SSSR (Publ.), 1958. P. 318–337.
29. Wang Zhaoyin and Hu Chunhong. Interaction between fluvial systems and large scale hydro-projects. *Proceedings of the Ninth International Symposium on River Sedimentation*, Yichang, China, 2004. P. 46–64.
30. Rinaldi M., Wyzga B., and Surian N. Sediment mining in alluvial channels: physical effects and management perspectives. *River research and applications*. 2005. Vol. 21. P. 805–828.