
ЭКЗОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ РЕЛЬЕФООБРАЗОВАНИЯ

УДК 551.438.5:624.13(470:282.2)

ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ РУСЕЛ РЕК РОССИИ ПОД ВЛИЯНИЕМ РУСЛОВЫХ КАРЬЕРОВ[#]

© 2024 г. К. М. Беркович^{1, *}, Л. В. Злотина^{1, **}, Л. А. Турыкин^{1, ***}

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
географический факультет, Москва, Россия

*E-mail: berkovitch@yandex.ru

**E-mail: zleonora@yandex.ru

***E-mail: filigorod@list.ru

Поступила в редакцию 16.06.2023 г.

После доработки 04.09.2023 г.

Принята к публикации 13.10.2023 г.

На основе сопоставления нивелировок продольного профиля ряда равнинных рек России выявлены интенсивность распространения полувексовых деформаций продольного профиля, обусловленных нарушением стока наносов и морфологии русла. Эта проблема остается актуальной и в теоретическом, и практическом аспектах, особенно для рек, на которых серии русловых карьеров занимают километры и десятки километров, и их разработка продолжается десятки лет. Изъятие из транспорта наносов большого количества аллювиального материала и изменение морфометрических характеристик речного русла дали толчок процессу выравнивания транспортирующей способности потока по длине реки путем врезания. Результатом является понижение дна и водной поверхности. Интенсивность врезания достигала 3–8 см, а его распространение по реке 400–700 м/год. Ярко выражена регрессивная эрозия, трансгрессивная же менее выражена, так как частично заменена механическим изъятием аллювиального материала. В ходе деформаций форма продольного профиля сменилась с выпуклой или прямой на вогнутую, и признаков восстановления за истекшие десятилетия не наблюдается несмотря на то, что в последние 30 лет на исследованных реках добыча производится в умеренных масштабах или прекращена.

Ключевые слова: русловая добыча аллювия, речная эрозия, понижение продольного профиля реки

DOI: 10.31857/S2949178924010016, **EDN:** ISRLFR

ВВЕДЕНИЕ

Разработка руслового карьера — механическое изменение морфометрических характеристик русла и безвозвратное изъятие из природной системы современных или древних речных наносов. После того, как русловой карьер разработан, начинается его постепенная трансформация — сложный морфодинамический процесс взаимодействия между русловым потоком, наносами и подвижными границами русла, включая карьер. В сущности это — закономерный процесс выравнивания транспортирующей способности речного потока по длине, возбуждаемый искусственно, вследствие вмешательства человека в морфологию русла и

транспорт наносов. Выравнивание транспортирующей способности речного потока по длине реки является одним из базовых постулатов русловых процессов (Маккавеев, 1955). Оно подразумевает, что там, где увеличивается удельная мощность потока за счет роста уклона и/или расхода воды, река реагирует врезанием, как и на сокращение стока наносов. Там, где увеличиваются глубина и площадь поперечного сечения, уклон уменьшается, и более вероятной реакцией является отложение наносов. При разработке руслового карьера — выемки или траншеи на дне реки происходят локальные изменения морфометрических характеристик русла, уклона, гидравлических сопротивлений, нарушается транзит русловых наносов. Это приводит к вертикальным деформациям русла в пределах карьера и на прилегающих участках. В исследованиях влияния русловых карьеров преобладают экспериментальные и теоретические, в кратком масшта-

[#] Ссылка для цитирования: Беркович К.М., Злотина Л.В., Турыкин Л.А. (2024). Вертикальные деформации русел рек России под влиянием русловых карьеров. *Геоморфология и палеогеография*. Т. 55. №1. С. 5–12. <https://doi.org/10.31857/S2949178924010016>; <https://elibrary.ru/ISRLFR>

бе времени и в ограниченном пространственном масштабе. Лишь редкие работы посвящены деформациям русел рек на крупных участках и за длительный период (Galay, 1983; Kondolf, 1994; Rinaldi et al, 2005). Протекание процесса выравнивания транспортирующей способности определяется размерами карьера: длиной и объемом выемки. Одиночный малый карьер может практически не оказать влияния на продольный профиль водной поверхности и привести к минимальным вертикальным деформациям. Предлагаются зависимости для определения параметров подобных карьеров (Bovolin, Ponce, 2008; Dong Chen, 2011; Наумов, 2012).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данной работе рассматривается трансформация русла ряда рек России, на которых русловая добыча развивалась несколько десятилетий, часто наряду с другими нарушениями факторов руслоформирования. Данными послужили многолетние натурные исследования русловых процессов с середины 1980-х гг. по 2018 г. Использовались архивные материалы служб водных путей Росморречфлота, в частности однодневные связки уровней в разные годы, начиная с конца 1930-х гг., когда русла рек условно можно было считать ненарушенными. Выполнялся анализ направленных изменений продольного профиля водной поверхности, полученного в разные годы по данным нивелировок при уровнях на опорных гидропостах близкой обеспеченности, обычно 80–90%. Кроме того, анализировались изменения продольного профиля дна, полученного по детальным промерам в 1982–2018 гг. Оказалось, что на больших участках рек длиной в несколько десятков километров среднее понижение дна и водной поверхности совпадают по величине. Расхождение наблюдается в редких экстремальных случаях чрезвычайно глубоких и длинных карьерных участков, а также если в период промеров производились работы по добыче материала или дноуглублению. Так, понижение отметки уровня и дна р. Белой ниже Уфы, где в 1999–2018 гг. добыча не производилась, составили одинаковые 50 см. В то же время на р. Оке в районе Каширы понижение дна оказалось почти на 1 м больше, чем понижение водной поверхности. В работе рассматриваются пять участков крупных равнинных судоходных рек России: Оки, Белой, Катунь, Томи, близких по водоносности, с песчаными и песчано-гравийными наносами, русловые процессы которых не

ограничены геологическими факторами. Интенсивность вертикальных деформаций получена для точек продольного профиля путем деления полного понижения профиля на период между нивелировками. Получены аналитические зависимости интенсивности вертикальных деформаций и дальности их распространения по длине рек.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрен процесс трансформации русла при массовой разработке месторождений песчано-гравийных материалов, продолжающейся несколько десятилетий. Под массовой разработкой подразумевается, что карьеры занимают большие площади речного русла, имеют большую глубину, сливаются между собой в длинные переуглубленные плесовые ложины длиной в километры. Годовой объем извлекаемого материала обычно многократно превышает сток наносов, что обеспечивает продолжительность процесса вертикальных деформаций и снижает вероятность восстановления русла.

Разработка подобных карьерных участков производится постепенно. К существующим, но не занесенным, карьерам добавляются новые, участок добычи расширяется и удлиняется. Карьерный участок имеет довольно отчетливые границы, в пределах которых в несколько раз увеличивается средняя глубина русла. Существующие представления о влиянии локального карьера на гидравлические и морфометрические характеристики русла хорошо известны (Kondolf, 1994). В вершине карьера понижается уровень воды (за исключением упомянутых малых карьеров). Чем больше длина карьера, тем больше понижение уровня, пропорциональное исходному уклону на участке реки. По мере осаждения наносов в карьере начинает размываться участок ниже по течению, испытывающий дефицит наносов. Это еще более увеличивает снижение уровня в вершине карьера и способствует увеличению уклона на вышележащем участке. Таким образом в области верхней кромки длинного карьера или участка добычи возникает прогиб водной поверхности, формирующий выше более крутой участок продольного профиля (Simon, Rinaldi, 2006). Увеличение уклона служит причиной регрессивной эрозии вышележащего участка, при этом перегиб смещается вверх по течению (Kondolf, 1994; Добыча..., 2012). Регрессивная эрозия рассматривается как наиболее характерная реакция русла на разработку карьера и признается одним из источников материала для восстанов-

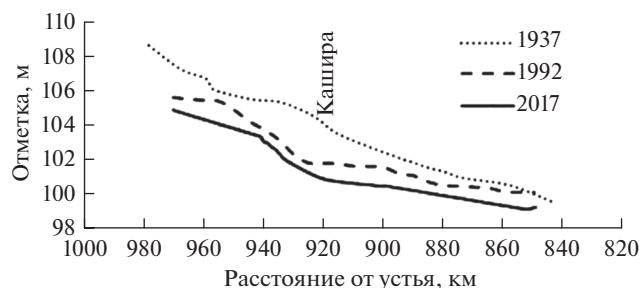


Рис. 1. Профиль водной поверхности р. Оки на участке от Серпухова до Коломны.

Fig. 1. Oka River water surface longitudinal profile between Serpukhov and Kolomna Cities.

ления русла. В натурных условиях это явление слабо изучено, из редких работ известно, что интенсивность врезания составляла на разных реках от 0.1 до 0.4 м/год, а перегиб профиля смещался вверх по течению до 0.4 км в год (Kondolf, 1994). Перегибы продольного профиля дна постепенно сглаживаются (Добыча..., 2012; Наумов, 2012).

Прогиб продольного профиля водной поверхности тем более выражен, чем больше длина карьера, чем медленнее он заносится, и увеличивается со временем. Пример такой формы продольного профиля приведен на рис. 1. Выше точки максимального прогиба предполагается распространение регрессивной эрозии, участок ниже нее включает в себя разработанные и частично занесенные карьеры, и одновременно подвержен трансгрессивной эрозии.

ХАРАКТЕРИСТИКА УЧАСТКОВ РЕК

Река Ока между Серпуховом и Коломной. На участке р. Оки длиной более 70 км между Каширой и Коломной сосредоточено несколько крупных карьеров, которые разрабатывались еще в 1950–1980-х гг. Здесь глубина карьеров достигает 13 м, из русла удалено ориентировочно 60 млн м³. С начала 1990-х гг. добыча продолжалась малыми темпами. Средний многолетний расход воды в реке составляет около 350 м³/с, средний максимальный — около 4000 м³/с. Исходный продольный профиль водной поверхности слабо выпуклый, средний уклон водной поверхности не превышал 0.07‰, крупность донных наносов колеблется от крупного песка до крупного гравия, средний диаметр от 1.5 до 5.0 мм. Характерно, что существовавшая естественная слабо выраженная выпуклость продольного профиля за 55 лет переместилась на 30 км вверх по течению (0.5 км/год). В ходе многолетней работы по добыче песчано-

гравийных материалов на месте слабо выпуклого сформировался вогнутый продольный профиль водной поверхности с точкой наибольшего прогиба возле Каширы (рис. 1). Опорный гидрологический пост (г.п.) Кашира зафиксировал понижение минимальных летне-осенних уровней более чем на 2 м, которое почти линейно происходило с начала 1950-х гг. Почти такое же понижение уровня (1.8–2.3 м) произошло на г.п. Серпухов вследствие того, что в районе гидропоста также разрабатывались карьеры.

Река Ока выше г. Алексина. Другой участок р. Оки — Троицкое месторождение песчано-гравийной смеси, на котором русловая добыча имеет также длительную историю. Только в 1970–1980-е гг. из русла было извлечено более 10 млн м³ материала. В 1990–2018 гг. выемка материала осуществлялась неоднократно, хотя и в небольших объемах. Участок отличается несколько меньшей шириной русла и большим уклоном — до 0.08‰. Гидрологические характеристики реки на этом участке сходны с вышеизложенными, только амплитуда уровней существенно больше. Крупность русловых наносов также больше и достигает 5–6 мм. Исходный продольный профиль отличался выпуклыми очертаниями. Ярко выраженная выпуклость продольного профиля с уклоном 0.12‰ существовала еще до начала добычи (1937 г.). К началу 1990-х гг. она переместилась вверх по течению в общей сложности более, чем на 30 км, с сохранением величины уклона. Точка наибольшего прогиба продольного профиля на этом участке также выявляется очень отчетливо. Характерно, что на г.п. Калуга, расположенном в 70 км выше по течению, минимальные уровни понизились с начала 1950 г. на 1.3–1.5 м.

Река Томь у Томска. Участок длиной более 100 км отличается разнородными условиями с отчетливой границей в районе 70–72 км от устья (у Томска), где меняются крупность наносов, уклон и морфометрия русла. Река отличается большой водоносностью: средний многолетний расход составляет 1000 м³/с, средний максимальный превышает 5000 м³/с.

Исходный уклон выше Томска по данным nivelировки 1933 г, когда русло можно считать не нарушенным, составлял 0.12‰, ниже Томска — 0.07‰. Судя по показаниям гидрологических постов, последствия добычи начали проявляться с конца 1950-х гг. (Вершинин, 2005). Изначальный профиль (1933 г.) имел слабо выпуклые очертания, отчетливый перегиб водной поверхности обозна-

чился в начале 1940-х гг. на 70 км от устья. В следующие 40 лет перегиб переместился на 4 км, где, будучи сложен неразмываемыми породами, сохранился до настоящего времени в виде порога. В ходе более чем 30-летней добычи около 100 млн м³ аллювия на 20-километровом участке наибольший прогиб профиля сформировался на 72 км от устья. Минимальные уровни на расположенном здесь г.п. Томск понизились более чем на 2.5 м, причем скорость понижения уровней заметно снизилась в начале 1980 гг. когда добыча в Томске была прекращена. Средний уклон верхнего участка увеличился до 0.24‰, а локальные уклоны достигали 0.3–0.4‰. Наоборот, ниже Томска уклон уменьшился до 0.013‰. На нем регулярно выполнялись дноуглубительные путевые работы. Различается также крупность русловых наносов: ниже Томска в прямолинейном и разветвленном русле преобладают песчано-гравийные наносы, тогда как выше русло преимущественно мелкогалечное и галечное.

Река Катунь в нижнем течении. Приустьевой участок Катуни длиной около 30 км отличается сложными условиями формирования русла, как естественными, так и антропогенными. Русло реки разветвленное, шириной до 400 м. На этом участке в 1980-е гг. выполнен крупный проект по выправлению русла для судоходства с увеличением гарантированной глубины путем землечерпания и строительства выправительных сооружений. Объем дноуглубления за десятилетие составил 8.1 млн м³. Одновременно в нижнем течении реки разрабатывались русловые карьеры, объем которых за десять лет превысил 5.5 млн м³. Катунь — левая составляющая р. Оби, характеризуется большой водоносностью, крупным русловым материалом, большим уклоном. Средний расход воды превышает 600 м³/с, максимальный расход 2000 м³/с. Исходное состояние относится к 1984 г., когда приустьевой участок Катуни еще не был освоен для судоходства. Тогда уклон реки составлял 0.39–0.32‰, а крупность донного материала — 30–60 мм. Продольный профиль водной поверхности близок к прямолинейному, хотя наблюдалось небольшое уменьшение уклона вниз по течению. Точка наибольшего прогиба продольного профиля располагается в 22 км от устья, где понижение водной поверхности, согласно повторным нивелировкам, за 6 лет достигло 1.45 м.

Река Белая ниже г. Уфы. Река была крупным источником аллювиальных стройматериалов в течение десятилетий. Крупные русловые карьеры со-

средоточены, в основном, на участке русла длиной до 100 км ниже г. Уфы. Объем добычи здесь временами достигал 6 млн м³/год, а в целом по документальным данным с середины 1960-х до конца 1990-х гг. извлечено не менее 120 млн м³. Река Белая — один из крупнейших притоков Камы, отличается высокой водоносностью. В нижнем течении это — типичная равнинная река с меандрирующим руслом шириной от 250 до 500 м. Продольный профиль водной поверхности прямолинейный с уклоном около 0.06‰. Река отличается сложными условиями судоходства, для их поддержания в течение нескольких десятилетий выполнялись крупные дноуглубительные работы. Средний многолетний расход воды превышает 800 м³/с, средний максимальный 5000 м³/с. Характерно, что точка наибольшего прогиба профиля наблюдается у г.п. Уфа, где понижение минимального уровня к 2010 г. составило около 2.0 м, причем скорость посадки уровня нарастала с 2 см/год в 1950–1960-е гг. до 9–12 см/год в 2000-е гг. На гидропостах, расположенных в 130 и 210 км ниже Уфы, существенного понижения уровня не выявлено, как и на гидропосте в 70 км выше Уфы по течению.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Теоретически интенсивность вертикальных деформаций прямо пропорциональна разнице удельного расхода наносов на выходе из карьера или входе в него и транспортирующей способности потока, а также обратно пропорциональна расстоянию от начала участка деформаций (Карасев, 1975; Dong Chen, 2011). На изученных равнинных реках произошло понижение отметок водной поверхности и дна. Величина вертикальных деформаций за полувековой период (за исключением р. Катуни, где период между повторными нивелировками продолжался всего лишь 6 лет) составила от 1.7 до 4.0 м. Наибольшей величины она достигала в вершине большого участка, на котором разрабатывались несколько карьеров, где находится точка наибольшего прогиба продольного профиля водной поверхности. От указанной точки вверх и вниз по течению величина деформаций, как правило, уменьшается. Деформации были выявлены на десятки километров выше и ниже крупных участков карьеров. Оценка объема деформаций не отличается высокой точностью, так как в ряде случаев на участках продолжалась, хотя в ограниченных объемах, разработка русло-

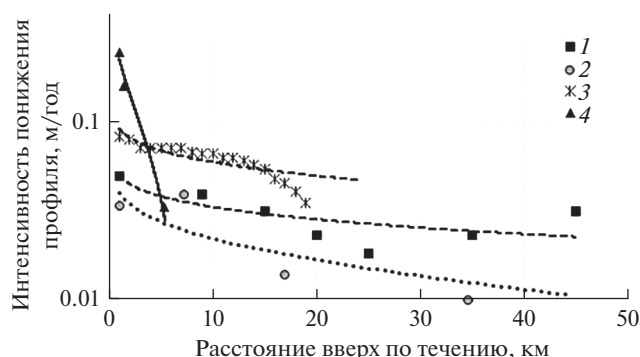


Рис. 2. Изменение интенсивности регрессивных деформаций по длине от точки максимального прогиба профиля: 1 — р. Ока между Серпуховом и Каширой; 2 — р. Ока выше Алексина; 3 — р. Томь выше Томска; 4 — р. Катунь выше пос. Лесное.

Fig. 2. Retrogressive deformations intensity changes along the river from the point of maximum profile deflection: 1 — Oka River between Serpukhov and Kashira Cities; 2 — Oka River upstream of Aleksin City; 3 — Tom' River upstream of Tomsk City; 4 — Katun' River upstream of Lesnoye settlement.

вых карьеров, а также выполнялись дноуглубительные путевые работы.

Регрессивная эрозия. Интенсивность и дальность продвижения регрессивной эрозии зависит от начального понижения дна и водной поверхности, т.е. приращения уклона, а также от исходной устойчивости русла. На изученных реках за 40–50 лет она продвинулась на несколько десятков километров. Отдельный случай представляет собой р. Катунь, для которой за короткий период сопоставления в условиях большого уклона деформации охватили только короткий участок. Выше длинных карьерных участков на Оке, Томи и Катунь отмечен двухкратный рост уклона. Это привело к соответствующему увеличению скорости течения и расхода донных наносов, что и явилось причиной деформаций.

Характер распределения деформаций выше участков карьеров представлен на рис. 2. Средняя скорость распространения деформаций вдоль рек составила 0.77 км в год (в диапазоне 0.4–1.0 км). Соотношение интенсивности деформаций и дальности их распространения подчиняется зависимости:

$$\frac{\Delta Z}{\Delta T} = A \ln L_b + C,$$

где L_b — расстояние вверх по реке, что согласуется с теоретическими выкладками И.Ф. Карасева (1975). Коэффициент A равен минимальному значению (<0.005 м/год) интенсивности деформаций там, где зависимость становится асимптотической,

свободный член C равен максимальной интенсивности деформаций.

Исходя из этих зависимостей, можно спрогнозировать полную дальность распространения направленных деформаций, которая, естественно, подчиняется экспоненциальной зависимости. Понижение отметок дна и водной поверхности на обоих участках р. Оки в настоящее время прослеживается на 45–50 км выше точки наибольшего прогиба профиля. Средняя интенсивность понижения отметок оценивается в 0.025–0.030 м/год. Годовой объем материала, поступившего в реку, по ориентировочным подсчетам, составлял в среднем от 130 до 200 тыс. м³, что сопоставимо со средней величиной годового стока русловых наносов верхней Оки. Общий объем деформаций между Серпуховом и Каширой за период 1937–2017 гг. достиг 21.5 млн м³ материала, частично компенсировавшего изъятый в ходе добычи. Выше Алексина интенсивность деформаций и их объем (7.2 млн м³) меньше, что, вероятно, связано с большей крупностью донного материала.

Деформации продольного профиля р. Томи выше Томска за 50 лет (1933–1982 гг.) охватили около 20 км, что, вероятно, не является пределом: расчет показывает, что уменьшение интенсивности деформаций до минимальной может проследиваться еще на 80–100 км выше по течению (рис. 3). Средняя по длине интенсивность эрозии составила 0.063 м/год. Годовой объем деформаций выше Томска 350 тыс. м³, что совпадает с объемом стока русловых наносов (Савичев, 2007). Общий объем удаленного и перенесенного материала за весь срок (до 1982 г) достигает 13.8 млн м³.

Несколько особняком стоит р. Катунь вследствие полугорного характера ее русла выше 27 км

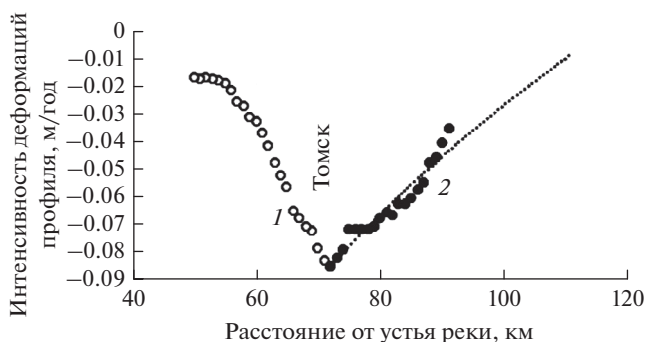


Рис. 3. Интенсивность деформаций русла р. Томи: 1 — ниже Томска, 2 — выше Томска.

Fig. 3. Tom' River channel deformation intensity: 1 — downstream of Tomsk City, 2 — upstream of Tomsk City.

от устья, куда распространяется регрессивная эрозия. Дальность ее распространения в 1984–1990 гг. не превысила 6 км выше точки наибольшего прогиба профиля при средней интенсивности -0.24 м/год. Здесь уклон особенно велик, а наносы отличаются большой крупностью, вследствие чего формируется отмостка. Уклон реки за период активизации работ по добыче увеличился с 0.39 до 0.62% . Объем деформаций выше точки максимального понижения профиля составил 1.2 млн м^3 , годовой — 200 тыс. м^3 .

Скорость продвижения деформаций на обоих участках верхней Оки одинакова (0.7 – 0.8 км/год), она различается только в силу разного объема добычи. Это связано с тем, что ее русло обладает примерно одинаковой устойчивостью (коэффициент стабильности по Н.И. Маккавееву равен 8.2) с небольшими вариациями на конкретных участках. В то же время распространение деформаций выше Томска до начала 1980-х гг. отличалось вдвое меньшими темпами — 0.4 км/год. При этом коэффициент устойчивости русла р. Томи выше Томска почти на порядок больше, чем русла верхней Оки. Отдельный случай представляет собой р. Катунь, для которой характерна высокая интенсивность понижения профиля и быстрое продвижение деформаций на коротком участке.

Дальность распространения деформаций вверх по течению на изученных реках зависит от соотношения максимального прогиба профиля водной поверхности и исходного уклона водной поверхности по зависимости:

$$L_{\text{в}} = 1.2 \frac{\Delta Z}{I},$$

где Δz — понижение отметки водной поверхности в низшей точке прогиба кривой водной поверхности за время между нивелировками, I — исходный уклон, $\%$. Она оказалась несколько меньше, чем следует из зависимости, предложенной Г.Г. Наумовым (2012). Особенностью рассмотренных участков регрессивных деформаций является увеличение уклона водной поверхности со временем в ходе деформаций, тогда как при естественном врезании уклон обычно уменьшается. Это может свидетельствовать о том, что в конкретных местных условиях эрозия не закончилась, и процесс выравнивания транспортирующей способности потока не завершен.

Трансгрессивная эрозия. На участке ниже по течению от точки наибольшего прогиба продоль-

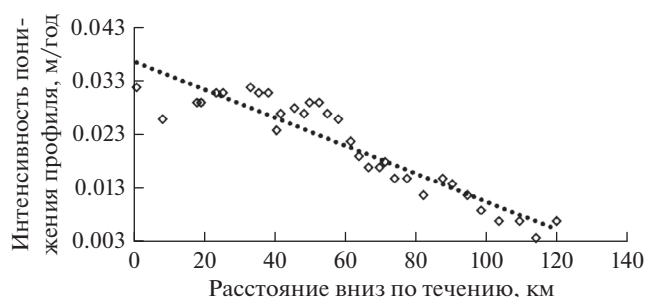


Рис. 4. Изменение интенсивности трансгрессивных деформаций по длине р. Белой ниже Уфы за 1965–1999 гг.

Fig. 4. Progressive deformation intensity change along Belaya River downstream of Ufa City in 1965–1999.

ного профиля понижение дна и водной поверхности обязано преимущественно безвозвратному изъятию в течение полувека слоя аллювия толщиной в несколько метров и на расстоянии многих километров. В большей или меньшей степени это компенсировано наносами, поступившими сверху, в том числе за счет регрессивной эрозии. В этих условиях происходило занесение отдельных выемок, выполаживание откосов карьеров, размыв между отдельными карьерами в серии. В отдельных случаях разработка месторождений продолжается, хотя и в небольших объемах. Эрозия играет второстепенную роль и то там, где серия карьеров заканчивается. Однако характерно, что понижение отметок продольного профиля водной поверхности по длине описывается, как и в случае регрессивной эрозии, логарифмической отрицательной зависимостью, с постепенным уменьшением интенсивности вплоть до величин, близких к нулевым. В рассмотренных случаях трансгрессивная эрозия не реализуется в полной мере. Так, на Оке ниже Каширы зона эрозии ограничена зоной выклинивания подпора Белоомутского гидроузла, т.е. ее длина не более 50 км. На Томи и Катунь области трансгрессивной эрозии ограничены зонами периодического подпора при слиянии, соответственно, с Обью и Бией и являются поэтому короткими, отличаясь быстрым снижением интенсивности деформаций (рис. 3). Наиболее отчетливо трансгрессивная эрозия выражена на р. Белой ниже Уфы (рис. 4). Основные карьеры в течение 30 лет были сосредоточены на расстоянии 40 – 60 км ниже Уфы, однако, понижение дна и уровня воды распространилось еще на 60 км. Интенсивность деформаций продольного профиля на этом участке невелика, составляя в среднем 2.5 см/год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ведущим процессом трансформации русла изученных рек, развивающимся в результате полувекковой русловой добычи аллювия, служит эрозия. Изъятие из транспорта наносов большого количества аллювиального материала и изменение морфометрических характеристик речного русла дают толчок процессу выравнивания транспортирующей способности потока по длине реки. Результатом является понижение дна и водной поверхности.

Выше участков сосредоточения серий карьеров происходило врезание со скоростью в несколько сантиметров при перемещении вверх по течению на несколько сотен метров в год. Верхняя граница участка карьеров четко выделяется в виде прогиба продольного профиля водной поверхности. Объем поступающего в поток материала сопоставим с размерами современного стока русловых наносов, однако существенно меньше объема изъятия в его среднем многолетнем и экстремальном проявлении. Поэтому даже спустя десятилетия форма продольного профиля сохраняет вогнутые очертания. Закономерное распределение интенсивности деформаций по длине позволяет прогнозировать окончательную дальность развития регрессивной эрозии.

Трансгрессивная эрозия в рассмотренных случаях выражена менее отчетливо, так как совпадает с другими естественными и антропогенными деформациями: механическое изъятие наносов из русла, размыв перемычек между отдельными карьерами участка, оплывание откосов выемок, и только ниже последнего в серии карьера выявляется эрозия. Тем не менее распределение интенсивности понижения водной поверхности и дна от точки наибольшего прогиба водной поверхности вниз по течению имеет признаки трансгрессивной эрозии в виде логарифмической зависимости уменьшения интенсивности деформаций по длине.

БЛАГОДАРНОСТИ

Источник финансирования: исследование выполнено по госзаданию НИ Лаборатории эрозии почв и русловых процессов географического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова (проект № 121051200166-А — исходные материалы).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вершинин Д.А. (2005). Техногенные воздействия на вертикальные деформации русла и гидравлику потока (на примере р. Томи). Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Томск: ТГУ. 22 с.
- Добыча нерудных строительных материалов в водных объектах. Учет руслового процесса и рекомендации по проектированию и эксплуатации русловых карьеров. (2012). СПб.: Глобус. 140 с.
- Карасев И.Ф. (1975). Русловые процессы при переброске стока. Л.: Гидрометеиздат. 288 с.
- Маккаев Н.И. (1955). Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР. 346 с.
- Наумов Г.Г. (2012). Антропогенные воздействия на русловые процессы на переходах через водотоки. М.: МАДИ. 105 с.
- Савичев О.Г. (2007). Сток влекомых наносов реки Томь (Западная Сибирь). *Известия Томского политехнического университета*. Т. 310. № 3. С. 22–25.
- Bovolin V., Ponce V.M. (2008). Evolution of sand mining pits in alluvial rivers. Final draft 28.08.08. <http://kon.sdsu.edu/~bovolin/borrowpit/evolution.html>
- Dong Chen (2011). Modeling Channel Response to Instream Gravel Mining. In *Sediment Transport — Flow Processes and Morphology*. In: *Tech publ. Rijeka, Croatia*. P. 125–140. <http://dx.doi.org/10.5772/21346>
- Galay V.J. (1983). Causes of River Bed Degradation. *Water resources research*. V. 19. № 5. P. 1057–1090.
- Kondolf G.M. (1994). Geomorphic and environmental effects of instream gravel mining. *Landscape Urban Planning*. V. 28. Iss. 2–3. P. 225–243. [https://doi.org/10.1016/0169-2046\(94\)90010-8](https://doi.org/10.1016/0169-2046(94)90010-8)
- Rinaldi M., Wyżga B., Surian N. (2005). Sediment mining in alluvial channels: physical effects and management perspectives. *River Res. Applic.* V. 21. № 7. P. 805–828. <http://dx.doi.org/10.1002/rra.884>
- Simon A., Rinaldi M. (2006). Disturbance, stream incision, and channel evolution: The roles of excess transport capacity and boundary materials in controlling channel response. *Geomorphology*. № 79. P. 361–383. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.037>

VERTICAL RIVERBED DEFORMATIONS DUE TO IN-STREAM MINING¹

K. M. Berkovich^{a,#}, L. V. Zlotina^{a,##}, and L. A. Turykin^{a,###}

^a*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia*

[#]*E-mail: berkovich@yandex.ru*

^{##}*E-mail: zleonora@yandex.ru*

^{###}*E-mail: filigorod@list.ru*

Comparison of the longitudinal profile of a number of lowland rivers in Russia, revealed their deformation due to a half-century of sediment flux and channel morphology adjustment. This problem remains relevant both in theoretical and practical aspects, especially for rivers where long-term mining of sediments from the stream beds extends from kilometers to tens of kilometers. The removal of a large amount of alluvial material from the sediments transport and changes of the riverbed morphometric characteristics triggered the process of leveling the sediment transport capacity along the river by the scour and resulted in a lowering of the bottom and water surface. The intensity of the incision reached 3–8 centimeters, and its progradation along the river 400–700 meters per year. Retrogressive erosion is pronounced, while progressive one is less pronounced, because partially replaced by mechanical removal of alluvial material. Over the past decades the shape of the longitudinal profiles changed from convex or straight to concave with no signs of recovery, despite the mining has been quite moderate for last 30 years or completed on the explored rivers.

Keywords: in-stream alluvium mining, river erosion, river longitudinal profile degradation

ACKNOWLEDGMENTS

The study was fulfilled on the state assignment of the Scientific research Laboratory of Soil Erosion and Channel Processes of the Faculty of Geography of Lomonosov Moscow State University (project № 121051200166-A).

REFERENCES

- Bovolin V., Ponce V.M. (2008). Evolution of sand mining pits in alluvial rivers. Final draft 28.08.08. <http://kon.sdsu.edu/~bovulin/borrowpit/evolution.html>
- Dobycha nerudnykh stroitelnykh materialov v vodnykh ob'ektakh. Uchet ruslovogo protsessy i rekomendatsii po proektirovaniyu i ekspluatatsii ruslovykh kar'erov (Non-metallic building materials mining in water objects. Riverbed process accounting and recommendation on instream mines design and operation). (2012). Sankt Peterburg: Globus (Publ.). 140 p. (in Russ)
- Dong Chen (2011). Modeling Channel Response to Instream Gravel Mining. In *Sediment Transport — Flow Processes and Morphology*. In: *Tech publ. Rijeka, Croatia*. P. 125–140. <http://dx.doi.org/10.5772/21348>
- Galay V.J. (1983). Causes of River Bed Degradation. *Water resources research*. V. 19. № 5. P. 1057–1090.
- Karasev I.F. (1975). Ruslovye protsessy pri perebroske stoka (Riverbed processes by stream flow diversion). Leningrad: Hydrometeo (Publ.). 288 c. (in Russ)
- Kondolf G.M. (1994). Geomorphic and environmental effects of instream gravel mining. *Landscape Urban Planning*. V. 28. Iss. 2–3. P. 225–243. [https://doi.org/10.1016/0169-2046\(94\)90010-8](https://doi.org/10.1016/0169-2046(94)90010-8)
- Makkaveev N.I. (1955). Ruslo reki i erosiya v ee basseine (River channel and erosion within its basin). Moscow: AN SSSR (Publ.). P. 346. (in Russ)
- Naumov G.G. (2012). Antropogennye vozdeistviya na ruslovye protsessy na perekhodakh cherez reki (Human induced impact to riverbed processes on the stream crossings). Moscow: MADI (Publ.). 105 p. (in Russ)
- Rinaldi M., Wyżga B., Surian N. (2005). Sediment mining in alluvial channels: physical effects and management perspectives. *River Res. Applic.* V. 21. № 7. P. 805–828. <http://dx.doi.org/10.1002/rra.884>
- Savichev O.G. (2007). Bed sediment flux of Tom' River (West Siberia). *Tomsk Polytechnics University Bulletin*. V. 310. № 3. P. 22–25. (in Russ.)
- Simon A., Rinaldi M. (2006). Disturbance, stream incision, and channel evolution: The roles of excess transport capacity and boundary materials in controlling channel response. *Geomorphology*. № 79. P. 361–383. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.037>
- Vershinin D.A. (2005). Tekhnogennye vozdeistviya na vertikal'nye deformatsii rusla i gidravliku potoka (na primere r. Tomi) (Technogenic impact on channel vertical deformation and flow hydraulic (case study of Tom River)). PhD thesis. Tomsk: Tomsk State University (Publ.). 22 p.

¹ For citation: Berkovich K.M., Zlotina L.V., Turykin L.A. (2024). Vertical riverbed deformations due to in-stream mining. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. V. 55. № 1. P. 5–12. (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2949178924010016>; <https://elibrary.ru/ISRLFR>