

УДК 551.438.5:627.132(282.251.1)

РЕЛАКСАЦИЯ РУСЛА В НИЖНЕМ БЬЕФЕ НОВОСИБИРСКОЙ ПЛОТИНЫ

© 2022 г. К. М. Беркович^{1,*}, Л. В. Злотина^{1,**}

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

*E-mail: berkovitch@yandex.ru

**E-mail: zleonora@yandex.ru

Поступила в редакцию 03.12.2021 г.

После доработки 22.12.2021 г.

Принята к публикации 10.01.2022 г.

Новосибирский гидроузел, построенный более 60 лет назад в 680 км от слияния рек Бии и Катунь и образовавший водохранилище объемом 8 км³, является единственным крупным гидроэнергетическим проектом на р. Оби. В работе рассматриваются процессы трансформации русла, последовавшие после создания гидроузла и обусловленные изменением гидрологического режима и стока наносов. Водоохранилище осуществляет суточное и сезонное регулирование стока, перехватывает 90% стока взвешенных наносов. Трансформация русла охватила не менее 70 км реки ниже плотины, на которых отчетливо прослеживаются волны суточного регулирования. Интенсивная эрозия со скоростью до 12 см в год проявилась на приплотинном участке длиной 8–10 км в течение 20 лет. На этом участке волны суточного регулирования имеют наибольшую высоту, здесь на фоне дефицита наносов происходило основное насыщение потока русловыми наносами. Понижение дна и уровней воды составило 1.8 м и имело явный экспоненциальный характер. На этой стадии были вынесены исходные песчаные наносы крупностью 0.5 мм и обнажились слабо размываемые, скальные и крупнообломочные грунты. В результате в течение следующих 20 лет эрозия развивалась крайне низкими темпами. На участке 10–40 км от плотины эрозия носила иной характер. Она началась с запаздыванием на 3–5 лет и имела малый темп – в основном менее 3 см/год. Понижение дна и уровня составило лишь 1.4 м, а стабилизация русла наступила через 50 лет после создания плотины – по мере увеличения крупности русловых наносов в 5–6 раз и некоторого уменьшения уклона. Заметную роль в трансформации русла сыграли дополнительные механические нарушения: добыча из русла не менее 20 млн м³ песчано-гравийных строительных материалов, а также выполнение большого комплекса землечерпательных и выправительных путевых работ, которые позволили в 1960–1970-х гг. увеличить судоходную глубину на 1.0–1.3 м.

Ключевые слова: антропогенные нарушения русла рек, эрозия ниже плотин

DOI: 10.31857/S0435428122020031

ВВЕДЕНИЕ

Речное русло реагирует на изменения факторов и условий его существования. Наиболее ярко это проявляется при вмешательстве человека, которое вносит в русловый режим изменения, экстремальные по величине и скорости. В этом случае реакция русла реки, как и любой другой природной системы, развивается вначале бурно, а затем, если нарушение не меняется по интенсивности, постепенно затухает. По мере затухания реакции русло приходит к исходному или измененному относительно стабильному состоянию. Этот процесс носит название релаксации.

Если обратиться к многосотлетней истории русловой гидротехники, то очевидно, что плотины и водохранилища остаются решающей техно-

логией балансирования неравномерного распределения воды во времени и пространстве, обеспечивают повышение и сосредоточение напора для генерации энергии, защиту от наводнений, увеличение меженного стока. Влияние крупного гидростроительства и на человека, и на природу особенно усилилось со второй половины XX века.

Быстрота, с которой образуются искусственные водоемы и плотины, режимные и морфологические особенности служат причиной того, что возникающие геоморфологические процессы очень специфичны [1]. Трансформация русла реки ниже плотины как реакция на изменение гидрологического режима и стока наносов развивается в большинстве случаев очень быстро. Речное русло может размываться на несколько метров в

глубину вслед за перекрытием реки плотиной [2]. Средний годовой темп врезания на реках мира за период эксплуатации плотин составляет более 0,2 м [3]. При этом водохранилища могут уменьшать максимальные расходы и увеличивать минимальные расходы воды, что сказывается в целом на руслоформирующей деятельности потока. Целью работы является выявление мало изученного механизма и проявления релаксации русла – затухание глубинной эрозии и трансформации русла, приводящие к его стабилизации.

РЕЛАКСАЦИЯ РУСЛА РЕКИ НИЖЕ ПЛОТИН

Первыми вопросы релаксации русла рек ниже плотин рассмотрели Н.И. Маккавеев и Б.Г. Федоров [4], проанализировав деформации русел в нижних бьефах ряда плотин. Они выделили несколько стадий развития процесса трансформации русла: 1) локальная эрозия на приплотинном участке; 2) быстрая глубинная эрозия, распространяющаяся вниз по течению, с одновременной трансформацией поперечного сечения русла; 3) сравнительно медленная трансгрессивная эрозия и 4) относительная стабилизация продольного профиля и поперечного сечения русла за счет уменьшения уклона и увеличения крупности донных отложений, а также приноса материала из притоков. Границы между стадиями, кроме 1 и 2, достаточно условные и определять их рекомендовалось по темпам понижения уровня воды. Неопределенной остается продолжительность как отдельных стадий, так и процесса в целом до достижения стабилизации, т.е. время релаксации. На распространение врезания влияют характер донных отложений и строение берегов. Большую роль могут играть ограничения в русле и долине: выходы скальных пород, скопления валунов и глыб, прибрежная растительность, искусственные сооружения и мероприятия по регулированию русла. Можно выделить два варианта релаксации русла ниже больших плотин [5]:

1) все наносы, которые поток может транспортировать в новых гидравлических условиях, вымываются, остаются лишь неразмываемые частицы – формируется отмостка, препятствующая дальнейшему размыву; это происходит, когда донный материал включает более 10% частиц, которые не могут транспортироваться при руслоформирующих расходах (вариант, часто встречающийся на реках с крупнообломочным аллювием);

2) размыв продолжается до тех пор, пока уклон не уменьшится до величин, при которых поток не сможет передвигать существующие наносы. Такой уклон называется уклоном стабильного русла [5]. Этот тип врезания наиболее выражен на реках с относительно мелкими наносами и при

малом изменении максимальных расходов. При этом происходит значительная трансформация продольного профиля реки. Величина врезания зависит от режима сбросов (типа регулирования), характеристик русла, размера донного материала.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Основой работы послужил анализ материалов Русловой экспедиции и Научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов географического факультета МГУ, неоднократно проводивших масштабные исследования русловых процессов р. Оби, на участке длиной до 300 км ниже Новосибирского гидроузла в 1961–2004 гг., а также гидрологических материалов последних 20 лет и результатов однодневной связки уровней 2021 г., предоставленных Администрацией водных путей Обского бассейна. Анализировались глубина, ширина, площадь поперечного сечения по картам русла, составленным в ходе исследований как до создания плотины, так и в разные годы вплоть до начала 2000-х гг. Также анализировались уровни воды на гидропостах Нижний бьеф и Новосибирск при гарантированном навигационном расходе воды, равном 1300 м³/с. Анализ уровней при фиксированном расходе наиболее информативен для оценки вертикальных деформаций русла. Кроме того, анализировались минимальные навигационные уровни периода открытого русла на всех гидропостах Оби ниже плотины ГЭС.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение трансформации русла р. Оби ниже Новосибирской плотины, выявление стадийности и релаксации русла реки к измененному гидрологическому режиму и стоку наносов имеют большое значение как для обеспечения условий судоходства, так и с точки зрения комплексного использования водных ресурсов.

Участок реки ниже плотины разнороден по геологическому строению и источникам поступления донных наносов. Вблизи плотины и на верхней половине участка в русле на небольшой глубине обнажаются как коренные породы, так и продукты их разрушения в виде скоплений щебня. Присутствуют также отдельные выступы коренных пород и гравийно-галечные отложения. Ниже по течению река подмывает берега, сложенные песком.

Для участка р. Оби, непосредственно прилегающего к плотине, характерны значительные антропогенные нарушения: изменения речной и береговой инфраструктуры, большие объемы водозабора, застройка пойменных территорий, разработка русловых карьеров, дноуглубительные и

выправительные работы на водном пути. Все это определяет специфику развития трансформации русла реки.

Объем Новосибирского водохранилища, заполненного в 1957 г., невелик – всего 8.8 км^3 , полезный объем 4.4 км^3 или 14% объема стока за половодье. Однако Новосибирский гидроузел оказывает влияние на сток р. Оби по меньшей мере на протяжении нескольких сотен километров. Водоохранилище позволяет осуществлять все виды регулирования стока, которые сказываются на расходах воды и уровнях реки: сезонное (годовое), недельное и суточное. Водоохранилище задерживает полностью сток влекомых песчаных наносов и около 70% стока взвешенных наносов. Воздействие регулирования стока и дефицита наносов неодинаково по длине, что определяет специфику развития процессов трансформации русла и, соответственно, его релаксации.

Сезонное регулирование сказывается на уменьшении водности половодья и увеличении водности летне-осенней межени. Максимальные расходы половодья сократились на 30–35%, соответственно выросли расходы воды в летне-осеннюю и зимнюю межень. Следует добавить, что с 1980-х гг. наступил маловодный период, который продолжается по настоящее время. Средний многолетний расход воды составляет 1580, средний максимальный расход $3700 \text{ м}^3/\text{с}$, доминирующий (эквивалентный) расход, характеризующий суммарное воздействие потока на русло, – $2400 \text{ м}^3/\text{с}$. В 2004–2020 гг. наблюдались сравнительно низкие уровни половодья. Так, средний максимальный уровень на г.п. (гидропост) Новосибирск с 2004 г. понизился на 160 см, а на г.п. Дубровино на 100 см. Транспортирующая способность потока составляет, как показали непосредственные наблюдения за движением донных гряд и расчеты по формуле В.Н. Гончарова [6], около 500 тыс. т или 300 тыс. м^3 в год.

Гидравлический режим ниже Новосибирского гидроузла в значительной мере определяется прохождением вниз по течению волн попусков суточного регулирования нагрузки ГЭС, что сопровождается периодическим увеличением транспортирующей способности потока. Расход воды на гребне попуска при работе всех агрегатов увеличивается, что обеспечивает волну высотой в среднем 0.8 м и приращение скорости течения в 2–3 раза. Так, согласно измерениям в 6 км от плотины скорость течения составляла 1.4–1.5 м/с, тогда как в 20 км от плотины (г.п. Новосибирск) она снижалась до естественных значений 0.5–0.7 м/с [7]. На расстоянии 20–22 км от плотины высота волн снижается в 2–4 раза, в 40 км от плотины и далее амплитуда волн мало значима.

Трансформация русла Оби ниже Новосибирской плотины развивалась с меняющейся интен-

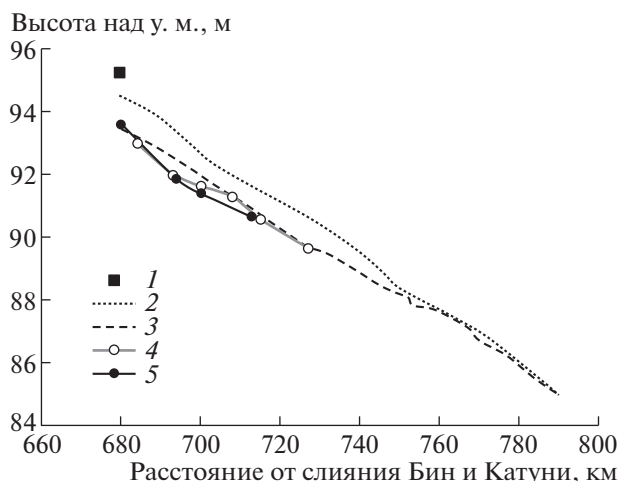


Рис. 1. Продольный профиль р. Оби ниже Новосибирской ГЭС при расходах воды $1200\text{--}1300 \text{ м}^3/\text{с}$ по годам: 1 – 1957, 2 – 1966, 3 – 1987, 4 – 2004, 5 – 2021.

сивностью, проходя ряд стадий, которые выделяются во времени и отражаются на пространственном распространении деформаций русла. Общий характер трансформации русла виден на совмещенном продольном профиле (рис. 1), построенном по данным однодневных связей уровней. Видно, что зона деформаций продольного профиля охватывает около 70 км и имеет вид “клина”, обращенного вниз по течению, сформировавшегося к 1987 г., а позднее изменившегося лишь в деталях. Непосредственно к плотине примыкает участок 1, названный нами *приплотинным*. Это участок характеризуется данными г.п. Нижний бьеф, который фиксирует уровни и среднесуточные сбросы. Он наследует зону местного размыва и отличается максимальной высотой волн суточного регулирования, неполным гашением энергии холостых сбросов и сложным геологическим строением – дно реки на сравнительно небольшой глубине подстилается крупнообломочным материалом. Выделение этого участка основано на предположении, что здесь первоначально после перекрытия реки происходило интенсивное насыщение потока руслоформирующими фракциями наносов, исходная крупность которых составляла 0.3–0.5 мм. Действительно, расчет по методике А.В. Караушева и И.Ф. Карасева [8] показал, что длина пути насыщения потока до уровня транспортирующей способности для донных наносов составляет 9–10 км, что и можно принять за длину участка 1. Высота волн суточного регулирования уменьшается по длине участка почти на четверть.

Процесс релаксации русла можно проследить по развитию эрозии и по одному из его основных признаков – изменению уровневого режима. Стадия быстрой глубинной эрозии началась на

Таблица 1. Изменение уровня при расходе 1300 м³/с на г.п. Нижний бьеф и Новосибирск

Период, годы	Нижний бьеф		Новосибирск	
	Понижение уровня, см	Скорость понижения, см/год	Понижение уровня, см	Скорость понижения, см/год
1957–1961	48	12	–25*	–
1962–1966	18	4.5	43	8.6
1967–1977	70	7.0	24	2.4
1978–1997	32	1.7	43	2.2
1998–2010	10	0.8	34	2.8
2011–2020	–10*	–	1	0.1
Всего	168		145	

Примечание: * – повышение уровня.

участке 1 сразу после перекрытия реки и продолжалась до 1976 г., т.е. в течение 20 лет. Если судить по понижению уровня воды при гарантированном навигационном расходе 1300 м³/с (табл. 1) и сравнению русловых съемок за период 1957–1976 гг., интенсивность эрозии на участке в этот период в среднем составляла 8 см в год. Величина понижения дна составила около 1.5 м, что совпало с посадкой уровня воды. В результате было вынесено не менее 10 млн м³, что соответствует ежегодному выносу около 500 тыс. м³ в год.

В дальнейшем на участке наступила крайне слабо выраженная стадия медленной трансформации, она продолжалась 19 лет, до начала 2000-х гг., а скорость понижения уровней не превышала в среднем 1–1.5 см в год; понижение уровня и дна реки на этой стадии составило 0.4 м. Следует отметить, что в 1970-е гг. на участке про-

изводилась добыча песчано-гравийной смеси из русловых карьеров. Хотя объем добычи можно оценить только приблизительно, А.Б. Векслер и В.М. Доненберг [9], считают, что русловые карьеры, увеличивая объем русла, ответственны за увеличение посадки уровней на 50%. Вероятно, медленная трансформация обусловлена исключительно механическими нарушениями русла и их последствиями. Суммарное понижение уровня на первой и второй стадиях достигло 1.8 м. После 2005 г. устойчивого понижения уровня практически не происходило, наоборот, наблюдалось некоторое повышение уровня – русло стабилизировалось. Релаксация русла на приплотинном участке заняла, таким образом, около 40 лет из 63 работы гидроузла. В целом ход релаксации на приплотинном участке описывается зависимостью, предложенной А. Саймоном [10] для случая природного врезания после нарушения:

$$H_* = a + be^{-ct}, \quad (1)$$

где H_* – относительная отметка водной поверхности, a , b , c – коэффициенты, равные для нижнего бьефа соответственно 0.982, 0.023, 0.11, t – время в годах с начала нарушения. Кривая этой зависимости достаточно точно соответствует данным наблюдений (среднее квадратическое отклонение измеренных и расчетных значений отметки уровня равно 16 см или 8% полной посадки уровня) и ярко показывает характер трансформации русла, очень быстрой вначале и стремящейся к нулю затем, причем быстрая трансформация заняла 1/3 всего времени деформаций (рис. 2).

В результате эрозии слой подвижных наносов был вынесен, и обнажились крупные обломки размером до 40–60 мм при ограниченном участии среднего гравия диаметром 4–6 мм. Образовалась своего рода отмостка, но не за счет селективного выноса материала, а вследствие близкого залегания неразмываемых грунтов. Поэтому существенного уменьшения уклона не произошло. В силу

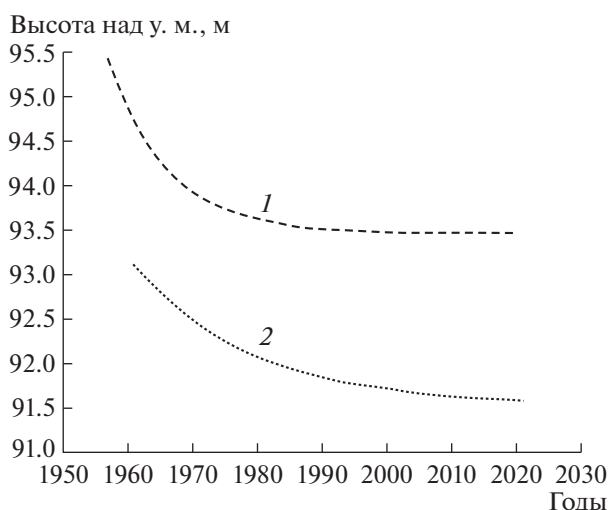


Рис. 2. Графики хода уровней р. Оби на г.п. Нижний бьеф (1) и Новосибирск (2) при расходе 1300 м³/с, аппроксимированные зависимостью (1).

отсутствия подвижных наносов зона насыщения потока сместилась на нижележащий участок. В этом заключается механизм трансгрессивной эрозии, развивающейся при дефиците руслообразующих наносов: по мере укрупнения доступных наносов зона насыщения потока смещается.

На расстоянии до 40 км от плотины располагается участок 2. Отличительная особенность гидравлического режима этого участка – достаточно заметная роль волн суточного регулирования, хотя по длине участка она ослабевает вследствие быстрого уменьшения высоты волн. На участке действует также сезонное регулирование, вносящее специфику в процессы переотложения и транспорта наносов. Этот участок характеризуется данными г.п. Новосибирск, на котором измеряются ежедневные уровни.

Врезание распространилось на участок 2 с запаздыванием от начала процесса у плотины на 5 лет. Это связано с первоначальной аккумуляцией здесь материала, поступившего в поток при бурном размыве первого участка, ее величина составила около 25 см. Быстрое врезание развивалось на участке кратковременно – 5 лет. Средняя скорость врезания достигала 9 см в год, но понижение уровня по г.п. Новосибирск составило на этой стадии только 0.4 м. Наступившая вслед за этим стадия сравнительно медленной трансгрессивной эрозии равномерно протекала до начала 2010-х гг., и понижение уровня составило около 1.0 м (табл. 1). Суммарное понижение уровня за 35–40 лет составило 1.45 м. В последнее десятилетие понижения уровня не наблюдалось – русло стабилизировалось, за это время уровни, отвечающие расходу 1300 м³/с, колебались на 15–20 см в обе стороны. Таким образом, фаза врезания до релаксации русла продолжалась примерно 50 лет. В целом понижение уровня также описывается зависимостью (1) при среднеквадратическом отклонении 10 см, но ее параметры указывают на существенно более медленный процесс: $a = 0.983$, $b = 0.017$, $c = 0.055$. Различный характер временной трансформации русла на соседних участках отчетливо виден на рис. 2: если на участке 1 релаксация русла наступила в начале 1990-х гг., то на участке 2 – спустя 30 лет.

Как можно судить по распространению врезания, его причинами стали, вероятно, неустановившийся режим движения потока и обусловленное им увеличение транспортирующей способности в условиях дефицита руслообразующих наносов. Стабилизации процесса трансформации способствовало увеличение крупности донных наносов и донных грунтов. Средняя крупность донных наносов на участке 2 составила 3.2 мм, что в 4–5 раз больше естественных величин. Большую роль сыграло то обстоятельство, что на втором участке массово разрабатывались русловые карьеры [9] и

осуществлялись крупномасштабные проекты по улучшению условий судоходства, включавшие землечерпательные и выправительные работы. Вероятно, с этим связано то, что понижение уровня не совпадает с понижением дна. Глубина русла в 1967–1987 гг. увеличилась на участке почти на 1.3 м, тогда как посадка уровня составила 0.55 м. Для участков 1 и 2 характерны значения показателей устойчивости русла, которые обычно наблюдаются на галечных врезанных реках, и глубинная эрозия здесь, очевидно, невозможна. Снижение скорости деформаций подтверждается изменением морфометрических характеристик русла, которое позволило установить, что если в 1967–1975 гг. объем русла увеличивался на 1.0 млн м³ в год, а в 1975–1987 г – 0.35 млн м³, то в 1988–2004 гг. выноса материала не обнаружено.

Третий участок простирается по меньшей мере до устья р. Томи, и русло развивается на фоне сезонного регулирования, вносящего специфические черты в горизонтальные деформации. В главных чертах они изложены в наших предыдущих работах [11]. Согласно анализу энергетических характеристик потока (удельной мощности, коэффициента устойчивости русла), потенциал русловых деформаций и сток руслообразующих наносов и полный потенциал, свойственный естественным разветвленным песчаным руслам, достаточно быстро восстанавливаются к 60–70 км от плотины.

Гидрологические условия участка 3 характеризуют данные г.п. Дубровино (109 км от плотины) и Кругликово (160 км от плотины), на которых измеряются уровни и расходы воды. Крупность наносов на протяжении участка остается практически постоянной, но в 2–3 раза превышает исходную, достигая, например в районе Дубровино 0.7–0.8 мм. Это связано с тем, что ниже г. Новосибирска сплошного распространения коренных пород не наблюдается, однако широко развиты аллювиальные песчано-галечные отложения, что благоприятствует более свободному развитию русловых деформаций. Слабое проявление волн суточного регулирования здесь не способствует интенсивной глубинной эрозии и саморегулирование гидравлических сопротивлений происходит путем переформирования руслового рельефа – перекаатов, островов, побочной, осередков. Эрозия распространилась только на его верхнюю часть. В этих условиях на увеличение крупности аллювия и глубины русла значительное влияние оказали проводимые на участке землечерпательные работы, хотя в настоящее время их роль уменьшилась, т.к. сократились их объемы, также нельзя исключить влияния на крупность наносов концентрации стока в одном рукаве многоруканного русла по мере снижения расходов и уровней половодья. При разработке прорезей вскрывают-

ся залегающие в нижних горизонтах аллювия слои галечников, гравия и крупных песков.

Изменения уклона водной поверхности не были значительными. Средний уклон реки в бытовом состоянии составлял на участке ГЭС-Дубровино 0.093‰, в настоящее время он равен 0.08‰. Уклон 70-километрового участка, на котором проявилось понижение водной поверхности, постепенно уменьшился до 0.075‰. Современный уклон водной поверхности на участке деформаций можно сравнить с расчетным, при котором донные наносы становятся неподвижными. Вычисления, выполненные с использованием подхода А. Шильдса, показывают, что расчетный предельный уклон совпадает со средним современным уклоном на участке деформаций. Это подтверждает тот факт, что трансформация продольного профиля, в основном, закончилась. Учитывая, что после 1987 г. понижения водной поверхности на 70-километровом участке не наблюдалось, можно полагать, что скорость распространения эрозии по длине составила до 3 км в год. Это совпадает с выводами А.Б. Векслера и В.М. Доненберга [3].

В последние 30–35 лет профиль остался достаточно стабильным, а стадии развития глубинной эрозии на нем не выделяются. Вероятно, за пределами зоны распространения волн суточного регулирования и по мере ослабления дефицита наносов на релаксацию русла влияют другие факторы: сезонное регулирование стока и широкое применение дноуглубительных работ на водном пути.

В условиях стабильного русла возможны, однако, локальные изменения минимальных за период открытого русла уровней, обусловленные колебаниями меженного стока и не связанные с деформациями дна. Диапазон колебания минимальных уровней от года к году составляет иногда несколько десятков сантиметров. Очевидного понижения минимальных уровней за пределами участка трансформированного русла, как в случаях механических нарушений, не обнаруживается. За последние 20 лет обнаруживаются лишь слабые тренды направленных изменений минимальных уровней, связанные со снижением водности и, возможно, выполнением дноуглубительных работ; на г.п. Нижний бьеф и Новосибирск понижение минимального уровня за последние 20 лет можно оценить в 6–7 см, на г.п. Дубровино (109 км от плотины) понижение минимального уровня составило около 10 см. Понижение уровней затрудняет практическое использование реки в современных условиях. Так, проектный уровень 90%-ной обеспеченности в Новосибирске, на котором основываются проекты путевых работ, за последние 25 лет снизился с 80 до –3 см от “0” графика гидрологического поста.

ВЫВОДЫ

Релаксация русла ниже большой плотины – процесс саморегулирования русла, развивающийся во времени и пространстве и обусловленный резким изменением гидрологического режима и стока наносов. Он происходит за счет преимущественно глубинной эрозии, сопровождающейся увеличением крупности наносов и донных грунтов и уменьшением уклона.

Участок глубинной эрозии ниже Новосибирской плотины протягивается на 70 км. Деформации русла по-разному проявились по длине реки, заняв более 40 лет. Быстрое врезание, происшедшее в первое время на относительно коротком приплотинном участке длиной несколько километров, сменилось стабилизацией вследствие формирования каменной отмости, практически минуя стадию медленной эрозии.

Для нижележащего участка длиной несколько десятков километров характерна относительно медленная эрозия, распространяющаяся трансгрессивно, причем стабилизация русла происходила с небольшим запаздыванием. Этот участок совпадает с зоной наиболее отчетливого распространения волн суточного регулирования.

Механизм трансгрессивной эрозии ниже плотин, вероятно, заключается в увеличении длины области насыщения потока по мере укрупнения руслообразующих наносов в зонах первоначального и последующих этапов врезания.

За пределами этого участка направленных вертикальных деформаций не происходило, однако изменился характер горизонтальных деформаций, что обусловлено сезонным регулированием стока реки.

Заметную роль в релаксации русла сыграли дополнительные нарушения русла механического характера – добыча аллювия и дноуглубительные работы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено по госзаданию НИ Лаборатории эрозии почв и русловых процессов географического факультета МГУ (проект № 121051200166-А).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Маккавеев Н.И.* Воздействие крупного гидротехнического строительства на геоморфологические процессы в речных долинах // Геоморфология. 1970. № 2. С. 28–34.
2. *Williams G.P. and Wolman M.G.* Downstream Effects of Dams on Alluvial Rivers. U.S. Geological Survey Professional Paper 1286. 1984. 83 p.
3. *Babiński Z.* Wpływ zapór na procesy korytowe rzek aluwialnych // Przestrzeń. 2000. No. 12. S. 9–19.

4. Маккавеев Н.И., Федоров Б.Г. Транспортное использование водохранилищ. М.: Транспорт, 1972. 223 с.
5. Лапшенков В.С. Прогнозирование русловых деформаций в бьефах речных гидроузлов. Л.: Гидрометеоздат, 1979. 239 с.
6. Рекомендации по прогнозу трансформации русла в нижних бьефах гидроузлов. СПб.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2006. 102 с.
7. Беркович К.М., Векслер А.Б., Виноградова Н.Н., Доненберг В.М., Лысенко В.В., Маккавеев Н.И., Рулева С.Н., Чалов Р.С. Формирование русла Оби в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС // Тр. Зап.-Сиб. Рег. НИИ. 1981. Вып. 52. С. 3–20.
8. Карасев И.Ф. Русловые процессы при переброске стока. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 288 с.
9. Векслер А.Б., Доненберг В.М. Переформирование русла в нижних бьефах крупных гидроэлектростанций. М.: Энергоатомиздат, 1983. С. 142–165.
10. Simon A. Adjustment and recovery of unstable alluvial channels: Identification and approaches for engineering management // *Earth Surface Processes and Landforms*. 1995. 20. P. 611–628.
11. Беркович К.М., Виноградова Н.Н., Завадский А.С., Сурков В.В., Рулева С.Н., Чалов Р.С. Нижний бьеф Новосибирской ГЭС в прошлом, настоящем и будущем (опыт исследования формирования природно-техногенных систем) // *Эрозия почв и русловые процессы*. Т. 16. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008. С. 132–147.

Riverbed relaxation downstream of Novosibirsk dam

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

^aLomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

[#]E-mail: berkovitch@yandex.ru

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

The Novosibirsk hydroelectric complex, the largest hydropower project on the Ob River, was built ~60 years ago. It is located 680 km from the confluence of the Biya and Katun rivers and formed a 8 km³ reservoir. The paper considers the riverbed transformation processes followed after the hydroelectric complex construction caused by changes in the hydrological regime and sediment flux. The reservoir regulates daily and seasonal runoff, and intercepts 90% of the suspended sediment flux. The riverbed transformation reflecting daily discharge fluctuations could be detected for 70 km downstream from the dam. The intensive erosion rates up to 12 cm/year were documented along the 8–10 km stretch of the channel near the dam during the period of 20 years due to the influence of daily discharge regulation waves and sediments shortage. The lowering of the riverbed and water levels for 1.8 m is exponential. During the 20-year period, the initial sand deposits of 0.5 mm in size were removed exposing poorly eroded, rocky and coarse-grained soils and significantly decreasing the erosion rates. Down the stream, 10–40 km from the dam, erosion started with a delay of 3–5 years with the rate of less than 3 cm/year. The lowering of the riverbed and water level reached only 1.4 m, and was stabilized ~50 years after the dam construction as the grain size of the riverbed sediments increased by 5–6 times and the water surface gradient decreased. Additional mechanical disturbances; mining of at least 20 million m³ sand and gravel construction materials, dredging the channel which allowed in the 1960s–1970s to increase the navigable depth by 1.0–1.3 m, and other river engineering work also played a significant role in riverbed transformation.

Keywords: man induced riverbed disturbances, erosion downstream of the dams

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was carried out according to the state task of the Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes of the Faculty of Geography of Moscow State University (project No. 121051200166-A).

REFERENCES

1. Makkaveev N.I. *Vozdeistvie krupnogo gidrotekhnicheskogo stroitel'stva na geomorfologicheskie protsessy v rechnykh dolinakh* (The impact of large hydrotechnical projects on geomorphological processes within the river valleys). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 1970. No. 2. P. 28–34. (in Russ.)
2. Williams G.P. and Wolman M.G. Downstream Effects of Dams on Alluvial Rivers. U.S. Geological Survey Professional Paper 1286. 1984. 83 p.
3. Babiński Z. Wpływ zapór na procesy korytowe rzek aluwialnych. *Przestrzeń*. 2000. No. 12. P. 9–19. (in Pol.)
4. Makkaveev N.I. and Fedorov B.G. *Transportnoe ispol'zovanie vodokhranilishch* (Transport use of reservoirs) M.: Transport (Publ.), 1972. 223 p. (in Russ.)
5. Lapshenkov V.S. *Prognozirovanie ruslovykh deformatsii v b'efakh rechnykh gidrouzlov* (Riverbed deformation prognosis in tailwater of river waterworks). L.: Gidrometeo (Publ.), 1979. 239 p. (in Russ.)
6. *Rekomendatsii po prognozu transformatsii rusla v nizhnikh b'efakh gidrouzlov* (Recommendations on riverbed transformation prognosis in downstream tailwater of

- dams) B.E. Vedeneev's. VNIIG. Sankt-Peterburg. 2006. 102 p. (in Russ.)
7. Berkovich K.M., Veksler A.B., Vinogradova N.N., Donenberg V.M., Lysenko V.V., Makkaveev N.I., Ruleva S.N., and Chalov R.S. *Formirovanie rusla Obi v nizhnem b'efe Novosibirskoi GES* (Ob River channel forming in Novosibirsk HPS' downstream tailwater reach). *Trudy Zap. Sib. Reg. NII*. Issue 52. 1981. P. 3–20. (in Russ.)
 8. Karasev I.F. *Ruslovye protsessy pri perebroske stoka* (Riverbed processes upon run-off transfer) L.: Gidrometeo, 1975. 288 p. (in Russ.)
 9. Veksler A.B. and Donenberg V.M. *Pereformirovanie rusla v nizhnikh b'efakh krupnykh gidroelektrostantsii* (Riverbed reforming in downstream tailwater reaches of large hydropower stations). M.: Energoatom (Publ.), 1983. P. 142–165. (in Russ.)
 10. Simon A. Adjustment and recovery of unstable alluvial channels: Identification and approaches for engineering management. *Earth Surface Processes and Landforms*. 1995. 20. P. 611–628.
 11. Berkovich K.M., Vinogradova N.N., Zavadskii A.S., Surkov V.V., Ruleva S.N., and Chalov R.S. *Nizhnii b'ef Novosibirskoi GES v proshlom, nastoyashchem i budushchem (opyt issledovaniya formirovaniya prirodno-tekhnogennykh sistem)* ((Novosibirsk HPS' downstream tailwater reach in the past, at present and in the future (the case study of natural-technogenic system forming)). *Erozia pochv I ruslovye protsessy*. Vol. 16. M.: MSU (Publ.), 2008. P. 132–147. (in Russ.)