

*А.Б. Векслер, В.М. Доненберг, Н.Н. Коротков, В.Л. Мануилов*

**ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА ТРАНСФОРМАЦИИ  
РУСЛА В НИЖНЕМ БЬЕФЕ ГИДРОУЗЛА  
ПО ДАННЫМ РЕТРОСПЕКТИВЫ**

*A.B. Veksler, V.M. Donenberg, N.N. Korotkov, V.L. Manuilov*

**VERIFICATION OF CALCULATION OF RIVER-BED  
TRANSFORMATION IN HYDRO POWER PLANT TAILRACE  
PROGRAM BASED ON OBSERVED DATA**

*Программа расчёта трансформации русла в нижнем бьефе гидроузла, реализующая одномерную модель квазиустановившегося потока в деформируемом русле, верифицирована по данным ретроспективы для участка р. Оби длиной 36,6 км в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС за период с 1957 по 1976 г. Для оценки влияния карьерных разработок русла ретроспективные расчёты выполнены для двух случаев: 1) при фактических карьерных разработках русла р. Оби; 2) в предположении их отсутствия.*

*Результаты верификации показали, что расчётная модель адекватно воспроизводит основные проявления процесса трансформации русла в нижнем бьефе гидроузла и может быть использована для прогностических расчётов этого процесса.*

*The program of calculation of river-bed transformation in hydro power plant tailrace realizes the one-dimensional model of quasisteady flow in the deformable river-bed. This program is verified on observed data for the section of the Ob River whose length is 36.6 km in the tailrace of the Novosibirsk hydro power station from 1957 to 1976. Retrospective calculations have been done for impact estimate of pit-run working for two cases: 1) under the factual pit-run working of river-bed; 2) under assumption of their absence.*

*Results of verification have shown that the designed model reproduces the main demonstrations of tailrace river-bed transformation and can be used for forecasting calculation of this process.*

При составлении прогнозов трансформации русел расчеты выполняются по программе, реализующей одномерную модель квазиустановившегося движения жидкости, дополненную уравнением деформации русла, в котором для определения транспортирующей способности потока использована формула И. И. Леви [Векслер, 1996, 2004]. Эта модель требует схематизации русла, грунтов ложа, гидрографов рассчитываемых лет, гидрографов притоков. Адекватность расчетной модели и используемых способов схематизации русла, потока и грунтов проверяется с помощью ретроспективных расчетов и сравнения их результатов с данными натурных наблюдений.

В ретроспективных расчетах, проведенных при обосновании прогноза развития трансформации русла р. Оби в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС,

принят участок реки длиной 36,6 км ниже створа ГЭС, для которого имеются сплошные русловые съемки за 1956 г. и 1975 г. и промерные поперечники через 300 – 700 м за 1960 г. Этим участком практически была ограничена до 1976 г. зона переформирования русла р. Оби в нижнем бьефе ГЭС после ввода ее в эксплуатацию в 1957 г. Кроме того, для этого участка за период ретроспективы имелись ежегодные кривые связи расходов и уровней воды на водпостах «Нижний бьеф ГЭС» и «г. Новосибирск», а также данные об объемах карьерных разработок русла [Векслер, 1983].

Метод расчета деформации русла по его одномерной модели не может учесть все подробности деформаций и, в частности, их распределение по ширине поперечных сечений. Возможности этого метода ограничены лишь оценкой распределения по длине потока средних по сечениям деформаций дна с точностью, соответствующей принятой схематизации русла и используемым в методе допущениям. Получаемое при этом изменение объемов русла по его длине и во времени при фиксированных расходах воды в конечном итоге отражается в изменении кривых свободной поверхности и связи расходов и уровней воды  $Q = f(H)$  в заданных («опорных») створах.

Очевидно, приведение русла к средним по сечению ширинам и отметкам дна при его схематизации прямоугольными поперечными профилями должно выполняться в том диапазоне расходов, который является в наибольшей степени ответственным за переформирование русла. Как правило, это расходы и уровни воды, не выходящие за пределы бровок русла.

По характеру взаимодействия руслового и пойменного потоков р. Обь в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС, по-видимому, должна быть отнесена к четвертому или даже пятому типу [Барышников, 1984], характеризуемому изменением направления динамических осей потоков по отношению друг к другу как по длине реки, так и по мере изменения уровней воды. Однако одномерная идеализация потока не позволяет учесть эти особенности реки, побуждая принять допущение, что весь паводковый расход сосредоточен в русле.

Начальное состояние русла р. Оби в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС принято по русловой съемке 1956 г. На охваченной съемкой длине 36,6 км русло разбито 37-ю основными створами на 36 участков. Поперечные сечения этих створов схематизированы прямоугольными профилями с ширинами, равными их средневзвешенным значениям при изменении расходов воды от 500 до 7500 м<sup>3</sup>/с, что соответствует, как правило, диапазону уровней, не выходящих из бровок русла (с учетом рукавов и проток).

Для каждого из основных створов строились поперечные профили, по которым определялись зависимости ширины  $B = B(y)$  по урезу  $y$  и площади живого сечения  $\omega = \omega(y)$  с шагом  $\Delta y = 0,2$  м. В диапазоне изменения уровней воды, соответствующем расходам  $500 < Q < 7500$  м<sup>3</sup>/с, вычислялись значения  $B_{cp}$  и по ним – значения отметки дна  $Z$ , удовлетворяющие условиям:

$$\left| 1 - \frac{(y-Z)B_{cp}}{\omega(y)} \right| < \varepsilon_1; \quad \left| 1 - \frac{\int (y-z)B_{cp} dy}{\int \omega(y) dy} \right| < \varepsilon_2. \quad (1)$$

В расширенном диапазоне  $500 < Q < 10\,000$  м<sup>3</sup>/с погрешности не превышали принятых значений  $\varepsilon_1 = 10^{-1}$ ;  $\varepsilon_2 = 10^{-6}$ .

Изменение геометрических характеристик схематизированного русла между основными створами начального русла принято линейным. После автоматического разбиения участков между основными створами, выполняемого программой на предварительной стадии идентификации коэффициентов шероховатости русла, линейное изменение геометрии русла сохраняется при расчетах лишь в пределах шагов по длине  $\Delta x$ , на которые разбивается каждый расчетный участок схематизированного русла.

В исследованиях и обобщениях МГУ [Русловые процессы ... , 2001] отмечена одна общая и важная тенденция: после возведения Новосибирской ГЭС в ее нижнем бьефе происходило постепенное укрупнение средневзвешенных диаметров частиц поверхностного слоя донных отложений р. Оби, которое распространялось на значительную протяженность бьефа. Одной из главных причин этого процесса является, по нашему мнению, изменение направленности русловых переформирований р. Оби после ее зарегулирования от обратимых к необратимым. При этом увеличение крупности частиц поверхностного слоя русла происходит не только за счет его перемыва и самоотмостки крупными фракциями грунта, но и за счет общего врезания русла в более низкие слои аллювия, сложенные гравийно-галечным и крупнопесчаным грунтом.

Последнее замечание показывает, что при расчетах трансформации русла в нижнем бьефе ГЭС следует не только (и не столько) ориентироваться на характеристики поверхностного слоя грунта, но и обязательно учитывать характеристики более глубоких слоев аллювия.

Имевшиеся сведения о составе грунтов ложа р. Оби в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС не могли быть использованы в расчетах в чистом виде как по причинам их чрезвычайного разнообразия, изменчивости во времени, так и из-за отсутствия сплошности информации по длине потока. Для выхода из создавшейся ситуации при выполнении ретроспективного расчета представилось целесообразным в каждом расчетном створе (или на расположенном ниже него участке) принять некоторый эквивалентный (неизменный за расчетный период времени) состав грунта, деформация которого была бы близка наблюдаемой в природных условиях, а совокупность всех принятых составов грунта на участках обеспечила бы динамику процесса трансформации русла по расчетам, близкую натурной.

Отсутствие достаточной информации о гранулометрическом составе грунтов русла р. Оби побудило, характеризуя состав эквивалентного грунта,

ограничиться лишь его средней крупностью  $d_3$ . Определение значения  $d_3$  в расчетных створах выполнено с помощью приближенного приема, основанного на следующей схеме формирования активного слоя переработки русла (слоя деформации).

Предполагается, что каждый пропущенный в нижний бьеф расход воды оставлял после себя в поверхностном слое донных отложений частицы не мельче, чем крупность «устойчивых» частиц  $d_y$ , для которых при этом расходе значения неразрывающих скоростей  $V_n$  совпадали со значениями скоростей потока  $V$ . При прохождении расхода  $Q_{j+1} > Q_j$  частицы поверхностного слоя, унаследованного от предыдущего расхода  $Q_j$ , будут уноситься вниз по течению. На их место могут быть принесены частицы с вышерасположенных участков. Те из них, крупность которых  $d \geq d_y(Q_{j+1})$ , будут формировать новый придонный слой, а более мелкие частицы будут уноситься потоком. При уменьшении расхода  $Q_{j+1} < Q_j$  поверх унаследованного поверхностного слоя отложений будут откладываться более мелкие частицы, принесенные с вышерасположенных участков, формируя новый слой отложений, и т.д. Активный слой переработки русла, образующийся таким образом, будет представлять собой совокупность всех поверхностных слоев донных отложений (как оставшихся, так и смытых), унаследованных после пропуска в нижний бьеф всего спектра расходов воды.

Зная расход воды  $Q$ , можно рассчитать кривую свободной поверхности в схематизированном русле  $p$ . Оби в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС и в каждом створе вычислить глубину  $h$  и скорость  $V$  потока. При найденном значении  $h$ , можно определить  $d_y$  с помощью зависимости Ц.Е. Мирцхулавы [Рекомендации..., 1981], в которой после подстановки  $V = V_n$  неизвестной остается только крупность  $d = d_y$ .

Предложенный прием может быть использован лишь в том случае, когда известно, что в составе аллювия есть фракции грунта, устойчивые против размыва при наибольших расходах воды. В нижнем бьефе Новосибирской ГЭС это условие выполнено. В противном случае прием должен быть усложнен предварительным расчетом предельных глубин размыва русла, сложенно-грунтом реальной наибольшей крупности.

Для периода ретроспективы 1957 – 1976 гг. имеются ежедневные расходы воды, пропущенные в нижний бьеф ГЭС. Весь ряд расходов был разбит на интервалы  $\Delta Q_j$ , и с помощью стандартной обработки были найдены повторяемости  $p_j$  каждого интервала. После вычисления значений  $d_{y_j}$  в каждом створе при расходах воды, равных среднему расходу  $Q_j$   $j$ -го интервала, опре-

делялась осредненная крупность устойчивых частиц в створе  $\bar{d}_y$ , характеризующая их совокупный состав за период 1957 – 1976 гг.:

$$\bar{d}_y = \frac{1}{100} \sum_{j=1}^J p_j d_{yj} . \quad (2)$$

Полагая найденную крупность  $\bar{d}_y$ , близкой к значению  $d_{05}$ , и считая условно слой переработки однородным с коэффициентом однородности  $k_0 = \frac{d_{cp}}{d_{05}} = 0,6$  – по нижней границе этого коэффициента [Гидравлические расчёты..., 1988], можно было найти  $d_{cp} = 0,6\bar{d}_y$  в каждом створе схематизированного русла и принять  $d_s = d_{cp}$ . Расположенные рядом участки с близкими значениями  $d_s$  объединялись в один участок, характеризующийся крупностью  $\bar{d}_s = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n d_{sk}$ .

Следует отметить, что средняя крупность грунтов поверхностного слоя русла р. Оби по данным изысканий Лаборатории эрозии почв и русловых процессов Географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, выполненных в 2002 – 2003 гг., оказалась крупнее значений  $\bar{d}_s$ , восстановленных для периода 1958-1976 гг.: в 3 – 5 раз на участке ГЭС – г. Новосибирск, где обнажились слои щебенистого, галечного и галечно-гравийного грунта, и в 1,5 – 2,5 раза на участке г. Новосибирск – п. Кудряшовский Бор, где еще сохранились песчано-гравийные и песчаные отложения.

Для расчетов ретроспективы в качестве опорных створов с заданными (проектными) кривыми связи расходов и уровней воды  $Q = f(H)$  в начальный момент времени приняты створы:

- 1 – в/п «Нижний бьеф ГЭС» – 0,1 км от оси плотины;
- 6 – в/п «д. Огурцово» – 3,1 км;
- 17 – в/п «водозабор М. Кривошеково» – 15,4 км;
- 24 – в/п «г. Новосибирск» – 21,3 км\*
- 37 – в/п «п. Кудряшовский Бор» – 36,5 км.

Гидрографы ежедневных расходов воды 1957 – 1976 гг. разбиты на ступени с постоянными (средними за ступень) расходами воды  $Q_j$ . Независимо от схематизации гидрографов р. Оби была выполнена схематизация гидро-

\* В период проектирования гидроузла в/п «г. Новосибирск» находился в створе 24. В 1953 г. он был перенесен в створ 26 (22,8 км от ГЭС) и оставался там до 1975 г.

графов р. Ини – правого притока р. Оби, впадающего в нее между створами 20 (18,9 км от ГЭС) и 21 (19,2 км).

Схематизация годовых объемов карьерных разработок была выполнена путем их пропорционального распределения по длинам участков схематизированного русла и длительностям ступеней гидрографов, на которые приходилась разработка каждого карьера. При этом предполагалось равномерная интенсивность извлечения грунта на конкретном карьере в периоды летне-осенней межени.

Расчеты ретроспективы выполнялись для двух случаев: I – при фактических карьерных разработках русла р. Оби; II – в предположении их отсутствия.

По результатам расчетов, выполнявшихся в 1978 г. с помощью менее подробной модели, был сделан вывод, что в диапазоне расходов воды 1000 – 3000 м<sup>3</sup>/с «карьерные разработки создали к 1977 г. дополнительное понижение уровней по водпосту «Нижний бьеф» – 85 – 90 см, в створе водпоста «г. Новосибирск» – 25 – 30 см, а в районе городских водозаборов (М. Кривошеково) – порядка 80 см». В долях от общего понижения уровней по расчету с учетом карьерных разработок русла приведенные оценки составляли:

в створе 1 («Нижний бьеф») – 55 – 65 %,

в створе 17 («водозабор М. Кривошеково») – 90 – 100 %,

в створе 26 («г. Новосибирск») – 55 – 60 %.

Результаты выполненных в 2005 г. расчетов для случаев I и II дали несколько иные оценки дополнительного понижения уровней за счет карьерных разработок русла (см. табл.), которые, однако, не меняют принципиального вывода, полученного в расчете 1978 г., о существенном влиянии карьерных разработок русла на понижение уровней нижнего бьефа.

**Влияние карьерных разработок русла р. Оби на понижение уровней в нижнем бьефе ГЭС**

Створ	Расход воды Q, м <sup>3</sup> /с	Уровень воды по проекту y <sub>0</sub> , м БС	Случай I		Случай II		Доля влияния карьеров $\left(1 - \frac{\Delta y_2}{\Delta y_1}\right) 100\%$
			Уровень 1976 г. y <sub>1</sub> , м БС	Δy <sub>1</sub> , м	Уровень 1976 г. y <sub>2</sub> , м БС	Δy <sub>2</sub> , м	
1	1300	95,18	93,71	1,47	94,46	0,72	51
17		93,85	93,00	0,85	93,56	0,29	66
26		92,87	92,65	0,22	92,72	0,15	32
1	3000	96,85	95,54	1,31	96,18	0,67	49
17		95,34	94,64	0,70	95,03	0,31	56
26		94,55	94,32	0,23	94,38	0,17	26

Примечания: Δy<sub>1</sub> = y<sub>0</sub> - y<sub>1</sub>; Δy<sub>2</sub> = y<sub>0</sub> - y<sub>2</sub>.

Обращает на себя внимание наибольшее влияние карьеров на понижение уровней в створе 17 как по расчетам 1978 г., так и по расчетам 2005 г. По-видимому, это связано с тем, что около 35 % извлеченного из русла р. Оби грунта в 1960 – 1976 гг. приходится на участок длиной 5,9 км от створа 17 до

створа 24, что составляет лишь 16 % от общей длины. Полученные расчетом для основного случая I изменения уровней воды во времени при различных расходах в створах 1 («Нижний бьеф») и 26 (в/п «г. Новосибирск») сопоставлены (рис. 1 и 2) с данными натурных наблюдений по результатам обработки суточных ведомостей ГЭС.

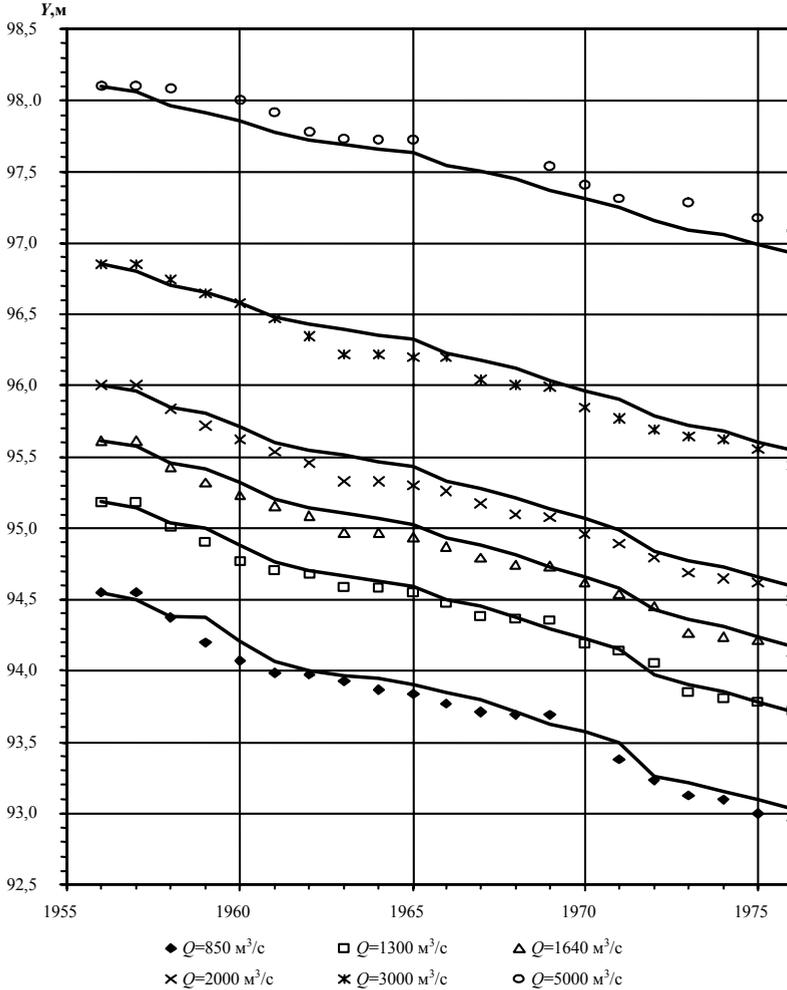


Рис. 1. Изменение уровней воды в створе 1 «Нижний бьеф» во времени при различных расходах воды: а) по расчету – сплошные линии; б) по натурным данным – точки.

Оценив результаты ретроспективного расчета, можно отметить следующее.

1. В створе 1 «Нижний бьеф», в котором изменение кривых  $Q = f(H)$  интегрально характеризует трансформацию русла, общее понижение уровней за период ретроспективы, полученное расчетом, удовлетворительно согласуется с данными натурных наблюдений 1958 – 1976 гг. во всем представляющем

интерес диапазоне расходов воды (850 – 5000 м<sup>3</sup>/с). Отклонение рассчитанных уровней от натуральных в 1975 г. не превышает ± 15 см, а при расходах 1300 м<sup>3</sup>/с (расход навигационного попуска) и 1640 м<sup>3</sup>/с (среднегодовой расход) составляет менее ± 5 см. Результаты расчета удовлетворительно воспроизводят натурную динамику изменения уровней по годам. Систематическое отклонение натуральных уровней воды от расчетных на 15 – 20 см вниз имеет место лишь в 1963 – 1964 гг. при расходах 1640 – 3000 м<sup>3</sup>/с.

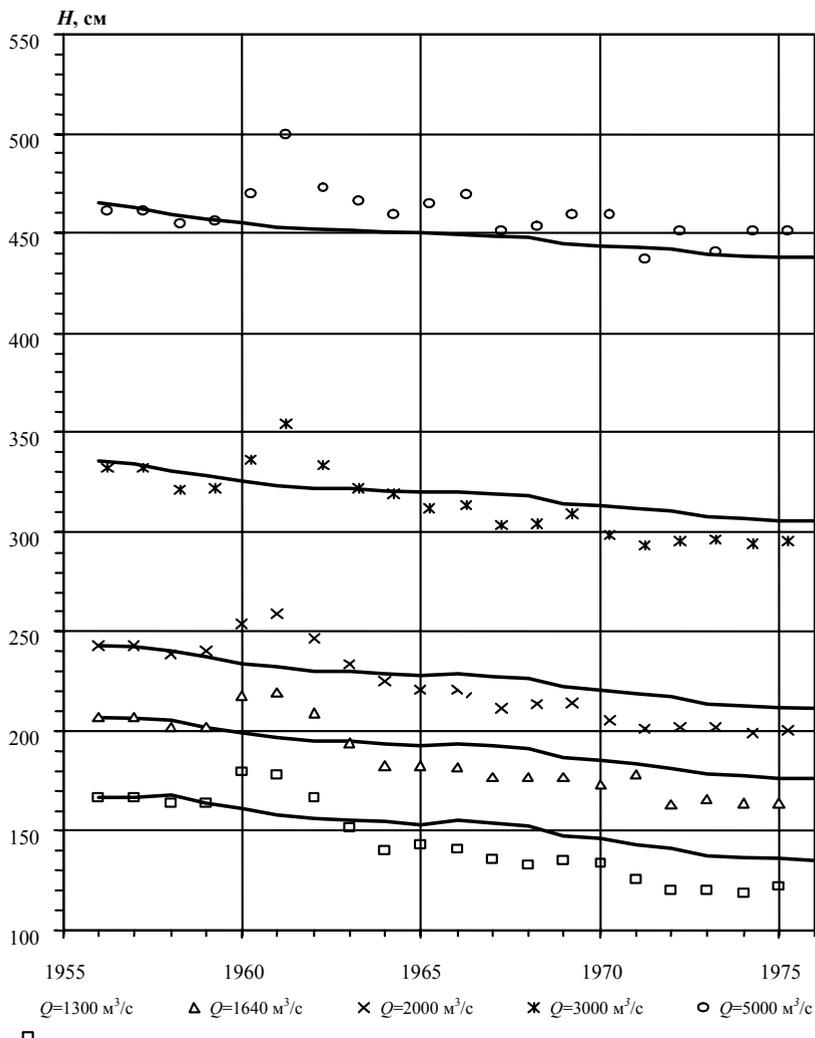


Рис. 2. Изменение уровней воды в створе 24 в/п «г. Новосибирск» (над "0" водпоста) во времени при различных расходах воды:  
 а) по расчету – сплошная линия; б) по натурным данным – точки.

2. В створе 26 (в/п «г. Новосибирск») расчетом удовлетворительно воспроизводится общее понижение уровней за 1958 – 1975 гг., но в 1961 г. имеются большие отклонения от натуральных уровней (0,3 – 0,5 м в сторону занижения при  $Q \geq 3000 \text{ м}^3/\text{с}$ ). Кроме того, при расходах  $Q \leq 3000 \text{ м}^3/\text{с}$  после 1964 г. натуральные уровни воды оказались на 20 – 30 см ниже расчетных, а при  $Q \geq 5000 \text{ м}^3/\text{с}$  – на 5 – 20 см выше.

3. Сравнение полученных расчетом отметок дна  $Z(L)$  схематизированного русла с приведенными к его ширинам отметками дна натурального русла по съемкам 1960 и 1975 показано на рис. 3 в виде продольных профилей дна.

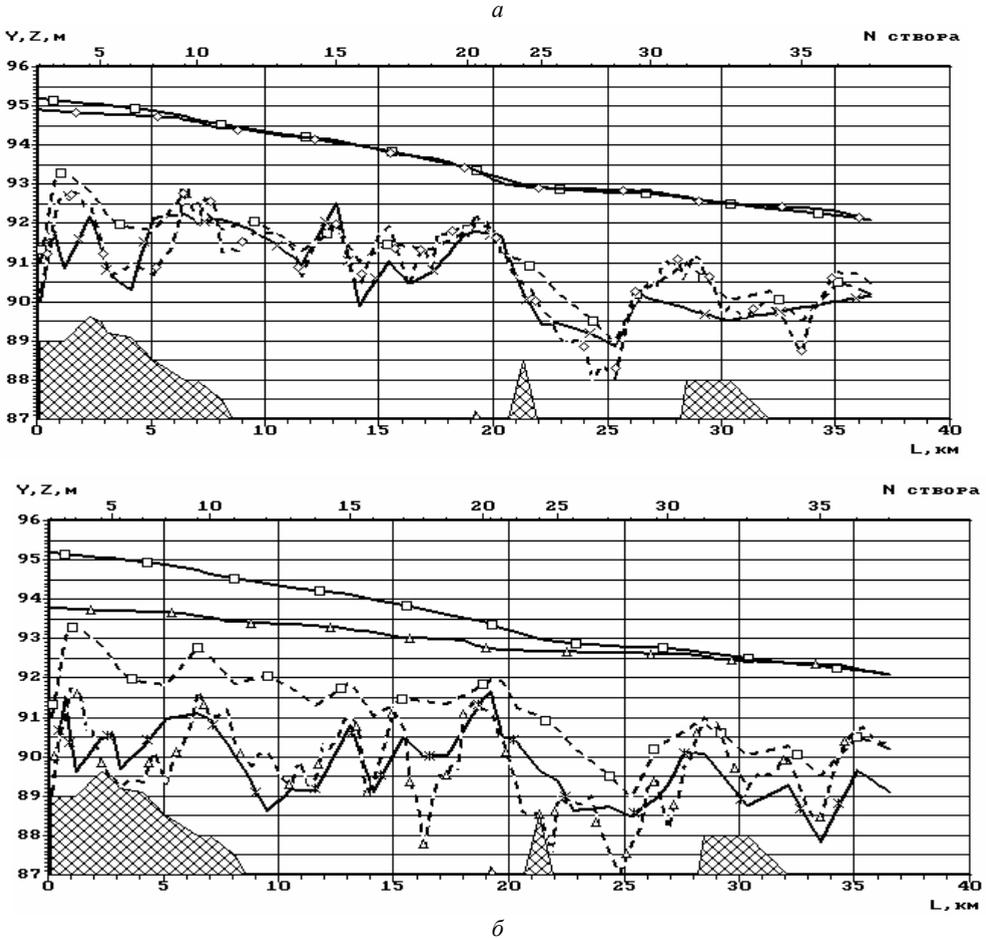
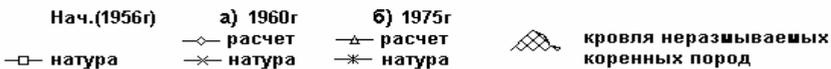


Рис. 3. Начальные и расчетные уровни  $Y(x)$  воды при расходе  $1300,0 \text{ м}^3/\text{с}$  и продольные профили  $Z(x)$  дна:



Локальные отклонения отметок дна от данных природы в 1960 г., превышающие  $\pm 1,0$  м, имеются лишь в 5 створах (3, 8, 27, 32, 34). В 1975 г. таких створов оказалось уже 8 (3, 8, 12, 18, 19, 23, 24, 36), причем 2 из них повторились. Самое большое расхождение отметок дна было получено в створе 18, где расчетное дно оказалось на 2,5 м ниже фактического.

Сравнение фактических и расчетных объемов деформации русла на длине 36,5 км к 1960 г. дало погрешность  $\frac{W_{\text{расч}}}{W_{\text{нат}}} - 1 = -25\%$ . К 1975 г. погрешность уменьшилась до  $-8\%$ .

Отмеченные несовпадения расчетных и натуральных уровней воды в створах в отдельные годы, локальные отклонения отметок дна, погрешности суммарных объемов деформации русла объясняются, с одной стороны, несовершенствами принятой схематизации русла и приема восстановления грунта за период ретроспективы, с другой – скудностью и не бесспорностью натурального материала, используемого при сопоставлениях.

В целом можно считать, что результаты ретроспективного расчета удовлетворительно описывают исследуемый процесс, а расчетная модель – адекватно воспроизводит основные проявления трансформации русла в нижнем бьефе гидроузла. Этот вывод послужил основанием для использования описанных приемов схематизации исходных данных и расчетного метода при выполнении прогностических расчетов трансформации русла р. Оби в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС до 2050 г.

### Литература

1. Барышников Н.Б. Морфология, гидрология и гидравлика пойм. – Л.: Гидрометеоздат, 1984.
2. Векслер А.Б., Доненберг В.М., Мануилов В.Л., Фрид Р.С. Метод расчета трансформации русла в нижних бьефах гидроузлов // Изв. ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1996, т. 230, ч. 1.
3. Векслер А.Б., Доненберг В.М. Переформирование русла в нижних бьефах крупных гидроэлектростанций. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
4. Векслер А.Б., Доненберг В.М., Мануилов В.Л., Коротков Н.Н. Некоторые аспекты расчета трансформации русла в нижних бьефах гидроузлов / Тезисы докладов VI Всероссийского гидрологического съезда. Секция 6. Проблемы русловых процессов, эрозии и наносов. – СПб.: Гидрометеоздат, 2004.
5. Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений. Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
6. Рекомендации по расчету трансформации русла в нижних бьефах гидроузлов. П95-51 / ВНИИГ. – Л., 1981.
7. Русловые процессы и водные пути на реках Обского бассейна / Под ред. Р.С. Чалова, Е.М. Плессевича, В.А. Баулы. – Новосибирск: Изд-во "РИПЭЛ плюс", 2001.