



DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2022.4.5>

УДК 519.63, 532.5
ББК 26.222

Дата поступления статьи: 24.10.2022
Дата принятия статьи: 23.11.2022



**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
САМОСОГЛАСОВАННОЙ ДИНАМИКИ
ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД,
ВЛЕКОМЫХ И ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ:
II. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ РУСЛА
И ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДОВ ВОДЫ
ПО РУКАВАМ р. ВОЛГИ
ПРИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ДОБЫЧЕ ПЕСКА¹**

Сергей Сергеевич Храпов

Кандидат физико-математических наук, доцент
кафедры информационных систем и компьютерного моделирования,
Волгоградский государственный университет
khrapov@volsu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2660-2491>
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Аннотация. Исследована динамика уровней воды, поперечных русловых деформаций и перераспределения расходов воды по рукавам р. Волга как при плановой промышленной добыче песка, так и при экстремальной трансформации рельефа дна в области карьере. Рассматривался реальный карьер нерудных строительных материалов, расположенный в устье Воложки Куропатки Волго-Ахтубинской поймы (ВАП) на участке 2549–2550 км р. Волга. Проведено математическое моделирование совместной динамики поверхностных вод, влекомых и взвешенных наносов, в которой учитываются нелинейная динамика жидкости и деформации дна. Для численного решения уравнений Сен-Венана и Экснера применялся CSPH-TVD метод, параллельный

CUDA-алгоритм которого адаптирован для высокопроизводительных вычислений на суперкомпьютерах с графическими сопроцессорами (GPUs). Показано, что условия разработки карьера как при плановой добыче, так и при экстремальной деформации дна не оказывают существенного влияния на структуру русловых течений вдоль судоходных путей.

Ключевые слова: русловые деформации, уровни и расходы воды, динамика поверхностных вод, влекомые и взвешенные наносы, CSPH-TVD метод, параллельные вычисления, CUDA-алгоритм, суперкомпьютеры с GPU.

Введение

Данная работа является продолжением исследования [3] по моделированию русловых процессов и оценке влияния промышленной добычи песка на безопасность судоходства в русле р. Волга, в котором рассматривался реальный карьер нерудных строительных материалов (НСМ) в окрестности о. Обливной (2549–2550 км участок р. Волга). В [3] была разработана математическая модель самосогласованной динамики поверхностных вод и наносов (влекомых и взвешенных), реализован эффективный инструмент (программный комплекс) для проведения параллельных вычислительных экспериментов на суперкомпьютерах с графическими сопроцессорами (GPUs), построена актуализированная цифровая модель рельефа дна р. Волга на участке от нижнего бьефа Волжской ГЭС до пгт. Светлый Яр и проведены расчеты русловых деформаций в период с 01.03.2022 по 30.09.2022 (весенний паводок – летняя и осенняя межень). Для оценки влияния процесса разработки карьера на основной («Нижний бьеф плотины Волжской ГЭС — ВДСК») и дополнительные («Волгоградский затон» и «Воложка Куропатка») судоходные пути в [3] были рассмотрены две модели: *A* — без учета разработки карьера; *B* — с учетом проектного плана добычи песка на карьере НСМ. Было показано, что плановая добыча песка на этом карьере оказывает минимальное воздействие на указанные выше судоходные пути — максимальные отклонения уровней дна и посадка (уменьшение) уровня воды лежат в пределах $\sim 1\text{--}5$ см, а относительная концентрация взвешенных наносов в окрестности о. Обливной не превышает $2.5 \cdot 10^{-6}$ (мутность $\epsilon < 4 \cdot 10^{-3}$ кг/м³).

Целью настоящего исследования является решение следующих дополнительных задач:

- 1) Моделирование динамики русловых процессов в модели с экстремальной локальной трансформацией рельефа дна на карьере — модель *C*, которая является наиболее неблагоприятным сценарием при оценке влияния карьера на деформацию русла, уровень и глубину воды вдоль судоходных путей р. Волга.
- 2) Исследование динамики уровней воды на гидropостах, поперечных деформаций русла и перераспределения расходов воды по рукавам р. Волга в различных моделях (*A*, *B* и *C*).

1. Математическое моделирование русловых процессов

Для описания русловых процессов в речных системах используется математическая модель самосогласованной динамики поверхностных вод и наносов (влекомые и

взвешенные) и разработанное на ее основе программное обеспечение. Приведем алгоритм расчета совместной динамики поверхностных вод, влекомых и взвешенных наносов, разработанный в [3]:

- 1) На основе численного решения уравнений Сен-Венана моделируется динамика поверхностных вод и определяется структура течения в русле р. Волга (определяются глубина H и скорость u потока воды).
- 2) На основе численного решения уравнения Экснера рассчитывается динамика транспорта влекомых наносов (донных отложений) и определяется деформация уровня дна b . Интенсивность русловых процессов (деформаций дна) определяется скоростью u и глубиной H потока воды, а также скоростью гравитационного оседания взвешенных наносов, которая приводит к притоку донного грунта из слоя воды со взвесью, обеспечивая самосогласованную связь между влекомыми и взвешенными наносами.
- 3) На основе численного решения уравнения переноса взвешенных наносов, включающего конвективный перенос потоком воды и процесс диффузии взвеси в слое жидкости, проводится расчет относительных концентраций взвешенных наносов в слое воды. Величина мутности потока воды определяется как произведение относительной концентрации α на плотность донного грунта ρ_g . При этом шлейф мутности, который формируется в окрестности источников взвеси (например, карьера и плотины ВГЭС), надо рассматривать только как концентрацию взвеси в слое воды, а влияние взвешенных наносов на деформацию дна учитывается за счет гравитационного оседания взвеси на дно реки.

Описанный выше алгоритм расчета совместной динамики поверхностных вод, влекомых и взвешенных наносов, а также параметры данной модели полностью соответствуют рекомендациям [1] по расчету и прогнозу трансформации русел рек в нижних бьефах речных гидроузлов.

Отметим, что при моделировании затопления пойменных территорий речных систем необходимо также учитывать процессы инфильтрации поверхностных вод в почву и высачивания грунтовых вод на поверхность (см., например, [2]).

Для получения полной картины о влиянии процесса разработки карьера НСМ в окрестности о. Обливной на безопасность судоходства в русле р. Волга необходимо дополнительно (наряду с решенными в [3] задачами):

- провести моделирование динамики русловых процессов с учетом полной выработки карьера НСМ в окрестности о. Обливной за период с 2022 по 2033 г. посредством трансформации дна русла перед началом моделирования — модель C ;
- построить карты распределения глубины воды и скорости течения в русле и зонах затопления суши для модели C в различные моменты времени;
- построить карты распределения рельефа дна в русле и зонах затопления суши для модели C в различные моменты времени;
- провести сравнительный анализ динамики уровней и расходов воды через поперечные срезы русла (створы) в моделях A , B и C ;
- оценить влияние процесса разработки карьера НСМ в окрестности о. Обливной на изменение уровней и расходов воды в русле р. Волга.

В соответствии с проектом разработки всего месторождения в 2022–2033 гг. общий объем извлекаемых НСМ составляет $V_{\Sigma} = 6\,730\,342 \text{ м}^3$, а площадь месторождения — $S_{\Sigma} = 472\,254 \text{ м}^2$. Поэтому в модели *C* начальный уровень рельефа дна в границах месторождения опускается на 14,25 м по сравнению с моделями *A* и *B*, что является наиболее неблагоприятным сценарием при оценке влияния, которое может потенциально оказывать процесс разработки карьера. Трансформированная цифровая модель рельефа для модели *C* показана на рисунке 1. Матрица высот имеет размер 1312×1728 ячеек с размером элемента 25 м, а моделируемый участок местности охватывает территорию размером $32,8 \times 43,2 \text{ км}$ ($x_{\min} = y_{\min} = 0 \text{ м}$, $x_{\max} = 32800 \text{ м}$, $y_{\max} = 43200 \text{ м}$).

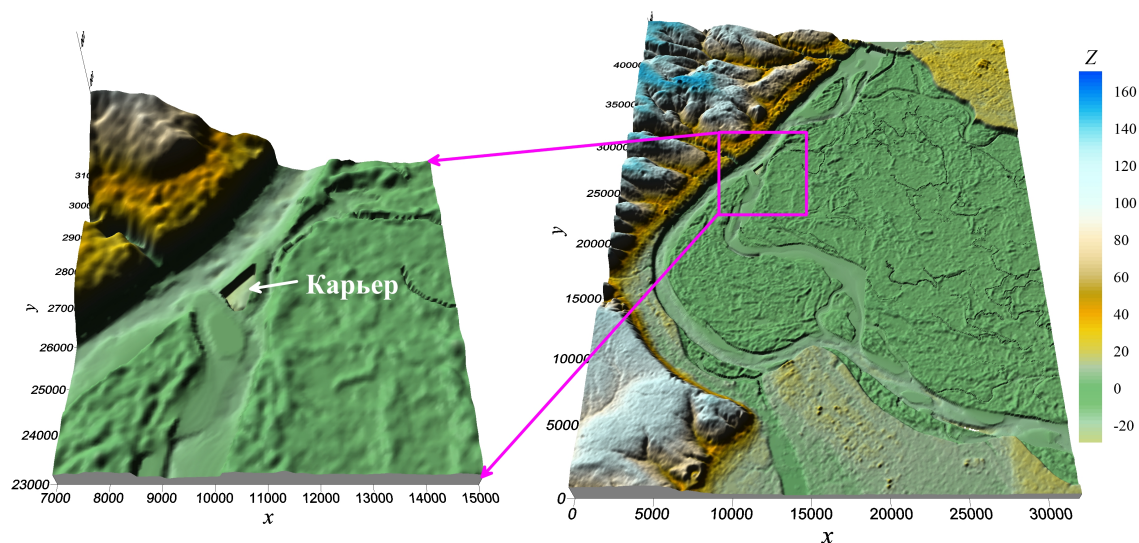


Рис. 1. Исходная цифровая 3D-модель рельефа (матрица высот) моделируемого участка местности

2. Результаты численного моделирования динамики русловых течений

При представлении результатов численного моделирования будем использовать следующую единую систему измерения физических величин: длина (x, y, L), высота (z), уровни дна (b) и воды (η), глубина (H) — м; скорость течения \mathbf{u} — м/с; время (t) — дни (сутки); объемный расход воды (Q) — $\text{м}^3/\text{с}$. Результаты моделирования представлены для нескольких моментов времени, соответствующих различным гидрологическим режимам работы Волжского гидроузла: пик весеннего паводка — 30.04.22 ($t = 61$), $Q = 24660 \text{ м}^3/\text{с}$; начало летней межени — 30.06.22 ($t = 122$), $Q = 9290 \text{ м}^3/\text{с}$; осенняя межень — 30.09.22 ($t = 214$), $Q = 5510 \text{ м}^3/\text{с}$.

Ранее в работе [3] было проведено две серии вычислительных экспериментов по моделированию гидродинамических течений и деформации дна русла р. Волга в рамках двух моделей: без учета разработки карьера — модель *A*; с учетом плановой добычи песка на карьере в 2022 г. — модель *B*. Было показано, что учет разработки карьера в модели *B* не оказывает существенного влияния на динамику поверхностных вод.

В настоящем исследовании проведено численное моделирование русловых процессов с учетом разработки всего месторождения с 2022 по 2033 г. — модель *C*. Структура

течения в модели C показана на рисунках 2–3, в окрестности о. Обливной заметны значительные изменения в структуре течения как по распределению глубины воды (H), так и по полю скоростей (\mathbf{u}). Это обусловлено наличием сильных начальных возмущений, связанных со значительным углублением дна в границах карьера (месторождения НСМ). Видно, что за счет такого углубления русла происходит смещение части потока воды в сторону Воложки Куропатки.

На рисунке 4 в окрестности разработки карьера представлена детализация структуры рельефа дна русла р. Волга в период осенней межени (30.09.22) для модели C , на фоне которой точками показаны пути судоходства: красные — основной «Нижний бьеф Волжской ГЭС – ВДСК»; желтые — «Волгоградский затон»; зеленые — «Воложка Куропатка». Хорошо заметна сильная деформация дна в границах месторождения НСМ, связанная с начальной трансформацией дна карьера, а также видны эффекты деформации дна на отмелях в окрестности островов и на мелководных участках русла р. Волга.

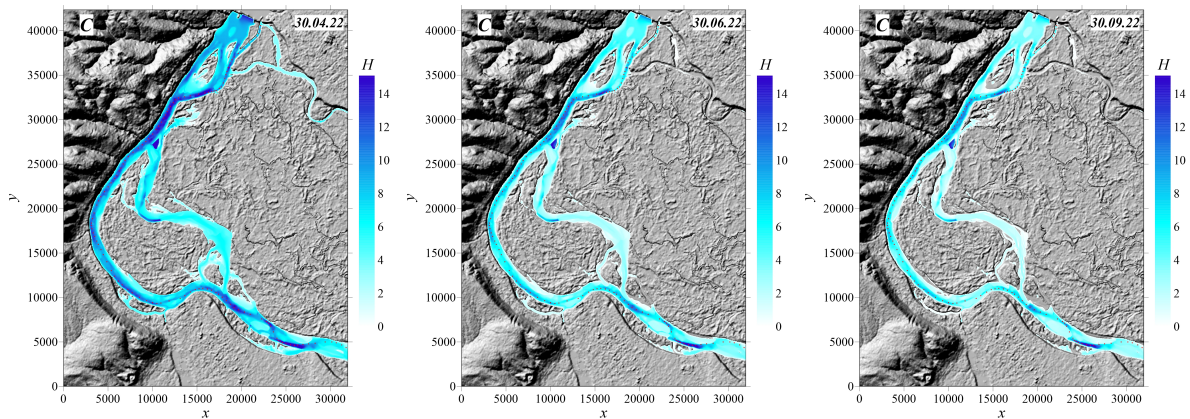


Рис. 2. Распределение глубины воды в русле р. Волга на фоне рельефа местности (градиентное светотеневое представление) в различные моменты времени.

Красными точками отмечен основной судовый ход

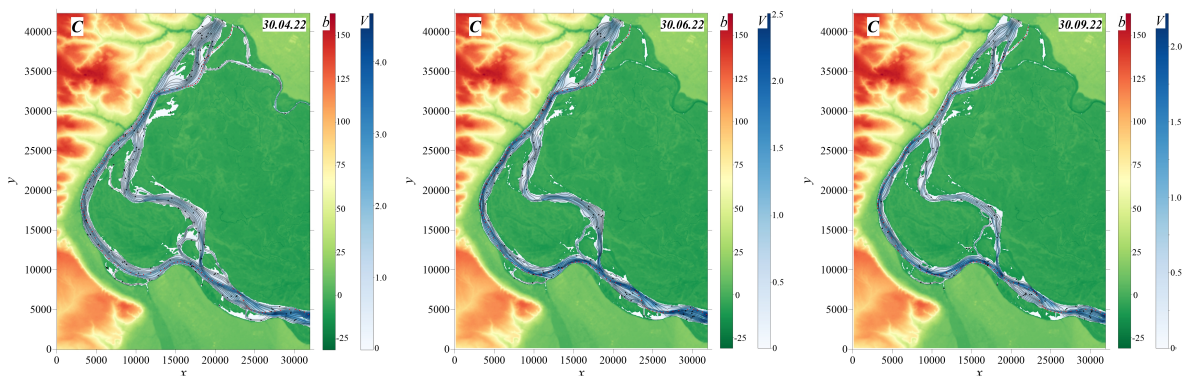


Рис. 3. Распределение скорости течения (линии тока и амплитуда модуля скорости) воды в русле р. Волга на фоне рельефа местности в различные моменты времени.

Красными точками отмечен основной судовый ход

3. Динамика уровней и расходов воды

Рассмотрим вопрос о влиянии процесса разработки карьера на динамику уровней и расходов воды в нескольких контрольных точках и створах (поперечных сечениях) русла р. Волга. В качестве контрольных точек выберем окрестности следующих объектов: 1) нижний бьеф ВГЭС; 2) речпорт Волгоград — о. Обливной; 3) вход в ВДСК; 4) пгт. Светлый Яр.

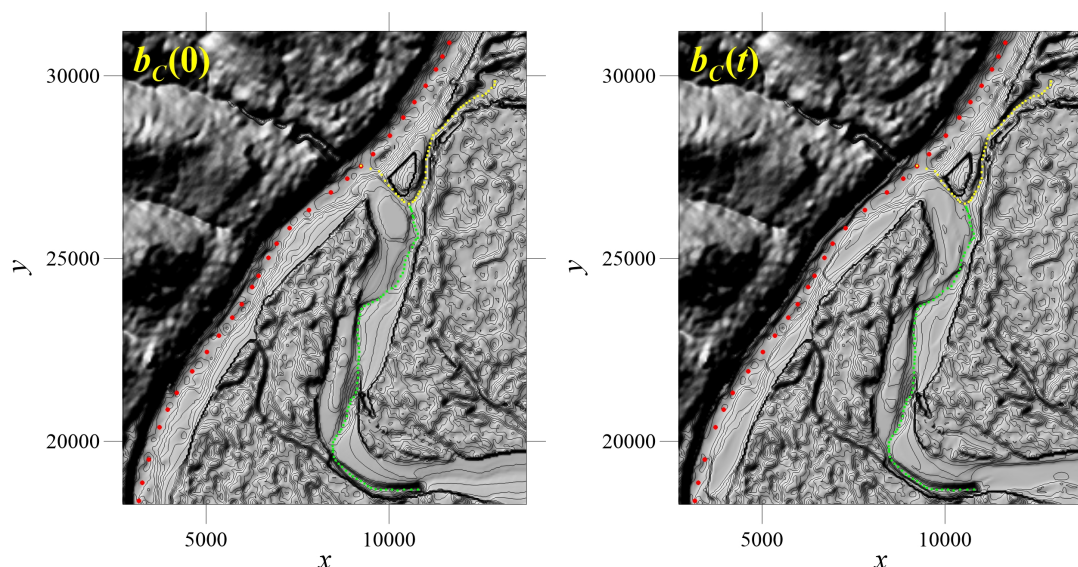


Рис. 4. Детализация структуры рельефа дна в окрестности о. Обливной в начальный момент времени (слева) и при $t = 214$ (справа) для модели C . Точками показаны линии судоходства: красные — основной; желтые — «Волгоградский затон»; зеленые — «Воложка Куропатка»

Для расчета расходов воды в русле р. Волга выберем следующие створы:

- 1) сечение основного русла вдоль координаты x от правого ($x = 11400, y = 31550$) до левого ($x = 13100, y = 31550$) берега, расположенное ниже по течению от о. Денежный и пересекающее основной судоходный путь (Створ 1);
- 2) сечение основного русла вдоль координаты x от правого ($x = 8000, y = 27200$) до левого ($x = 11400, y = 27200$) берега, пересекающее карьер и судоходные пути — основной и дополнительный «Волгоградский затон» (Створ 2);
- 3) сечение основного русла вдоль координаты x от правого ($x = 2550, y = 18300$) до левого ($x = 4550, y = 18300$) берега (о. Сарпинский), пересекающее основной судоходный путь (Створ 3);
- 4) сечение основного русла вдоль координаты y от правого ($x = 27900, y = 3900$) до левого ($x = 27900, y = 5900$) берега, пересекающее основной судоходный путь в окрестности пгт. Светлый Яр (Створ 4);
- 5) сечение русла «Воложки Куропатки» вдоль координаты y от правого ($x = 10000, y = 18200$) до левого ($x = 10000, y = 21400$) берега, пересекающее дополнительный судоходный путь от о. Сарпинский до ВАП (Створ 5).

Изменения уровня воды $\Delta\eta_C = \eta_C - \eta_A$ в русле р. Волга в период межени ($t = 122$ и $t = 214$) показаны на рисунке 5. Видно, что в момент времени $t = 122$ происходит в

основном незначительное уменьшение (посадка) на 1–5 см уровня воды в модели *C* по сравнению с моделью *A*, и только на некоторых локальных участках, в том числе и в окрестности карьера, происходит такое же незначительное увеличение уровня воды на 1–5 см. А к моменту времени $t = 214$ наблюдается обратный эффект незначительного увеличения на 1–5 см уровня воды как в дополнительном русле «Воложка Куропатка», так и в небольшой части основного русла. Это может быть связано с изменением структуры течения в окрестности карьера из-за сильной начальной деформации русла в модели *C*, что приводит к увеличению расхода воды через вход в «Воложку Куропатку» и создает дополнительный подпор потоку воды в основном русле, когда происходит слияние этих потоков. Общая посадка уровня воды на судоходных путях (основном и дополнительном), в окрестности нижнего бьефа ВГЭС и у входа в ВДСК не превышает 1 см, а в окрестности пгт. Светлый Яр < 5 см.

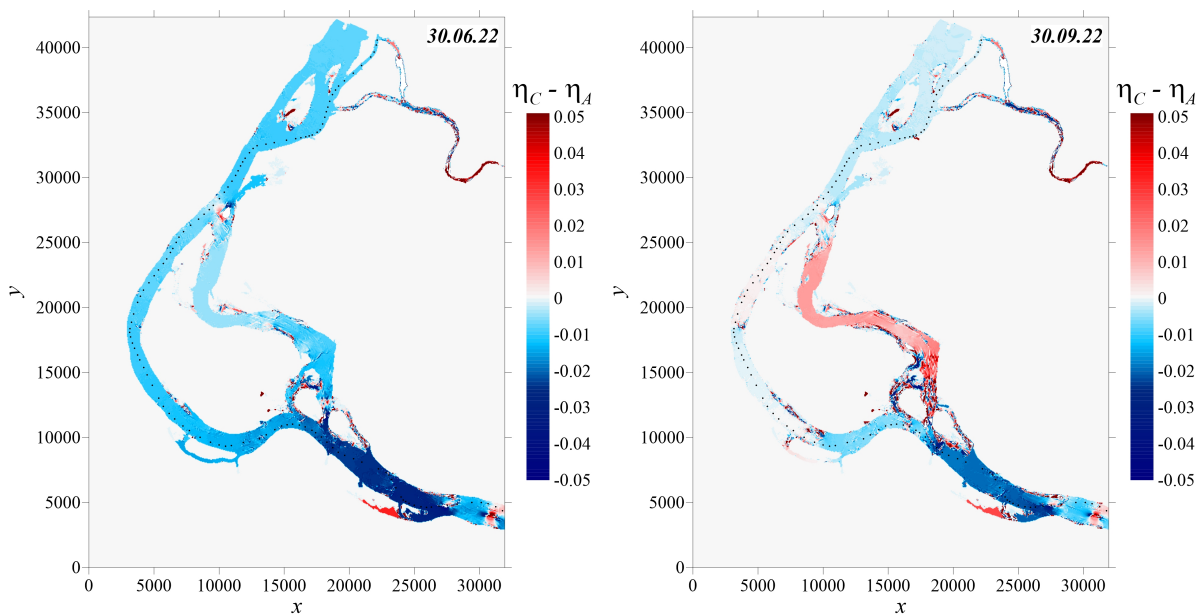


Рис. 5. Распределение разности уровней воды $\Delta\eta_C = \eta_C - \eta_A$ в различные моменты времени. Красными точками отмечен основной судоходный ход

На рисунке 6 показана зависимость от времени уровней воды η в контрольных точках для моделей *A*, *B* и *C*, а также их изменение, связанное с разработкой карьера. Хорошо видно, что с учетом разработки месторождения происходит незначительное изменение уровней воды: для модели *B* отрицательные отклонения (посадка) в окрестности ВГЭС и карьера не превышают 1 см, около ВДСК < 2 см, а в окрестности пгт. Светлый Яр < 5 см; для модели *C* отрицательные отклонения (посадка) в окрестности ВГЭС и карьера не превышают 2 см, около ВДСК < 3 см, а в окрестности пгт. Светлый Яр < 7 см.

Рассчитанные в контрольных точках уровни воды η хорошо коррелируют с наблюдаемыми на гидропостах и в период межени лежат в следующих пределах: от -10,5 до -11 м в окрестности нижнего бьефа ВГЭС; от -11 до -11,5 м в окрестности карьера и речпорта; от -12 до -12,5 м в окрестности ВДСК; от -13 до -13,5 м в окрестности пгт. Светлый Яр.

Структура рельефа дна и динамика расхода воды на контрольных створах для

моделей A , B и C представлена на рисунках 7–8 и 9–10. Хорошо видно, что с учетом разработки карьера происходит незначительное изменение как структуры русла, так и расходов воды на контрольных створах:

Створ 1 — во всех трех моделях структура русла практически не меняется, а изменение расхода воды на пике паводка составляет $\sim 10 \text{ м}^3/\text{с}$, а в период межени $< 1 \text{ м}^3/\text{с}$.

Створ 2 — хорошо заметны изменения структуры русла в области карьера, связанные с его разработкой, за пределами месторождения происходит деформация русла, но практически одинаково во всех трех моделях, при этом изменение расхода воды для модели B составляет в среднем $10 \text{ м}^3/\text{с}$, а в модели C происходит увеличение расхода воды до $35 \text{ м}^3/\text{с}$ на пике паводка и до $10 \text{ м}^3/\text{с}$ в период межени.

Створ 3 — происходит незначительная деформация русла, но практически одинаково во всех трех моделях, расход воды в модели B увеличивается приблизительно на $5\text{--}10 \text{ м}^3/\text{с}$ в меженный период, а в модели C , наоборот, уменьшается на $5\text{--}10 \text{ м}^3/\text{с}$.

Створ 4 — хорошо заметна деформация на левобережной части русла, причем в модели A глубоководная часть русла уменьшается сильнее, а разность расходов воды в моделях B и C не превышает в среднем $5\text{--}10 \text{ м}^3/\text{с}$.

Створ 5 — в основном происходит деформация левобережной части русла Воложки Куропатки (на отмелях), но практически одинаково во всех трех моделях, расход воды в модели B уменьшается в среднем на $10 \text{ м}^3/\text{с}$ в меженный период, а в модели C до паводка (весенняя межень) увеличивается приблизительно на $10 \text{ м}^3/\text{с}$, затем после паводка уменьшается и в период осенней межени опять увеличивается.

Немонотонное поведение величины $\Delta Q_C = Q_C - Q_A$ в модели C обусловлено сильной начальной деформацией русла в окрестности карьера. Вначале в период весенней межени ($0 < t < 40$) происходит перестройка течения и часть потока воды из основного русла р. Волга перенаправляется в рукав Воложки Куропатки, что приводит к увеличению расхода воды через *Створ 5* и уменьшению — через *Створ 3*. Затем в период весеннего паводка ($50 < t < 90$) за счет избыточного потока воды в рукаве Воложки Куропатки создается дополнительный подпор за о. Сарпинский в области соединения с основным руслом и происходит обратный эффект, то есть увеличивается расход воды на *Створе 3* и уменьшается — на *Створе 5*. Далее этот квазипериодический процесс осцилляций разности расходов ΔQ_C продолжается и во время межени (летней и начала осенней), но с меньшей амплитудой и периодом ~ 60 дней.

Отметим, что рассчитанные в контрольных створах расходы воды Q хорошо коррелируют с гидрографом плотины ВГЭС (см. рис. 3 в [3]).

Заключение

Сформулируем основные результаты работы:

- 1) Проведено численное имитационное моделирование динамики русловых процессов в р. Волга с учетом полной выработки карьера НСМ в окрестности о. Обливной за период с 2022 по 2033 г. посредством трансформации дна русла перед началом моделирования — модель C .

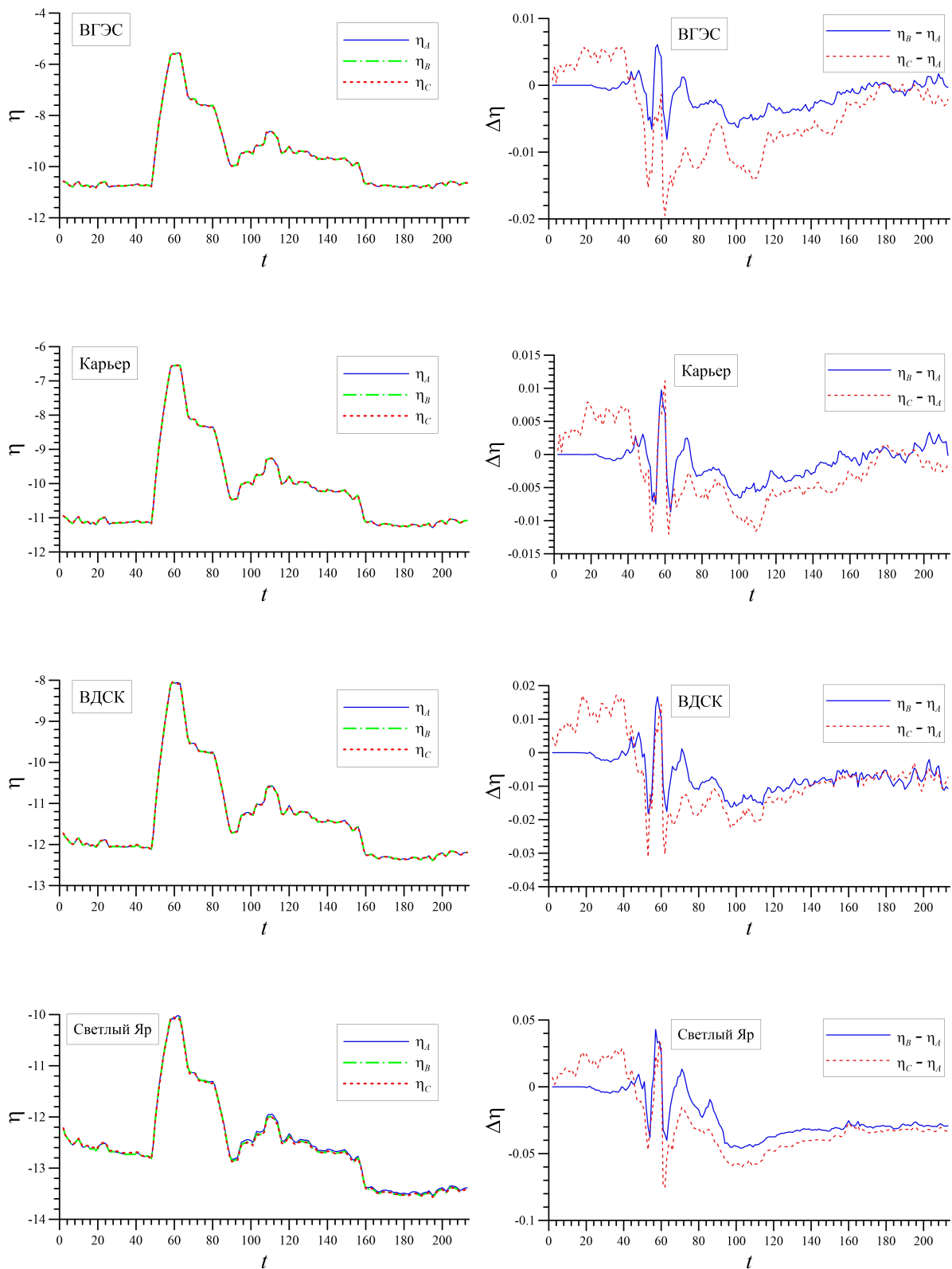


Рис. 6. Динамика уровней воды (слева) и их разностей (справа) в окрестности различных контрольных точек в русле р. Волга (ВГЭС, Карьер, ВДСК и Светлый Яр) для трех моделей (A, B и C)

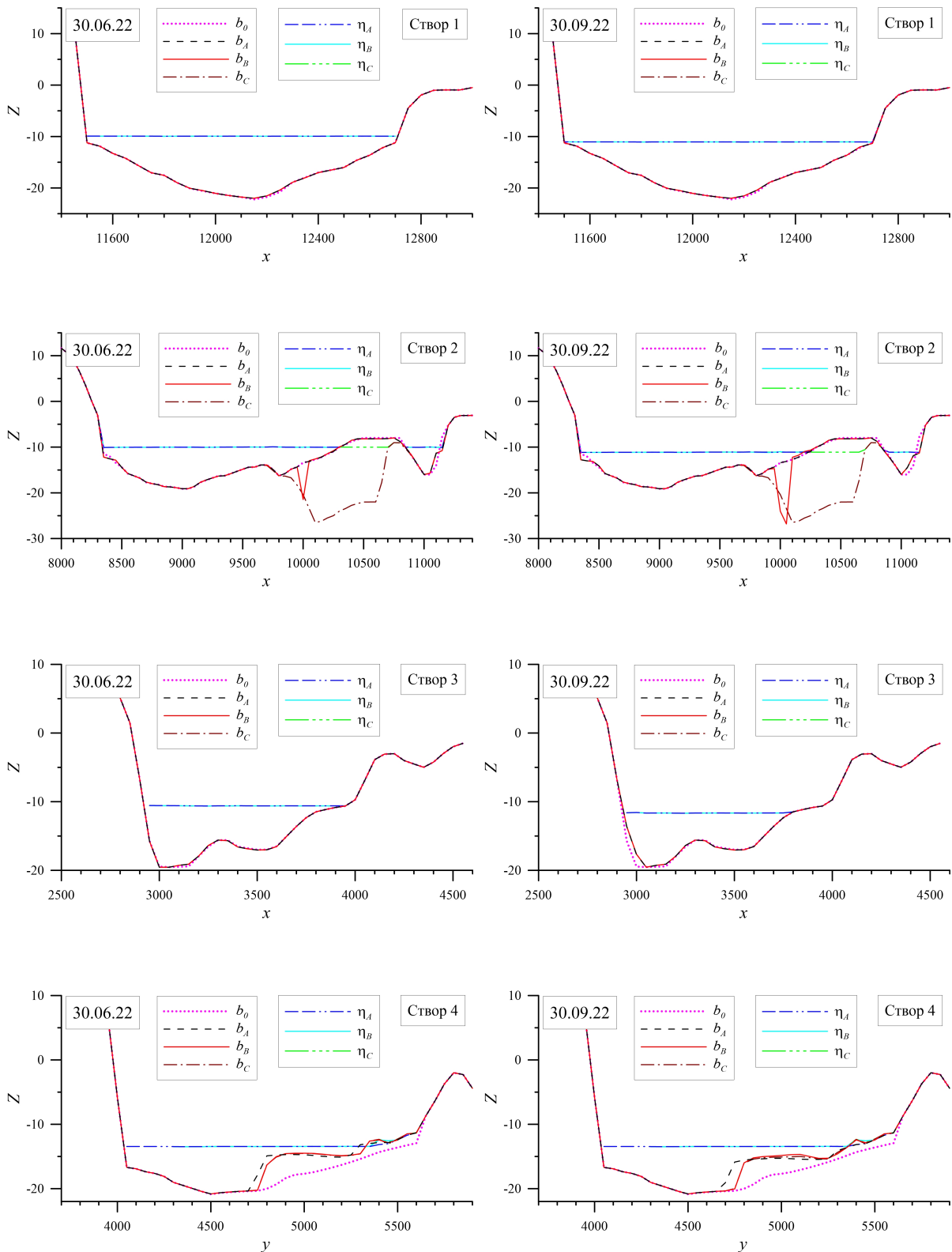


Рис. 7. Распределения уровней воды (η_A, η_B, η_C) и рельефа дна (b_A, b_B, b_C) вдоль различных поперечных сечений основного русла р. Волга (Створы 1–4) в моменты времени $t = 122$ (слева) и $t = 214$ (справа). Начальный ($t = 0$) уровень рельефа дна (b_0) показан точечной линией

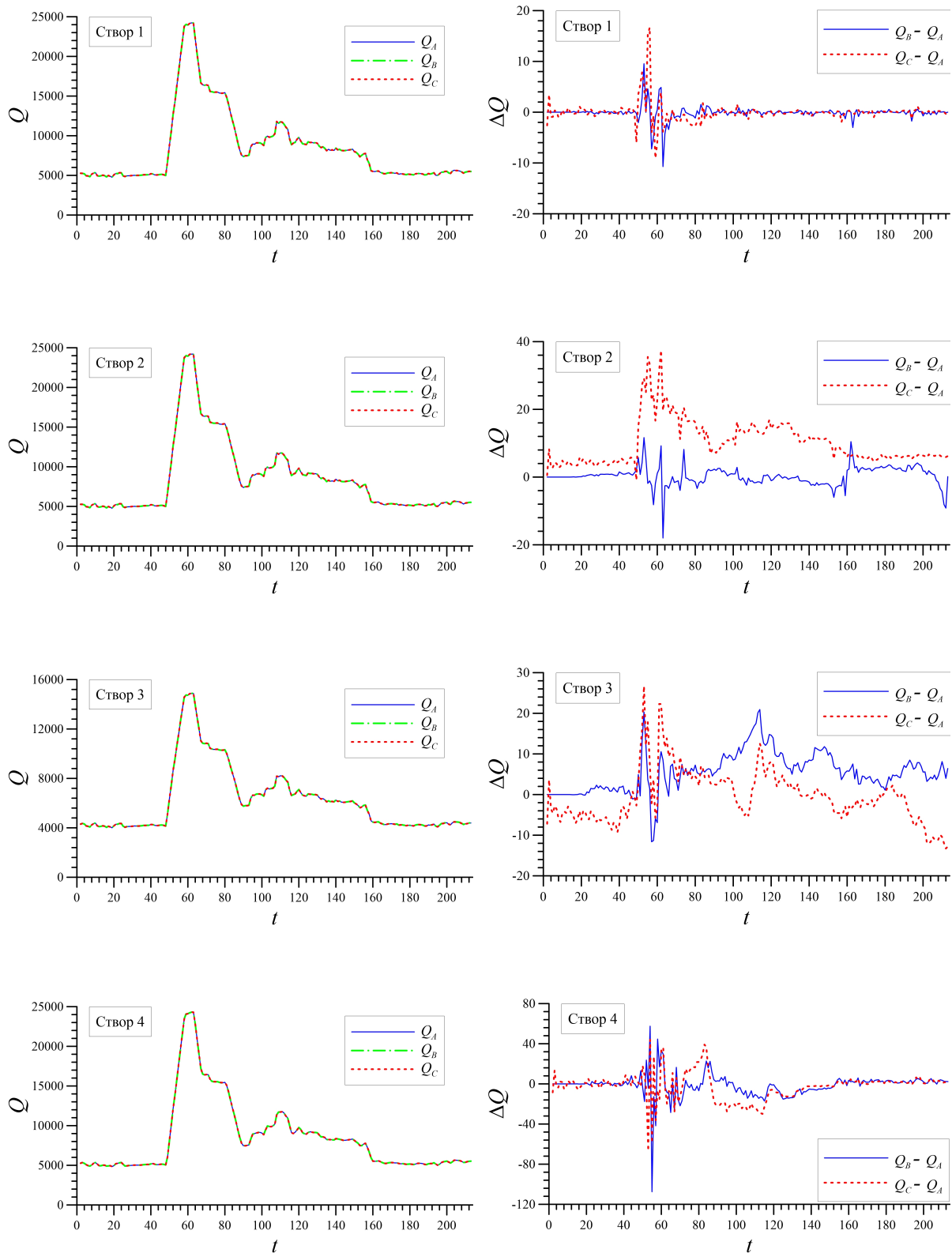


Рис. 8. Динамика расходов воды (слева) и их разностей (справа) на различных поперечных сечениях основного русла р. Волга (Створы 1–4) для трех моделей (A, B и C)

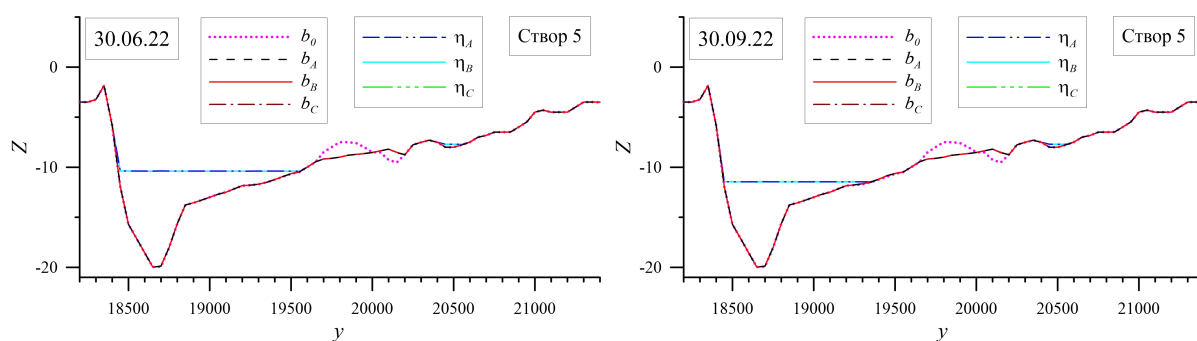


Рис. 9. Распределение уровней воды (η_A, η_B, η_C) и рельефа дна (b_A, b_B, b_C) вдоль поперечного сечения русла р. Волга (Створ 5) в моменты времени $t = 122$ (слева) и $t = 214$ (справа). Начальный ($t = 0$) уровень рельефа дна (b_0) показан точечной линией

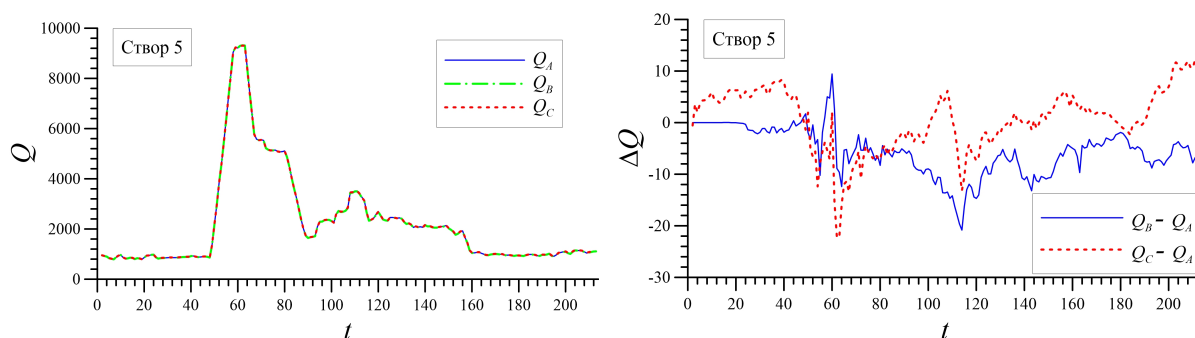


Рис. 10. Динамика расходов воды (слева) и их разностей (справа) на поперечном сечении русла р. Волга (Створ 5) для моделей A, B и C

- 2) Построены карты распределения глубины воды, скорости течения и рельефа дна в русле р. Волга для модели C в различные моменты времени.
- 3) Построены поперечные сечения русла р. Волга, а также зависимости уровней и расходов воды от времени для трех моделей (A, B и C).
- 4) В модели C обнаружен квазипериодический характер изменения уровней и расходов воды как в основном русле р. Волга, так и в рукаве Воложки Куропатки. Величина $\Delta\eta_C = \eta_C - \eta_A$ изменяется в пределах ± 5 см, разность расходов воды $\Delta Q_C \approx \pm 10$ м³/с, а период колебаний составляет ≈ 60 дней.

Полученные результаты математического моделирования показывают, что разработка карьера как в плановом режиме эксплуатации (модель B), так и при экстремальной деформации дна карьера (модель C) не оказывает значимого влияния на структуру русловых течений вдоль судоходных путей «Нижний бьеф Волжской ГЭС – ВДСК», «Волгоградский затон» и «Воложка Куропатка». Поперечные деформации дна, уровни воды на гидростаях и расходы воды на контрольных створах изменяются в пределах, не превышающих нормы безопасной эксплуатации основного и дополнительных судоходных путей на р. Волга.

Окончание статьи².

ПРИМЕЧАНИЯ

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (госзадание N 0633-2020-0003).

² Начало см. [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Векслер, А. Б. Рекомендации по прогнозу трансформации русла в нижних бьефах гидроузлов — СО 34.21.204-2005 / А. Б. Векслер, В. М. Доненберг. — СПб : ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2006. — 102 с.

2. Храпов, С. С. Численное моделирование самосогласованной динамики поверхностных и грунтовых вод / С. С. Храпов // Математическая физика и компьютерное моделирование. — 2021. — Т. 24, № 3. — С. 45–62. — DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2021.3.5>

3. Численное моделирование самосогласованной динамики поверхностных вод, влекомых и взвешенных наносов: I. Влияние промышленной добычи песка на безопасность судоходства в русле р. Волга / С. С. Храпов, Е. О. Агафонникова, А. Ю. Кликунова, В. П. Радченко, Е. В. Баскаков, Е. С. Савин, И. С. Маковеев, Н. С. Храпов // Математическая физика и компьютерное моделирование. — 2022. — Т. 25, № 3. — С. 31–57. — DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2022.3.3>

REFERENCES

1. Veksler A.B., Donenberg V.M. *Rekomendatsii po prognozu transformatsii rusla v nizhnikh biefakh gidrouzlov — SO 34.21.204-2005* [Recommendations for the Forecast of Channel Transformation in the Downstream of Hydroelectric Facilities — SO 31.21.204-2005]. Saint Petersburg, ОАО “VNIIG im. B.E. Vedeneeva”, 2006. 102 p.

2. Khrapov S.S. Chislennoe modelirovanie samosoglasovannoy dinamiki poverkhnostnykh i gruntovykh vod [Numerical Modeling of Self-Consistent Dynamics of Surface and Ground Waters]. *Matematicheskaya fizika i kompyuternoe modelirovanie* [Mathematical Physics and Computer Simulation], 2021, vol. 24, no. 3, pp. 45-62. DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2021.3.5>

3. Khrapov S.S., Agafonnikova E.O., Klikunova A.Yu., Radchenko V.P., Baskakov E.V., Savin E.S., Makoveev I.S., Khrapov N.S. Chislennoe modelirovanie samosoglasovannoy dinamiki poverkhnostnykh vod, vlekomykh i vzveshennykh nanosov: I. Vliyanie promyshlennoy dobychi peska na bezopasnost sudokhodstva v rusle r. Volga [Numerical Modeling of Self-Consistent Dynamics of Shallow Waters, Traction and Suspended Sediments: I. Influence of Commercial Sand Mining on the Safety of Navigation in the Channel of the Volga River]. *Matematicheskaya fizika i kompyuternoe modelirovanie* [Mathematical Physics and Computer Simulation], 2022, vol. 25, no. 3, pp. 31-57. DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2022.3.3>

**NUMERICAL MODELING OF SELF-CONSISTENT DYNAMICS
OF SHALLOW WATERS, TRACTION AND SUSPENDED SEDIMENTS:
II. STUDY OF THE TRANSVERSE DEFORMATIONS
OF THE CHANNEL AND THE REDISTRIBUTION OF WATER
DISCHARGES ALONG THE BRANCHES OF THE VOLGA RIVER
DURING INDUSTRIAL SAND MINING**

Sergey S. Khrapov

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Department of Information Systems and Computing Modeling,
Volgograd State University
khrapov@volsu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2660-2491>
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Abstract. The dynamics of water levels, transverse channel deformations, and redistribution of water discharges along the branches of the Volga River, both during planned industrial sand mining and during extreme transformation of the bottom topography in the area of the quarry, have been studied. A real quarry of non-metallic building materials was considered, located at the mouth of the Volozhka Partridge of the Volga — Akhtuba floodplain (VAF) in the section 2549–2550 km of the Volga River. Mathematical modeling of the joint dynamics of shallow waters, traction and suspended sediments is carried out, which takes into account the nonlinear dynamics of the liquid and bottom deformations. For the numerical solution of the Saint-Venant and Exner equations, the CSPH-TVD method was used, the parallel CUDA algorithm of which is adapted for high-performance computing on supercomputers with graphics coprocessors (GPUs). It is shown that the conditions of quarry development, both during planned mining and under extreme bottom deformation, do not significantly affect the structure of channel flows along shipping routes.

Key words: channel deformations, water levels and discharges, surface water dynamics, entrained and suspended sediments, CSPH-TVD method, parallel computing, CUDA-algorithm, GPU supercomputers.