

Оценки интегральных изменений рельефа дна для участка Нижней Волги на основе гидродинамического моделирования

А.Ю. Кликунова, О.В. Коноваленко

Волгоградский государственный университет, Волгоград

Аннотация: В работе рассматривается влияние крупности частиц на динамику взвешенных наносов в речном русле. Используется вычислительный комплекс EcoGIS-Simulation для моделирования совместной динамики поверхностных вод и наносов в модели реки Волга ниже плотины Волжской ГЭС. Важнейшим фактором изменчивости русла являются весенние попуски воды из Волгоградского водохранилища, когда расход воды увеличивается в пять раз. Вычислены некоторые интегральные и локальные характеристики речного русла в зависимости от коэффициента крупности частиц.

Ключевые слова: взвешенные наносы, размер частиц грунта, динамика наносов, диффузия, донные отложения, морфология русла, рельеф, скорость гравитационного оседания частиц, программно-аппаратный комплекс EcoGIS-Simulation, формула Векслера, расход воды.

Введение

Динамика наносов в речных системах оказывает значительное влияние на изменение морфологии рек и прибрежных территорий [1, 2]. Особенно сильным является увеличение переноса взвешенных наносов с увеличением попуска воды во время сезонных паводков [3, 4], когда гидрограф увеличивается в 4–5 раз по сравнению с меженными значениями (рис. 1). Для моделирования динамики наносов используется формула Векслера, которая включает в себя несколько свободных параметров [5]. Одним из таких параметров является коэффициент крупности частиц d_{50} , который характеризует средний размер частиц наносов и может различаться в разных водоемах [5, 6].

Целью данной работы является определение влияния параметра d_{50} на динамику изменения рельефа дна реки на примере течения реки Волга ниже плотины Волжской ГЭС. Выполнено сравнение модельных рельефов дна реки для различных значений d_{50} . Проведено исследование зависимости

интегрального изменения дна крупной реки от величины крупности частиц наносов.

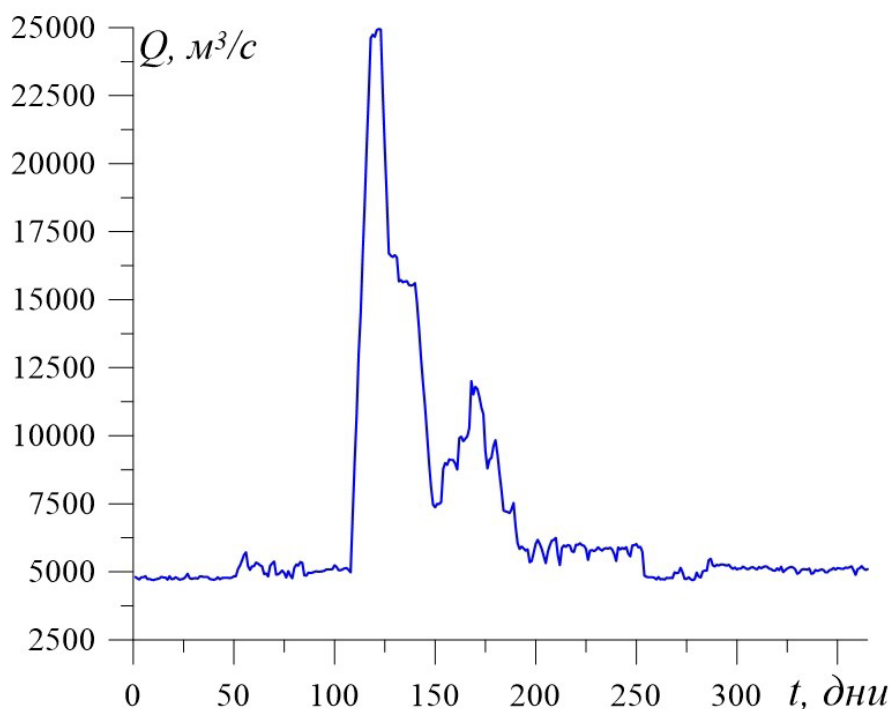


Рис. 1. – График попуска воды для Волжской ГЭС в 2022 году

Моделирование совместной динамики воды и наносов

Вычислительные эксперименты проводились с использованием программно-аппаратного комплекса EcoGIS-Simulation [7, 8], вычислительное ядро которого использует трехкомпонентную математическую модель следующего вида [7, 9, 10]:

$$\frac{\partial \mathbf{D}_1}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{D}_2}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{D}_3}{\partial y} = \mathbf{D}_4, \quad \mathbf{D} = (\mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2, \mathbf{D}_3, \mathbf{D}_4) =$$

$$= \begin{pmatrix} H & Hu & Hv & \sigma_w \\ Hu & Hu^2 & Huv & gH \frac{\partial}{\partial x} \eta + Hf_x \\ Hv & Huv & Hv^2 & gH \frac{\partial}{\partial y} \eta + Hf_y \\ (1-\psi)b & J_{bx} - c_J |\mathbf{J}_b| \frac{\partial}{\partial x} b & J_{by} - c_J |\mathbf{J}_b| \frac{\partial}{\partial y} b & q_b - q_{ba} \end{pmatrix},$$

где также используются уравнение Экснера, формулы Грасса и Векслера для динамики наносов, $\mathbf{u} = (u, v)$ – скорость жидкости, H – глубина, η – уровень

воды, b – функция дна, σ_w – плотность источников/стоков, $\mathbf{f} = (f_x, f_y)$ – удельная сила, $\mathbf{J}_b$ – плотность потока наносов, q_b источник наносов, q_{ba} описывает эффект эрозии дна, C_j – эмпирическая постоянная [11, 12], зависящая от типа и состояния грунта.

Для расчета скорости гравитационного оседания q_{ba} можно использовать формулу [3, 13]:

$$q_{ba} = \phi_\alpha w^{(ss)} \alpha^{(ss)}, \quad (2)$$

которая зависит от гидравлической крупности частиц наносов $w^{(ss)}$ и коэффициента связи между придонной и средней концентрациями наносов ϕ_α . Вычисление величины $w^{(ss)}$ можно выполнить по формуле Векслера [5, 13]:

$$w^{(ss)} = \frac{(s-1)g d_{50}^2}{\nu_0 \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2}{45} Re_d^2}\right)} \left(1 - \frac{3}{4} \frac{1 + 1.75 \cdot 10^{-12} Re_d^5}{\left(1 + \frac{24}{Re_d}\right)^2 - \frac{44}{Re_d} + 1.75 \cdot 10^{-12} Re_d^5}\right)^{-1/2}, \quad (3)$$

где ν_0 – коэффициент кинематической вязкости воды, $Re_d = \frac{d_{50}}{\nu_0} \sqrt{(s-1)g d_{50}}$.

Рис. 2 демонстрирует пространственное распределение функции b для дна реки Волга через 150 дней моделирования с использованием описанного метода для гидрографа 2022 года.

Для оценки деформации водных объектов необходимо учитывать динамику донных отложений. Важнейшим фактором, влияющим на динамику взвешенных наносов, является гранулометрический состав грунта, который может быть интегрально охарактеризован средним размером частиц d_{50} [м]. Для анализа влияния d_{50} на изменение рельефа дна реки были проведены численные эксперименты моделирования динамики поверхностных вод для нижнего течения реки Волга от Волжской ГЭС до

пгт. Светлый Яр. Мы используем реальный гидрограф 2022 года и варьируем параметр размера частиц от $9 \cdot 10^{-5}$ м до 10^{-2} м.

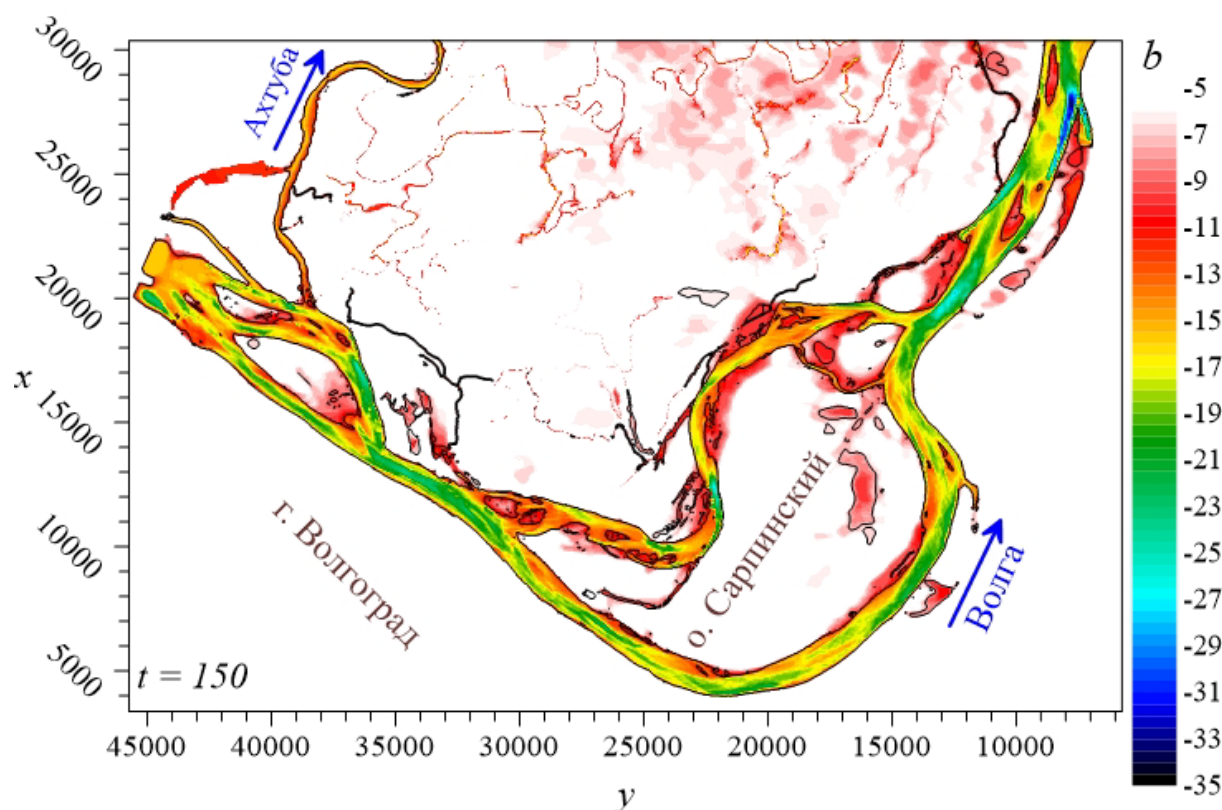


Рис. 2. – Пространственное распределение высоты дна на момент $t = 150$

при $d_{50} = 10^{-3}$ м

Рис. 3 демонстрирует разницу между цифровыми моделями рельефа дна рек Волга и Ахтуба через 150 дней моделирования при использовании $d_{50} = 10^{-2}$ и $d_{50} = 10^{-4}$. Значительные локальные расхождения до 10 м видны на участках реки, на которых русло наиболее извилисто или имеется сложная структура с островами и рукавами. Из-за изменения скорости и направления потока на таких участках могут образовываться ямы из-за слишком быстрого сноса грунта или значительные повышения рельефа дна из-за намыва мелких частиц породы на берега.

Характерным значением крупности частиц для рассматриваемого участка по данным измерений является $d_{50} = 0.00029$ м.

Для различных значений крупности частиц было рассчитано интегральное изменение рельефа дна реки Волга Δb_z в течение одного года (рис. 4). Значение $d_{50} = 0.01$ является достаточно большим и не приводит к значительным изменениям рельефа дна. Частицы такого размера практически не подвержены перемещению. Красная линия на рис. 4 демонстрирует незначительное изменение рельефа в начале моделирования, однако исследуемая величина очень быстро достигает стационарного значения и уже не изменяется в процессе моделирования. Заведомо мелкие размеры частиц, напротив, в большей степени влияют на изменение рельефа дна реки (синяя линия на рис. 4). Они легко перемещаются с поверхностными водами, образуя новую морфологию реки.

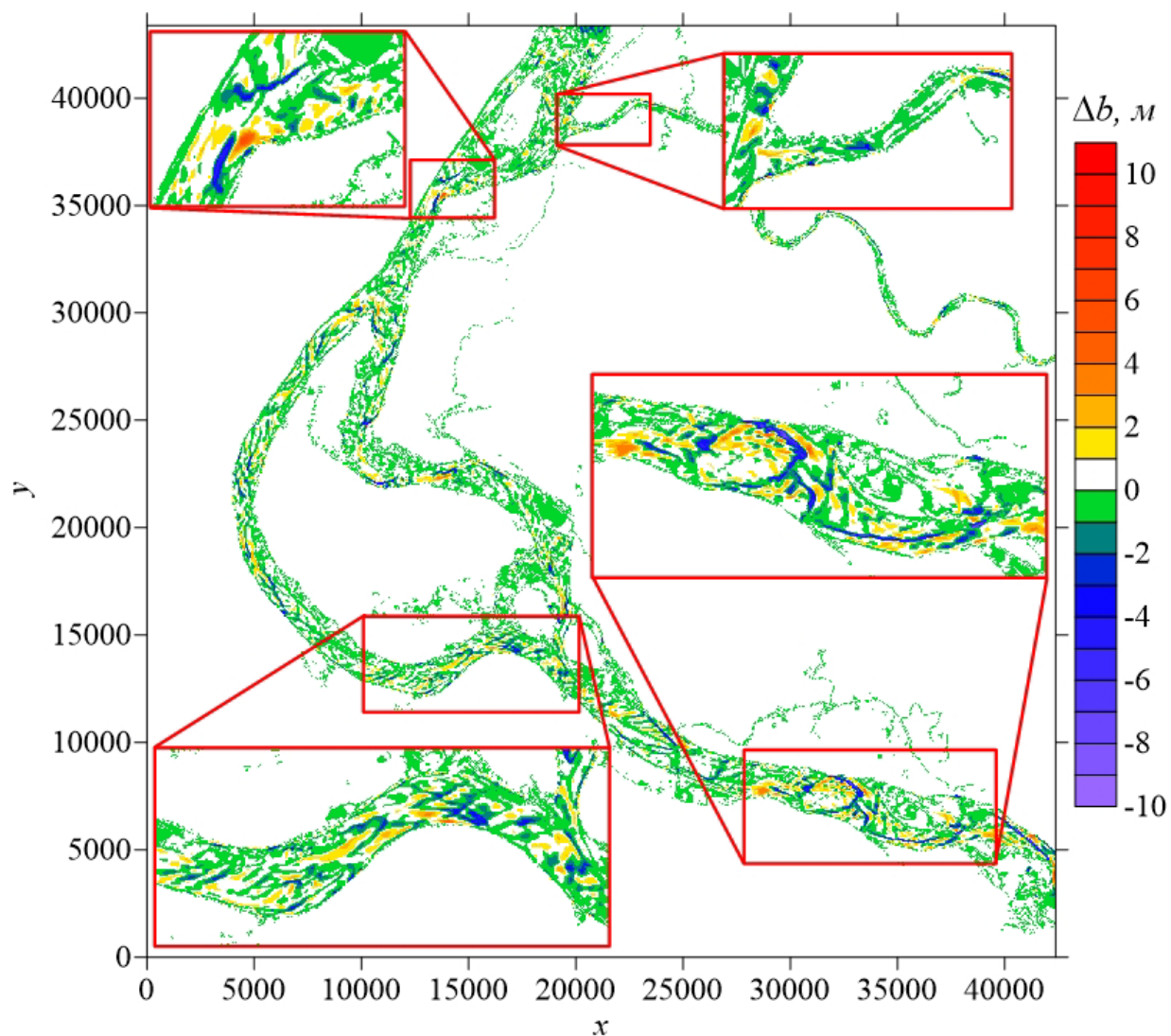


Рис. 3. – Распределение разницы батиметрических изменений для двух моделей при $d_{50} = 10^{-2}$ м и $d_{50} = 10^{-4}$ м.

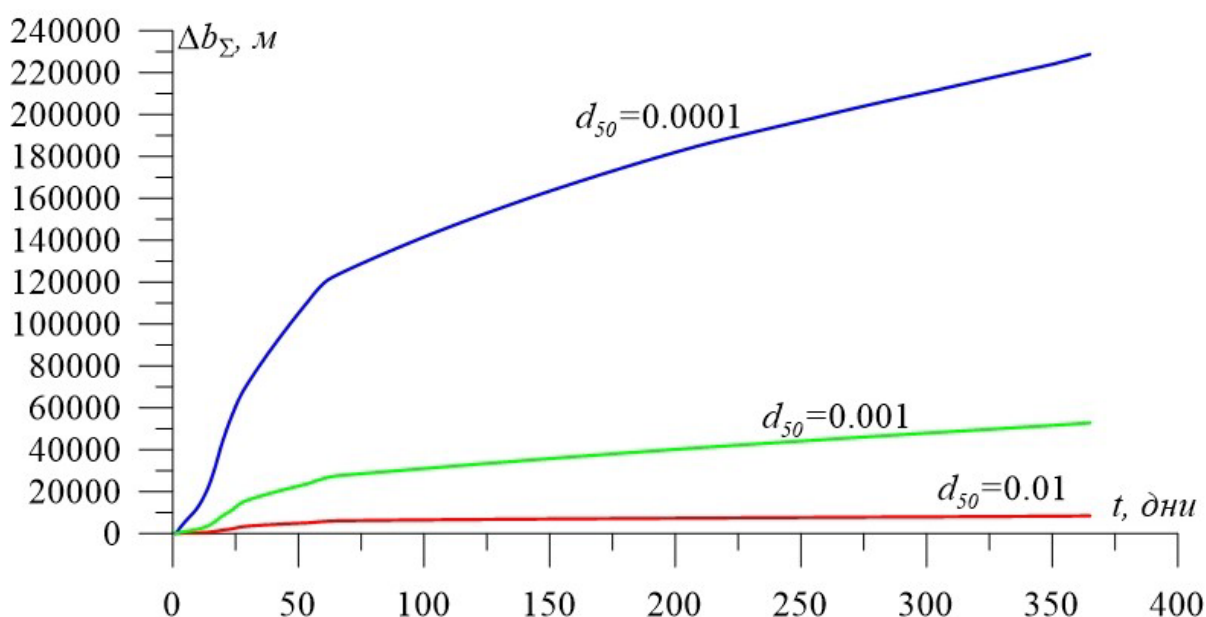


Рис. 4. – Суммарное изменение рельефа дна на изучаемом участке реки Волга для различных диаметров частиц

Скорость гравитационного оседания частиц нелинейно зависит от величины d_{50} (2)–(3). Это соотношение определяет влияние размера крупности частиц на динамику изменения рельефа. Рис. 5 показывает изменение рельефа дна от крупности частиц для различных моментов времени в течение одного года моделирования. Синим цветом показан сотый день моделирования, в этот период пуск воды в реке Волга принимает меженные значения $5000 \text{ м}^3/\text{с}$ (рис. 1). После начинается паводок, который характеризуется значительным увеличением пуска в 4–5 раз, такое изменение ведет к ускорению процессов деформации дна и потока наносов.

Почти линейная зависимость на рисунке 5 на плоскости параметров $(\lg(\Delta b_{\Sigma}[\text{м}]), \lg(d_{50} / d_{\min}))$ ($d_{\min}$ – минимальное рассмотренное значение крупности частиц) дает для фиксированного времени функцию вида $\lg(\Delta b_{\Sigma}[\text{м}]) = A(t) - B(t) \cdot \lg(d_{50} / d_{\min})$, где $A(t)$ и $B(t)$ некоторые рассчитанные параметры, зависящие от времени. Это дает степенную зависимость для интегральных отклонений рельефа дна $\Delta b_{\Sigma} \propto (d_{50} / d_{\min})^{-B(t)}$.

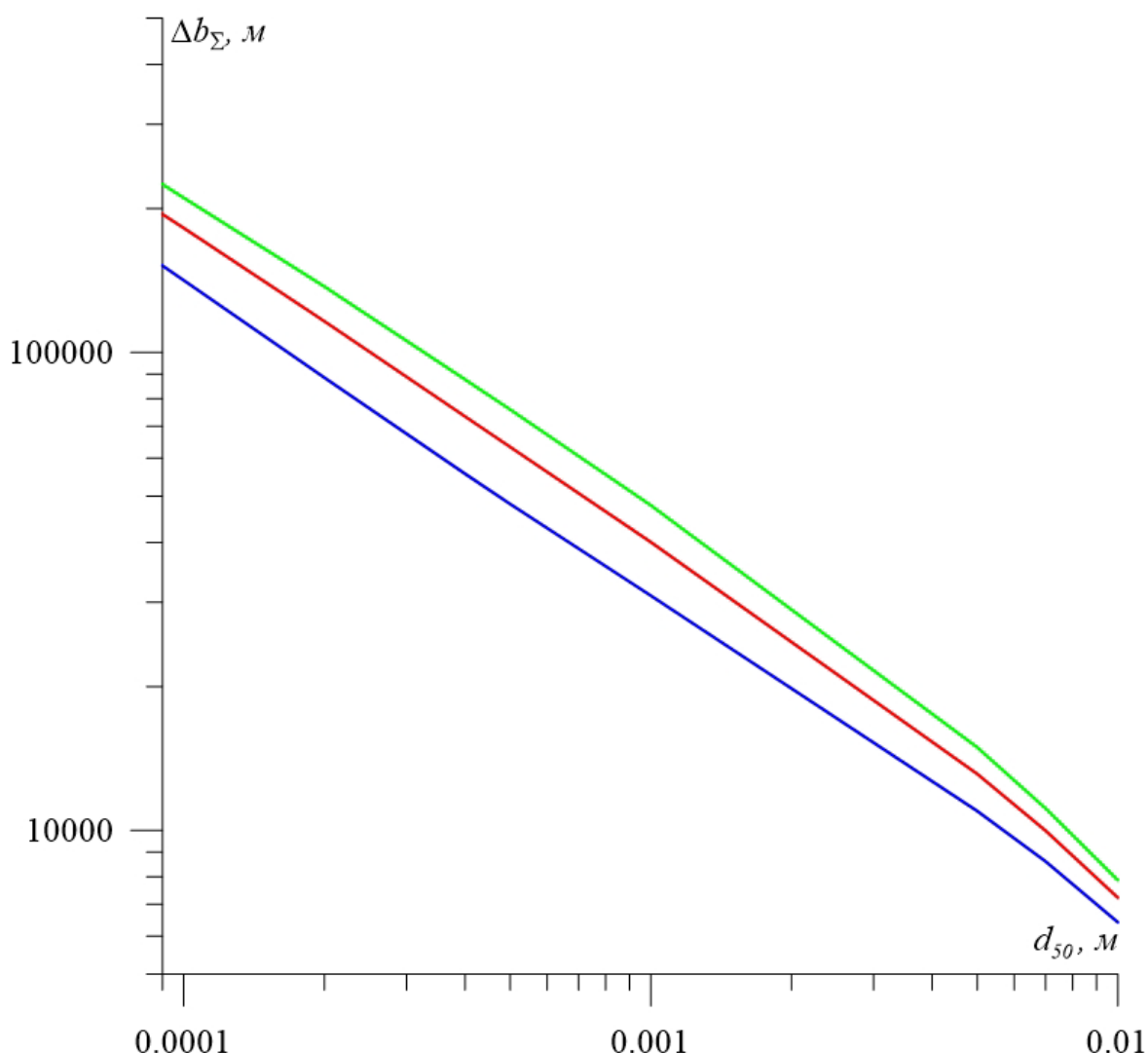


Рис. 5. – Зависимость суммарного изменения рельефа дна от диаметра частиц в разные моменты времени: синим – $t = 100$, красным – $t = 200$, зеленым – $t = 300$

Заключение

Сложная пространственная структура рельефа дна Волги ниже Волжской ГЭС включает сильные перепады высот на разных продольных шкалах, изменения поперечных сечений дна вдоль русла, изгибы русла, наличие ряда островов, включая остров Сарпинский, крупнейший речной остров Европы. Все это приводит к сильным локальным изменениям высоты дна, как в сторону положительных, так и отрицательных значений.

Нестационарность потока способна существенно усиливать темп транспорта наносов.

Проведены вычисления интегральных изменений рельефа дна Δb_{Σ} на длине около 80 км русла Волги для различных значений крупности частиц наносов d_{50} . Показано наличие степенной зависимости между Δb_{Σ} и d_{50} с показателем степени, зависящим от времени.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 23-71-00016, rscf.ru/project/23-71-00016/). Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова.

Литература

1. Проценко Е.А. Двумерная конечно-разностная модель формирования наносов в прибрежной зоне водоема и ее программная реализация // Инженерный вестник Дона, 2010, №. 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2010/224
2. Гейдт В.Д., Ашихмин О.В., Гейдт Л.В., Усова О.В. Определение возможности использования намывного грунта из озера Чёрное в городе Кургане в целях инженерной подготовки территории // Инженерный вестник Дона, 2024, №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2024/9237
3. Храпов С.С., Агафонникова Е.О., Кликунова А.Ю., Радченко В.П., Баскаков Е.В., Савин Е.С., Маковеев И.С., Храпов Н.С. Численное моделирование самосогласованной динамики поверхностных вод, влекомых и взвешенных наносов: I. Влияние промышленной добычи песка на безопасность судоходства в русле р. Волга // Математическая физика и компьютерное моделирование. 2022. № 25(3). С. 31-57.

4. Зиновьев А.Т., Марусин К.В., Шибких А.А., Шлычков В.А., Зatinaцкий М.В. Математическое моделирование динамики течения и русловых деформаций на участке р. Обь у г. Барнаула // Ползуновский вестник. 2006. №2. С. 204-209.

5. Векслер А.Б. Влияние формы частиц наносов на их гидравлические характеристики // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1982. №154. С. 52-58.

6. Дебольский В.К., Зайдлер Р., Массель С. Динамика русловых потоков и литодинамика прибрежной зоны моря. М.: Наука, 1994. 302 с.

7. Khrapov S.S., Khoperskov A.V. Application of Graphics Processing Units for Self-Consistent Modelling of Shallow Water Dynamics and Sediment Transport // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2020. Vol. 41(8). pp. 1475-1484.

8. Khrapov S., Agafonnikova E., Potaptseva P., Makoveev I., Klikunova A. EcoGIS-Simulation software for riverbed sediments modeling // VI International Conference on Actual Problems of the Energy Complex and Environmental Protection (APEC-VI-2023). 2023. P. 02005.

9. Khoperskov A.V., Khrapov S.S., Klikunova A.Yu., Popov I.E. Efficiency of using GPUs for reconstructing the hydraulic resistance in river systems based on combination of high performance hydrodynamic simulation and machine learning // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2024. Vol. 45(7). pp. 3085-3096.

10. Dyakonova T., Khoperskov A., Khrapov S. Numerical Model of Shallow Water: The Use of NVIDIA CUDA Graphics Processors // Communications in Computer and Information Science. 2016. Vol. 687. P. 11.

11. Храпов С.С. Численное моделирование гидродинамических аварий: размыв дамб и затопление территорий // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. 2023. №10(2). С. 357-373.

12. Jayaratne R., Takayama Y., Shibayama T. Applicability of Suspended Sediment Concentration Formulae to Large-Scale Beach Morphological Changes // Engineering Proceedings. 2012. Vol. 1(33). pp. 57.

13. Векслер А.Б., Доненберг В.М. Рекомендации по прогнозу трансформации русла в нижних бьефах гидроузлов. СПб.: ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2006. 201 с.

References

1. Procenko E.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2010, №. 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2010/224.

2. Gejdt V.D., Ashihmin O.V., Gejdt L.V., Usova O.V. Inzenernyj vestnik Dona, 2024, №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2024/9237

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. Mathematical physics and computer simulation. 2022. № 25(3). pp. 31-57.

4. Zinov'ev A.T., Marusin K.V., Shibkih A.A., Shlychkov V.A., Zatinackij M.V. Polzunovskij vestnik. 2006. №2. pp. 204-209.

5. Veksler A.B. Izvestija VNIIG im. B.E. Vedeneeva. 1982. №154. С. 52-58.

6. Debol'skij V.K., Zajdler R., Massel' S. Dinamika ruslovyh potokov i litodinamika pribrezhnoj zony morja [The dynamics of riverbed flows and lithodynamics of the coastal zone of the sea]. M.: Nauka, 1994. 302 p.

7. Khrapov S.S., Khoperskov A.V. Lobachevskii Journal of Mathematics. 2020. Vol. 41(8). pp. 1475-1484.

8. Khrapov S., Agafonnikova E., Potaptseva P., Makoveev I., Klikunova A. EcoGIS-Simulation software for riverbed sediments modeling. VI International Conference on Actual Problems of the Energy Complex and Environmental Protection (APEC-VI-2023). 2023. P. 02005.

9. Khoperskov A.V., Khrapov S.S., Klikunova A.Yu., Popov I.E. Lobachevskii Journal of Mathematics. 2024. Vol. 45(7). pp. 3085-3096.

10. Dyakonova T., Khoperskov A., Khrapov S. Communications in Computer and Information Science. 2016. Vol. 687. P. 11.
11. Khrapov S.S. Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Astronomiya. 2023. Vol. 10(2). pp. 357-373.
12. Jayaratne R., Takayama Y., Shibayama T. Engineering Proceedings. 2012. Vol. 1(33). pp. 57.
13. Veksler A.B., Donenberg V.M. Rekomendacii po prognozu transformacii rusla v nizhnih b'efah gidrouzlov [Recommendations for forecasting channel transformation in the lower reaches of waterworks]. SPb.: OAO «VNIIG im. B.E. Vedeneeva», 2006. P. 201.

Дата поступления: 26.06.2025

Дата публикации: 25.08.2025