

Построение цифровых моделей рельефа местности для речных пойм

А.Ю. Кликунова¹, А.В. Хоперсков¹

¹Волгоградский государственный университет, пр. Университетский 100, Волгоград, Россия, 400062

Аннотация. Описана процедура построения цифровой модели рельефа (ЦМР) северной части Волго-Ахтубинского междуречья. Основываясь на матрице высот SRTM, проведены уточнения и актуализация пространственных данных с использованием космоснимков, GPS-измерений, промеров глубин русел Волги и Ахтубы. Для Волго-Ахтубинской поймы (ВАП) важнейшим источником высотных данных являются результаты наблюдений за динамикой береговых линий малых водоемов (озер, ериков, протоков), возникающих в процессе весеннего затопления поймы и исчезающих в меженный период. Система оцифрованных береговых линий в различные моменты времени позволяет существенно повысить качество ЦМР. Метод построения цифровой модели рельефа включает итерационную процедуру, которая использует результаты морфоструктурного анализа ЦМР и численного гидродинамического моделирования затопления ВАП.

1. Введение

Развитие вычислительной техники и численных методов дает нам новые возможности для моделирования широкого круга прикладных задач динамики жидкости для конкретных территорий. К числу таких проблем относятся нагонные затопления вверх по течению рек, весенние половодья в речных поймах, затопления из-за обильных осадков [1]. Гидродинамические модели позволяют проводить технические и экологические экспертизы при проектировании гидрологических сооружений [2]. Важной задачей является определение границ водосборов [3]. Для всех этих задач критически важным является качественная цифровая модель рельефа (ЦМР) [4]. Важной проблемой являются изменения профиля дна и прилегающих зон из-за активного переноса наносов и эрозийных процессов, которая решается в рамках самосогласованных моделей динамики воды и наносов [5]. Эти процессы требуют регулярной актуализации ЦМР.

В данной работе мы описываем ключевые этапы построения ЦМР на основе синтеза различных пространственных данных на примере северной части Волго-Ахтубинской поймы. В частности, мы используем данные наблюдений об изменениях береговых линий многочисленных водоемов во время весеннего паводка, а также проводим верификацию ЦМР с использованием гидродинамического моделирования.

2. Основные этапы построения ЦМР

На рисунке 1 показана общая схема построения цифровой модели рельефа. Обсудим здесь наиболее существенные этапы. В основе нашей ЦМР лежит матрица высот $b_{ij} = b(x_i, y_j)$, построенная в узлах декартовой системы координат с постоянным шагом $\Delta x = \Delta y$:

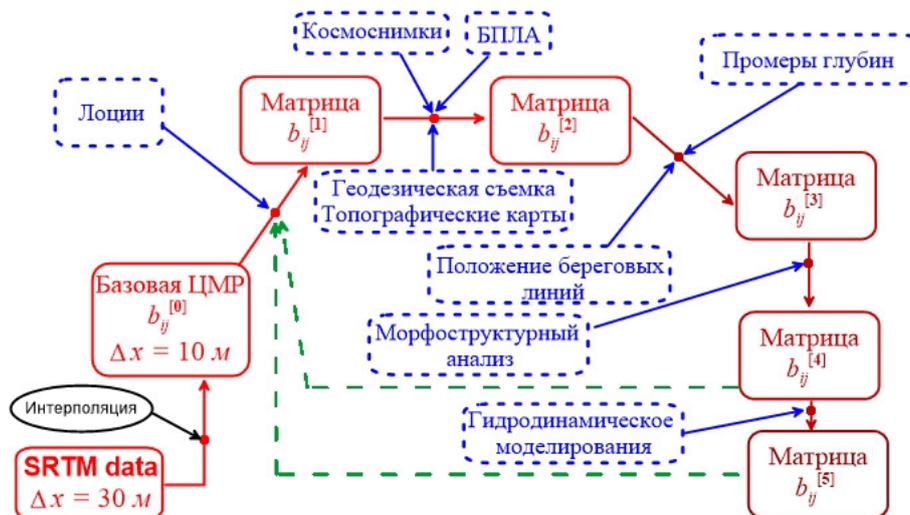


Рисунок 1. Этапы и последовательность создания ЦМР.

$x_i = x_0 + i\Delta x$, $y_j = y_0 + j\Delta y$ ($i = 1, 2, \dots, N_x$, $j = 1, 2, \dots, N_y$). В качестве исходной матрицы высот мы берём данные SRTM3 SRTMGL1 $b_{ij}^{[SRTM]}$. Используя инструментальные средства ГИС «Карта 2011», пересчитываем её на меньший шаг ($\Delta x = 15$ м или 10 м), применяя средневзвешенную интерполяцию по 16 направлениям. Новую матрицу $b_{ij}^{[0]}$ будем называть базовой ЦМР.

1) Для уточнения модели дна р. Волга и р. Ахтуба используем лоции (судоходные карты) и карты глубин водоемов. После оцифровки и внедрения этих данных в базовую ЦМР $b_{ij}^{[0]}$, получаем матрицу $b_{ij}^{[1]}$.

2) Особенностью ВАП является сложная система малых русел поймы, так называемых ериков и протоков, которые образуют иерархическую систему русел между Ахтубой и Волгой. Для учета этой гидрологической системы в ЦМР, используем космоснимки спутников серии «Ресурс-П» и UK-DMC 2, спутниковой группировки DigitalGlobe через сервисы Google Earth для векторизации линейных объектов русловой системы и последующего внедрения в $b_{ij}^{[1]}$. Дополнительно можно использовать съемку с БПЛА и геодезические данные. В результате формируем матрицу $b_{ij}^{[2]}$, которая содержит систему малых русел.

3) Для актуализации дна р. Волга используем данные последних промеров глубин в пределах от Волжской ГЭС до р.п. Светлый Яр, которые аппроксимируем на все узлы нашей сетки, что дает нам матрицу $b_{ij}^{[3]}$, содержащую высотные данные речных русел.

4) Мы используем данные о динамике береговых линий транзитных водоёмов, которые возникают на стадии затопления поймы (апрель–май), с учетом последующего падения уровня воды (рисунок 2). Эти измерения дают дополнительную систему линий постоянного уровня с очень высокой точностью. Привязывая изолинии к высоте, мы уточняем ЦМР, улучшая таким образом матрицу $b_{ij}^{[3]}$. Наши исследования показали эффективность использования БПЛА для получения исходных данных о границах водоемов. БПЛА обеспечивают получение более подробной последовательности изолиний на этапе подъема затопления, недостижимой для спутниковых данных. Однако такой подход является локальным и не позволяет охватить большие территории. Для матрицы $b_{ij}^{[2]}$ на рисунке 2б,в мы построили профили AB и CD , указав положения соответствующих

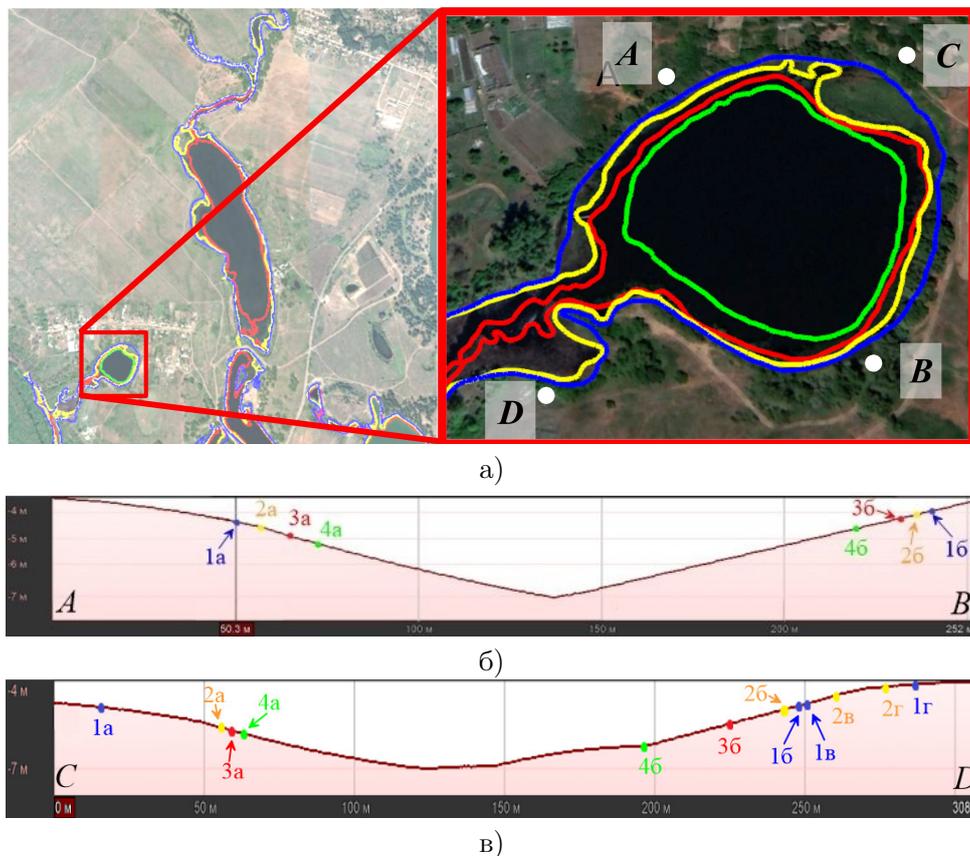


Рисунок 2. Положения береговых линий в разные моменты времени для небольших водоемов вблизи х. Зональный.

пересечений береговых линий с этими отрезками. Точки для одной береговой линии на противоположных склонах водоема имеют различные уровни высот, что указывает на необходимость актуализации $b_{ij}^{[2]}$. Например, для пары точек (1a,16) на рисунке 2б разность высот $\Delta b = 0.5$ м, а для (2a,2г) на рисунке 2в $\Delta b = 1$ м.

5) Далее рассчитываем стандартный набор параметров морфоструктурного анализа [6]: профильную кривизну $k_t(x_i, y_j)$, касательную кривизну $k_s(x_i, y_j)$ (рисунок 3в) и углы наклонов $s(x_i, y_j)$ (формулы 1-3):

$$s = \frac{360^\circ}{2\pi} \arctan \sqrt{f_x^2 + f_y^2}, k_t = \frac{f_{xx}f_y^2 - 2f_{xy}f_xf_y + f_{yy}f_x^2}{p\sqrt{q}}, k_s = \frac{f_{xx}f_y^2 + 2f_{xy}f_xf_y + f_{yy}f_x^2}{p\sqrt{q^3}},$$

где $f_x = \frac{\partial f}{\partial x}, f_y = \frac{\partial f}{\partial y}, f_{xx} = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}, f_{yy} = \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}, f_{xy} = \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}, p = f_x^2 + f_y^2, q = 1 + p$. Пространственные распределения этих величин помогают определить зоны с артефактами, прежде всего, зоны с нарушением гидрологической связности водотоков на ЦМР. Морфоструктурный анализ ЦМР позволяет простыми средствами выявлять возможные ошибки и оперативно исправлять их, возвращаясь на этап построения гидрологической сети [7].

6) На заключительном этапе проводится гидродинамическое моделирование (рисунок 3а,б), воспроизводящее весеннее затопление территории поймы в соответствии методикой, описанной в работах [1]. Это позволяет дополнительно проверить связность гидрологической системы. Согласование результатов такого моделирования с данными наблюдений позволяет актуализировать ЦМР для наиболее важных зон, прежде всего, обеспечивающих

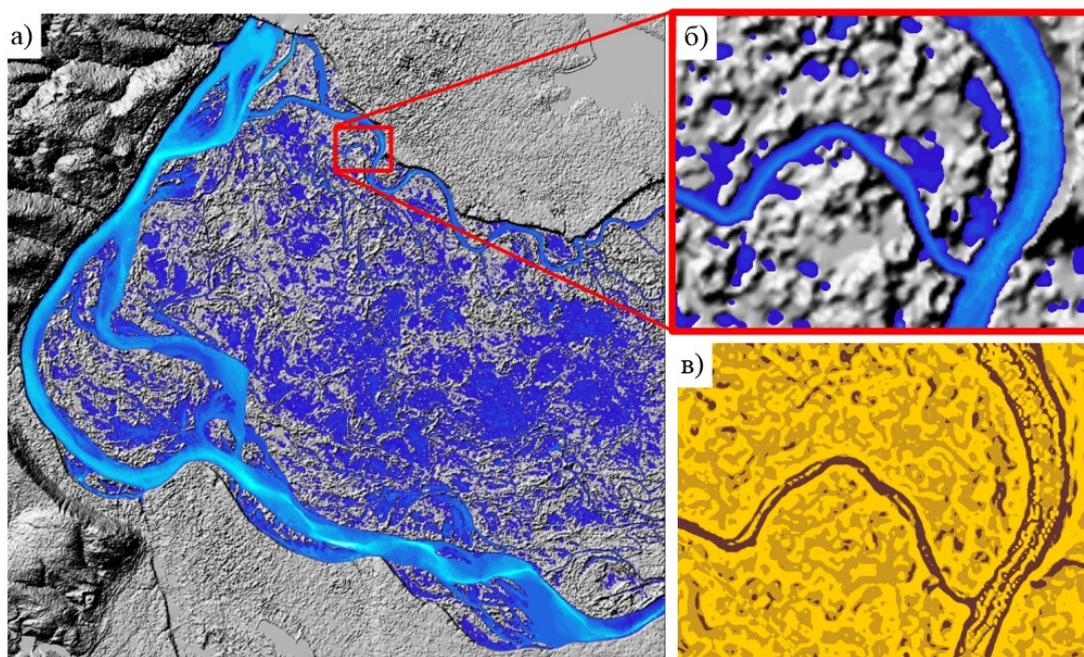


Рисунок 3. а) Общая структура затопления ВАП по результатам численного гидродинамического моделирования. б) Распределение воды для выделенного участка. в) Для того же участка распределение морфометрического показателя k_s .

выход воды из ериков с формированием обширных водоемов озерного типа. Такая верификация на основе гидродинамического моделирования является наиболее ресурсоёмкой процедурой. Для гидродинамических симуляций мы используем программное обеспечение для численного решения уравнений мелкой воды, описанное в работах [1, 8] с учетом параллельной реализации для GPU [9].

3. Заключение

Для построения цифровых моделей рельефа были использованы данные SRTM, космические снимки, полученные со спутников “Ресурс-П” и UK-DMC-2, а также топографические карты. Кроме того, для актуализации цифровых моделей рельефа дна рек были использованы лоцманские карты и данные о промерах глубин в реках Волга и Ахтуба. Мощными инструментами верификации ЦМР могут являться морфоструктурный анализ и численные методы моделирования динамики поверхностных вод на заданном рельефе местности.

Определение из наблюдений динамики береговых линий, дающих постоянный уровень высот, активно используется при построении ЦМР. Однако в случае периодически затапливаемых территорий такая возможность приобретает особую ценность, являясь основой для очень качественного построения цифровой модели рельефа местности.

4. Литература

- [1] Khrapov, S. The Numerical Simulation of Shallow Water: Estimation of the Roughness Coefficient on the Flood Stage / S. Khrapov, A. Pisarev, I. Kobelev, A. Zhumaliev, E. Agafonnikova, A. Losev, A. Khoperskov // Advances in Mechanical Engineering. — 2013. — Vol. 5. — P. 787016.
- [2] Agafonnikova, E.O. Computer simulation of the Volga river hydrological regime: problem of water-retaining dam optimal location / E.O. Agafonnikova, A.Y. Klikunova, A.V.Khoperskov // Bulletin of the South Ural

- State University, Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software. — 2017. — Vol. 10(3). — P. 148-155.
- [3] Мальцев, К.А. Использование цифровых моделей рельефа для автоматизированного построения границ водосборов / К.А. Мальцев, О.П. Ермолаев // Геоморфология. — 2014. — №1. — С. 45-53.
- [4] Satge, F. Accuracy assessment of SRTM v4 and ASTER GDEM v2 over the Altiplano watershed using ICESat/GLAS data / F. Satge, M.P. Bonnet, F. Timouk, S. Calmant, R. Pillco, J. Molina, W. Lavado-Casimiro, A. Arsen, J.F. Cretaux, J. Garnier // International Journal of Remote Sensing. — 2015. — Vol. 36(2). — P. 465-488.
- [5] Sidoryakina, V.V. Well-posedness analysis and numerical implementation of a linearized two-dimensional bottom sediment transport problem / V.V. Sidoryakina, A.I. Sukhinov // Computational Mathematics and Mathematical Physics. — 2017. — Vol. 57(6). — P. 978-994.
- [6] Сорохтин, Н.О. Геодинамическая эволюция и морфоструктурный анализ западной части арктического шельфа России / Н.О. Сорохтин, С.Л. Никифоров, С.М. Кошель, Н.Е. Козлов // Вестник МГТУ. — 2016. — Т. 19, № 1/1 — С. 123-137.
- [7] Кошель, С.М. Современные методы расчета распределения поверхностного стока по цифровым моделям рельефа / С.М. Кошель, А.Л. Энтин // Геоморфология: Современные методы и технологии цифрового моделирования рельефа в науках о Земле. — М.: Медиа-ПРЕСС. — 2016. — №6. — С. 24-34.
- [8] Khoperskov, A. A Numerical Simulation of the Shallow Water Flow on a Complex Topography / A. Khoperskov, S. Khrapov // Numerical Simulations in Engineering and Science / Edited by Srinivasa Rao, InTechOpen. — 2018. — P. 237-254.
- [9] Dyakonova, T. Numerical Model of Shallow Water: The Use of NVIDIA CUDA Graphics Processors / T. Dyakonova, A. Khoperskov, S. Khrapov // Communications in Computer and Information Science. — 2016. — Vol. 687. — P. 132-145.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской области в рамках научных проектов № 18-47-340007 р_а (в части построения актуализированной цифровой модели местности) и № 18-41-342001 р_мк (в части расчета параметров транспортной сети малых русел).

Creating a digital elevation model for interfluve

A.Yu. Klikunova¹, A.V. Khoperskov¹

¹Volgograd State University, University Prospect 100, Volgograd, Russia, 4000062

Abstract. The procedure for constructing a digital elevation model (DEM) of the northern part of the Volga-Akhtuba interfluve (VAI) is described. We take the elevation matrix of SRTM data as the basis for further refining and updating spatial data using satellite imagery, GPS measurements, depth surveys of the Volga and Akhtuba riverbeds. Important sources of high-altitude data for VAI are observations of the shorelines dynamics of small temporary reservoirs (lakes, ducts, water spills), which arise during the spring flood and disappear during the low-flow period. The system of digitized coastlines at different points in time can significantly improve the quality of the DEM. Our method of constructing digital elevation models includes an iterative algorithm that uses the results of the DEM morphostructural analysis and the numerical hydrodynamic simulation of the VAI flooding.