



www.volsu.ru

DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2020.3.2>

УДК 528.8, 528.9, 532.5
ББК 26.22, 26.17, 22.253

Дата поступления статьи: 03.06.2020
Дата принятия статьи: 13.07.2020

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ ЗОН ЗАТОПЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ¹

Татьяна Андреевна Дьяконова

Кандидат технических наук,
доцент кафедры информационных систем и компьютерного моделирования,
Волгоградский государственный университет
dyakonova@volsu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0919-4206>
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Владислава Викторовна Кривко

Стажер младшего научного сотрудника,
Витебский государственный университет им. П.М. Машерова
vlada.krivko@mail.ru
просп. Московский, 33, 210038 г. Витебск, Республика Беларусь

Екатерина Олеговна Агафонникова

Доцент кафедры информационных систем и компьютерного моделирования,
Волгоградский государственный университет
agafonnikova@volsu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2862-4531>
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Анна Юрьевна Кликунова

Старший преподаватель кафедры информационных систем
и компьютерного моделирования,
Волгоградский государственный университет
klikunova@volsu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4055-4601>
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

© Дьяконова Т.А., Кривко В.В., Агафонникова Е.О., Кликунова А.Ю., Соколовский Е.В., Савин Е.С., 2020

Евгений Валерьевич Соколовский

Стажер младшего научного сотрудника,
Витебский государственный университет им. П.М. Машерова
falconlepel@gmail.com
просп. Московский, 33, 210038 г. Витебск, Республика Беларусь

Егор Сергеевич Савин

Ассистент кафедры информационных систем и компьютерного моделирования,
Волгоградский государственный университет
e.s.savin@volsu.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Аннотация. В работе обсуждается проблема определения границ зон затопления, подтопления территорий. Описана методика построения кадастровых карт зон затопления для различных значений расчетной обеспеченности уровней воды, в основе которой лежит гидродинамическое и геоинформационное моделирование. Для построения цифровых моделей рельефа (ЦМР) местности мы используем пространственные данные, полученные от большого числа источников. Описанную методику мы применили для построения кадастровых карт для ряда населенных пунктов Волгоградского региона Российской Федерации. В результате получен набор xml-файлов, подготовленных для внесения на учет в Федеральную службу государственной регистрации, кадастра и картографии. Для Республики Беларусь проблема затопления территорий также является актуальной. Наиболее подвержены затоплению пойменные территории р. Припять. Нами была построена ЦМР местности в окрестностях г. Петриков и проведено гидродинамическое моделирование, в результате которого были получены карты затопления.

Ключевые слова: кадастровые карты, численное моделирование, зоны затопления, модель мелкой воды, цифровая модель рельефа.

Введение

В соответствии с Постановлением Правительства РФ № 360 «О зонах затопления, подтопления» границы затопления территорий, прилегающих к водным объектам, должны быть внесены в единый государственный реестр недвижимости [3]. Этот документ требует от органов региональной власти формирования предложений о внесении в реестр кадастровых карт на основе расчетных данных геологических и гидрогеологических изысканий, а также пространственных данных, полученных при выполнении геодезических и картографических работ.

Использование геоинформационного и гидродинамического моделирования позволяет получать более точные границы зон и карты затоплений с учетом всех основных физических, топографических, метеорологических, гидрологических и других факторов [9]. Результаты построения такого рода моделей содержат полную временную картину

пространственных распределений воды на заданной территории, позволяя также рассчитывать площадь затопления, скорости потока, распределения глубин, характерные времена изменения основных характеристик гидрологического режима [5].

Имеющиеся программные инструменты дают возможность исследовать редко встречающиеся события, включая катастрофические паводки, что позволяет прогнозировать гидрологический режим территорий при различных неблагоприятных условиях [5; 9].

1. Методика расчета затопления

Задача определения зон затопления является многоэтапной и включает в себя различные подходы. В начале проводится подробный анализ водного объекта, который заключается в определении водотоков, источников воды, гидрологических и геологических условий, а также местоположения прилегающих зон с особыми условиями использования территории.

К последним в нашем случае относятся населенные пункты, сельскохозяйственные угодья, объекты хозяйственной инфраструктуры, природоохраняемые зоны [4].

Затем на основе ассимиляции пространственных данных из разных источников строится цифровая модель рельефа (ЦМР) местности, учитывая русла рек с использованием геоинформационных систем (ГИС). Третьим этапом является гидродинамическое моделирование динамики затопления с учетом определенных ранее параметров расчета. Для моделирования мы используем программное обеспечение [8], в основе которого лежит численная схема CSPH — TVD (Combined Smooth Particle Hydrodynamics — Total Variation Diminishing) для интегрирования уравнений мелкой воды, описанная в работе [9]. Вычислительные эксперименты проводятся на GPU NVIDIA Tesla V100.

В результате обработки результатов моделирования формируется графическое описание местоположения границ зон затопления, определяются их координаты, площадь затопления и расход воды, что требует Постановление № 360 [3].

2. Построение ЦМР

Построение ЦМР для целей гидродинамического моделирования проводилось в несколько этапов, определяемых диаграммой на рисунке 1. В качестве исходных данных были использованы матрицы высот SRTM3 и SRTMGL1, а также космоснимки спутников серии «Ресурс-П» и UK-DMC2. Актуализация моделей рельефа проводится на различных этапах построения с использованием инструментальных средств ГИС «Карта 2011» и сервисов Google Earth для векторизации линейных объектов русловой системы. Для построения рельефа дна водных объектов использованы промеры глубин, продольные и поперечные профили рек.

Для актуализации рельефа на некоторых участках дополнительно использовалась съемка с БПЛА и геодезические данные, полученные как в результате векторизации топографических планов, так и дополнительной съемки на местности в критически важных зонах [7]. На заключительных этапах были рассчитаны стандартные параметры морфоструктурного анализа и проведено гидродинамическое моделирование, воспроизводящее затопление территории во время паводка при различных гидрографах, задающих различные уровни водной обеспеченности.

3. Результаты моделирования

Проведено гидродинамическое моделирование затопления территории в окрестностях ряда населенных пунктов Волгоградской области Российской Федерации и Республики Беларусь. Целью проведения серий вычислительных экспериментов является построение кадастровых карт [11], содержащих границы зон затопления при различной водной обеспеченности — 1, 3, 5, 10, 25 и 50 % [5]. Величина такой обеспеченности определяется вероятностью возникновения паводка соответствующего уровня.

В качестве объектов исследования были выбраны для Волгоградского региона станция Михайловская на реке Хопер и город Жирновск на реке Медведица, для Республики Беларусь — город Петриков на реке Припять.

Для проведения моделирования паводка в окрестностях города Жирновск была построена цифровая модель рельефа изучаемой территории с постоянным пространственным шагом $\Delta x = \Delta y = 15$ м, задан основной источник в русле реки Медведица выше по течению. Для определения объемного расхода для различных значений обеспеченности были использованы нормы годового стока, внутригодового распределения стока, максимальные расходы объема воды в паводок, гидрографы половодий. В результате получены следующие соотношения величины обеспеченности и объемного расхода в источниках (Q_{\max}): 1 % — 2 000 м³/с, 3 % — 1 250 м³/с, 5 % — 1 000 м³/с, 10 % — 600 м³/с, 25 % — 230 м³/с, 50 % — 1 00 м³/с.

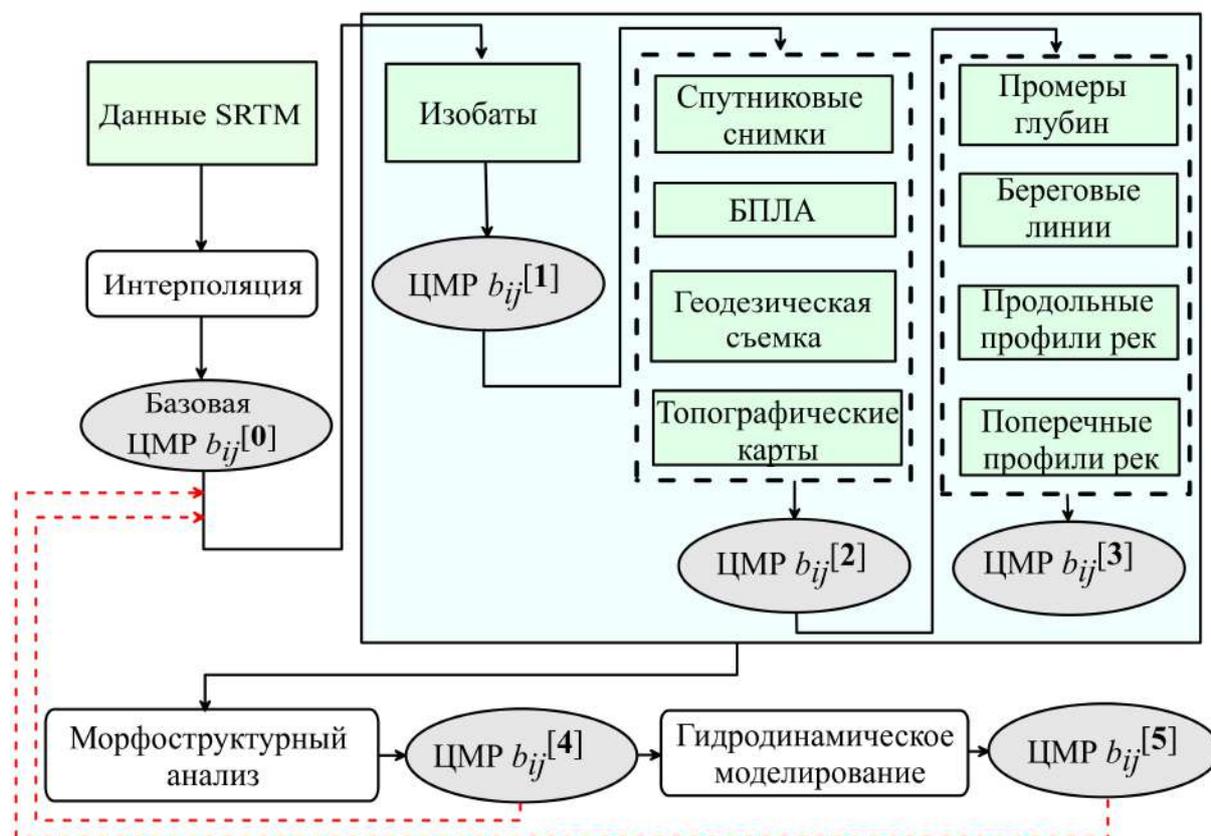


Рис. 1. Процедура построения цифровой модели рельефа

Гидродинамические расчеты для станции Михайловской и прилегающих территорий включали ЦМР с пространственным шагом построения $\Delta x = \Delta y = 15$ м и основной источник в русле реки Хопер в 5 км выше по течению. Мы получили следующие оценки для Q_{\max} : 1 % – 1 395 м³/с, 3 % – 786 м³/с, 5 % – 576 м³/с, 10 % – 261 м³/с, 25 % – 156 м³/с, 50 % – 93 м³/с. На рисунке 2 показаны построенные кадастровые карты.

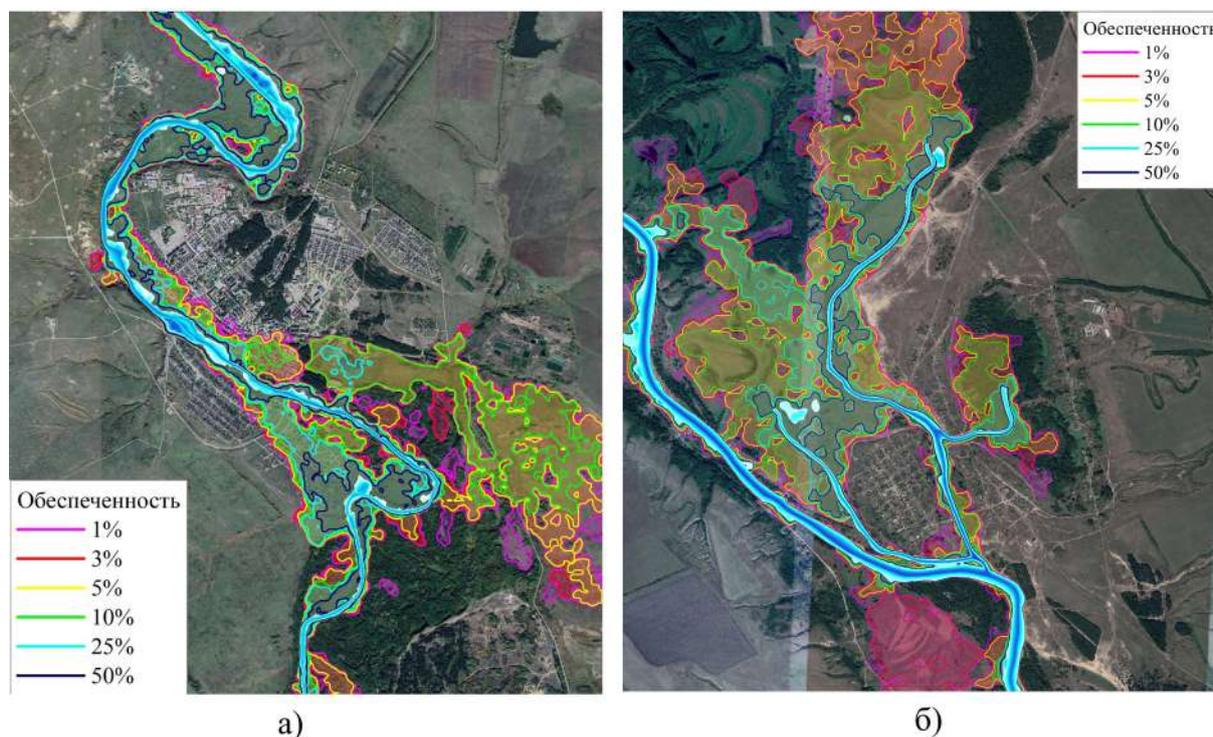


Рис. 2. Границы зон затопления в окрестности населенных пунктов при различной обеспеченности на космическом снимке. Сплошные линии соответствуют границам с глубиной 0,1 м, полупрозрачная цветная заливка соответствует зонам затопления: а) г. Жирновск; б) ст-ца Михайловская

На основе результатов гидродинамического моделирования была подготовлена электронная документация по зонам затопления для последующего внесения на учет в Федеральную службу государственной регистрации, кадастра и картографии. Для каждого населенного пункта были созданы по 6 комплектов, включающих в себя два xml-файла. Первый xml-файл – TerritoryToGKN, второй – ZoneToGKN. Для создания файлов использовалась программа «Полигон ПРО: Карта план» (см. рис. 3).

Исходными данными для создания первого xml-файла были растр космоснимка и файл с таблицей координат границ зон затопления. Выходными данными является zip-архив, содержащий xml-файл TerritoryToGKN и план зоны затопления. Процесс создания файла состоял из пяти этапов:

- 1) Заполнение информации о землеустроителе, объекте землеустройства и документах, регламентирующих выполнение работ.
- 2) Загрузка в программу исходной таблицы координат.
- 3) Привязка исходного растра по загруженным координатам.
- 4) Заполнение семантической информации, описывающей местоположение границ

зон затопления.

- 5) Создание xml-файла и выгрузка в zip-архив.

Полученный zip-архив служит исходными данными для создания второго xml-файла. Выходными данными является zip-архив, содержащий файлы TerritoryToGKN, ZoneToGKN и план зоны затопления. Процесс создания второго файла состоит из трех этапов:

- 1) Загрузка исходного zip-архива с первым xml-файлом.
- 2) Заполнение информации об объекте землеустройства.
- 3) Создание xml-файла и выгрузка в zip-архив.

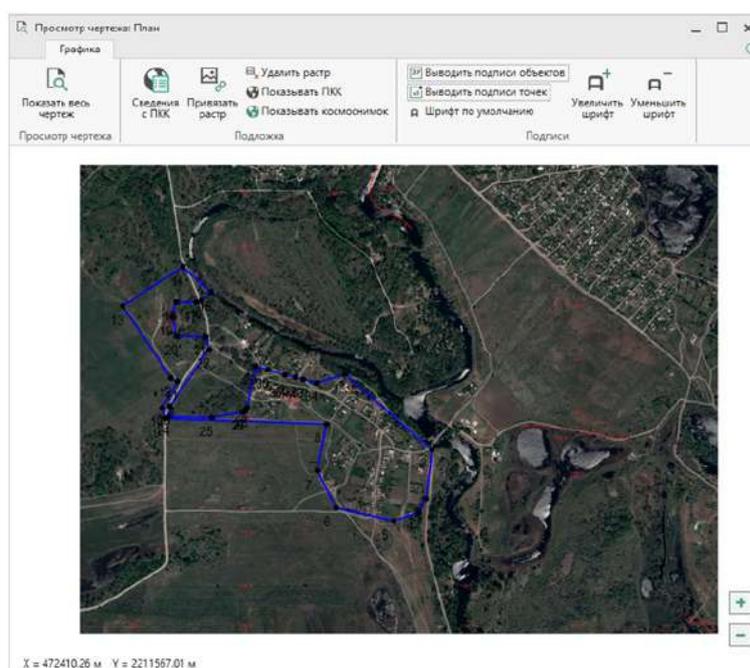


Рис. 3. Окно просмотра плана границ зон затопления в программе «Полигон ПРО: Карта план»

На территории Республики Беларусь остро стоит проблема затопления территории из-за паводков и обильных осадков. Построение кадастровых карт затопления при различной водной обеспеченности позволит выделить территории, для которых эта проблема является критической, и составить план действий для предотвращения возникновения чрезвычайных ситуаций, вызванных паводком [10].

Река Припять является одной из крупных рек Белорусского полесья, самым длинным и большим по площади бассейна из всех притоков Днепра. Ежегодно во время весеннего паводка территории, расположенные в пойме этой реки, подвергаются затоплению. Наиболее крупные наводнения наблюдались в 1931, 1932, 1940, 1956, 1958, 1966, 1970, 1999 годах. Так, в 1958 г. в г. Петриков уровень воды повысился на 1 м, а в г. Мозырь — на 2 м.

С использованием нашей методики построения актуальных цифровых моделей рельефа, была создана ЦМР окрестностей города Петриков Гомельской области. Для выполнения расчетов динамики затопления был задан основной источник в русле реки выше по течению от населенного пункта. Количественные значения объемного расхода

$Q(t)$ источника воды определялись из расчетных максимальных расходов воды весеннего половодья р. Припять за период с 1845 по 1958 год [1]. На начальном этапе для интервала времени $\Delta t = 5 - 10$ суток задавалось меженное значение $Q_{min} = 350 \text{ м}^3/\text{с}$, что дает наблюдаемые значения глубины воды в русле реки в этот период. Этот выбор зависит от таких параметров русла, как ширина, глубина, извилистость, шероховатость дна [2; 6]. При проведении имитационного моделирования весеннего паводка значение гидрографа $Q(t)$ увеличивалось до значения $Q_{max} = 11\,000 \text{ м}^3/\text{с}$ с шагом $\Delta Q(t)$. Построены карты распределения воды, полученные в результате гидродинамического моделирования, в различные моменты времени, от меженного значения гидрографа (рис. 4а) до пика паводка (рис. 4г).

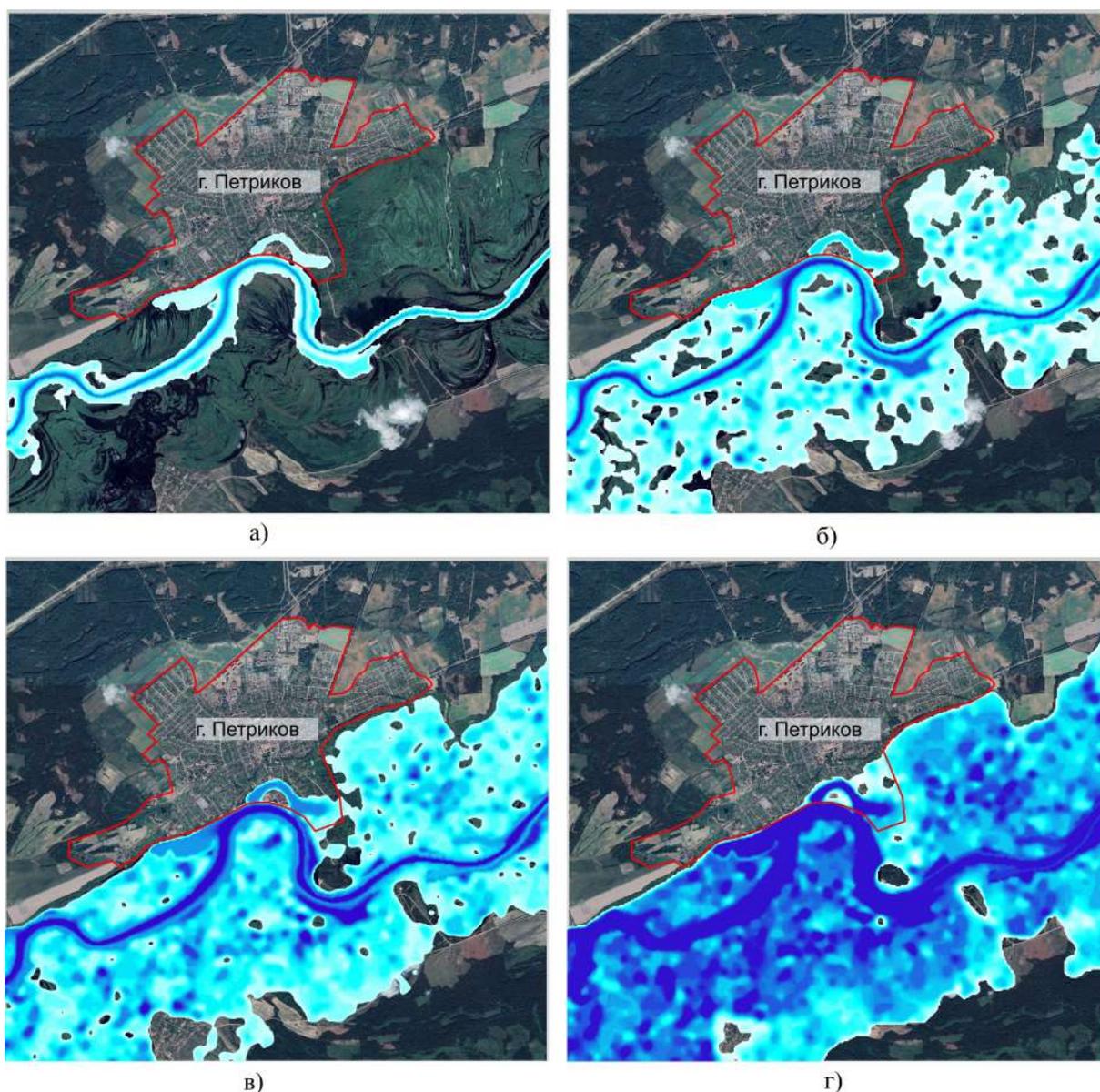


Рис. 4. Результат гидродинамического моделирования для территории в окрестностях г. Петриков, Гомельская область, Беларусь в различные моменты времени

Заключение

Кратко рассмотрена методика построения кадастровых карт для зон, подверженных опасностям затопления, в соответствии с юридическими требованиями на территории Российской Федерации. В основе предлагаемого подхода лежат методы геоинформационного моделирования для построения цифровой модели рельефа местности с точностью, необходимой для последующего численного моделирования динамики поверхностных вод для получения границ водной обеспеченности.

Изучена возможность применения разработанных методов для других территорий с отличающимися природно-климатическими условиями. В отличие от Волгоградского региона, который характеризуется засушливым климатом со среднегодовым уровнем осадков до 500 мм на северо-западе области и в пределах 270 мм в южных районах, на территории Республики Беларусь уровень осадков составляет $500 \div 800$ мм. Кроме того, влияние подтоплений из-за грунтовых вод также может играть более существенное значение для РБ. В однослойном приближении модели мелкой воды удается воспроизводить паводковую ситуацию только для отдельных зон РБ.

В данной работе мы не учитываем фактор внутренних грунтовых вод, который может играть значительную роль. В этом случае необходимо использовать многослойные гидродинамические модели с учетом переноса воды из грунта на поверхность и в обратном направлении. Поэтому для создания метода построения кадастровых карт для особых территорий, подверженных затоплению, переход к двуслойной модели мелкой воды представляется необходимым.

ПРИМЕЧАНИЕ

¹ Кликунова Анна Юрьевна выражает благодарность Министерству науки и высшего образования РФ за поддержку в рамках ГЗ 0633-2020-0003.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волчек, А. А. Затопления на территории Беларуси / А. А. Волчек // Вестник Брестского государственного технического университета. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. — 2017. — С. 39–53.
2. Дьяконова, Т. А. Метод оценки эффективного коэффициента шероховатости в меандрированных руслах на основе численного моделирования / Т. А. Дьяконова // Математическая физика и компьютерное моделирование. — 2018. — Т. 21, № 1. — С. 64–69.
3. Постановление Правительства РФ от 18.04.2014 № 360 (ред. от 07.09.2019) «О зонах затопления, подтопления». — Электрон. текстовые дан. — Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/499090951>. — Загл. с экрана.
4. Соколовский, Е. В. Выделение границ природных территорий, подлежащих специальной охране, средствами искусственных нейронных сетей / Е. В. Соколовский, В. В. Кривко, А. Б. Торбенко // Современные технологии в деятельности особо охраняемых природных территорий: геоинформационные системы, дистанционное зондирование земли. — 2019. — С. 127–129.
5. Creation of cadastral maps of flooding based on numerical modeling / A. Y. Klikunova, A. V. Khoperskov, E. O. Agafonnikova, A. S. Kuz'mich, T. A. Dyakonova, S. S. Khrapov, I. M. Gusev // Journal of Computational and Engineering Mathematics. — 2019. — Vol. 6, № 2. — P. 3–17.

6. Dyakonova, T. Bottom friction models for shallow water equations: manning's roughness coefficient and small-scale bottom heterogeneity / T. Dyakonova, A. Khoperskov // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2018. — Vol. 973, № 012032. — P. 1–10.
7. Klikunova, A. Creation of digital elevation models for river floodplains / A. Klikunova, A. Khoperskov // *CEUR Workshop Proceedings*. — 2019. — Vol. 2391. — P. 275–284.
8. Khoperskov, A. Numerical model of shallow water: the use of nvidia cuda graphics processors / A. Khoperskov, S. Khrapov // *Communications in Computer and Information Science*. — 2016. — Vol. 687. — P. 132–145.
9. Khrapov, S. Dynamics of unstable sound waves in a non-equilibrium medium at the nonlinear stage / S. Khrapov, A. Khoperskov // *Journal of Physics Conference Series*. — 2018. — Vol. 973. — P. 1–11.
10. Rapid flood damage prediction and forecasting using public domain cadastral and address point data with fuzzy logic algorithms / J. L. Gutenson, A. N. S. Ernest, A. A. Oubeidillah, L. Zhu, X. Zhang, S. T. Sadeghi // *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. — 2018. — Vol. 54, № 1. — P. 104–123.
11. Thompson, R. J. A Model for the Creation and Progressive Improvement of a Digital Cadastral Data Base / R. J. Thompson // *Land Use Policy*. — 2015. — Vol. 49. — P. 565–576. — DOI: 10.1016/j.landusepol.2014.12.016.

REFERENCES

1. Volchek A.A. Затопления на территории Беларуси [Flooding on the Territory of Belarus]. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Vodokhozyaystvennoe stroitelstvo, teploenergetika i geoekologiya*, 2017, pp. 39-53.
2. Dyakonova T.A. Metod otsenki effektivnogo koeffitsienta sherokhovatosti v meandrirovannykh ruslakh na osnove chislennogo modelirovaniya [The Method of Estimation of the Effective Roughness Coefficient in the Meandering Channels Based on Numerical Simulation]. *Matematicheskaya fizika i kompyuternoe modelirovanie* [Mathematical Physics and Computer Simulation], 2018, vol. 21, no. 1, pp. 64-69.
3. *Postanovlenie Pravitelstva RF ot 18.04.2014 № 360 (red. ot 07.09.2019) «O zonakh zatopleniya, podtopleniya»* [Decree of the Government of the Russian Federation of April 18, 2014 N 360 (as Amended on September 07, 2019) “About Flooding Zones, Flooding”]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/499090951>.
4. Sokolovskiy E.V., Krivko V.V., Torbenko A.B. Vydelenie granits prirodnykh territoriy, podlezhashchikh spetsialnoy okhrane, sredstvami iskusstvennykh neyronnykh setey [Identification of the Boundaries of Natural Areas Subject to Special Protection by Means of Artificial Neural Networks]. *Sovremennye tekhnologii v deyatel'nosti osobo okhranyaemykh prirodnykh territoriy: geoinformatsionnye sistemy, distantsionnoe zondirovanie zemli*, 2019, pp. 127-129.
5. Klikunova A.Y., Khoperskov A.V., Agafonnikova E.O., Kuz'mich A.S., Dyakonova T.A., Khrapov S.S., Gusev I.M. Creation of Cadastral Maps of Flooding Based on Numerical Modeling. *Journal of Computational and Engineering Mathematics*, 2019, vol. 6, no. 2, pp. 3-17.
6. Dyakonova T., Khoperskov A. Bottom Friction Models for Shallow Water Equations: Manning's Roughness Coefficient and Small-Scale Bottom Heterogeneity. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 973, no. 012032, pp. 1-10.
7. Klikunova A., Khoperskov A. Creation of Digital Elevation Models for River Floodplains. *CEUR Workshop Proceedings*, 2019, vol. 2391, pp. 275-284.
8. 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, pp. 132-145.
9. Khrapov S., Khoperskov A. Dynamics of Unstable Sound Waves in a Non-Equilibrium Medium at the Nonlinear Stage. *Journal of Physics Conference Series*, 2018, vol. 973, pp. 1-11.

10. Gutenson J.L., Ernest A.N.S., Oubeidillah A.A., Zhu L., Zhang X., Sadeghi S.T. Rapid Flood Damage Prediction and Forecasting Using Public Domain Cadastral and Address Point Data with Fuzzy Logic Algorithms. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 2018, vol. 54, no. 1, pp. 104-123.

11. Thompson R.J. A Model for the Creation and Progressive Improvement of a Digital Cadastral Data Base. *Land Use Policy*, 2015, vol. 49, pp. 565-576. DOI: 10.1016/j.landusepol.2014.12.016.

DETERMINATION OF THE BOUNDARIES OF FLOODED ZONES BASED ON HYDRODYNAMIC MODELING

Tatyana A. Dyakonova

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Department of Information Systems and Computer Simulation,
Volgograd State University
dyakonova@volsu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0919-4206>
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Vladislava V. Krivko

Trainee of Junior Researcher,
Vitebsk State University named after P.M. Masherov
vlada.krivko@mail.ru
Prosp. Moskovskiy, 33, 210038 Vitebsk, Republic of Belarus

Ekaterina O. Agafonnikova

Associate Professor, Department of Information Systems and Computer Simulation,
Volgograd State University
agafonnikova@volsu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2862-4531>
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Anna Yu. Klikunova

Senior Lecturer, Department of Information Systems and Computer Simulation,
Volgograd State University
klikunova@volsu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4055-4601>
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Evgeniy V. Sokolovskiy

Trainee of Junior Researcher,
Vitebsk State University named after P.M. Masherov
falconlepel@gmail.com
Prosp. Moskovskiy, 33, 210038 Vitebsk, Republic of Belarus

Egor S. Savin

Assistant Lecturer, Department of Information Systems and Computer Simulation,
Volgograd State University
e.s.savin@volsu.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Abstract. The paper discusses the problem of determining the boundaries of flooding zones, minor flooding of territories. The paper describes a technique for constructing cadastral maps of flooded zones for various values of the estimated availability of water levels, which is based on hydrodynamic and geoinformation modeling. For creating digital elevation models (DEM) of the conformation, we use spatial data obtained from a large number of sources. We have applied the described technique to construct cadastral maps for a number of settlements in Volgograd region of the Russian Federation. As a result, we get a set of xml-files prepared for registration with the Federal Agency for State Registration, Cadastre and Cartography. For the Republic of Belarus, the problem of flooding of territories is also urgent. The floodplain areas of the Pripyat River are most prone to flooding. We have built a DEM for the area in the vicinity of Petrikov city and carried out hydrodynamic modeling. As a result, the inundation maps have been obtained. The method proposed in this work is based on a mathematical model of shallow water in a single-layer approximation. This model is successfully applied in simulation of flooding for territories by flood waters. Solving the problem of determining the boundaries of flooding zones requires transition to a two-layer shallow water model that takes into account the interaction of surface and ground waters.

Key words: cadastral map, numerical simulation, flood zones, shallow water model, digital elevation model.