

КАРТОГРАФИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОН ЗАТОПЛЕНИЯ В ГИС «ПАНОРАМА» НА ПРИМЕРЕ УЧАСТКА р. ПРИПЯТИ

А. П. ЗАЙЦЕВА¹⁾, Н. А. ШЕСТАКОВ¹⁾, А. А. ТОПАЗ¹⁾, А. Б. КАФТАНЧИКОВА¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Аннотация. Представлены методика и результаты картографического моделирования зон затопления участка долины р. Припяти вблизи г. Петрикова в ГИС «Панорама» на основе создания цифровых моделей рельефа. Построение цифровых моделей рельефа выполнено двумя методами: по данным топографических карт масштаба 1 : 100 000 и данным дистанционного зондирования Земли, полученным в рамках международного исследовательского проекта «Радиолокационная топографическая миссия шаттла» (*Shuttle radar topography mission*, SRTM). С использованием инструментов ГИС «Панорама» (версия 14) осуществлено моделирование зон затопления методом створов в пределах исследуемой территории. В результате картографического моделирования получены теоретические модели зон затопления при условии подъема уровня воды в р. Припяти на 3 и 6 м. Дополнительно рассчитаны площади зон вероятного затопления при подъеме уровня воды на 3; 4; 5; 6; 7; 8 и 9 м. Проведен сравнительный анализ цифровых моделей рельефа, построенных по данным топографических карт и радиовысотным данным SRTM, а также результатов картографического моделирования зон затопления на основе этих цифровых моделей рельефа. Результаты моделирования позволили определить границы возможного затопления в пределах исследуемого участка долины р. Припяти в случае возникновения опасной гидрологической обстановки, вызванной кратковременным (паводки) или долгосрочным (половодье) подъемом уровня воды в реке.

Ключевые слова: зона затопления; ГИС «Панорама»; картографическое моделирование; топографические карты; данные дистанционного зондирования Земли; SRTM; цифровая модель рельефа; ЦМР.

Образец цитирования:

Зайцева АП, Шестаков НА, Топаз АА, Кафтанчикова АБ. Картографическое моделирование зон затопления в ГИС «Панорама» на примере участка р. Припяти. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2025;1:35–46.
EDN: PZBVZU

For citation:

Zaitseva HP, Shastakou MA, Tapaz AA, Kaftanchykava HB. Cartographic modelling of flood zones in GIS «Panorama» on the example of a section of the Pripjat River. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology*. 2025;1: 35–46. Russian.
EDN: PZBVZU

Авторы:

Анна Павловна Зайцева – преподаватель-стажер кафедры геодезии и космоаэрокартографии факультета географии и геоинформатики.

Никита Алексеевич Шестаков – преподаватель кафедры геодезии и космоаэрокартографии факультета географии и геоинформатики.

Антонина Анатольевна Топаз – кандидат географических наук, доцент; заведующий кафедрой геодезии и космоаэрокартографии факультета географии и геоинформатики.

Анна Борисовна Кафтанчикова – старший преподаватель кафедры геодезии и космоаэрокартографии факультета географии и геоинформатики.

Authors:

Hanna P. Zaitseva, trainee lecturer at the department of geodesy and aerospace cartography, faculty of geography and geoinformatics.

zaitseva65297@gmail.com

Mikita A. Shastakou, lecturer at the department of geodesy and aerospace cartography, faculty of geography and geoinformatics.

shastakou23@gmail.com

Antanina A. Tapaz, PhD (geography), docent; head of the department of geodesy and aerospace cartography, faculty of geography and geoinformatics.

topaz_antonina@mail.ru

Hanna B. Kaftanchykava, senior lecturer at the department of geodesy and aerospace cartography, faculty of geography and geoinformatics.

abkaft@rambler.ru

CARTOGRAPHIC MODELLING OF FLOOD ZONES IN GIS «PANORAMA» ON THE EXAMPLE OF A SECTION OF THE PRIPYAT RIVER

H. P. ZAITSEVA^a, M. A. SHASTAKOU^a, A. A. TAPAZ^a, H. B. KAFTANCHYKAVA^a

^aBelarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: H. P. Zaitseva (zaiceva65297@gmail.com)

Abstract. The article presents the methodology and results of cartographic modelling of flood zones of the Pripyat River valley section near Petrikov in GIS «Panorama» based on the creation of digital elevation models. The digital elevation models were created using two methods: based on 1 : 100 000 scale topographic maps and Earth remote sensing data obtained within the framework of the international research project «Shuttle radar topography mission» (SRTM). Flood zones were modelled using the cross-section method within the study area using the tools of GIS «Panorama» (version 14). As a result of cartographic modelling, theoretical models of flood zones were obtained under the condition of a water level rise in the Pripyat River by 3 and 6 m. Additionally, the areas of probable flood zones were calculated with a water level rise of 3; 4; 5; 6; 7; 8 and 9 m. A comparative analysis of digital elevation models created using topographic maps and SRTM radio altitude data, and the results of cartographic modelling of flood zones based on these digital elevation models was conducted. The results of the modelling made it possible to determine the boundaries of probable flooding within the study section of the Pripyat River valley in the event of a dangerous hydrological situation caused by a short-term (floods) or long-term (flood) rise in the water level in the river.

Keywords: flood zone; GIS «Panorama»; cartographic modelling; topographic maps; Earth remote sensing data; SRTM; digital elevation model; DEM.

Введение

Наводнение – это значительное затопление местности в результате подъема уровня воды в реке, озере или море. Наиболее распространенными причинами наводнений являются снеготаяние, продолжительные дожди и ливни, заторы и зажоры льда на реках, прорывы дамб и плотин. На территории Беларуси наводнения обычно связывают с гидрологическим режимом рек: в период весеннего половодья фиксируют долгосрочное, а в период паводков – кратковременное повышение уровня воды. В начале весны на крупных реках могут происходить заторы (перегораживание русла многослойным скоплением льда во время ледохода), что в некоторых случаях также приводит к затоплению территорий, расположенных выше по течению.

Актуальность исследования обусловлена ежегодно наблюдающимися в Беларуси половодьями и паводками на крупных реках и, соответственно, необходимостью совершенствования и автоматизации систем мониторинга чрезвычайных ситуаций в целях своевременного прогнозирования и, как следствие, сокращения негативных последствий затоплений и наносимого ими ущерба для населения и хозяйственной деятельности.

Эффективным инструментарием для решения подобного рода задач обладают геоинформационные системы (ГИС) – системы, реализованные в виде аппаратно-программных многофункциональных комплексов, которые обеспечивают сбор, хранение, обработку, отображение и распространение пространственно координированных данных, интеграцию информации и знаний о территории (географическом объекте). В отличие от сложных методик математического моделирования современное программное ГИС-обеспечение позволяет выполнять компьютерное моделирование зон затопления достаточно быстро, наглядно и эффективно.

Целью работы является изучение возможностей картографического моделирования зон затопления прирусловых территорий на основе применения цифровых моделей рельефа (ЦМР) в ГИС «Панорама» на примере участка долины р. Припяти.

Объектом исследования выступают зоны затопления (в том числе вероятного) – участки местности, затапливаемые в результате поднятия уровня воды в реке (водоеме).

Материалы и методы исследования

Для прогнозирования и зонирования областей подтопления, подготовки к этому населения необходимо иметь не только исторические и метеорологические данные, но и оперативную информацию о зонах затопления, продолжительности паводка или половодья, геометрии русла реки, местах образования

заторов и наносов и т. п. В этом отношении методы дистанционного зондирования обладают явными преимуществами перед полевыми исследованиями, которые требуют больших затрат времени и имеют ряд дополнительных ограничений¹.

В Беларуси подтопление территорий чаще всего происходит во время разлива крупных рек в период весеннего половодья. Наиболее ярко выражены разливы рек весной в Гомельской (бассейны рек Припять, Днепр, Сож), Могилёвской (бассейны рек Днепр, Сож) и Гродненской (бассейн р. Неман) областях. В частности, слаборасчлененный водно-ледниковый, озерно-аллювиальный и аллювиальный рельеф территории Полесья способствует выходу р. Припяти из берегов на значительные площади при повышении уровня воды в реке. Помимо прочего, в районе г. Турова наблюдается сужение поймы р. Припяти до 6–8 км, а в районе г. Мозыря – до 1,5–2,0 км. На этом участке в р. Припять впадают такие крупные притоки, как Горынь, Случь, Уборть, Птичь² [1]. Все вышеизложенное дает основание выбрать для исследования участок долины р. Припяти в районе г. Петрикова (рис. 1).



Рис. 1. Территория моделирования зон затопления

Fig. 1. The territory of flood zones modelling

Для реализации практической части исследования взят участок р. Припяти, ограниченный створами в районе населенных пунктов Переров (на западе) и Жаховичи (на востоке). В пределах выделенного участка находится гидропост Петриков.

Площадь исследуемой территории составляет 2537,8 км² (253 780 га). Крайние точки участка имеют следующие географические координаты: 52° 20' с. ш., 28° 00' в. д. – северо-западная точка; 52° 20' с. ш., 29° 00' в. д. – северо-восточная точка; 52° 00' с. ш., 29° 00' в. д. – юго-восточная точка; 52° 00' с. ш., 28° 00' в. д. – юго-западная точка.

К настоящему времени накоплена достаточно обширная информация о водном режиме Полесья, позволяющая охарактеризовать его с учетом преобразования в процессе осушительной мелиорации. В водном режиме водотоков внутри года выделяются основные фазы – половодье, паводки и межень. Половодье ежегодно происходит весной в результате снеготаяния и выпадения дождей при снеготаянии. На р. Припяти оно обычно начинается в первой половине марта, в отдельные годы – в феврале или апреле. Продолжительность половодья составляет в среднем 3,0–3,5 мес.

Согласно данным Республиканского центра по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды (Белгидромет)³ в первом квартале 2024 г. мониторинг поверхностных вод в бассейне р. Припяти проводился в 33 пунктах наблюдений.

Паводковая ситуация на р. Припяти в течение первого квартала 2024 г. выглядела следующим образом: за январь в среднем по бассейну р. Припяти выпало 80,8 мм осадков, что составило 193 % от климатической нормы, за февраль – 64,5 мм осадков (159 %), за март – 32,3 мм осадков (72 %). В начале января на реках возобновились ледообразовательные процессы, в первой декаде почти повсеместно установился ледостав. В уровенном режиме рек в основном отмечался рост уровней воды до 34 см в сутки, в результате чего

¹Тоназ А. А., Шестаков Н. А., Лис К. Я. Картографирование зон затоплений по данным дистанционного зондирования Земли : учеб.-метод. рекомендации по курсу «Цифровая обработка космических снимков» для студентов специальностей 1-31 02 03 «Космоаэрокартография», 1-56 02 02 «Геоинформационные системы (по направлениям)». Минск : БГУ, 2024. 47 с.

²Блакiтная кнiга Беларусi (водныя аб'екты Беларусi) : энцыклапедыя / рэдкал.: Н. А. Дзiсько [i iнш.] ; маст. В. Г. Загароднi. Мiнск : Беларус. энцыкл. iмя Петруся Броўкi, 1994. 415 с.

³Сеть мониторинга поверхностных вод. Припять // Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды : сайт. Минск, 2008–2025. URL: <https://rad.org.by/articles/voda/observation-points-voda/basseyin.pripyati.html> (дата обращения: 25.02.2025).

на притоках р. Припяти (р. Случь у аг. Ленин и р. Птичь у д. Першая Слободка) уровни воды превысили опасные высокие отметки. На большинстве рек бассейна р. Припяти вода находилась в пойме. Таким образом, водность р. Припяти в первом квартале 2024 г. была значительно больше нормы.

По данным Гомельского областного управления МЧС Республики Беларусь, по состоянию на 22 марта 2024 г. в Гомельской области тальми и паводковыми водами были подтоплены 130 жилых домов, 25 подвалов жилых домов, 450 подворий, 211 хозяйственных построек, 34 участка дорог и 135 иных зданий и сооружений. Угроза неблагоприятных последствий затоплений для населения и хозяйственной деятельности обуславливает необходимость и актуальность выбора оперативных и эффективных методов решения задач.

Исследования по выявлению, расчету и моделированию зон затопления в бассейне р. Припяти и на территории Полесья в целом проводились многими авторами из Беларуси (А. А. Волчек, Т. А. Шелест, Д. А. Костюк, Д. О. Петров и др. [1; 2]). В ряде работ расчеты зон затопления были основаны на использовании оцифрованных профилей рельефа и матриц высот совместно с применением математических алгоритмов (моделей) распределения воды, однако не всегда интерпретировались в виде картографических данных.

Основные этапы исследования. Реализация исследования предусматривает последовательное выполнение следующих этапов.

Этап 1: выбор исходных данных.

Этап 2: создание проекта в ГИС «Панорама».

Этап 3: интеграция исходных данных в ГИС-проект.

Этап 4: построение ЦМР по данным топографических карт масштаба 1 : 100 000 и данным дистанционного зондирования Земли, полученным в рамках международного исследовательского проекта «Радиолокационная топографическая миссия шаттла» (*Shuttle radar topography mission, SRTM*).

Этап 5: сравнительный анализ результатов построения ЦМР и оценка их точности.

Этап 6: картографическое моделирование зон затопления на основе ЦМР, полученных по данным топографических карт масштаба 1 : 100 000 и данным SRTM.

Этап 7: сравнительный анализ результатов моделирования и оценка их точности.

Применение ГИС-технологий необходимо уже на этапе подготовки исходных данных, а также непосредственно при расчете ЦМР, моделировании зон затопления, анализе результатов прогнозирования развития гидрологической обстановки на территории региона для определения потенциальных социальных и экономических последствий наводнений [3].

В качестве исходных данных для построения графической и картографической информации, как правило, используются данные многолетних наблюдений за уровнем воды в реке, фактические и спрогнозированные расходы воды, а также подверженность пойменных территорий неблагоприятным и опасным гидрологическим явлениям [4; 5]. В таком случае картографическое моделирование является не только средством отображения процессов и явлений на географической карте, но и объективным критерием проверки данных, методом, генерирующим новую информацию об объектах окружающей действительности в виде информационных моделей [6; 7].

Построение ЦМР. Картографическое моделирование зон затопления и расчет основных морфометрических показателей временно затопленных участков в среде ГИС осуществляются прежде всего исходя из данных о рельефе местности и гидрологической обстановке (абсолютные отметки высот и водной поверхности реки): разность отметки водной поверхности и отметок высот точек местности берется за основу при определении зоны распространения разлива воды в период паводка или половодья. Отметки уровня воды в реке могут быть взяты из данных гидрометеорологических наблюдений (по гидропосту), а также из картографического материала, имеющегося для объекта исследования. Векторные топографические карты содержат сведения и о рельефе, и о среднем уровне воды в реке на определенную дату. Электронный формат карты позволяет оперативно обновлять информацию о семантике и метрике объектов на карте с учетом произошедших (или предполагаемых) изменений гидрологических условий местности.

Главная идея, на основе которой, как правило, реализуется моделирование паводкоопасных ситуаций, заключается в построении пересечения поверхности рельефа с водным зеркалом. Для этих целей используется ЦМР, построенная по горизонталям и отметкам высот на топографической карте, совместно с моделью текущей плоскости водной поверхности, построенной на основе результатов моделирования уровней воды.

Согласно определению Геологической службы США ЦМР, или матрица высот, – это цифровое картографическое представление высот поверхности Земли в узлах регулярной сетки в направлениях x и y , вертикальное значение которого привязано в пространстве к общему вертикальному датуму.

Технические инструкции ГИС «Панорама», с помощью которой выполнялись расчеты, определяют матрицу высот как трехмерную растровую модель местности, получаемую путем преобразования исходных векторных данных о местности в растровый вид и дальнейшего дополнения растровой модели

методом интерполяции. Матрица высот рельефа местности строится на основе информации об объектах на карте, имеющих абсолютную высоту или 3D-метрику, содержит абсолютные высоты рельефа местности либо сумму абсолютных и относительных высот объектов.

Стоит отметить, что ЦМР может применяться в качестве элемента географической основы при составлении общегеографических карт. С использованием данной модели производятся разнообразные расчеты и преобразования, выполняется построение производных морфометрических карт в автоматическом режиме, осуществляется создание гидрографических моделей. В ГИС «Панорама» ЦМР применяется в таких задачах анализа рельефа, как построение профилей и зон видимости, вычисление длины и площади объектов с учетом рельефа, моделирование зон затопления, определение направлений склонов, формирование трехмерной карты местности. Кроме того, ЦМР позволяет оценить спектр высот (статистику поверхности) заданного участка местности, получить отмывку рельефа в виде растра.

Растровая ЦМР содержит достаточный объем данных для определения общего рисунка сети стока и водосборных бассейнов. При этом точность ЦМР зависит от качества и разрешения исходной информации.

В качестве исходной информации для построения ЦМР в первом случае в работе использовались векторные топографические карты масштаба 1 : 100 000. Исследуемая территория ограничена рамками карт номенклатуры N-35-141 и N-35-142. Данные векторные карты были загружены в ГИС «Панорама» (версия 14). Построение матрицы высот исследуемой территории выполнено с помощью инструмента создание матрицы. В окне настроек параметров инструмента при этом были указаны область вывода (весь район), метод построения поверхности (в данном случае средневзвешенная интерполяция по 8 направлениям) и размер элемента (50 м).

Полученная матрица высот представлена на рис. 2. Для наглядности может быть применено наложение на матрицу высот основных (или же всех) элементов содержания топографической карты масштаба 1 : 100 000 (рельеф, гидрография, растительность и грунты, дорожная сеть, населенные пункты и пр.) в пределах листов исходных топографических карт (рис. 3).

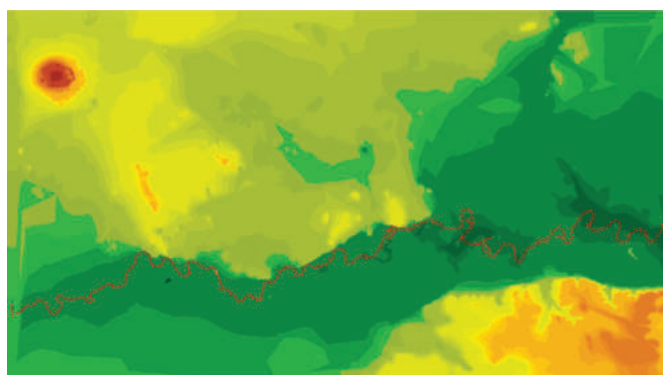


Рис. 2. Матрица высот, составленная по данным топографических карт масштаба 1 : 100 000 (красным цветом выделено русло р. Припяти)

Fig. 2. The terrain matrix based on topographic map data at a scale of 1 : 100 000 (the Pripyat riverbed is highlighted in red colour)

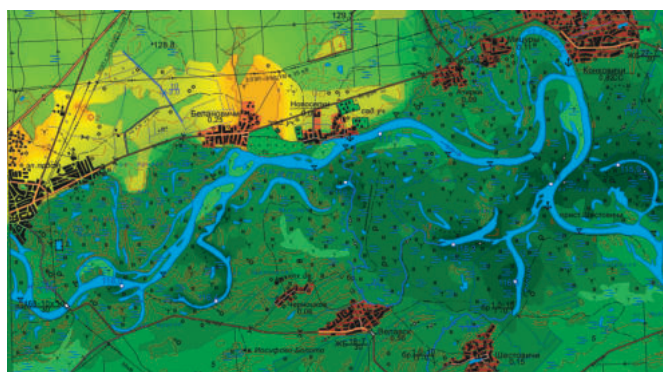


Рис. 3. Совмещение слоев векторной топографической карты и растра ЦМР

Fig. 3. Combining layers of the vector topographic map and the digital elevation model (DEM) raster

В качестве альтернативных данных о рельефе для построения ЦМР во втором случае в работе использовались радиовысотные данные SRTM, полученные в результате радиолокационных съемок Земли в 2000 г. с помощью радаров SIR-C и X-SAR. Общедоступными являются значения высот в углах ячейки размером $3 \times 3''$ [8–10]. Точность высот заявлена не ниже 16 м, однако, по оценкам исследований [11; 12], высоты ЦМР, построенных по данным SRTM, имеют ошибку, которая для равнинной местности составляет в среднем 2,9 м, а для холмистой – 5,4 м. Необходимо отметить, что отклонение от данных топографических карт не остается постоянным в пространстве. Такие погрешности возникли ввиду определения абсолютных высот любых относительно твердых поверхностей, в том числе поверхности крон деревьев. Согласно работе [13] применение матриц высот, полученных по данным SRTM, эффективно в случае отсутствия крупномасштабных топографических карт (от 1 : 10 000 до 1 : 50 000) при расчетах и картографировании границ и глубин зон затопления при любых заданных уровнях воды в реке. Использование этих матриц допустимо в условиях территории, не покрытой густой древесной и кустарниковой растительностью, при незначительной высоте снегового покрова, отсутствии старичных озер и оврагов в удалении на несколько десятков метров от пойменных бровок и крутых уступов надпойменных террас.

Радиовысотные данные о рельефе являются хорошей альтернативой данным, полученным традиционными методами (в особенности данным о рельефе территории, снятым с топографических карт). Кроме того, согласно исследованиям [14; 15] ЦМР, построенные по данным SRTM, схожи с ЦМР, построенными по данным топографических карт масштаба 1 : 100 000. Стандартные отклонения в этом случае составляют 27 м, а в случае использования топографических карт масштабов 1 : 200 000 и 1 : 50 000 равны 43 и 30 м соответственно [16]. В целом плоскоравнинный гравистый рельеф речных пойм относительно удовлетворительно отражают лишь крупномасштабные карты (1 : 10 000 и крупнее) с высотой сечения рельефа 1–2 м, но такие карты не являются общедоступными. По этой причине модели, построенные по данным SRTM, целесообразно применять в предварительных исследованиях при проектировании и поиске оптимальных вариантов детальных наземных инженерных изысканий в условиях плоскоравнинных безлесных территорий.

Следует учитывать, что ЦМР, используемая при определении гидрографических характеристик рек и их бассейнов, должна быть гидрологически корректной. Исходя из этого, в ЦМР должны отсутствовать фиктивные точки стока (фиктивные депрессии), а потоковые линии (талвеги) должны совпадать с исходными отрезками речной сети. Проведение гидрологической коррекции предполагает заполнение локальных понижений – небольших артефактных несуществующих замкнутых впадин на ЦМР, появление которых обычно связано с неточностью исходных данных. Локальные понижения или вершины представляют собой небольшие ошибки, возникающие из-за пространственного разрешения используемых данных или округления чисел до ближайшего целого значения [17]. В среде ГИС «Панорама» подобного рода недочеты могут быть исправлены программой при импорте матриц из файла формата GeoTIFF (при условии установки флажка напротив пункта «Вычислять значения высот в пустых элементах методом интерполяции»).

Точность построения ЦМР ограничена ввиду того, что модели высокой детальности, как и крупномасштабные карты, не являются доступными для широкого круга лиц.

Для построения матрицы рельефа данные SRTM необходимо импортировать в ГИС «Панорама». Исходная проекция данной матрицы (WGS-84) также требует преобразования к проекции используемых ранее топографических карт (рис. 4).

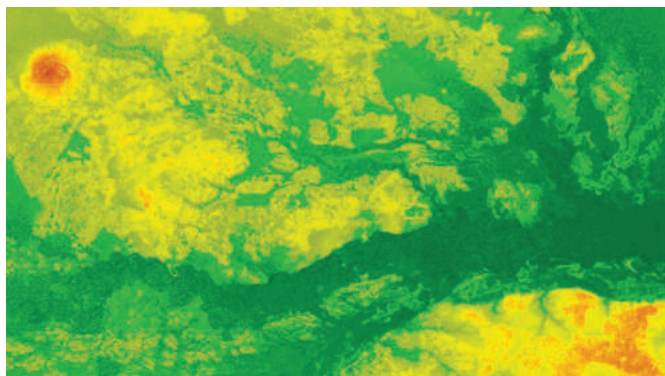


Рис. 4. Результат преобразования проекции матрицы рельефа по данным SRTM
Fig. 4. The result of transformation of elevation matrix projection from SRTM data

Сравнение результатов построения ЦМР. Полученная по данным SRTM матрица рельефа отличается большей детальностью, чем ЦМР, построенная по данным топографических карт, где ввиду значительной высоты сечения рельефа (20 м) поверхность интерполирована и отображена весьма обобщенно. В результате применения инструмента сравнения матриц получена карта, отражающая разность высот (модулей экстремумов) созданных ЦМР (рис. 5).

В ходе визуального анализа результатов сравнения матриц рельефа отмечено, что различия в высотах между ними являются незначительными и на большей части исследуемой территории (>70 %) составляют 1–5 м. Максимальная амплитуда высот на данном участке равна 13 м, что в два раза меньше, чем упомянутое ранее стандартное отклонение (27 м).



Рис. 5. Результат сравнения матриц, полученных по данным топографических карт масштаба 1 : 100 000 и данным SRTM

Fig. 5. The result of matrices comparison derived from 1 : 100 000 scale topographic maps and SRTM data

Картографическое моделирование зон затопления. При изучении местности в целях предварительной оценки природного риска для проектируемых и функционирующих инженерных сооружений, населенных пунктов, сельскохозяйственных земель, располагающихся в речных долинах, исходной информацией являются сведения о границах возможного затопления.

С помощью модуля «Прогноз ЧС» в ГИС «Панорама» смоделирован сценарий затопления участка долины р. Припяти по методу створов (инструмент расчет затопления методом створов). Для расчета моделей оператором вводятся следующие входные данные: метеорологические условия, координаты центра аварии, условия окружающей обстановки, а также сведения о рельефе местности в виде матриц высот (MTW). В окне настройки параметров инструмента необходимо выбрать векторный объект, указать уровень подъема воды, максимальную ширину зоны затопления и шаг расчета матрицы. Выходными данными являются расчетные показатели, полученные в результате моделирования, пространственные данные, пользовательские векторные карты в формате SIT, матрицы качеств (MTQ), содержащие результаты расчета поражающего фактора на местности.

В матрице качеств соответствующими весовыми коэффициентами заполняются те ячейки, координаты которых относятся к результатам расчета. Матрицы качеств и матрицы высот имеют единую структуру.

Полученная по описанной выше методике модель предназначена для оценки численных характеристик водонаполнения заданного бассейна при изменении уровня подъема воды, а также для получения графических документов, соответствующих рассчитанным численным характеристикам. При расчете зоны затопления используется информация о рельефе местности, следовательно, без матрицы высот в составе исходных данных его выполнение невозможно.

Для построения зоны затопления необходимо выбрать векторный площадный или линейный гидрографический объект на карте и указать точки, для которых задается уровень подъема воды. Первой указывается начальная точка подъема воды на берегу, второй – точка, задающая направление обхода берега, третьей – конечная точка подъема воды. На выбранном участке, где согласно сведениям Белгидромета в период половодья уровень воды в р. Припяти может подняться на 3 м, была построена соответствующая модель зоны затопления, а также спрогнозированы зоны вероятного затопления при подъеме уровня воды в реке на 6 м.

На основе матрицы высот, по которой выполняется моделирование, и значений превышения уровня воды в точках, ограничивающих исследуемый участок, программой определяется уклон местности (значения высот в точках участка выбираются из матрицы рельефа), формируются створы (отрезки, перпендикулярные осевым отрезкам русла реки), вычисляется уровень подъема воды для каждого створа, а затем производятся радиально-секторная развертка участков земной поверхности между соседними створами, построение профилей рельефа по направлениям развертки и расчет пространственных координат граничных точек распространения волны пропуска по линиям развертки. В результате решаются две задачи: вычисляются координаты граничных точек зоны затопления и уровень подъема воды в каждой точке (в пределах зоны затопления). Все значения помещаются в матрицу качеств (глубин). При отображении на экране растровая составляющая матрицы глубин визуализирует зону затопления. Кроме получения матрицы глубин, предусмотрена возможность создания объекта, отображающего границы зоны затопления.

По завершении работы инструмента в отдельном окне представляются как исходные, так и рассчитанные данные (рис. 6).

Исходные данные		
Параметр	Значение	Размерность
Координаты первой точки	52,074543	° с. ш.
Координаты первой точки	27,998851	° в. д.
Координаты второй точки	52,136698	° с. ш.
Координаты второй точки	28,998184	° в. д.
Уровень подъема воды в первой точке	3	м
Уровень подъема воды во второй точке	3	м
Максимальная ширина зоны	10000	м
Шаг матрицы	50	м
Рассчитанные данные		
Параметр	Значение	Размерность
Список зон		
Название зоны	Зона возможного наводнения (паводка)	
Периметр зоны	691,687698	км
Площадь зоны	243,69408	кв. км
Название зоны	Зона возможного затопления	
Периметр зоны	501,719415	км
Площадь зоны	538,552638	кв. км
<div>Сохранить</div> <div>Закрыть</div>		

Рис. 6. Результаты расчета модели зоны затопления на р. Припяти при превышении меженного уровня воды на 3 м на основе ЦМР, построенной по данным топографических карт масштаба 1 : 100 000

Fig. 6. The results of the flood zone on the Pripyat River modelling if the low-water level rises by 3 m based on a DEM derived from 1 : 100 000 scale topographic maps

Посредством инструмента построение зон затоплений методом створов были смоделированы зоны затопления при повышении уровня воды в р. Припяти на 3 и 6 м на основе ЦМР, построенных по данным топографических карт масштаба 1 : 100 000 (рис. 7) и данным SRTM (рис. 8).

Результаты и их обсуждение

При сравнительном визуальном анализе результатов картографического моделирования (см. рис. 7 и 8) видны различия в построении зон затопления на основе ЦМР, полученных с использованием разных источников информации – топографических карт и данных SRTM. В первом случае из-за высокой степени обобщения рельефа, обусловленного масштабом карт, построение зон затопления осуществляется на основе ЦМР, созданной в результате интерполяции рельефа по горизонталям, проведенным через 20 м. Из этого следует получение весьма обобщенных зон затопления, построенных по окружностям соответствующего радиуса с центрами в точках линии тальвега долины реки. Использование такого подхода к построению ЦМР является целесообразным только при моделировании зон затопления на мелкомасштабном уровне (например, 1 : 200 000, 1 : 500 000, 1 : 1 000 000). Картографирование зон затопления на крупно- и среднемасштабном уровнях требует более подробных данных о рельефе мест-

ности. Как отмечалось ранее, доступ к топографическим картам крупного масштаба ограничен, в связи с чем и возникает необходимость в поиске альтернативных источников информации (данные SRTM).

Сравнительный анализ результатов построения ЦМР показал, что даже в случае получения незначительной разницы в высотах рельефа при использовании инструмента сравнение матриц результаты моделирования зон затопления имеют существенные различия.

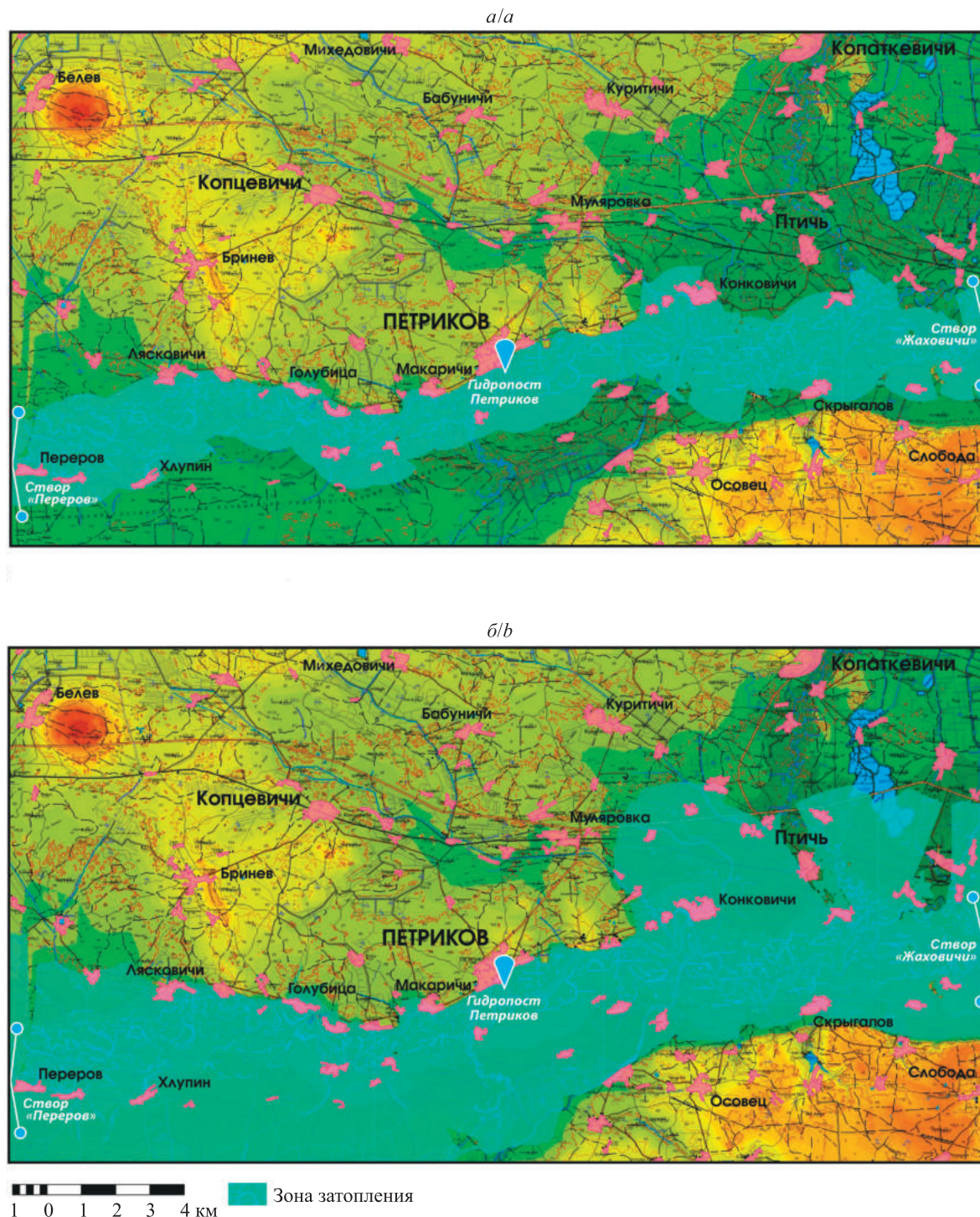


Рис. 7. Моделирование зон вероятного затопления на р. Припяти при превышении меженного уровня воды на 3 м (а) и 6 м (б) с использованием ЦМР, построенной по данным топографических карт масштаба 1 : 100 000

Fig. 7. Modelling of probable flood zones on the Pripet River when the low-water level exceeds 3 m (a) and 6 m (b) using DEM based on 1 : 100 000 scale topographic maps

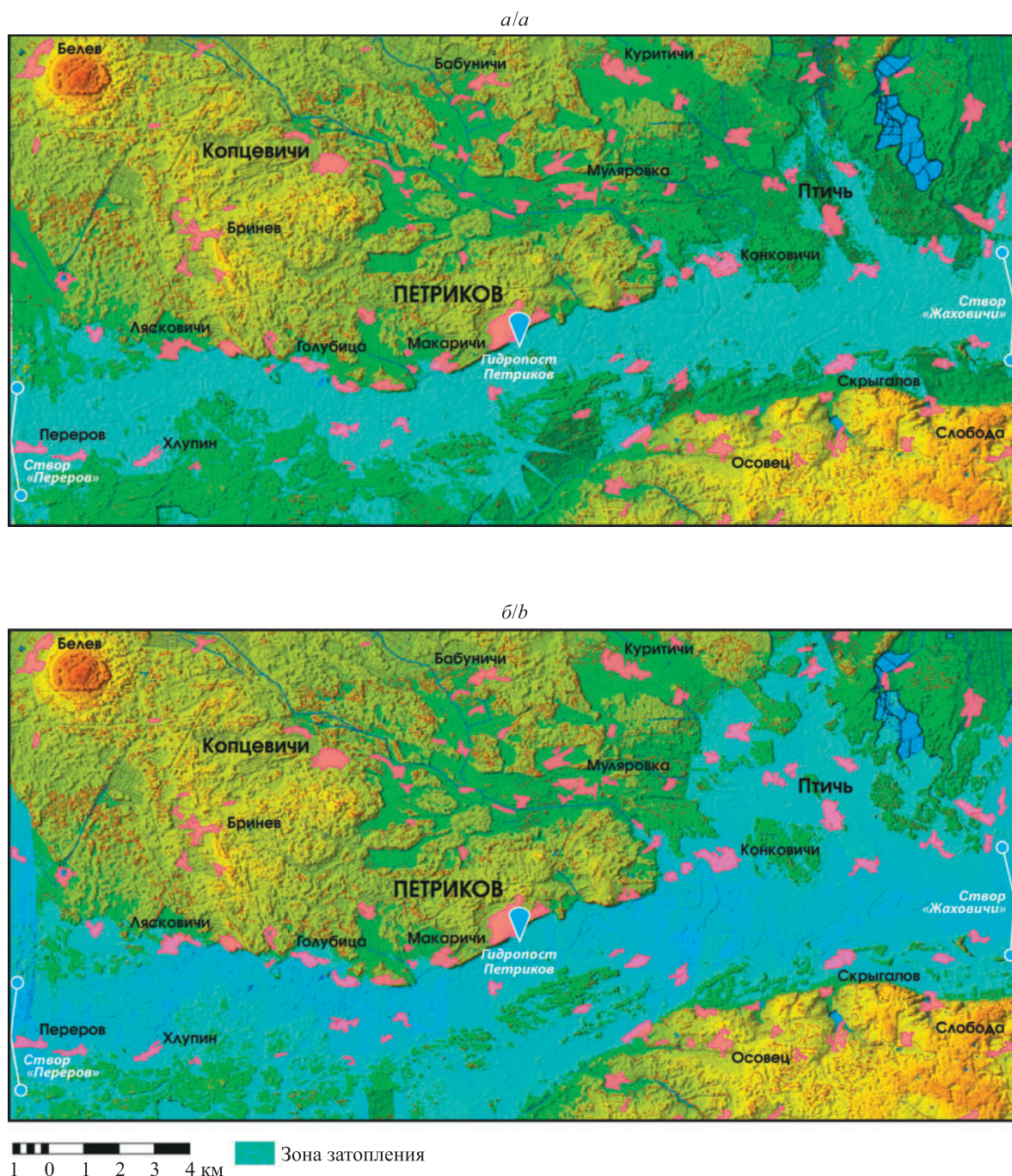


Рис. 8. Моделирование зон вероятного затопления на р. Припять при превышении меженного уровня воды на 3 м (*а*) и 6 м (*б*) с использованием ЦМР, построенной по данным SRTM

Fig. 8. Modelling of probable flood zones on the Pripet River when the low-water level exceeds 3 m (*a*) and 6 m (*b*) using DEM based on SRTM data

По данным Белгидромета, максимальный уровень воды в р. Припяти в 2024 г. достиг 811 см в период с 28 февраля по 2 марта. Абсолютный максимум за 2021–2024 гг. составил 878 см. Опасным уровнем воды на гидропосту Петриков считается отметка 760 см.

По результатам моделирования зон вероятного затопления в ГИС «Панорама» с помощью инструмента построение зон затоплений методом створов были проведены расчеты площади зон вероятного затопления при поднятии уровня воды на 3 и 6 м. Дополнительно рассчитаны значения площади в случае поднятия уровня воды в р. Припяти на 4; 5; 7; 8 и 9 м (см. таблицу).

**Расчет площади зоны вероятного затопления на р. Припяти
с учетом изменения уровня воды**
**Calculation of the area of the probable flood zone on the Pripyat River
taking into account changes in the water level**

Уровень подъема воды, м	Площадь зоны вероятного затопления, км ² (га)	Число населенных пунктов, попадающих в расчетные зоны затопления
3	339,77 (33 977)	27
4	500,81 (50 081)	31
5	528,95 (52 895)	36
6	697,46 (69 746)	46
7	843,46 (84 346)	48
8	945,25 (94 525)	50
9	1038,26 (103 826)	51

Кроме того, в таблице приведено количество населенных пунктов, входящих в зону вероятного затопления при заданном уровне подъема воды. Всего на территории исследования насчитывается 147 населенных пунктов (преимущественно сельских), из них 65 населенных пунктов имеют численность населения менее 100 человек, 63 населенных пункта – от 100 до 500 человек, 15 населенных пунктов – от 500 до 1000 человек, 4 населенных пункта (г. Петриков, аг. Птичь, п. Копцевичи и г. п. Копаткевичи) – более 1000 человек.

Зоны затопления, построенные на основе ЦМР, полученных по данным SRTM, являются более подробными и правдоподобными, что связано с разрешением матрицы высот (около 30 м/пк). Однако необходимо учитывать, что в некоторых случаях разрешение данных может быть чуть хуже из-за различных факторов (сильно расчлененный рельеф местности, ошибки и погрешности в исходной информации). В ситуации с пологим рельефом указанные факторы будут иметь весьма малое значение.

Таким образом, приведенные выше результаты подтверждают пригодность используемых данных для моделирования зон затопления. Однако для проведения более детальных исследований следует использовать картографические источники масштаба 1 : 50 000 и крупнее (при наличии доступа к таким картам).

Заключение

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Для моделирования зон затопления могут быть использованы как топографические карты, так и радиовысотные данные SRTM. При этом точность построения ЦМР зависит от детальности и подробности исходных данных: масштаба (для топографических карт), который, в свою очередь, влияет на высоту сечения рельефа, изображаемого на картах; разрешения растра (для данных SRTM). Выбор источника пространственных данных определяется целями и задачами моделирования, а также требованиями, предъявляемыми к точности получаемых моделей. Исходя из результатов построения ЦМР, устанавливается необходимость в гидрологической коррекции.

2. Инструментарий ГИС «Панорама» (версия 14) позволяет достаточно эффективно и в полной мере производить моделирование зон затопления (в том числе вероятного), а также рассчитывать их площадь в зависимости от уровня подъема воды в реке.

3. Полученный картографический материал (результаты моделирования зон затопления) может применяться при прогнозировании и оценке потенциального риска наступления чрезвычайной ситуации в районах с высокой угрозой подтоплений при условии комплексного использования результатов картографического моделирования и гидрометеорологической информации как в кратковременный (паводки), так и в долгосрочный (половодье) период, а также при разработке наиболее рациональных подходов к защите населения, что позволит своевременно предпринять меры по снижению материального и социального ущерба от последствий затоплений.

В заключение стоит отметить, что картографическое моделирование зон затопления может проводиться при недостатке сведений или отсутствии гидрометрических наблюдений для территорий с неблагоприятной паводковой обстановкой, что в дальнейшем дает возможность оценивать риски ущерба населению, инфраструктуре, промышленным и социально-культурным объектам, в том числе мелиорируемым сельскохозяйственным землям и их инфраструктуре, а также разрабатывать наиболее рациональные способы защиты от последствий чрезвычайных ситуаций на водных объектах и гидротехнических сооружениях.

Библиографические ссылки

1. Волчек АА, Шелест ТА. *Паводки на реках Беларуси*. Брест: Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина; 2016. 199 с.
2. Волчек АА, Костюк ДА, Петров ДО. К вопросу расчета затопления для системы мониторинга и прогнозирования паводка. В: Пойта ПС, Волчек АА, Валуев ВЕ, Басов СВ, Водич НН, Житенев БН и др., редакторы. *Научно-технические проблемы водохозяйственного и энергетического комплекса в современных условиях Беларуси. Сборник материалов Международной научно-практической конференции; 21–23 сентября 2011 г.; Брест, Беларусь. Часть 1*. Брест: Издательство Брестского государственного технического университета; 2011. с. 27–29.
3. Стахан ТН. Моделирование наводнений с использованием геоинформационных систем (ГИС). *Студенческий форум [Интернет]*. 2019 [процитировано 17 декабря 2024 г.]; 22(часть 2):5–9. Доступно по: <https://nauchforum.ru/journal/stud/73/54767/>. EDN: НКWKYH.
4. Орлянкин ВН, Алешина АР. Способы расчетов и картографирования пространственно распределенных гидрологических характеристик рек при возможных катастрофических паводках в условиях отсутствия данных гидрометрических наблюдений в целях предотвращения ЧС или снижения ущерба от наводнения. В: Центр «Антистихия» МЧС России. *Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций. Сборник докладов и выступлений на XVI Всероссийской научно-практической конференции; 27–28 сентября 2017 г.; Москва, Россия*. Москва: Центр «Антистихия» МЧС России; 2017. с. 172–177.
5. Павлов СВ, Христоуло ОИ, Шарафутдинов РР. Разработка геоинформационной модели речной сети с учетом картографической, гидрологической и морфометрической информации для определения границ зон затоплений при изменении уровня воды в водных объектах. *Вестник УГАТУ. Управление, вычислительная техника и информатика*. 2008;11(1):18–27. EDN: JXEBWF.
6. Борщ СВ, Самсонов ТЕ, Симонов ЮА, Львовская ЕА. Визуализация гидрологической обстановки в бассейнах крупных рек средствами ГИС-технологий. *Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации*. 2013;349:47–62. EDN: RDJAJB.
7. Балдаков НА, Ловцкая ОВ. Способы визуализации результатов расчета зон затопления пойменных территорий средствами ГИС. В: Сибирский государственный университет геосистем и технологий. *Интерэкспо Гео-Сибирь. XIV Международный научный конгресс; 23–27 апреля 2018 г.; Новосибирск, Россия. Сборник материалов Международной научной конференции «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология». Том 1*. Новосибирск: Сибирский государственный университет геосистем и технологий; 2018. с. 267–274. EDN: VSFLPY.
8. Farr TG, Hensley S, Rodriguez E, Martin J, Kobrick M. The shuttle radar topography mission. In: Harris RA, Ouwehand L, editors. *Proceedings of the CEOS SAR Workshop; 1999 October 26–29; Toulouse, France*. Noordwijk: European Space Agency; 2000. p. 361–363 (European Space Agency special publications; volume 450).
9. Karwel AK, Ewiak I. Estimation of the accuracy of the SRTM terrain model on the area of Poland. In: Jun C, Jie J, van Gendren J, editors. *The International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences. Volume 37, part B7*. Beijing: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing; 2008. p. 169–172.
10. Rodríguez E, Morris CS, Belz JE, Chapin EC, Martin JM, Daffer W, et al. *An assessment of the SRTM topographic product*. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory; 2005. 143 p. Report No.: D-31639.
11. Карионов ЮИ. Оценка точности матрицы высот SRTM. *Геопрофи*. 2010;1:48–51.
12. Орлянкин ВН, Алешина АР. Использование матриц высот SRTM в предварительных расчетах и картографировании глубин потенциального паводкового затопления речных пойм. *Исследование Земли из космоса*. 2019;5:72–81. DOI: 10.31857/S0205-96142019572-81.
13. Павлова АН. Геоинформационное моделирование речного бассейна по данным спутниковой съемки SRTM (на примере бассейна р. Терешки). *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле*. 2009;9(1):39–44. DOI: 10.18500/1819-7663-2009-9-1-39-44.
14. Ерицян ГГ. Сравнение цифровых моделей рельефа, полученных с топографических карт масштаба 1 : 50 000, 1 : 100 000 и 1 : 200 000, с ЦМР SRTM. *Известия НАН Республики Армения. Науки о Земле*. 2013;66(1):39–47.
15. Трофимов АА, Филиппова АВ. Оценка точности матрицы высот SRTM по материалам топографических съемок. *Геопрофи*. 2014;6:13–17.
16. Муравьев ЛА. Высотные данные SRTM против топографической съемки. В: Маловичко АА, Маловичко ДА, Костицын ВИ, Уткин ВИ, редакторы. *Восьмая Уральская молодежная научная школа по геофизике. Сборник научных материалов; 19–23 марта 2007 г.; Пермь, Россия*. Пермь: Горный институт Уральского отделения Российской академии наук; 2007. с. 174–177.
17. Чумаченко АН, Хворостухин ДП, Морозова ВА. Построение гидрологически корректной цифровой модели рельефа (на примере Саратовской области). *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле*. 2018;18(2): 104–109. DOI: 10.18500/1819-7663-2018-18-2-104-109.

Получена 07.11.2024 / исправлена 03.03.2025 / принята 06.03.2025.
Received 07.11.2024 / revised 03.03.2025 / accepted 06.03.2025.