

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТРИЦ ВЫСОТ SRTM В ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ РАСЧЕТАХ И КАРТОГРАФИРОВАНИИ ГЛУБИН ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ПАВОДКОВОГО ЗАТОПЛЕНИЯ РЕЧНЫХ ПОЙМ

© 2019 г. В. Н. Орлянкин *, А. Р. Алешина

Научный геоинформационный центр РАН, Москва

**E-mail: vadim.orlyankin@yandex.ru*

Поступила в редакцию 14.03.2019 г.

В статье показаны возможности использования модели SRTM с целью поисков оптимальных вариантов детальных наземных инженерных изысканий в условиях плоскоравнинных безлесных территорий. Авторами проведено исследование точности модели SRTM по территории Российской Федерации южнее 60° с.ш., а также сопредельным странам (17 стран Европы и 10 стран Азии). Демонстрируется составленная карта зональности выявленных систематических ошибок матрицы высот SRTM. На примере Раменского участка долины реки Москва (в районе городов Жуковский и Раменское) определены абсолютные высоты поверхности зоны паводкового затопления, рассчитаны и картированы границы и глубины затопления при паводке 1% обеспеченности. Предложены карты объектов инженерной защиты от затопления территории этого участка в масштабе 1:100 000 и крупнее, а также частей долин рек Москва и Ока в более мелком масштабе — 1:1 000 000.

Ключевые слова: матрица высот SRTM, систематическая ошибка, река, поверхность поймы, глубины затопления, инженерная защита

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019572-81>

ВВЕДЕНИЕ

На предварительных (рекогносцировочных) этапах различных профильных изысканий, связанных с получением пространственно-распределенных характеристик (количественных параметров) территории, например, при зонировании природных рисков для сооружений в зонах потенциального (возможного) паводкового затопления, составлении карт земельного кадастра или при планировании мелиорации земель, в условиях плоскоравнинного рельефа могут возникать трудности с получением адекватной числовой информации о малоамплитудном рельефе исследуемого участка. На имеющихся в общедоступном пользовании (в сети Интернет) цифровых моделях рельефа (ЦМР), созданных на базе топографических карт масштаба 1:100 000, горизонтالي проведены, как известно, с шагом 20 м (полугоризонтالي — через 10 м). Поэтому часто создаются ситуации, когда в пределах какого-либо локального заданного участка равнинной местности площадью в сотни и даже первые тысячи км², где амплитуда высот рельефа менее 20 м, горизонтالي на ЦМР масштаба 1:100 000 (как, например, на пойме реки Ока между г. Серпуховом и г. Коломной), могут вообще отсутствовать, а точки опорной геодезической сети с высотными отметками часто единичны и потому малоинформативны.

Плоскоравнинный гривистый рельеф речных пойм относительно удовлетворительно отражается лишь крупномасштабными картами (или

планами) масштаба 1:10 000 и крупнее с сечением рельефа 2 м, 1 м или 0.5 м. Но они не являются общедоступными и к тому же создавались только локально в пределах городов, промышленных, горно-добывающих, гидротехнических и других ограниченных в пространстве объектов.

С начала XXI в. ситуация существенно изменилась в связи с появлением в глобальной сети Интернет матрицы высот SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) в виде цифровой модели рельефа Земли — результата радарной интерферометрической съемки поверхности Земли между 60° с.ш. и 54° ю.ш., проведенной специалистами США с борта космического корабля многоцелевого использования.

Как известно, на территории России общедоступной (в Интернете) является версия SRTM с абсолютными высотами земной поверхности в углах ячеек размером 3"×3" или примерно 90×90 м. Заявленная разработчиками точность SRTM по высоте — не ниже 16 м (неясно — с плюсом или минусом). За истекшие почти два десятилетия точность высот матрицы SRTM исследовалась, оценивалась и обсуждалась множество раз во многих странах мира, в том числе, и в Российской Федерации. Так, в зависимости от типа рельефа Земли по данным (Korwel, 2008), ошибки высот матрицы SRTM на равнинной местности

оцениваются в среднем в 2.8 м, а для холмистой местности — 5.4 м (также не дан знак ошибки). В работе (Rodriguez et al., 2006) приведены фактические параметры точности модели SRTM по каждому континенту Земли, например, для Евразии точность по высоте составляет +8.8 м. По-видимому, последнее число получено при анализе всей территории континента, включая горы, леса, города.

Что касается соответствующих исследований в Российской Федерации, необходимо отметить их пространственную локальность — только в пределах какого-либо изолированного участка местности, площадью в десятки и не более первых сотен км². Например, исследовались участки с равнинным рельефом около г. Саратова — 36 км², с горным рельефом на о. Ольхон (Байкал) — 37 км² и с высокогорьем в районе г. Сочи — 36 км² (Карионов, 2011). Изначальная точность изображений в плане на SRTM — десятки метров, а как показывают последующие исследования, в горных районах на крутых склонах ошибки по высоте часто превышают и 100 м, и очевидно, что случайные ошибки по высоте в матрице SRTM пропорциональны крутизне склонов земной поверхности. Учитывая также, что SRTM фиксирует отражающую поверхность любых обширных техногенных сооружений (плотную застройку городов и промышленных зон) и сомкнутых крон древесно-кустарниковой растительности (Оньков, 2011), во

многих работах использование SRTM для серьезных инженерных изысканий не рекомендуется. Однако, по нашему мнению, априори можно полагать, что модель SRTM целесообразно применять в предварительных исследованиях с целью поисков оптимальных вариантов детальных наземных инженерных изысканий в условиях плоскоравнинных безлесных территорий.

КАРТА ЗОНАЛЬНОСТИ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ОШИБОК ВЫСОТ МАТРИЦЫ SRTM

Для практического использования модели SRTM, очевидно, необходимы данные о высотах матрицы SRTM в конкретном заданном участке местности, где намечаются изыскания, но отсутствуют вообще или недоступны крупномасштабные топографические карты. Предыдущие исследования (Ерицян, 2011) и наши настоящие показывают, что при сравнении ЦМР, полученных с топографических карт масштабов 1:50 000, 1:100 000 и 1:200 000 с ЦМР SRTM, наиболее близкими значениями к SRTM обладают карты ЦМР масштаба 1:100 000.

Ранее установлено (Трофимов, 2014) и подтверждается нами, что случайные ошибки в матрице высот SRTM (включая артефакты на акватории рек и озер) имеют нормальное распределение и могут быть сглажены в процессе первичной

Таблица 1. Показатели точности высот матрицы SRTM (в метрах)

№	Z_{SRTM}	$Z_{\text{топо}}$	$\Delta Z_i = Z_{\text{SRTM}} - Z_{\text{топо}}$	$\delta_Z = \Delta Z_i - \Delta_Z$	δ_Z^2
1	96.4	100.2	-3.8	0.2	0.04
2	96.3	100.4	-4.1	-0.1	0.01
3	96.3	100.3	-4.0	0	0
4	96.4	100.1	-3.7	0.3	0.09
5	95.9	100.2	-4.3	-0.3	0.09
6	96.0	100.1	-4.1	-0.1	0.01
7	96.1	100.0	-3.9	0.1	0.01
8	96.1	99.9	-3.8	0.2	0.04
9	96.4	100.5	-4.1	-0.1	0.01
10	96.1	100.3	-4.2	-0.2	0.04
			$\sum_{i=1}^n Z_i = -40.0$		$\sum_{i=1}^n \delta_Z^2 = 0.34$

генерализации. Поэтому считается, что модель SRTM может быть использована при оперативной оценке крупных форм рельефа до начала проведения детальных инженерно-геодезических изысканий. Для получения более точной информации о рельефе необходимо знать и учитывать также систематическую ошибку в матрицах высот SRTM.

Например, можно взять простейший случай, где в пределах плоскоравнинного участка, размерам соответствующего в масштабе 1:100 000 листу формата А4, измерены отклонения высот матрицы SRTM от данных топографической карты в 10 точках, относительно равномерно распределенных по площади участка. Эти измерения зафиксированы в таблице 1.

Систематическая ошибка высот SRTM (Δ_z) на участке равна сумме всех измеренных на участке отклонений ΔZ_i , деленной на число измерений (n). Тогда в нашем случае:

$$\Delta_z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta Z_i = \frac{40.0}{10} = 4.0 \text{ м}$$

или округленно $\Delta_z = 4$ м.

Случайные ошибки высот SRTM (δ_z) определяются индивидуально для каждой точки: $\delta_z = \Delta Z_i - \Delta_z$. Оценка случайных ошибок на участке может быть проведена путем расчета средней квадратической случайной ошибки (Root Mean Square Error):

$$RMSE_{\delta_z} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_z^2} = \sqrt{0.34/10} = 0.18 \text{ м.}$$

Если на имеющейся в Интернете ЦМР, созданной на основе топографической карты масштаба 1:100 000, в пределах, например, заданного участка с достаточно широкой (1 км и более) речной поймой имеется горизонталь (полугоризонталь) или несколько равномерно размещенных по участку высотных отметок опорной геодезической сети, то пользователь может определить местную систематическую ошибку высот SRTM самостоятельно. Но, как уже отмечалось, такие условия имеют далеко не всегда. Тогда бывает необходимо знать, как изменяются в пространстве параметры точности SRTM, каков градиент изменения систематической ошибки, с тем, чтобы интерполяцией между ближайшими участками с известной (или легко определяемой) систематической ошибкой хотя бы приближенно оценить искомую местную систематическую ошибку высот матрицы SRTM.

Как показывают наши исследования, эта ошибка (отклонение от данных топографических карт) не остается постоянной в пространстве.

В процессе исследований нами использованы два способа расчета систематических отклонений абсолютных отметок рельефа на матрице SRTM от рельефа, изображенного на топографических картах:

- совмещением пространственно распределенных высотных отметок опорных геодезических сетей на топографических картах и интерполируемых отметок на матрицах высот SRTM;

- совмещением горизонталей и полугоризонталей топографических карт масштаба 1:100 000 (с шагом соответственно 20 и 10 м) с абсолютными высотами матриц SRTM, получаемыми интерполяцией между смежными горизонталями матрицы SRTM с шагом 1 м в речных долинах с известной высотой половодья (паводка) до 5 м, с шагом 2 м в долинах с высотой половодья от 5 до 20 м.

Исследование по выявлению систематической ошибки матрицы высот SRTM было проведено нами на территории Российской Федерации и сопредельных стран к югу от 60° с.ш. с относительно равномерным пространственным распределением 370 тестовых участков, площадью 360 км² каждый (в формате А4) на территории Российской Федерации и 17 стран Европы (Украины, Белоруссии, Литвы, Латвии, Эстонии, Швеции, Дании, Польши, Германии, Венгрии, Румынии, Болгарии, Сербии, Словакии, Грузии, Армении, Азербайджана) и 10 стран Азии (Казахстана, Узбекистана, Туркменистана, Кыргызстана, Таджикистана, Монголии, Китая, Афганистана, Ирана, Турции). Вычислялись отклонения высот только на безлесных незастроенных субгоризонтальных площадях с крутизной склонов менее 10%. Для этого в программу Global Mapper 18 загружались топографические карты в системе координат UTM 84 масштаба 1:100 000 (или, в отсутствие последних, 1:200 000) для определенного тестового участка. Затем для исследуемого участка загружалась модель матрицы высот SRTM. Сравнение SRTM и топографических карт проводилось следующим образом. Модель SRTM в программе Global Mapper 18 с помощью инструмента Generate Contour (from Terrain Grid) разбивалась на полигоны по значениям высот через каждые 2 м. Полученное изображение совмещалось с топографической картой, и высоты матрицы SRTM (цветные полигоны) сравнивались с высотами топосновы по горизонталям и полугоризонталям и отметкам высот опорной геодезической сети.

На основе этих исследований составлена карта зональности распределения систематических ошибок высот матрицы SRTM (рис. 1) с дискретностью 1 м в диапазоне шкалы поправок от -2 м (Эстония, Ферганская долина, Восточная Грузия)

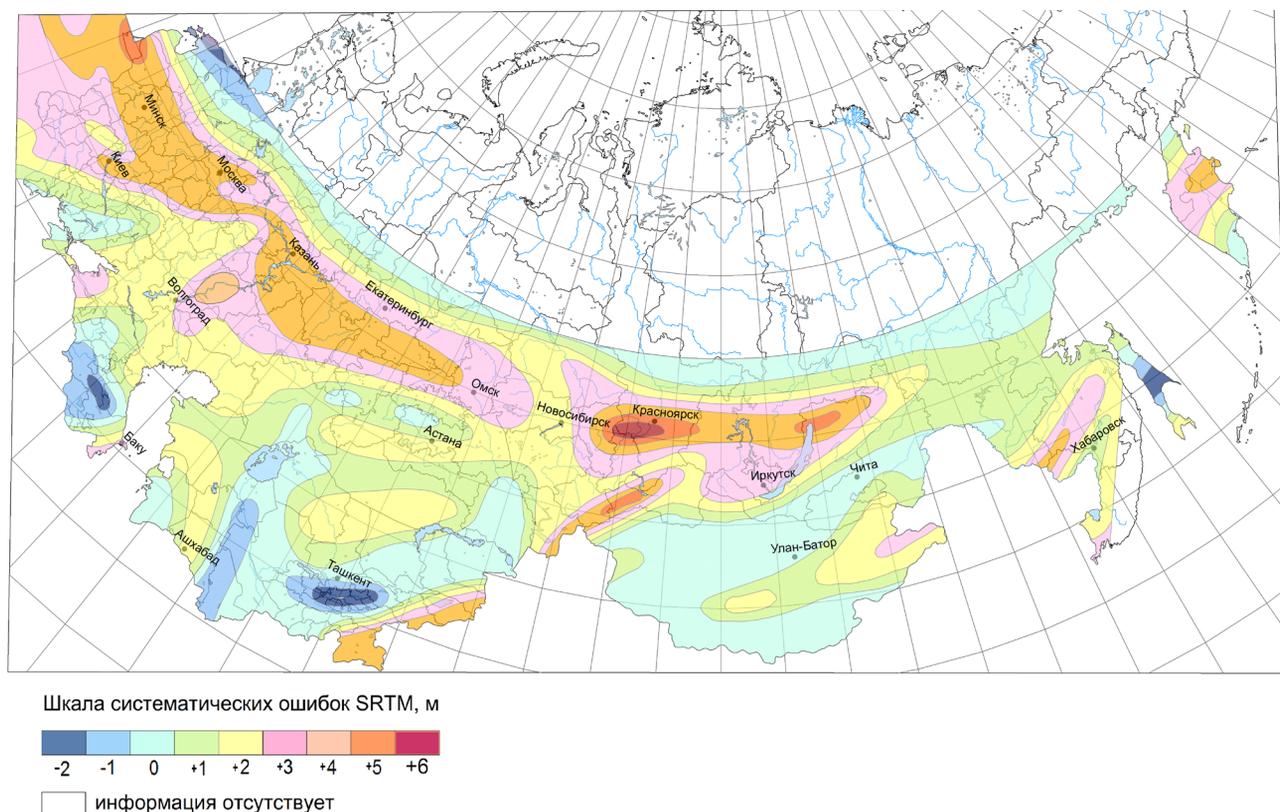


Рис. 1. Карта зональности систематических ошибок на матрице высот SRTM в пределах территории Северной Евразии.

до +5 м (Калининградская область) и +6 м (район Красноярска). Эта карта является, по существу, и картой поправок к матрицам высот SRTM (с обратным знаком).

Составленная карта зональности оказалась структурированной на относительно крупные зоны, в границах каждой из которых систематические ошибки SRTM по высоте ΔZ показаны кратные единице (в метрах). В каждой зоне во всех входящих в нее тестовых участках ошибки ΔZ варьируют в пределах $\Delta Z \pm 0.5$ м, т.е. значения ΔZ округлялись до кратного единице числа. Например, в самой крупной в России широтно ориентированной близ 52° – 55° с.ш. зоне ΔZ изменяется от -3.5 м до -4.5 м, в нулевых зонах — от -0.5 м до $+0.5$ м и т.д. Образованные на карте структуры в большинстве случаев ориентированы своей длинной осью субширотно. Градиенты ΔZ в поперечном направлении этих структур местами достигают величины 1 м на 100 км. Вдоль северного края карты (60° с.ш.) на всех тестовых участках ΔZ близка к нулю.

В странах Средней Азии упомянутые структуры принимают также и субмеридиональное положение. В Западной Китае, Афганистане, Иране и Турции, наряду с нулевыми значениями ΔZ , часто отмечаются и $\Delta Z = -10 \dots -15$ м,

что, по-видимому, является следствием недостаточно высокого качества топографических карт масштаба 1:100 000 на отдельных участках, и потому указанные страны в составленную карту (рис. 1) нами не включены.

Конфигурация изолиний поправок (ΔZ) и ориентировка их региональных площадных структур на карте явно не коррелируются ни с рельефом, ни с геологическим строением, ни с гравиметрическим полем. Вопрос о генезисе этих структур остается пока открытым.

Применение матриц высот SRTM, в которых систематические ошибки исправлены на основе данных карты зональности этих ошибок и соответствующих поправок (с обратным знаком) (рис. 1), достаточно эффективно в отсутствие крупномасштабных топографических карт (1:50 000–1:10 000) при расчетах и картографировании границы зоны паводкового затопления и глубин воды в изобатах при уровнях воды в реке любой заданной обеспеченности на открытых незастроенных территориях поймы, не покрытых густой древесной и кустарниковой растительностью, при малой толщине снегового покрова и добавим — вне речных русел, старичных озер, оврагов, в удалении на несколько десятков метров от пойменных бровок и от крутых уступов надпойменных террас.

СОСТАВЛЕНИЕ КАРТ ГРАНИЦ И ГЛУБИН ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ПАВОДКОВОГО ЗАТОПЛЕНИЯ В РЕЧНЫХ ДОЛИНАХ

По данным водомерных постов гидрометеослужбы (в соответствующих каталогах наивысших уровней воды) определяют абсолютную высоту наивысшего уровня воды в заданном створе в пик половодья (паводка) любой требуемой обеспеченности. Абсолютная высота уровня воды рассчитывается прибавлением величины наивысшего уровня воды (в см) к абсолютной отметке «нуля графика» водопоста. Если отметка «нуля графика» дана не в «балтийской системе» (БС), а в условных единицах, то за начало отсчета берутся интерполируемые отметки уреза воды меженного уровня на топографических картах.

При отсутствии данных гидрометрических наблюдений для незарегулированных пойменных рек предлагаем для заданного створа следующую полуэмпирическую формулу приближенного расчета наивысшего уровня воды 1% обеспеченности:

$$h_{1\%} = a \cdot \bar{n}^{0.6} \left(\frac{F}{B \cdot i} \right)^{0.3},$$

где \bar{n} — средневзвешенный коэффициент шероховатости русла и поймы (СП 33–101–2003);

F — площадь водосбора выше заданного створа, км²;

B — средняя ширина поймы (зоны затопления) в районе заданного створа, м;

i — местный продольный уклон водной поверхности реки, в долях единицы;

a — поправочный безразмерный коэффициент, определяемый после расчетов по \bar{n} , F , B и i на ближайших пунктах реки-аналога с известным (из справочников) уровнем воды 1% обеспеченности.

При правильных замерах по картам и материалам космических съемок указанных морфометрических параметров точность расчета $h_{1\%}$ составляет примерно 5%.

Между смежными водомерными постами или заданными расчетными створами по абсолютным высотам их наивысших уровней строится наклонная вниз по течению реки (или горизонтальная при подпоре) виртуальная плоскость, соответствующая водной поверхности в пик паводка определенной обеспеченности, с линиями равных высот — гидроизогипсами — через 0.1; 0.2; 0.5 или 1.0 м в зависимости от продольного уклона водной поверхности и масштаба картографирования. Гидроизогипсы проводятся поперек речной

долины перпендикулярно динамической оси паводкового потока. При этом линия пересечения построенной плоскости и матрицы высот SRTM будет являться границей зоны паводкового затопления. Конечно, если на местности переход от поймы (зоны наибольшего затопления) к надпойменной террасе или к коренному берегу резкий и ясно выражен в рельефе в виде подножия надпойменного уступа, то для прослеживания границы зоны затопления редкой повторяемости (обеспеченности 1% и реже) матрица SRTM может и не требоваться (например, на вышеупомянутом субширотном участке долины реки Ока между городами Серпухов и Коломна, где ширина поймы почти постоянна и варьирует в пределах 1.5–2 км). В то же время SRTM может иметь высокую информативность в иных геоморфологических условиях — при постепенном переходе от затопляемой поймы к надпойменным частям речной долины, как это, например, имеет место вдоль левобережной части долины реки Ока в пределах Мещерской низменности, т.е. между городами Коломна и Касимов.

Отсутствие грубой ошибки в расчетах наивысшего уровня воды и глубины затопления, при использовании данных SRTM, будет свидетельствовать полученный результат, в котором наиболее низкие участки поймы в удалении от русла реки оказываются все-таки выше меженного уровня воды в реке, а минимальные глубины воды в центральных частях поймы при уровне 1% обеспеченности не превышают 1.0 м в долинах как средних, так и крупных рек. В последнем случае, конечно, не учитываются останцы надпойменной террасы — высокие незатопляемые острова без гривистого рельефа (следов современного бокового смещения русла).

Поскольку модель SRTM не отражает русла рек и овраги шириной менее 100 м (а иногда и менее 150 м) или фиксирует их частично в виде цепочки замкнутых понижений, при составлении карт рельефа пойм и глубин затопления необходимо комплексировать данные матрицы высот SRTM с топографическими картами масштаба 1:100 000 и крупнее (Чумаченко и др., 2018).

В качестве примера картографирования границ зоны паводкового затопления при уровне воды 1% обеспеченности, рельефа поверхности и глубин затопления (в изобатах) приводится участок долины реки Москва в районе городов Жуковский и Раменское (рис. 2, 3). Наивысший уровень 1% обеспеченности в абсолютных высотах условно (но близко к истине) снижается на участке от 115 до 112 м (и ниже). У западного края участка река Москва врывается в тектонически

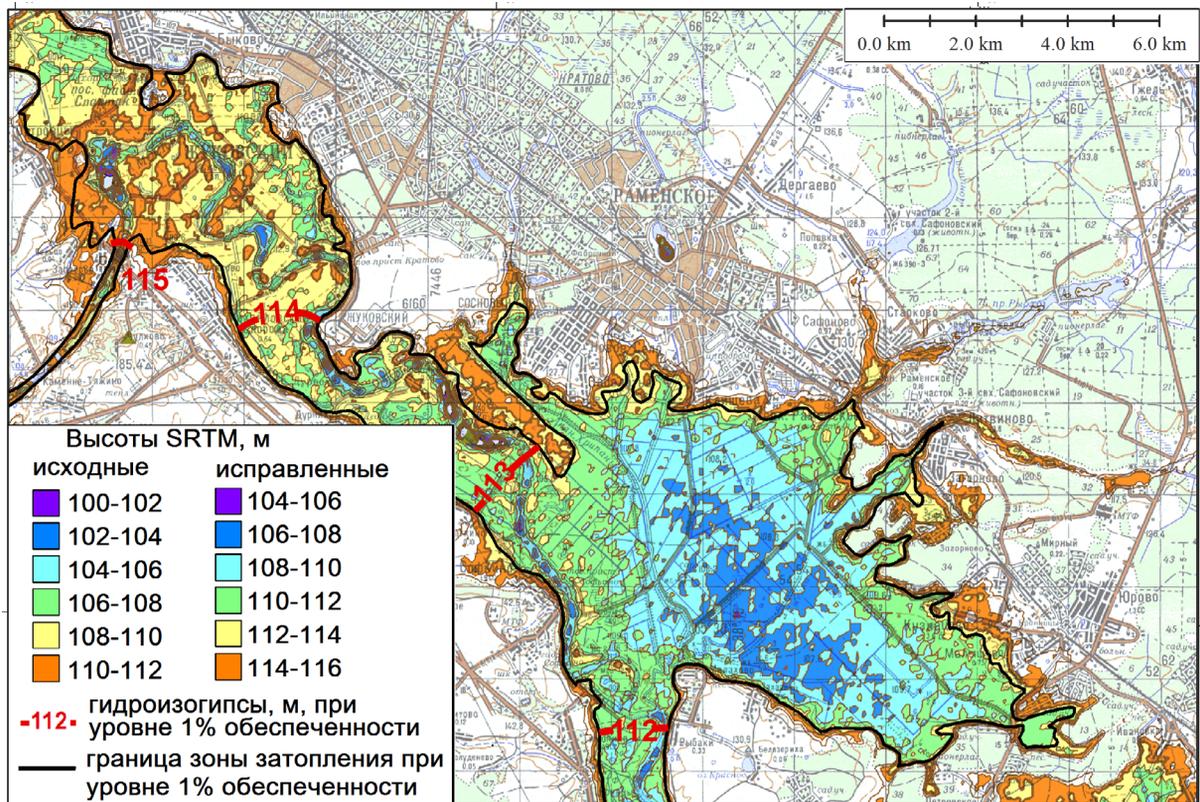


Рис. 2. Рельеф поверхности зоны паводкового затопления при уровне воды 1% обеспеченности в долине Москва-реки Раменского участка на матрице исправленных высот SRTM.

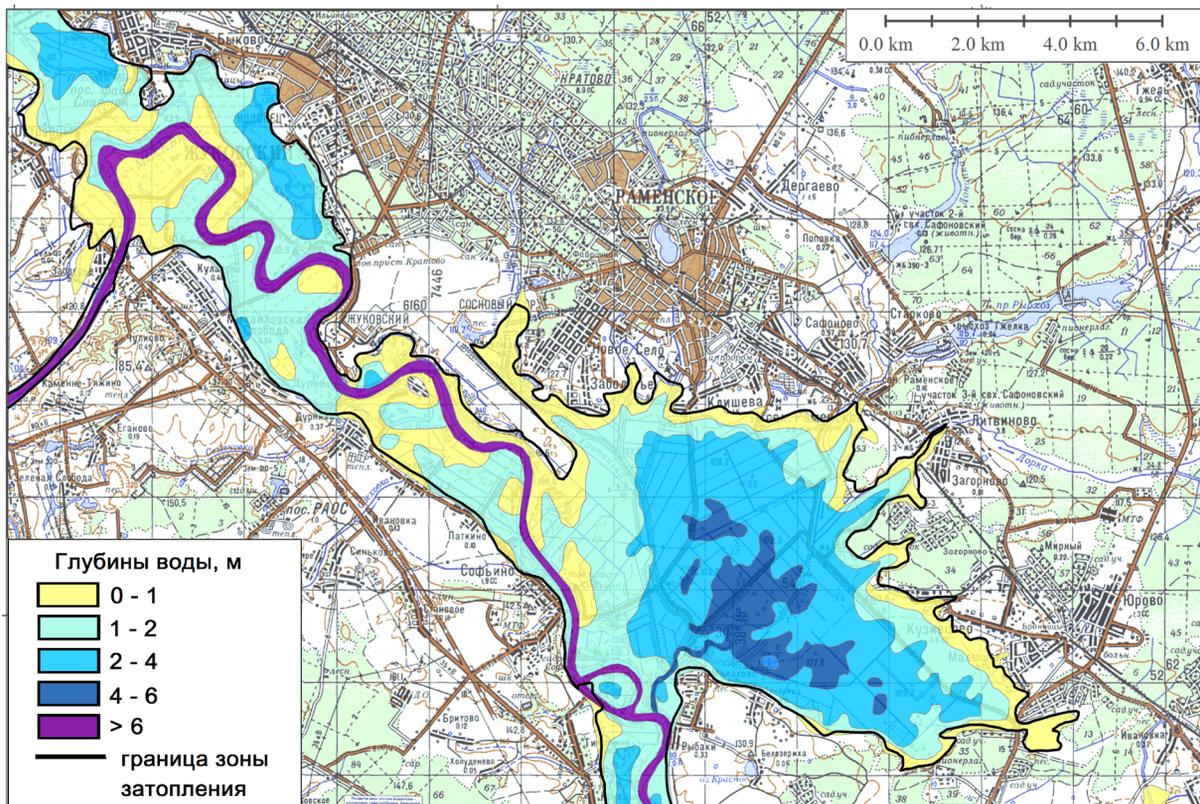


Рис. 3. Расчетные глубины затопления при уровне воды 1% обеспеченности в долине Москва-реки на Раменском участке.

воздымающийся Мячковско-Бронницкий вал СЗ-ЮВ простирания и поэтому не имеет поймы. Входя в обширную Пехоркинскую котловину, река формирует широкую (до 4-х км) пойму. Наиболее высокая часть ее поверхности представляет собой конус выноса эродируемого материала, а наиболее низкие части располагаются в удалении от этого конуса. Далее вниз по течению южнее г. Жуковского пойма сужается до нормального для равнинной меандрирующей реки такого размера — 2 км (при ширине русла 150 м). Затем южнее г. Раменское река выходит в еще более крупную Гжельскую котловину (название — по впадающей здесь в Москва-реку речке Гжелке) шириной до 6 км и общей площадью 45 км². Днище Гжельской котловины в ее наиболее глубокой части заглублено до 107 абс. м, что на 4 м ниже поверхности прирусловой части поймы (111 м), но на 1 м выше меженного уровня воды в реке Москва, чем обеспечивается сток с поймы в меженный период. Более низкое

положение днища котловины и большие глубины затопления — 5–6 м (при уровне 1% обеспеченности), по сравнению с прирусловой поймой — 1–2 м соответственно (и более высокие риски для находящихся там сооружений) обусловлены некомпенсируемым интенсивным прогибанием в течение всего четвертичного периода Гжельской котловины как краевой части более обширной Мещерской неотектонической депрессии.

На всем рассматриваемом участке долины реки Москва матрица высот SRTM имеет систематическую ошибку $\Delta Z = -4$ м. Сопоставляя матрицу SRTM с цифровой моделью рельефа (ЦМР), созданной на основе топографической карты масштаба 1:50 000, можно получить более точную величину $\Delta Z = -3.8$ м. Но, учитывая гравистый микрорельеф поверхности поймы, с амплитудой высот до 1 м, такая точность будет не вполне корректной. Поэтому здесь и на всех других тестовых участках величина ΔZ указывалась до целого метра.

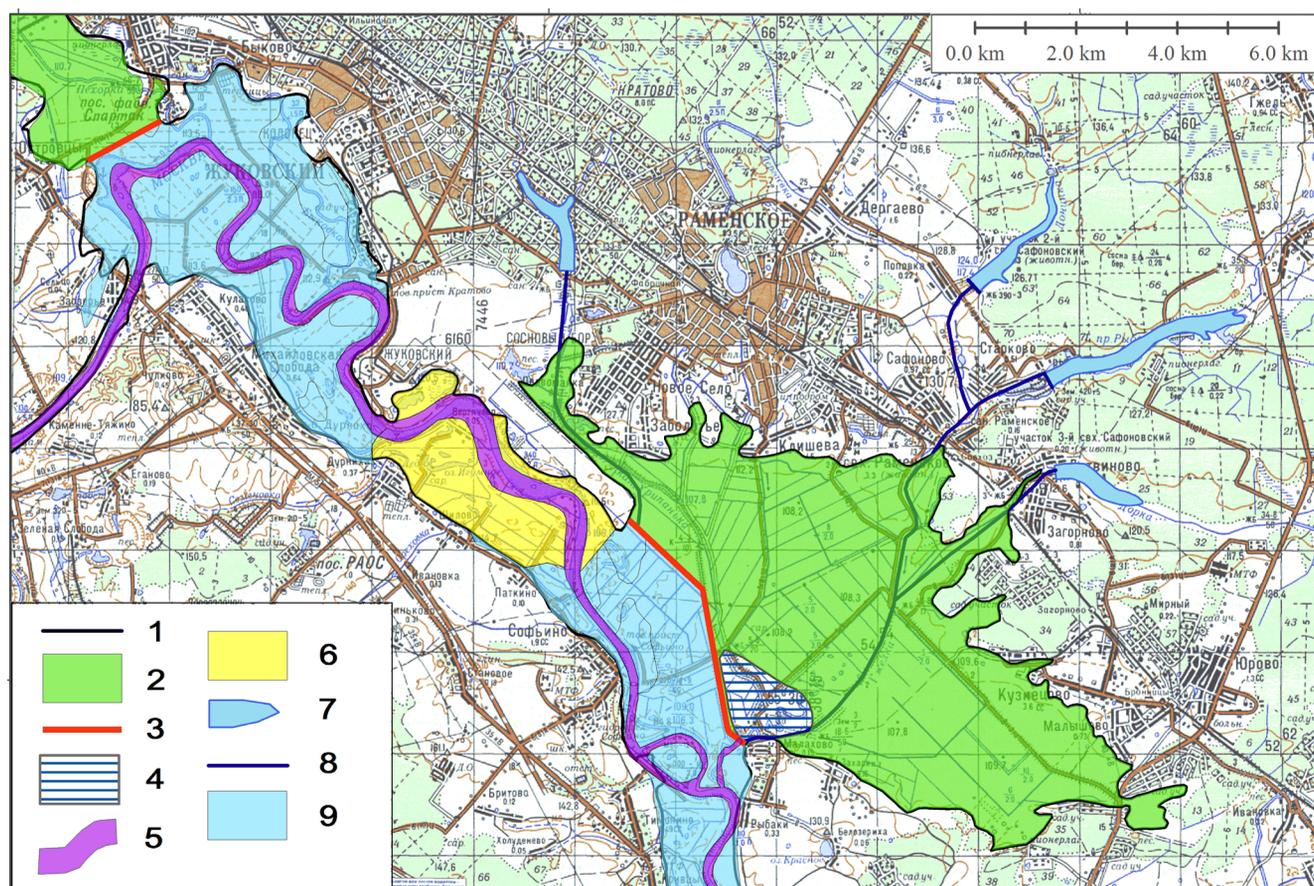


Рис. 4. Рекомендуемые варианты инженерной защиты территории от паводкового затопления на Раменском участке долины Москва-реки, где: 1 — расчетная граница зоны затопления при уровне 1% обеспеченности (до инженерной защиты земель от затопления); 2 — территории, защищенные от затопления дамбой обвалования; 3 — дамба обвалования; 4 — котлован — временный коллектор талых вод местного стока весеннего снеготаяния; 5 — участок расширенного и углубленного русла Москва-реки; 6 — территории, защищенные от затопления повышением поверхности подсыпкой грунта или гидронамывом; 7 — пруды — водохранилища талых вод; 8 — подземные водные трубопроводы; 9 — территории, не защищенные от затопления.

ИНЖЕНЕРНАЯ ЗАЩИТА ЗЕМЕЛЬ ОТ ЗАТОПЛЕНИЯ

Обе котловины — Пехорская и Гжелская — могут быть технически изолированы от прирусловой части поймы и, таким образом, защищены от паводкового затопления при уровнях воды любой обеспеченности (не только 1%). Для этого параллельно руслу реки Москва (в 1–1.5 км от последней) на наименьших глубинах затопления (менее 2 м на рис. 3) должны быть возведены дамбы обвалования длиной 1.5 км в Пехорской котловине и 5 км в Гжелской. При этом высоты гребня дамб должны быть не менее 0.5 м выше уровня воды 1% обеспеченности для защиты от волнового напора и перелива через дамбы. Превышение на 1.0 м обеспечит защиту от редчайшего паводка 0.1% обеспеченности (раз в 1000 лет), который в условиях зарегулированных верховьев реки Москва представляется в настоящее время совершенно невероятным.

Паводковые воды в верховьях речки Гжелки и других ручьев, задерживаемые в ныне действующих прудах, верхние бьефы которых гипсометрически выше паводкового уровня воды в реке Москва 1% обеспеченности, могут сбрасываться в реку по самонапорным (без машинно-насосной подкачки) подземным трубопроводам, проведенным сквозь тело дамбы обвалования (рис. 4). Местный сток от снеготаяния и ливневых дождей с защищенной дамбой части Гжелской котловины (35 км²) может временно (до межени) аккумулироваться в искусственном котловане с полезным объемом 10 млн. м³ (3 км²×3.3 м), грунт из которого целесообразно использовать при строительстве дамбы. Высокая часть поймы с малыми глубинами затопления (~1 м) в непосредственной близости от г. Жуковского может быть защищена от затопления повышением ее поверхности подсыпкой местного грунта или гидронамывом. При этом грунт может браться из расширяющегося (до 400 м) и углубляющегося русла реки Москва,

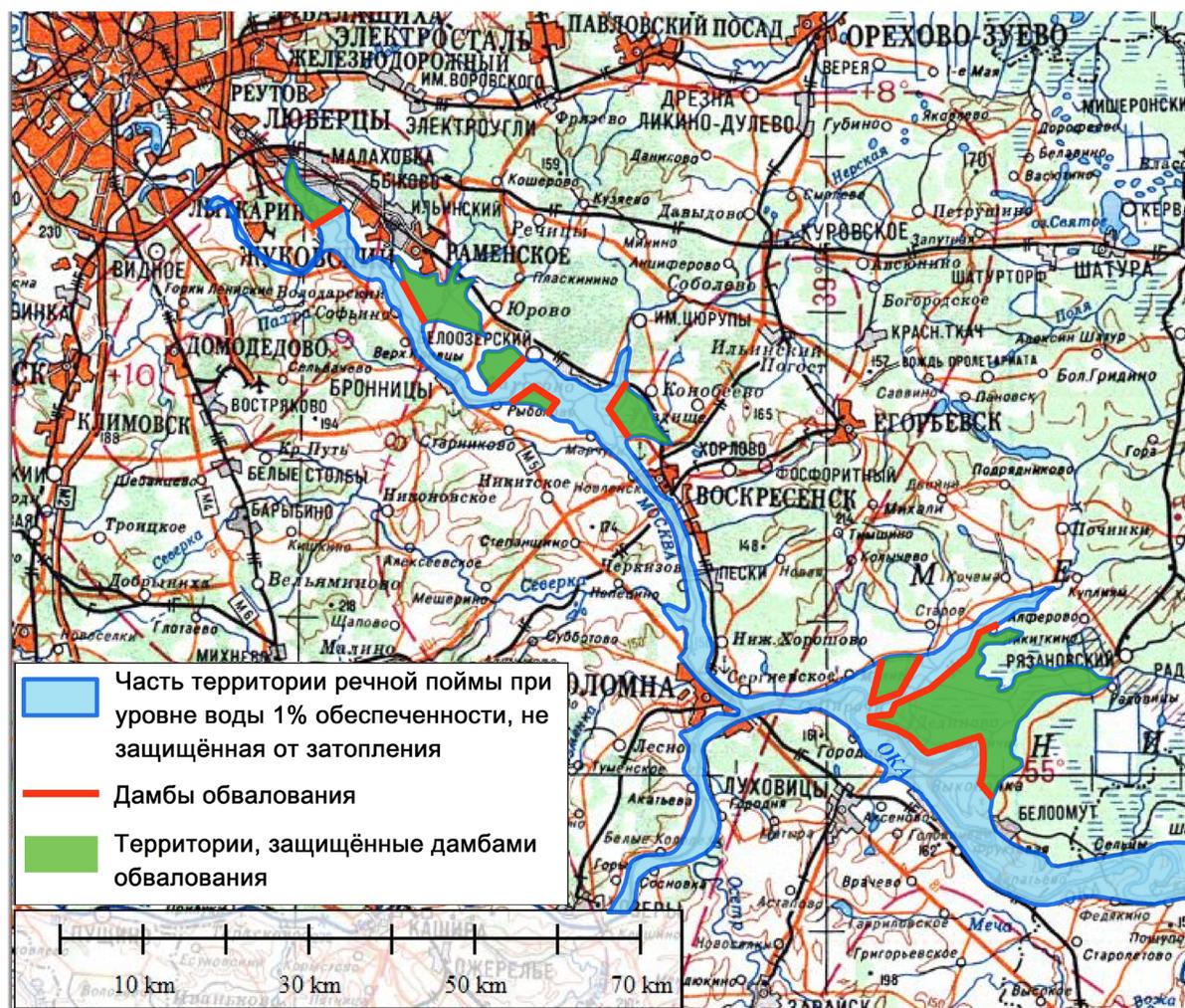


Рис. 5. Схема рекомендуемой инженерной защиты территорий от паводкового затопления в долинах рек Москва и Ока.

имеющим тогда возможность пропускать через свое живое сечение весь паводковый расход воды 1% обеспеченности.

На рис. 5 в мелком масштабе (на основе топографической карты масштаба 1:1 000 000) показана схема рекомендуемой нами инженерной защиты территорий от паводкового затопления в долинах рек Москва и Ока. На схеме выделены три расширенных зоны потенциального затопления в долине реки Москва — в Пехорской, Гжелской (Раменский участок) и Нерской неотектонических котловинах и Цнинская зона в долине реки Ока. Рекомендуемые дамбы обвалования суммарной длины 30 км защитят от затопления в долине реки Москва территории площадью около 100 км². В долине реки Ока дамбы длиной 55 км защитят соответственно 200 км² с пос. Дединово. Уместно заметить, что при расчетах глубин затопления на анализируемой территории систематические ошибки высот на матрицах SRTM плавно снижались с СЗ на ЮВ от –4.0 м (р. Пехорка), –3.8 м (р. Гжелка), –3.5 м (р. Нерская), –3.0 м (устье реки Москва) до –2.6 м (низовья реки Цна). Во всех случаях поправки к высотам матрицы SRTM (со знаком +) округлялись до единицы (т.е. 4 и 3 м).

Возведение дамб обвалования позволит включить в полноценное инфраструктурное освоение 100 км² дополнительных площадей в пригородных территориях городов Московской области Люберцы, Жуковский, Раменское, Фаустово, Воскресенск, включая экологически безопасное строительство на защищенных территориях капитальных гражданских и промышленных сооружений. Дамбы в долине реки Ока защитят от затопления крупный поселок Дединово и будут способствовать более эффективному сельскохозяйственному и лесохозяйственному освоению 200 км² окской поймы в районе устья реки Цна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования выявлены серьезные недостатки общедоступных (в Интернете) цифровых моделей рельефа, основанных на топографических картах масштаба 1:100 000 (с шагом горизонталей 20 м), при их использовании в условиях плоскоравнинных территорий: речных пойм, широких надпойменных террас, обширных аккумулятивных равнин, плоских водоразделов.

В связи с этим авторами был поднят вопрос о возможности и целесообразности практического использования в указанной ситуации модели SRTM. Исследованиями авторов установлено, что технически наиболее приемлемой для

плоскоравнинного рельефа является матрица высот SRTM в масштабе 1:100 000 с шагом горизонталей 2 м, при условии учета и исправления в матрице высот SRTM систематических и случайных ошибок.

Систематические ошибки выявлялись совмещением матриц высот SRTM с горизонталями и высотными отметками пунктов опорных геодезических сетей топографических карт масштаба 1:100 000. По полученным данным о величинах и знаке (+ или -) отклонений высот матрицы SRTM от абсолютных высот топографических карт на 370 тестовых участках площадью 300–360 км² каждая составлена карта зональности систематических ошибок SRTM на территории Российской Федерации и сопредельных стран (к югу от 60° с.ш.) с шагом 1 м от +2 м до –6 м. Карту рекомендуется использовать для введения соответствующих поправок к матрице высот SRTM при построении по данным SRTM предварительных карт рельефа плоскоравнинных поверхностей любого генезиса до детальных наземных инженерно-геодезических изысканий.

Случайные ошибки, как установлено, обычно не превышающие 1 м, подчиняются закону нормального распределения и «срезаются» при первичной генерализации ЦМР на основе матриц высот SRTM.

Исправленные матрицы высот SRTM могут использоваться при расчетах и оконтуривании зон паводкового затопления в долинах равнинных и горных рек. Еще более ценная информация может быть получена из модели SRTM при расчетах и картографировании глубин естественного паводкового или прогнозируемого искусственного затопления (при создании водохранилищ). В обоих случаях необходима информация о наивысших уровнях воды в паводок (или половодье) в соответствующих справочных пособиях — гидрологических ежегодниках или каталогах.

Для условий отсутствия или недостатка данных гидрометрических наблюдений авторами разработан и предложен дистанционный способ расчета наивысших уровней воды 1% обеспеченности — по материалам аэро- или космических съемок и ЦМР на основе топографических карт.

В качестве примера практического использования матрицы высот SRTM в гидрологических расчетах приведен комплект последовательно составляемых в масштабе 1:100 000 карт Раменского участка долины реки Москва: рельефа дна зоны потенциального затопления при уровне 1% обеспеченности, границы и глубины затопления и расположения рекомендуемых объектов инженерной защиты земель от затопления. Защищенные

от затопления около 300 км² территории (вместе с землями в долине реки Ока) позволят расширить пригородную инфраструктуру и более рационально вести на этой территории транспортно-логистическое, энергетическое, сельское и лесное хозяйства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ерицян Г.Г. Сравнение цифровых моделей рельефа, полученных с топографических карт масштаба 1:50 000, 1:100 000 и 1:200 000 с ЦМР SRTM // Известия НАН РА, Науки о Земле, 2013. Т. 66. № 1. С. 39–47.

Карионов Ю.И. Оценка точности матрицы высот SRTM // Геопрофи. 2010. № 1. С. 48–51.

Онъков И.В. Оценка точности высот SRTM для целей ортотрансформирования космических снимков высокого разрешения // Геоматика. 2011. № 3. С. 40–46.

Трофимов А.А., Филиппова А.В. Оценка точности матрицы высот SRTM по материалам топографических съемок // Геопрофи. 2014. № 6. С. 13–17.

Чумаченко А.Н., Хворостухин Д.П., Морозова В.А. Построение гидрологически-корректной цифровой модели рельефа (на примере Саратовской области) // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Серия Науки о Земле. 2016. Т. 18. № 2. С. 104–109.

Karwel A.K., Ewiak I. Estimation of the accuracy of the SRTM terrain model on the area of Poland. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Beijing, 2008. V. XXXVII. Part B7. P. 169–172.

Rodriguez E., Morris C.S., Biez J.E., Chapin E.C., Martin J.M., Daffer W., Hensley S. An assessment of The SRTM Topographic Product // Technical Report JPT. D-31639. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, 2005. 143 p.

The Use of Matrixes of Heights SRTM in the Preliminary Calculations and Mapping of Depths and Potential Flood Inundation of Fluvial Plain

V. N. Orlyankin, A. R. Aleshina

Geoinformation Research Center, Russian Academy of Sciences, Moscow

The article shows the possibility of using the SRTM model in order to search for the best options for detailed ground-based engineering surveys in flat-tree-free areas. The authors conducted a study of the accuracy of the SRTM model for the territory of the Russian Federation to the south of 60° N and neighboring countries (17 countries of Europe and 10 countries of Asia). A mapped zonality map of the identified systematic errors of the SRTM matrix of heights is shown. Using the example of the Ramensky section of the Moscow River valley (near the cities of Zhukovsky and Ramenskoye), the absolute heights of the surface of the flood zone were determined, the boundaries and depths of flooding were calculated and mapped during a flood of 1% of the coverage. Maps of engineering protection objects from flooding of the territory of this site on a scale of 1:100 000 and larger, as well as parts of the Moscow and Oka river valleys on a smaller scale - 1:1 000 000 are proposed.

Keywords: SRTM DEM, systematic error, river, floodplain surface, depth of flooding, engineering protection

REFERENCES

Chumachenko A.N., Khvorostukhin D.P., Morozova V.A. Postroenie gidrologicheski-korrektnoi tsifrovoy modeli rel'efa (na primere Saratovskoi oblasti) [Construction of a hydrologically correct digital model of relief (for example, the Saratov region)] // Izv. Saratov. un-ta. Nov. ser. Seriya Nauki o Zemle, 2016. V. 18. № 2. P. 104–109. (in Russian).

Eritsyayn G.G. Sravnenie tsifrovoykh modelei rel'efa, poluchennykh s topograficheskikh kart masshtaba 1:50 000, 1:100 000 i 1:200 000 s TSMR SRTM [Comparison of digital elevation models obtained from topographic maps of 1:50 000, 1: 100 000 and 1: 200 000 scale with DTM SRTM] // Izvestiya NAS RA, Nauki o Zemle, 2013. V. 66. № 1. P. 39–47. (in Russian).

Karionov Yu.I. Otsenka tochnosti matrity vyсот SRTM [Estimation of the accuracy of the height matrix SRTM] // Геопрофи, 2010, № 1. P. 48–51. (in Russian).

Karwel A.K., Ewiak I. Estimation of the accuracy of the SRTM terrain model on the area of Poland. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Beijing, 2008. V. XXXVII. Part B7. P. 169–172.

On'kov I.V. Otsenka tochnosti vyсот SRTM dlya tselei ortotransformirovaniya kosmicheskikh snimkov vysokogo razresheniya [Estimate of the accuracy of SRTM heights for orthotransformation of high resolution satellite imagery] // Геоматика. 2011. № 3. P. 40–46. (in Russian).

Rodriguez E., Morris C.S., Biez J.E., Chapin E.C., Martin J.M., Daffer W., Hensley S. An assessment of The SRTM Topographic Product // Technical Report JPT. D-31639. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, 2005. 143 p.

Trofimov A.A., Filippova A.V. Otsenka tochnosti matrity vyсот SRTM po materialam topograficheskikh s"emok [Estimation of the accuracy of the height matrix SRTM on the materials of topographic surveys] // Геопрофи, 2014. № 6. P. 13–17. (in Russian).