**РАЗДЕЛ IX. БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ
ЧЕЛОВЕКА. СПЕЦИАЛЬНОСТЬ 05.26.00.****РАСЧЁТЫ И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ГРАНИЦ И ГЛУБИН ПАВОДКОВОГО
ЗАТОПЛЕНИЯ В РЕЧНЫХ ДОЛИНАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТРИЦ
ВЫСОТ SRTM****CALCULATIONS AND MAPPING OF THE BOUNDARIES AND DEPTHS OF
FLOOD IN RIVER VALLEYS USING SRTM HEIGHT MATRIX****ОРЛЯНКИН В.Н.¹
АЛЕШИНА А.Р.²****ORLYANKIN V.N.¹
ALESHINA A.R.²**¹*Научный геоинформационный
центр РАН*¹*Scientific geoinformation centre Russian
Academy of Sciences*²*Научный геоинформационный
центр РАН*²*Scientific geoinformation centre Russian
Academy of Sciences**vadim.orlyankin@yandex.ru**vadim.orlyankin@yandex.ru**doi: 10.18411/pivsn-37**idsp: pivsn-37***АННОТАЦИЯ**

В статье кратко излагается способ расчёта и картографирования водной поверхности реки в гидроизогипсах и глубин воды в изобатах в пики паводков различной обеспеченности при условии отсутствия или недостатка данных гидрометрических наблюдений. Методология проведенных работ: расчёт наивысших уровней воды в пики паводков с использованием материалов космических съёмок и топографических карт; составление карт рельефа затопляемых территорий по корректируемой матрице высот SRTM; построение карт глубин затопления как разницы между расчётной поверхностью воды в пик паводка и поверхностью речной поймы. Цель работы: использование результатов расчётов для предотвращения чрезвычайных ситуаций или снижения ущерба от наводнений.

Ключевые слова: речное русло, пойма, половодье, паводок, уклон реки, расчётный наивысший уровень воды, граница зоны затопления, глубины затопления, матрица SRTM, топографические карты.

ABSTRACT

The article briefly describes the method of calculating and mapping the water surface of the river by hydroisohypses and the depths of water in isobaths into flood peaks of various levels under the condition of lack or absense of hydrometric observations. Methodology of the accomplished works: calculation of the highest water levels in the flood peaks using the materials of space imagery and topographic maps; mapping the relief of flooded areas on the corrected SRTM height matrix; construction maps of the flooding depths as the difference between the calculated surface of water in the flood peak and the surface of the river floodplain. Objective: use calculation results to prevent emergencies or reduce flood damage.

Keywords: stream channel, flood-plain, flood, flooding, river-slope, design high-water level, flooding limit, depth flooding, SRTM matrix, topographic maps.

ВВЕДЕНИЕ

В процедуре предварительной оценки природного риска для проектируемых и функционирующих инженерных сооружений и сельскохозяйственных угодий, пространственно располагающихся в речных долинах, исходной информацией, как известно, являются сведения о границе возможного паводкового затопления и распределении глубин воды в пик паводка, на основе чего рассчитываются и картографируются скорости течения [1] и соответственно локальные гидродинамические воздействия и ледовый напор на затопляемые сооружения. В зависимости от важности потенциально затопляемого объекта и длительности проектного срока его эксплуатации рассчитывают гидрологические параметры, относящиеся к паводкам соответствующей различной обеспеченности (повторяемости).

Основным параметром для последующих расчётов при оценке рисков является наивысший уровень воды весеннего половодья или дождевого паводка, если он выше половодья. При наличии данных по уровням воды на ближайших к исследуемому участку реки гидрометрических постах в последние годы разрабатываются и применяются компьютерные технологии для виртуальной реконструкции зон затопления при наводнениях на базе ГИС-технологией [2]. Однако известно, что на территории России с 1990 г. сеть постов гидрометрических наблюдений значительно сократилась, особенно в Восточной Сибири, где на многих малых реках их не было никогда.

В то же время учащающиеся в последние годы наводнения во многих районах России (особенно на её востоке) и во всём мире приводят к серьёзным чрезвычайным ситуациям, сопровождающимся крупными материальными потерями и социальным ущербом в зонах затопления при экстремальных половодьях и дождевых паводках. Поэтому превентивные гидрологические расчёты в слабо изученных районах в целях прогнозирования наводнений приобретают очевидную повышенную актуальность в научной сфере, в хозяйственной деятельности и социальной политике Российской Федерации.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью проведённых исследований являлась разработка способов дистанционного определения (путём расчётов) и предварительного картографирования границ и глубин паводкового затопления плоскоравнинных территорий днища речных долин, в том числе в условиях слабой гидрологической и топо-геодезической изученности. Оперативное получение необходимой исходной информации без наземных работ, только интерпретацией материалов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и, в частности, матриц высот SRTM должно обеспечить эффективное и более целенаправленное последующее проведение начального (поискового) этапа детальных инженерных гидролого-экологических изысканий для технико-экономического обоснования гидротехнических мероприятий, предотвращающих катастрофические последствия от затопления территории или снижающих материальный, социальный и экологический ущерб от наводнения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Определение наивысших уровней воды в реках и глубин затопления без гидрометрических наблюдений

Согласно СП 33-101-2003, определение наивысших уровней воды рек при весенних половодьях и дождевых паводках в условиях отсутствия данных гидрометрических наблюдений производится через максимальные мгновенные расходы воды, методы расчётов которых достаточно трудоёмки и требуют наличия близко расположенных гидрологически изученных рек-аналогов и использования набора современных специальных региональных карт, труднодоступных для массового пользования. Кроме того, необходимы полевые работы непосредственно на местности – промеры глубин в реке ниже уреза воды и нивелирование русла и береговых склонов

выше уреза до предполагаемой высоты уровня воды 1%-ной вероятности превышения (обеспеченности) плюс один метр. При этом предупреждается, что изложенные в указанном нормативном документе [3] методы расчёта максимальных расходов воды могут применяться только для рек с площадями водосборов до 20 000 км² на европейской части России и до 50 000 км² на азиатской части. Эти методы неприменимы также и на транзитных участках рек, на которых паводковые волны сильно распластываются, снижая максимальные расходы воды. Если необходимо определить максимальные расходы воды на реках с более крупными площадями водосборов, то при отсутствии гидрометрических данных требуются специальные инженерно-гидрометеорологические изыскания в исследуемом створе.

Принимая во внимание вышесказанное, нами была предпринята попытка разработать дистанционный способ приближённого определения наивысших уровней воды и границ зон затопления на реках с любыми площадями водосборов, в том числе и на транзитных реках, без данных гидрометрических наблюдений, без полевых изысканий, без предварительных расчётов максимальных расходов воды, но с возможностью учёта распластывания гребня паводковой волны при выходе воды на широкую пойму.

Попытка приблизиться к решению указанной проблемы была предпринята нами на основе эмпирически ранее установленной связи средней ширины русла (между пойменными бровками на прямолинейных отрезках) равнинных и полугорных рек России с мгновенными расходами воды 1% обеспеченности как при весеннем половодье, так и при дождевых паводках [4]. При этом простой способ измерения ширин русла реки, например, по космическим снимкам, в определённой степени заменил относительно сложную процедуру вычисления максимальных расходов воды по [3].

Дальнейшие исследования шли по пути сокращения первоначально громоздких формул с целью облегчения расчётов без потери точности ($\pm 10\%$).

В предлагаемом способе определения наивысших уровней воды в реках предусматривается измерения на материалах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и на топографических картах следующих гидроморфометрических параметров:

- F , км² – площадь водосборного бассейна выше заданного створа;
- b , м – ширина русла реки в пойменных бровках на прямолинейных участках однорукавного русла (наиболее часто повторяемая) в районе заданного створа;
- B , м – ширина поймы на участке долины длиной $L = (50 \dots 100)b$; $(B+b)$, м – сумма ширины поймы и русла на участке длиной $L = (50 \dots 100)b$;
- i – продольный уклон реки (водной поверхности в межень) на участке русла длиной l , м (в долях единицы, определяется как частное от деления разницы абсолютных отметок меженного уровня воды в начале и конце участка (ΔH , м) на длину участка l , м);
- n_p – коэффициент шероховатости речного русла;
- $n_{п}$ – коэффициент шероховатости поверхности заливаемой поймы;
- $\bar{n}$ – средневзвешенный коэффициент шероховатости русла и поймы.

Значения n_p и $n_{п}$ берутся из соответствующей таблицы в СП 33-101-2003 [3].

Для равнинных и полугорных незарегулированных пойменных рек с наивысшим уровнем воды в весеннее половодье предлагается следующая формула расчёта наивысшего уровня воды 1% обеспеченности:

$$h_{1\%} = a \cdot \bar{n}^{0.6} \cdot \left[\frac{F}{(B+b) \cdot l} \right]^{0.3}, \text{ м} \quad (1)$$

где a – поправочный безразмерный коэффициент, определяемый после расчётов по $\bar{n}$, b , B и i на ближайших пунктах реки-аналога с известным (из справочников) уровнем воды 1% обеспеченности ($h_{1\%}^c$), который отличается от расчётного ($h_{1\%}^p$) на величину a :

$$a = \frac{h_{1\%}^c}{h_{1\%}^p}.$$

Использование коэффициента a позволяет повысить точность расчёта $h_{1\%}$ по формуле (1) до $\pm 5\%$.

Для расчёта наивысших уровней воды любой обеспеченности ($h_{p\%}$) предлагается эмпирическая формула:

$$h_{p\%} = h_{1\%} \cdot \left\{ 1 - \left[0,25 - 0,05 \cdot \left(\lg \frac{B+b}{b} \right)^3 \right] \cdot \lg P\% \right\}. \quad (2)$$

При составлении карт зон затопления и глубин воды рассчитываются абсолютные отметки водной поверхности ($H_{p\%}$, м) при уровне воды $h_{p\%}$

$$H_{p\%} = H_m + h_{p\%},$$

где H_m – минимальный уровень воды (в межень), определяемый интерполяцией между смежными отметками уреза воды на топографической карте.

По снижающимся вниз по течению $H_{p\%}$ поперёк долины проводятся гидроизогипсы (линии равных абсолютных высот водной поверхности) с шагом в зависимости от уклона реки и масштаба составляемой карты. По разнице абсолютных высот водной поверхности $H_{p\%}$ и поверхности поймы проводятся изобаты – линии равных глубин воды на затопляемой пойме [5]. Глубины воды в затопленном русле рассчитываются как сумма наивысшего уровня воды $h_{p\%}$ и глубины меженного русла (h_r) в лотиях судоходных рек.

Исследование точности матрицы высот SRTM для расчётов глубин затопления

На крупных и средних равнинных реках, на которых продольные уклоны измеряются несколькими сантиметрами на 1 км длины реки, по топографическим картам масштаб 1:100 000 получить относительно достоверную информацию о характере рельефа поймы весьма сложно, поскольку проведенные с шагом 20 м горизонтали чаще всего вообще на заданном пойменном участке отсутствуют, а отдельные высотные отметки пунктов геодезической сети или единичны, или на некоторых листах карты в пределах поймы их нет вообще.

С начала XXI в. ситуация существенно изменилась в связи с появлением в Интернете матрицы высот SRTM (Shuttle radar topographic mission) в виде цифровой модели рельефа Земли – результата радарной интерферометрической съёмки поверхности Земли между 60° с.ш. и 54° ю.ш., проведённой с борта космического корабля многоразового использования. К сожалению, пока матрица SRTM фиксирует абсолютные высоты любой относительно твердой поверхности, в том числе и поверхности крон деревьев и кустарника лесных массивов, отдельных рощ и даже придорожных полос. А в связи с крупными погрешностями в плане, при возрастании крутизны склонов ошибки по высоте увеличиваются до многих десятков метров пропорционально. Поэтому матрицу SRTM можно применять только вне лесных массивов, вне площадей с плотной городской и промышленной застройкой и с относительно плоской субгоризонтальной поверхностью, с крутизной склонов не более 10% (10 м/км), что как раз характерно для пойм крупных и средних рек. Но и в этих условиях данные SRTM могут содержать систематическую ошибку по высоте в несколько метров. Как выясняется нашими исследованиями, эта ошибка – отклонение от данных топографических карт не остаётся постоянной в пространстве.

В процессе исследований нами проработаны три способа расчёта систематических отклонений абсолютных отметок рельефа на матрице SRTM от рельефа, изображённого на топографических картах:

- построением совмещённых профилей рельефа на топографических картах и рельефа матрицы SRTM;
- совмещением пространственно распределённых высотных отметок 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 с шагом 1 м в речных долинах с высотой половодья (паводка) до 5 м, с шагом 2 м в долинах с высотой половодья от 5 до 20 м.

В опубликованных на русском языке работах по оценке точности матрицы SRTM соответствующие исследования проводились обычно в пределах какого-либо одного локального участка, площадью не более первых сотен км² [6]. В 2017-2018 гг. в НГИЦ РАН было проведено исследование по выявлению систематической ошибки матрицы высот SRTM на большей части территории северной Евразии с относительно равномерным пространственным распределением тестовых участков. Определялись отклонения высот (ΔH) матрицы SRTM от абсолютных высот на цифровых моделях рельефа, созданных на базе топографических карт М 1:100 000. Исследованиями были охвачены 370 тестовых участков, площадью около 360 км² каждый (в формате A4) 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 топонсов по горизонталям и полугоризонталям и отметкам высот опорной геодезической сети (рис. 1; 2).

На основе этих исследований на территорию России (южнее 60° с.ш.) и ряда сопредельных стран составлена Карта структурированной зональности поправок высот к матрице SRTM с дискретностью 1 м в диапазоне шкалы поправок от -2 м до +6 м (рис. 3). Конфигурация изолиний поправок (ΔH) и ориентировка региональных площадных структур на карте явно не коррелируются ни с рельефом, ни с геологическим строением, ни с гравиметрическим полем. Вопрос о генезисе этих структур остаётся пока открытым. Карта рекомендуется нами для использования её при расчётах и картографировании границ и глубин воды зон паводкового затопления и в других научных исследованиях и наземных изысканиях в субгоризонтальных долинных и водораздельных пространствах, если в отсутствие крупномасштабных топографических карт (1:50 000 – 1:10 000) требуется детальная информация о рельефе

изучаемой территории, а оценить систематическую ошибку SRTM бывает затруднительно.

Рисунок 1. Определение систематической ошибки матрицы высот SRTM совмещением ее с топографической картой (Саратовское Заволжье, 25-25 км к ЮВ от Саратова). Фрагмент топографической карты М 1:100 000 с цифровыми значениями локальных отклонений высот матрицы SRTM от высот топографической карты.

Рисунок 2. Матрица высот SRTM с цветными полигонами значений высот через 2 м с исходными и исправленными ($\Delta H = +4,0$ м) высотами.

Рисунок 3. Карта зональности поправок высот к матрице SRTM (ΔH , м) на территории Российской Федерации и сопредельных стран. Цифры на зонах карты соответствуют поправкам высот к матрице SRTM в метрах.

Рисунок 4. Расчётные глубины затопления при уровне воды 1% обеспеченности в долине Москва-реки на Раменском участке.

Систематические отклонения высот SRTM на территориях Китая, Афганистана, Ирана и Турции местами достигают значений 10-20 м (вероятно, из-за невысокого качества топографических карт) и потому на карте (рис.3) не изображены.

При расчётах и картографировании зон затопления с распределением в них глубин воды нельзя ограничиваться только высотной матрицей SRTM (даже

исправленной), поскольку на ней, как правило, не находят отражения русла рек и старичные озёра шириной менее 100 м, тем более овраги и промоины постоянных и временных водотоков – мелких боковых притоков основной реки. В пределах акваторий крупных рек и озёр обычно пятнистая структура матриц высот SRTM, являясь следствием случайных ошибок, совершенно не соответствует естественному закономерному распределению глубин в меженных речных руслах: глубокие плёсы – у выгнутых берегов, мелкие перекаты – на прямолинейных отрезках реки перед поворотом русла. Поэтому составление карты глубин паводкового затопления должно выполняться только при обязательном комплексировании высотной матрицы SRTM с цифровой моделью рельефа, созданной на основе топографической карты масштаба 1:100 000 или, если есть возможность, – 1:50000, с добавлением на карту глубин всей необходимой информации, отсутствующей на SRTM.

Как пример выполнения предварительных расчётов и картографирования границ и глубин паводкового затопления при уровне воды 1% обеспеченности на рис. 4 приведена итоговая карта глубин затопления на участке долины Москвы-реки в районе городов Жуковский и Раменское.

ЗАКЛЮЧЕНИЯ

1. В результате научно-исследовательских работ 2018 г. выявлена необходимость внесения уточнений в ранее выведенную формулу расчёта наивысших уровней воды 1% обеспеченности (для условий отсутствия данных гидрометрических наблюдений) [4],[5]. В обновлённую формулу (1) вводятся новые параметры: площадь водосборного бассейна F , км² (вместо b) и безразмерный коэффициент a , повышающий точность расчёта $h_{1\%}$ до $\pm 5\%$.

2. Проведены широкомасштабные исследования на территории России и сопредельных государств по выявлению варьирующих в пространстве систематических отклонений абсолютных отметок земной поверхности на матрицах высот SRTM от отметок поверхности на топографических картах и составлена Карта зональности поправок высот к матрице SRTM на территорию РФ и сопредельных стран Европы и Азии.

3. Составленная карта использовалась авторами при расчётах наивысших уровней воды, границ и глубин зон затопления при половодье 1% обеспеченности на безлесных участках долин рек Ока, Москва, Клязьма, Лена и при дождевых паводках на реках Амур и Зея. Карта рекомендуется для широкого пользования гидрологами, экологами, специалистами МЧС, а также изыскателями для проектирования инженерной гидротехнической защиты от наводнений и любых сооружений инфраструктурного освоения безлесных территорий речных долин и плоских водоразделов.

1. Евстигнеев Н.М. Конечно-объёмная TVD-схема для решения 2D эволюционных уравнений мелкой воды // «Вычислительные методы и программирование», 2006. Т. 7. С. 108-112.
2. Вишневская И.А. Компьютерные технологии оценки зон затопления при наводнениях / Диссерт. на соиск. уч. степ. к.т.н. – М., 2006. – 145 с.
3. Определение расчётных максимальных расходов и наивысших уровней воды рек при отсутствии данных гидрометрических наблюдений / СП 33-101-2003.
4. Лебедев В.В., Куприянова Е.И., Орлянкин В.Н. Дистанционное определение наивысшего уровня воды рек при отсутствии гидрометрических наблюдений // ДАН, 2012. Т.445. №1. С.94-97.
5. Орлянкин В.Н., Алешина А.Р. Способы расчетов и картографирования пространственно распределённых гидрологических характеристик рек при возможных катастрофических паводках в условиях отсутствия данных гидрометрических наблюдений в целях предотвращения ЧС или снижения ущерба от наводнения // XVI Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций». Москва. ФКУ Центр «Антистихия» МЧС России, 2017. С.93-94.
6. Карионов Ю.Н. Оценка точности матрицы высот SRTM // Геопрофи, 2010, №1. С. 48-51.