

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ В БАССЕЙНАХ КРУПНЫХ РЕК СРЕДСТВАМИ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ

С.В. Борщ¹, Т.Е. Самсонов², Ю.А. Симонов¹, Е.А. Львовская²

¹*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации*

²*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
tsamsonov@geogr.msu.ru; simonov@mecom.ru*

Введение

В настоящее время геоинформационные системы (ГИС) - неотъемлемая составляющая автоматизированных систем прогнозирования паводков и половодий на реках. Они являются связующим звеном между основными компонентами таких систем [15]. Крайне важна роль ГИС на этапе интерпретации мониторинга и прогнозирования развития гидрологической обстановки на реках с целью определения возможных социально-экономических последствий от прохождения опасных гидрологических явлений. Использование ГИС-технологий в оперативной гидрологии позволяет существенно расширить спектр выходной прогностической продукции, в первую очередь за счет представления ее в картографическом виде.

В последнее десятилетие в технологически и методологически развитых гидрометеорологических службах многих стран при разработке систем гидрологического прогнозирования для оценки фактической и ожидаемой гидрологической обстановки широко используются ГИС-технологии. Так, в рамках «Усовершенствованной системы гидрологического прогнозирования» Национальной службы погоды США разработана и успешно используется система картографического и графического представления информации о складывающейся и прогнозируемой обстановке на реках с точки зрения ее опасности [2, 3].

В данной работе на примере бассейна р. Оки рассматриваются возможности использования ГИС для представления гидрологической информации (фактической и прогностической) в графическом виде. Выбор объекта исследования продиктован тем, что наводнения на реках бассейна р. Оки – явление достаточно распространенное, в отдельные годы они могут принимать катастрофический характер (1908, 1970, 1979 гг.). Анализ повторяемости и масштабов наводнений в бассейне Оки показал, что затопление прибрежных территорий здесь наблюдается довольно часто и практически исключительно в период весеннего половодья [1]. Почти ежегодно наблюдается затопление пониженных прибрежных участков местности в районах городов Калуги, Серпухова, Каширы, Коломны,

Рязани, в бассейнах Мокши, Клязьмы. Особенно обширные затопления наблюдаются в Луховицком районе Московской области. С учетом большой плотности населения, высокой степени хозяйственного освоения территории и наличия развитой транспортной инфраструктуры надо признать, что в период весеннего половодья бассейн реки Оки требует постоянного пристального внимания с целью мониторинга развития гидрологической ситуации и прогнозирования ее дальнейшего развития для предупреждения возможных наводнений.

Исходные данные

Для решения поставленной задачи визуализации фактически сложившейся прогнозируемой гидрологической обстановки на гидрологических постах, а также картирования зон затоплений при прохождении паводков и половодий была организована ГИС-инфраструктура. В качестве программного обеспечения использована ГИС ArcGIS Desktop 10.0 с расширениями для работы с растровыми и трехмерными данными [4, 5]. В ГИС-проекте была создана тематическая база пространственных данных, содержащая информацию о речной сети, рельефе, гидрологических постах. В качестве информационной основы использованы государственные топографические карты Федерального картографо-геодезического фонда (ФКГН) масштаба 1:200 000 (85 листов). Номенклатурные листы конвертированы из формата *SXF (формат хранения данных ФКГФ) в формат файловой базы геоданных ГИС. Векторные объекты номенклатурных листов объединены в базу геоданных «ОКА».

Для решения задачи отображения гидрологической обстановки на реках использованы данные о высотных отметках «0» графика гидрологических постов на р. Оке и ее притоках, а также значения критических отметок уровня воды (отметка выхода на пойму, отметки неблагоприятного и опасного явлений). Источником такой информации послужили данные оперативно-прогностических учреждений Росгидромета.

Цифровая модель рельефа (ЦМР) является одним из наиболее важных информационных слоев при разработке методики картографирования зон затопления. В качестве основы для построения ЦМР использованы информационные слои созданной в ходе разработки методики картографирования базы географических, топографических, гидрографических и морфометрических данных разделов «рельеф суши» и «гидрография». В основе инструмента построения ЦМР Topo to Raster модуля ArcGIS Spatial Analyst положен алгоритм М. Хатчинсона [10], который преобразует исходные данные слоев «рельеф» и «гидрография» в набор точечных высот с последующей интерполяцией на регулярную сетку посредством мультисеточных сплайнов с натяжением. При этом точками становятся узлы

исходных линий и полигонов (горизонталей, гидрографического строения русловой сети, границы области моделирования). Алгоритм М. Хатчинсона позволяет учесть возможность пересечения линий водотоков, а также ареалов гидрографической информации и гидрологических депрессий при построении ЦМР. Эти данные являются вспомогательными и используются для определения морфологии поверхности между горизонталями: плоскость (озеро), наклонная ложбина (водоток) или впадина (бессточная депрессия). Таким образом, обеспечивается гидрологическая корректность ЦМР и достоверность проводимых по ней расчетов. ЦМР бассейна р. Оки построена с шагом сетки 100 м. Растровая модель соответствует точности исходных топографических данных. ЦМР была трансформирована в проекцию Гаусса-Крюгера, с целью проведения измерения масштабов линейных и площадных объектов с минимальными искажениями.

Объекты речной сети в тематической базе данных собраны в геометрическую сеть и снабжены линейными координатами и высотой. Геометрическая сеть позволяет для произвольного замыкающего створа определить характеристики всех водотоков, расположенных выше по течению, а также трассировать маршрут стока от одной точки до другой. Линейные координаты являются удобным средством интерполяции любого показателя по всей длине линии. В частности, реальное расстояние до замыкающего створа от начала водотока невозможно оценить по длине самой линии, поскольку она не учитывает уклона в направлении продольного профиля и приуменьшена в силу генерализации. Эта проблема была успешно решена путем внесения в базу данных реальной длины каждого водотока из гидрологического справочника и интерполяции ее по длине каждой линии, так что в каждой ее точке появилась возможность получить более точную оценку расстояния от истока. Аналогичным образом была обеспечена возможность интерполяции текущих уровней воды на основе показаний гидрологических постов. Графическое представление бассейна Оки, построенное на основе исходных данных, показано на рис. 1.

Для проверки рассчитанной области затопления использовались данные дистанционного зондирования Земли ИСЗ AQUA (MODIS) пространственного разрешения 250 м. Космический снимок бассейна Оки на дату 28.04.2012 г. был предоставлен ФГБУ «НИЦ «Планета».

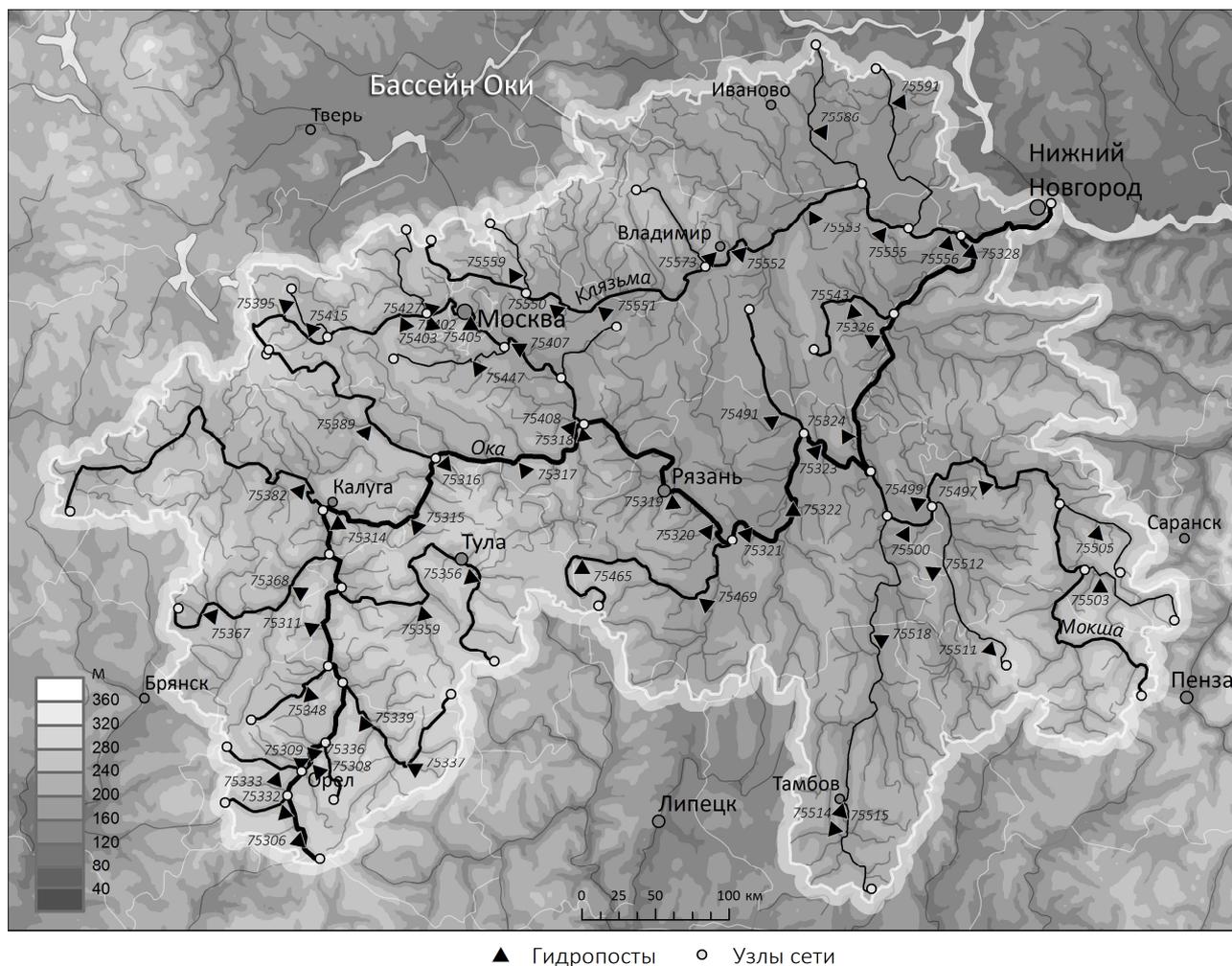


Рис. 1. Графическое представление информационных слоев ГИС проекта «ОКА».

Отображение гидрологической ситуации на реках

Первая задача, которая была решена в разработанном прототипе ГИС - это создание технологии отображения гидрологической обстановки на реках. Гидрологическая обстановка классифицирована относительно критических отметок по гидрологическим постам – уровня выхода на пойму, уровня неблагоприятного явления (НЯ) и уровня опасного явления (ОЯ) с использованием фактических и прогнозируемых уровней воды на примере бассейна реки Оки. Визуализация текущих отметок уровня воды позволяет оперативно оценить степень опасности складывающейся и ожидаемой гидрологической обстановки. Обновление карты происходит автоматически при поступлении новых данных об уровнях воды на гидрологических постах. Пример представления данных оперативной гидрологической обстановки, сложившейся 28 апреля 2012 г. в бассейне р. Оки, представлен на рис. 2.

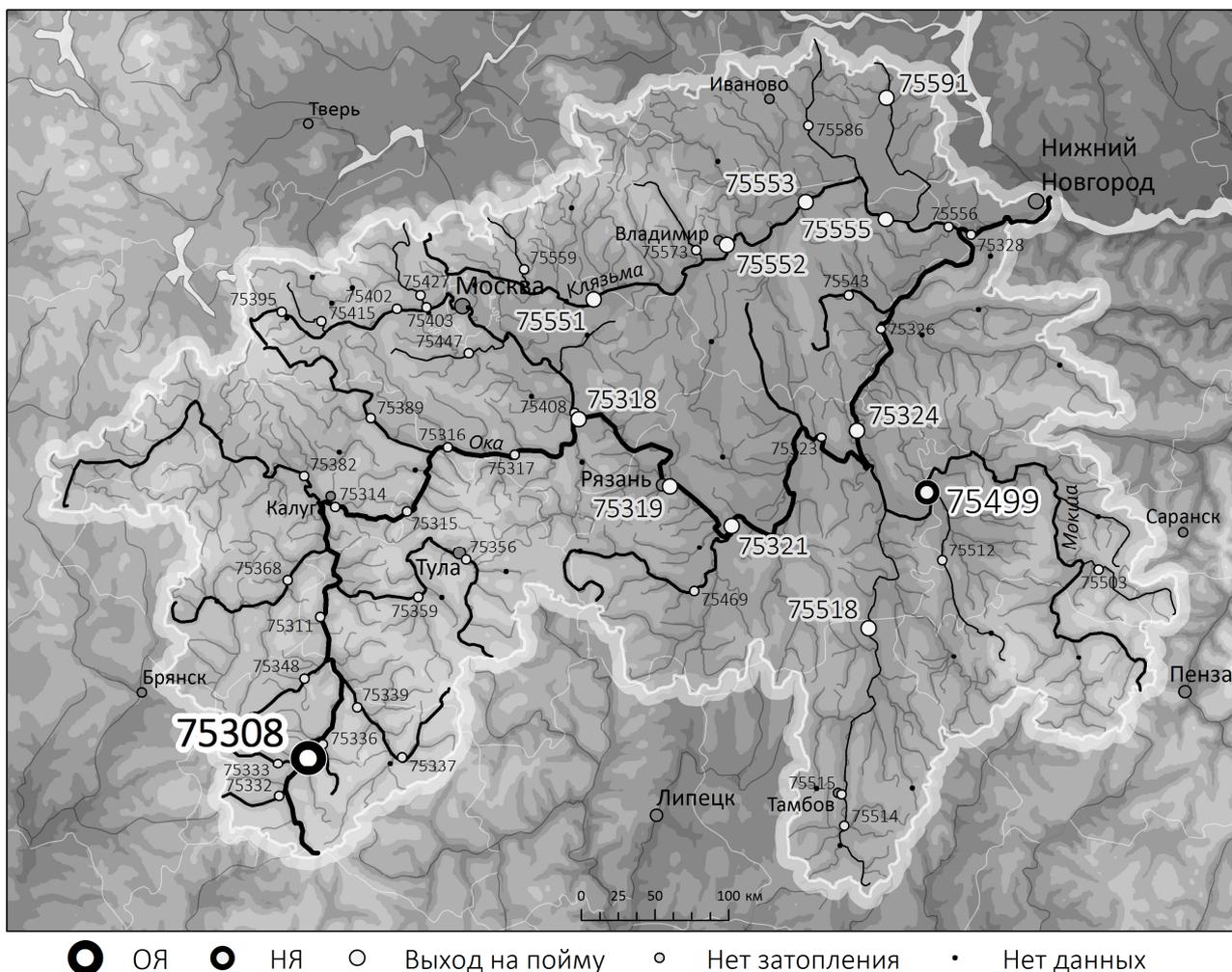


Рис. 2. Отображение гидрологической обстановки в бассейне р. Ока 28 апреля 2012 года.

Картографирование зон затопления

Точность расчетов областей затоплений речных долин в большой степени зависит от таких факторов, как качество данных о рельефе долины реки (пространственное разрешение, погрешность определения высотных отметок), от геометрической формы поперечных сечений долины, а также от используемого вида решения системы уравнений Сен-Венана, отражающей основные закономерности перемещения речных волн. В последние годы, с распространением данных о рельефе высокого разрешения и увеличившимися вычислительными мощностями широкое распространение получило применение двумерных и трехмерных гидравлических моделей. Значительное количество работ посвящено сравнению результатов моделирования областей затопления с помощью гидродинамических моделей, решающих систему уравнений речной гидравлики в различном (одномерном, двумерном и трехмерном) приближении [6, 9].

Для параметризации и адаптации гидродинамических моделей необходимы данные:

– о строении речной долины, т.е. ее рельеф;

- коэффициенты шероховатости русла и долины реки для параметризации уравнения диссипации энергии потока;

- ряды расходов и уровней воды на гидрологических створах исследуемой реки для задания граничных условий;

- а также данные для оптимизации параметров модели и их верификации (спутниковые снимки разливов речных вод, отметки уровня высоких вод и т.д.).

Результаты последних исследований в области моделирования областей затоплений показали, что:

- качество исходных данных о рельефе русла и поймы рек является наиболее важным фактором, влияющим на итоговый результат моделирования областей затопления с применением моделей речной гидравлики [14];

- использование гидродинамического моделирования для описания процессов затопления поймы рек является обоснованным при наличии данных о рельефе высокого пространственного и высотного разрешения [9];

- при ограниченном наборе данных используются модели затопления, основанные не на гидродинамических, а на геометрических принципах [7], при этом может приниматься допущение, что из ячеек ЦМР с известной высотой уровня распространение воды в соседние ячейки происходит горизонтально (модели типа “flat-water”).

В связи с ограниченным набором исходных данных для моделирования (отсутствие данных о характеристиках шероховатости русла и поймы бассейна Оки, пространственное разрешение ЦМР 100 м) было принято решение разработать упрощенную методику расчета областей затоплений с использованием ГИС-технологии. В разработанной методике расчета зон затопления гидрографическая сеть представляется в виде графа. Истоки и устья рек, а также точки гидропостов образуют узлы графа, а сегменты линий между ними – ребра. Такое представление речной сети в ГИС показало свою эффективность [8].

Для интерполяции уровня воды в устьях был разработан иерархический алгоритм, основанный на использовании линейных координат L и классификации элементов речной сети, в соответствии с которой порядок рек увеличивается от главной реки в сторону ее притоков. При такой классификации Ока на всем протяжении имеет порядок 1, Мокша и Клязьма – 2 и т.д. Несмотря на то, что эта схема не соответствует масштабированию характеристик речных бассейнов при изменении порядка, она в данном случае удобна с алгоритмической точки зрения. Расчет уровней осуществляется следующим образом:

- для каждого узла графа (устьевого створа) с неизвестным значением уровня определяется значение координаты L на водотоках порядка j и $j+1$, к которым он принадлежит;

- для всех водотоков порядка j от 1 до N значение уровня воды в i -м устьевом створе $_j$ определяется по формуле:

$$H_i = H_{up} + (H_{down} - H_{up}) \frac{L_i - L_{up}}{L_{down} - L_{up}},$$

где H_i – уровень воды в створе; H_{up} – уровень воды в ближайшем створе с известным значением выше по течению; H_{down} – уровень воды в ближайшем створе с известным значением ниже по течению; L_i , L_{down} , L_{up} – значения линейных координат для соответствующих створов.

После того как определены уровни для всех устьевых створов водотока первого порядка, процедура повторяется для водотоков второго порядка и так далее. Использование данного алгоритма иллюстрирует рис. 3. В данном случае значение уровня воды неизвестно в створах “А”, “В” и “С” бассейна р. Оки. На первой итерации вычисляется значение уровня воды в створе “А” на основе уровней воды на гидрологических постах р. Ока – г. Касимов и р. Ока - пгт. Елатьма. Далее рассчитывается уровень воды в створе “В” по уровням в створах “А” и створе р. Мокша – с. Шевелевский Майдан и в створе “С” по уровням на гидропостах р. Мокша – с. Шевелевский Майдан и р. Мокша – с. Кадом. По завершении интерполяции все узлы графа гидрографической сети получают высотные отметки, а его ребра преобразуются в трехмерные линии, имеющие уклон в соответствии с длиной и значениями уровня воды в начальном и конечном узле.

Для определения затопляемой площади необходимо знать абсолютную отметку водной поверхности в каждой точке водотока. Разность этой отметки и отметки рельефа, взятой по ЦМР, используется для определения зоны распространения разлива при прохождении паводка. Частота дискретизации значений уровня вдоль линии реки должна соответствовать разрешению ЦМР, которое в данном случае составляет 100 м. При такой постановке задачи наиболее удобно растривать линию водотока так, чтобы получилась линия толщиной один пиксел, в каждой ячейке которой записана абсолютная отметка водной поверхности. Для этого линия преобразуется в растровую на основе значений уровня воды, и к высотам полученных ячеек прибавляется отметка подстилающих ячеек ЦМР.

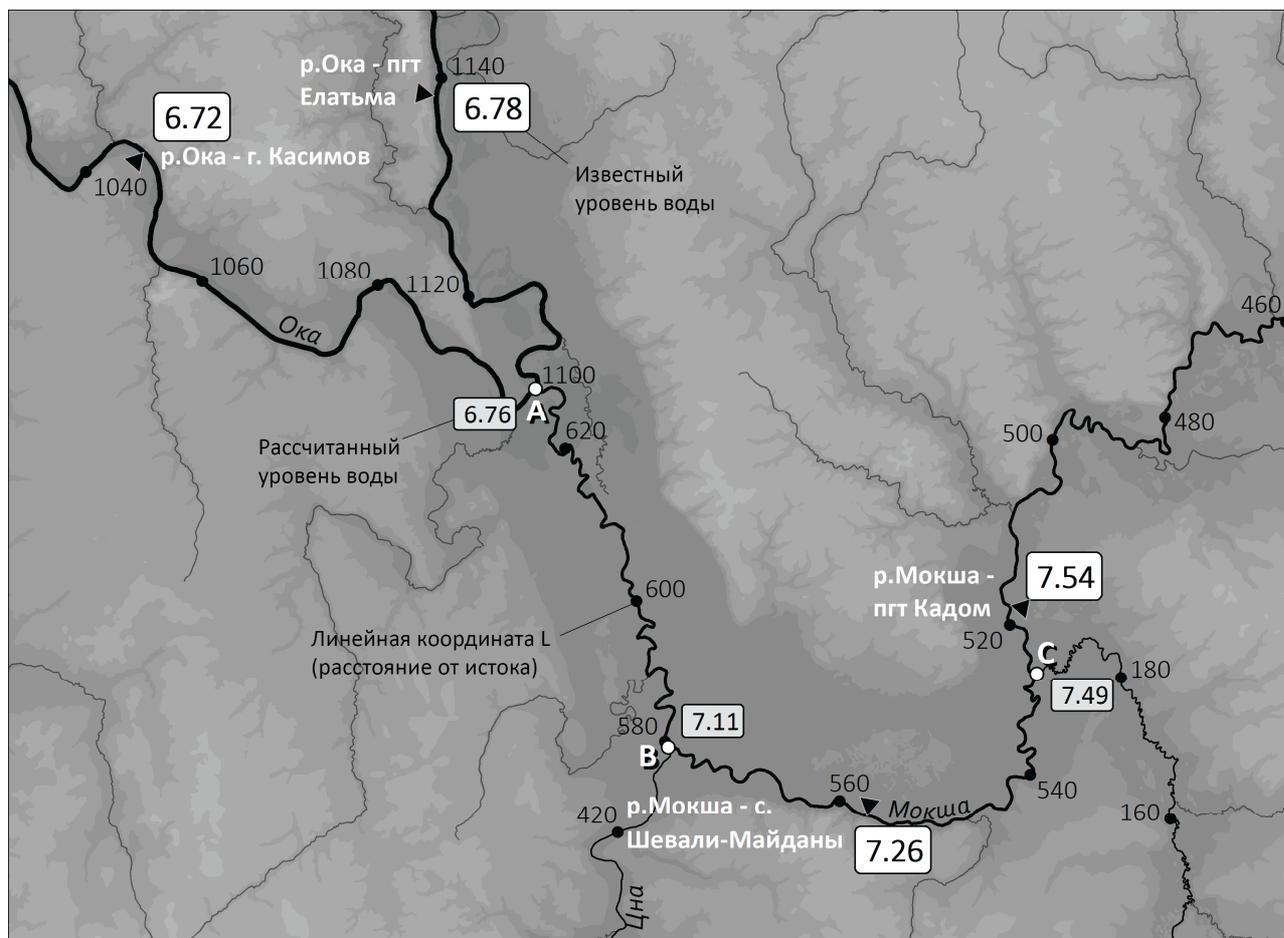


Рис. 3. Алгоритм вычисления уровней воды в устьевых створах.

Алгоритм затопления имитирует подъем воды по склону из каждой ячейки растра водной поверхности и сравнивает текущее значение высоты по ЦМР с абсолютной отметкой водной поверхности, взятой в ячейке растра, из которой начат подъем. Если текущая высота меньше, ячейка ЦМР считается затапливаемой и помечается в выходном растре. Алгоритм рекурсивно распространяет затопление во все ячейки выше по склону, стекающие в данную, используя модель направления тока D8 [11]. По сути, для каждого пиксела водотока определяются ячейки его бассейна, которые лежат ниже уровня затопления, образуя некую локальную зону затопления. Объединение локальных зон затопления дает общую область затопления. Схематично алгоритм представлен на рис. 4. При этом следует учитывать, что в одну и ту же ячейку при возможном движении по восьми направлениям вода при подъеме может попасть с разных точек водотока. Поэтому для повышения эффективности вычислений «затопленные» ячейки помечаются и на последующих итерациях их обработка не происходит. На выходе алгоритма получается растр, в котором все затапливаемые ячейки помечены единицами, а остальные оставлены пустыми. При размерах ЦМР 8367 x 7580 ячеек время расчета области затопления для бассейна Оки на ЭВМ с процессором Intel Core i7 2.7 GHz, 4 Гб оперативной памяти и жестким диском SSD составляет 74 секунды.

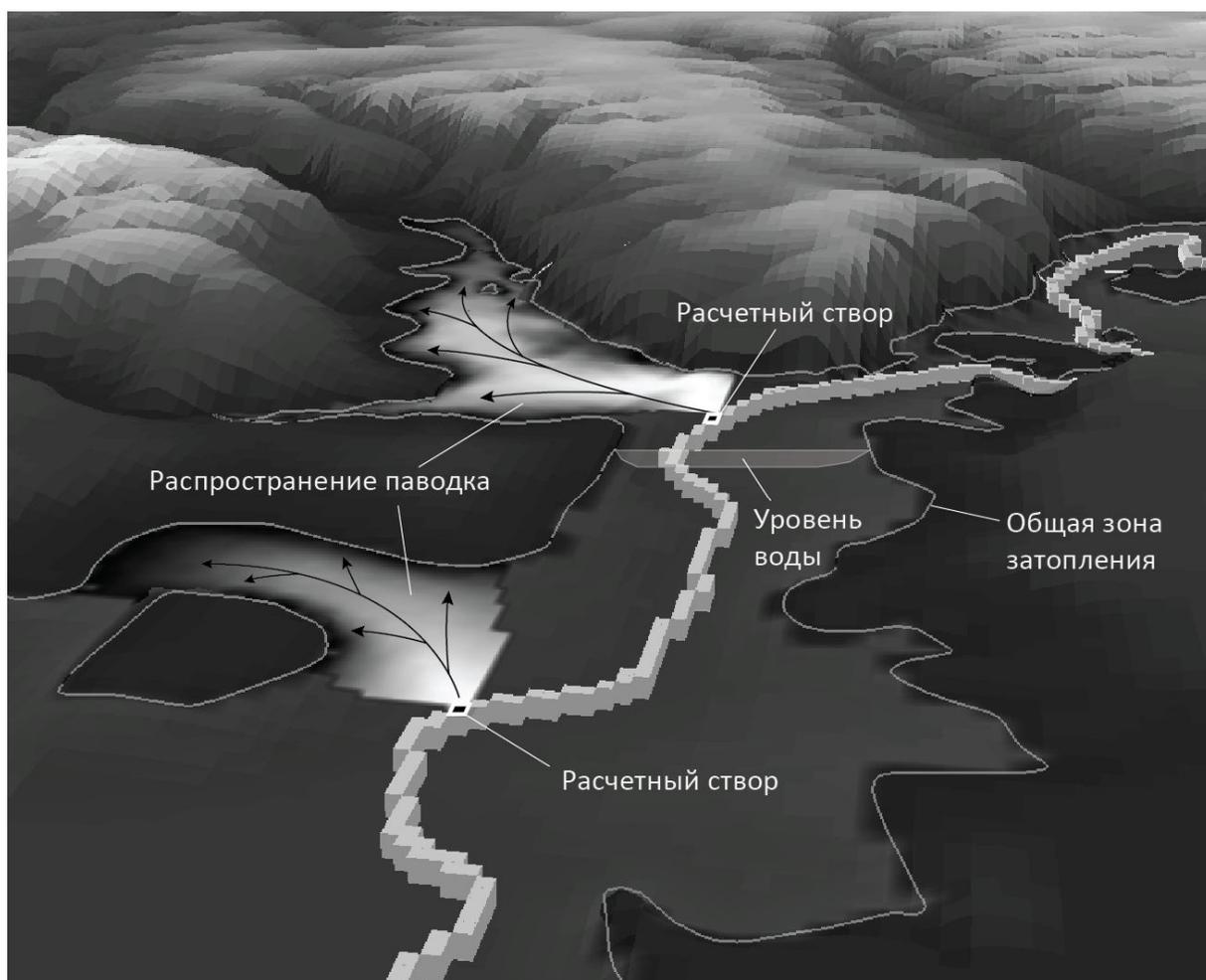


Рис. 4. К вычислению зоны затопления для отдельных створов.

Результаты расчета области затопления

.Космические снимки с искусственных спутников Земли высокого разрешения в настоящее время широко используются при моделировании зон затоплений на реках. Площади распространения затоплений на реках, рассчитанные с помощью космических снимков инфракрасного диапазона, применяются при оптимизации параметров гидродинамических моделей перемещения паводковых волн, а также для проверки качества моделирования областей затопления [13]. Для проверки предложенной методики расчета областей затопления во время прохождения паводков и половодий использован спутниковый снимок бассейна р. Оки ИСЗ AQUA (MODIS) с разрешением 250 м на 28 апреля 2012 года, именно на эту дату пришелся пик уровней половодья 2012 года в бассейне Оки. Фактическая область затопления была дешифрирована по снимку в инфракрасном диапазоне. Границы зоны затопления определены эмпирически по порогу яркости инфракрасного канала. Рассчитанные и фактические области затопления представлены на рис. 5.

Для удобства анализа и наглядности полученных результатов бассейн Оки был разделен

на 8 районов (рис. 5). Для каждого из районов вычислены следующие площадные характеристики: площадь рассчитанного затопления (A_c), площадь фактического затопления (A_o), пересечение ($A_c \cap A_o$) и объединение ($A_c \cup A_o$) рассчитанных и фактических площадей затопления.

Общая погрешность расчета областей затопления C_0 оценена как отношение рассчитанной площади затопления к фактической: $C_0 = \frac{A_c}{A_o}$. Для оценки доли корректно

рассчитанных областей затопления применен следующий критерий: $C_1 = \frac{A_c \cap A_o}{A_o}$.

Количественные оценки площадей затопления и критерии качества расчета представлены в таблице.

Анализ рассчитанных критериев качества показывает, что в различных районах бассейна Оки наблюдаются разные степени сходимости расчетных и фактических значений затоплений. С точки зрения общей погрешности расчета площадей затопления, с помощью ГИС-технологий наибольшая точность характерна для районов 1, 4 и 6. Для данных районов абсолютное значение погрешности не превышает значения чуть более 30 %. Точность расчета областей затопления, характеризуемая оценкой C_1 , показывает, что для районов 4, 5 и 6 фактические области затопления были более чем на 75 % спрогнозированы расчетной методикой. Рассмотренные районы имеют наибольшую плотность гидрологических наблюдений на единицу площади бассейна р. Оки, что нашло отражение в причинах удовлетворительного качества расчета областей затопления в данных районах бассейна.

Таблица

Сравнение площадей (км²) рассчитанной (модель) и фактической (снимок) областей затопления для восьми районов бассейна р. Оки

Номер района	A_c , км ²	A_o , км ²	\cup , км ²	\cap , км ²	C_0	C_1
1	214	299	124	389	0,71	0,41
2	137	243	127	253	0,56	0,52
3	377	1076	271	1182	0,35	0,25
4	1721	1454	1117	2057	1,18	0,77
5	80	262	58	285	0,31	0,22
6	862	655	542	975	1,32	0,83
7	91	288	46	333	0,32	0,16
8	291	198	150	339	1,47	0,76

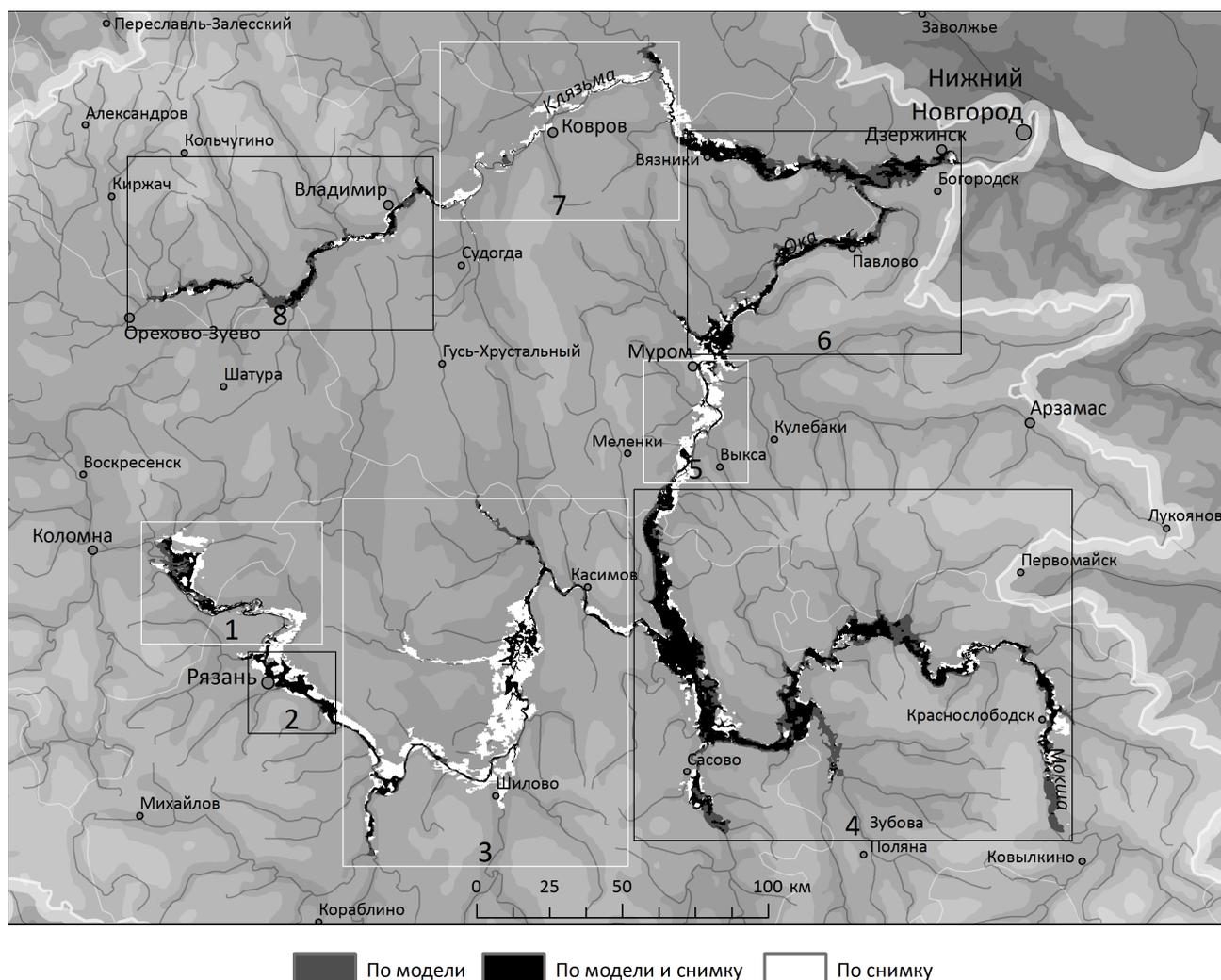


Рис. 5. Рассчитанные и фактические области затопления.

Сопоставление рассчитанной и фактической зон затопления для района впадения р. Мокши в р. Оку (район 4) представлено на рис. 6.

Вместе с тем, для районов бассейна Оки: участок Оки между г. Рязань и до впадения р. Мокша (район 3), участок Оки, включающий г. Муром (район 5), и участок р. Клязьма ниже г. Владимир, включающий г. Ковров (район 7), фактические области затопления в значительной степени были недооценены расчетной методикой (рис. 5). Недооценка фактических площадей затопления для вышеуказанных районов составила до 70 %. Неудовлетворительная точность описания площадей затоплений для данных районов связана с рядом факторов, в первую очередь с небольшим количеством гидрометрических измерений уровней воды.

Немаловажно отметить, что проверка точности методики расчета затоплений на основе использования ГИС-технологий основана на сравнении расчетных результатов с областью затопления, рассчитанной на основе анализа космического снимка, что в свою очередь является отдельной задачей и несомненно вносит неопределенность в расчет оценок

погрешности.

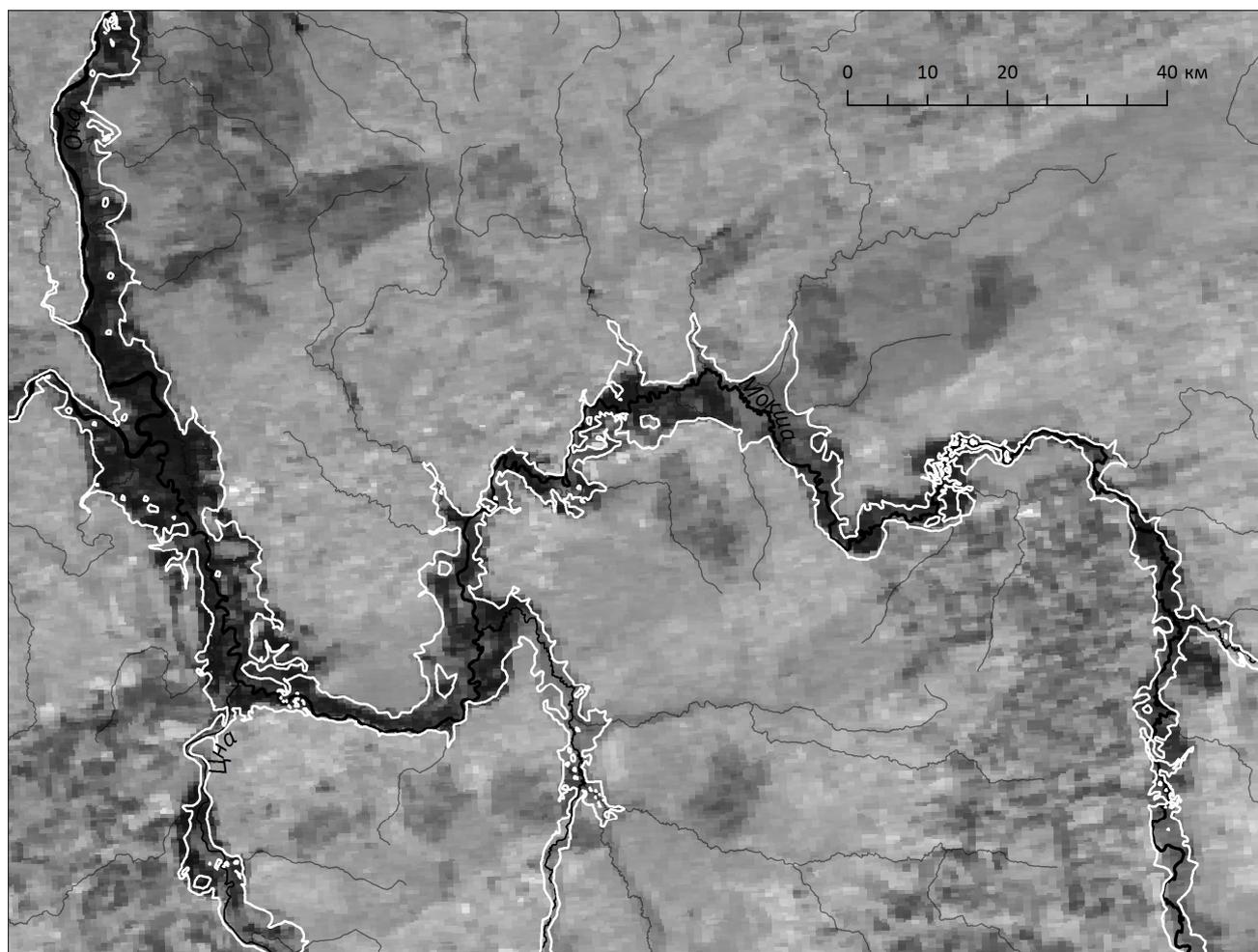


Рис. 6. Рассчитанная зона затопления для участка 4 (белая линия) и ее изображение на снимке AQUA/MODIS (инфракрасный канал, разрешение 250 м).

Выводы

Исходные данные о рельефе небольшого пространственного разрешения (100 м), а также информация о водных объектах и данные об уровнях воды на гидрологических створах позволили разработать упрощенную методику расчета затоплений на основе ГИС-технологий для крупных речных бассейнов (в т.ч. бассейнов рек Ока, Кубань и Уссури). Представленная приближенная методика позволяет с удовлетворительной точностью рассчитывать область затопления в районах рек с наличием плотной сети гидрологических постов. При помощи предложенной методики описывается не менее 75 % от площади затопляемых областей бассейна р. Оки в районах с высокой плотностью гидрологических постов.

Вместе с тем выполненная работа указала на ряд источников неопределенности, которые вносят погрешность в расчет областей затопления. Наличие данных о рельефе высокого разрешения и точности (данные лазерного сканирования с борта воздушного судна,

с топографических карт масштаба 1:25 000 и крупнее), а также более плотное распределение гидрометрических данных позволит уточнить предложенную методику, а также разработать методику расчета зон затоплений, основанную на использовании гидродинамического моделирования процесса перемещения паводочной волны.

Немаловажным фактором разработки методики является оптимизация параметров модели и верификация результатов моделирования. Для этого необходимо наличие фактических областей затопления, рассчитанных на основе космических снимков высокого разрешения, что в свою очередь является самостоятельной областью исследования и требует внимания для получения устойчивого и точного результата. Крайне важным критерием проверки расчетной области затоплений и распределения глубин являются метки высоких вод, полученные по результатам экспедиционных съемок. Наличие указанных данных позволит разработать более детальную и физически обоснованную методику расчета зон затоплений в бассейнах крупных рек средствами ГИС-технологий.

Разработанные ГИС-технологии по визуализации фактической и прогностической гидрологической обстановки на гидрологических постах используются в оперативной практике гидрологического прогнозирования ФГБУ «Гидрометцентр России», а также проходят испытания в территориальных подразделениях Росгидромета для бассейнов крупных рек (в т.ч. бассейнов рек Ока, Кубань, Усури). Включение системы визуального отображения выпускаемой прогнозной информации в оперативную систему прогнозирования позволило более эффективно оценивать прогнозы уровня воды на реках бассейна Кубани, Оки и Усури для снижения социальных и экономических рисков от прохождения опасных паводков на реках региона.

Список использованных источников

1. *Природные опасности России. Том 5. Гидрометеорологические опасности / под ред. Г.С. Голицина, А.А. Васильева.* – М., Крук, 2001. – 295 с.
2. Интернет-сайт Национальной службы погоды США. Рассчитанные области затопления при прохождении паводочной волны. [Электронный ресурс]. – <http://water.weather.gov/ahps/inundation.php>
3. Интернет-сайт программы моделирования зон затоплений Геологической службы США. [Электронный ресурс]. – http://water.usgs.gov/osw/flood_inundation/
4. ArcGIS™ Spatial Analyst□: Advanced GIS Spatial Analysis Using Raster and Vector Data. ESRI White Paper. Redlands. – 2001. – 17 p.
5. ArcGIS™ 3D Analyst™□: Three-dimensional Visualization, Topographic Analysis and Surface Creation. ESRI White Paper. Redlands. – 2002. – 16 p.
6. *Bates P.D., De Roo A.P.J.* A simple raster-based model for flood inundation simulation // J.

Hydrology. – 2000. – Vol. 236. – P. 54–77.

7. *Chen J., Hill A.A., Urbano L.D.* A GIS-based model for urban flood inundation // *J. Hydrology.* – 2009. – Vol. 373. No 1-2. – P. 184–192.

8. *Goteti G., Famiglietti J.S., Asante K.* A Catchment-Based Hydrologic and Routing Modeling System With Explicit River Channels // *J. Geophysical Research.* – 2008. – Vol. 113. No D14. – P. D14116.

9. *Horritt M.S., Bates P.D.* Evaluation of 1D and 2D Numerical Models for Predicting River Flood Inundation // *J. Hydrology.* – 2002. – Vol. 268. No. 1-4. P. 87–99.

10. *Hutchinson M.F.* A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits // *J. Hydrology.* – Vol. 106 (1/2): 211-321989

11. *O'Callaghan J. F., Mark D.M.* The extraction of drainage networks from digital elevation data. // *Computer Vision, Graphics, and Image Processing.* – 1984. –Vol. 28. – P. 323–344.

12. *Schumann G., Matgen P., Cutler M.E.J., Black A., Hoffman L., Pfister L.* Comparison of Remotely Sensed Water Stages from LiDAR, Topographic Contours and SRTM // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, In Press, CorrectedProof.

13. *Schumann G., Bates P.D., Horrit M.S., Matgen P., Pappenberger F.* Progress in integration of remote sensing-derived flood extent and stage data and hydraulic models // *Reviews of Geophysics.* – 2009. – Vol. 47. Issue 4. – 20 p.

14. *Werner M, Blazkova S, Petr J.* Spatially distributed observations in constraining inundation modelling uncertainties // *Hydrological Processes.* – 2005. – Vol. 19. – P. 3081-3096.

15. *WMO Manual on Flood Forecasting and Warning*, World Meteorological Organization, 2011.

Поступила в редакцию 07.06.2013 г.