

УДК 504.454, 504.062.2

Н. И. Куракина, В. С. Ковчик
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Геоинформационная система моделирования гидрологических процессов подтопления территории

Исследуются вопросы ландшафтного моделирования гидрологических процессов. Разработана геоинформационная обобщенная модель формирования стока. Схематизация стока производится на основе выделения в пределах бассейна однородных ландшафтно-гидрологических районов и высотных зон. Эта задача решается средствами ГИС-технологий на основе цифровых моделей рельефа, почвенных и ландшафтных карт различных масштабов, данных космической съемки и продуктов их обработки. Выделение зон подтопления заданной обеспеченности осуществляется с использованием специализированных инструментов «Гидрология» ArcGIS Spatial Analyst. Для анализа достаточно рассматривать лишь водосборную область реки, тем самым существенно сокращая временные затраты. Объектом исследования является река Белая, протекающая в республике Башкортостан, основной водный и питьевой источник региона – типичный пример водного объекта, подвергающегося ежегодным интенсивным разливам. Проведен анализ результатов в соответствии с реальной статистикой подтоплений в исследуемом регионе.

Ландшафтное моделирование, гидрологические процессы, подтопление территории, геоинформационные системы, анализ, ArcGIS for Desktop

Подтопления территории – проблема, ежегодно затрагивающая тысячи населенных пунктов в России и по всему миру. Весеннее половодье и паводки наносят значительный материальный ущерб, повреждают жилые дома, автомобили, дороги, прочие инфраструктурные объекты и производственные сооружения, затрудняют передвижение и помощь пострадавшим, не говоря уже о жизнях людей, ежегодно отнимаемых подтоплениями. В связи с этим имеет практическую значимость определение зон возможного подтопления, а также составление перечня объектов, находящихся под непосредственной угрозой подтопления с различной вероятностью.

Использование геоинформационных технологий и цифровых моделей рельефа (ЦМР) позволяет значительно автоматизировать данный процесс. Определение зон возможного подтопления в настоящее время – распространенная прикладная гидрологическая задача, решаемая средствами ГИС [1]. В качестве исходных данных для определения зон подтопления необходимо обладать детальной информацией о рельефе и значениях уровней воды заданной обеспеченности.

Цель данной работы – исследование современных решений в вопросе картографического моделирования подтопления территорий, разра-

ботка алгоритма выделения зон подтопления заданной обеспеченности с использованием специализированных инструментов «Гидрология» ArcGIS Spatial Analyst, анализ результатов в соответствии с реальной статистикой подтоплений в анализируемом регионе.

Объект исследования в данной работе – река Белая, крупнейшая река в республике Башкортостан, основной водный и питьевой источник региона – типичный пример водного объекта, подвергающегося ежегодным интенсивным разливам. Знание закономерностей протекания процесса подтопления в данном регионе имеет широкое практическое значение.

Для анализа достаточно рассматривать лишь водосборную область реки, тем самым существенно сокращая временные затраты. ЦМР должна иметь постоянное понижение вдоль русла реки и гидрологическую корректность.

Цифровые модели рельефа. Цифровой моделью рельефа принято считать средство цифрового представления трехмерных пространственных объектов (поверхностей или рельефов) в виде трехмерных данных, образующих множество высотных отметок и иных значений аппликат (координаты Z) в узлах регулярной или нерегулярной сети либо совокупность записей горизонталей (изогипс, изобат) или иных изолиний [1].

Цифровая модель рельефа – это важнейший компонент любой гидрологической модели. Пространственное разрешение цифровой модели территории, используемой в ходе цифрового моделирования, определяется площадью рассматриваемого водосбора и детализацией имеющихся данных. Так, в модели ECOMAG (Ecological Model for Applied Geophysics), используемой для значительных водосборов, применяется ЦМР GLOBE (The Global Land One-km Base Elevation Project) с размером ячейки 1 км. Для моделирования стока с малых и средних водосборов необходимы данные с более высоким пространственным разрешением, получение которых представляет некоторую трудность. За прошедшие 10 лет в свободном доступе появились глобальные ЦМР с шагом сетки от 30 до 250 м: SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), GMTED2010 (Global Multi-resolution Terrain Elevation Data), ASTER GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, Global Digital Elevation Model).

В результате анализа различных моделей наиболее подходящей для решения задачи формирования стока была признана ЦМР GMTED2010 ввиду доступности для использования, приемлемой точности и скорости работы с моделью. Модель находится в открытом доступе.

Моделирование речного стока. Для определения русла потока жидкости ЦМР можно представить как составленную из горизонтальных

ячеек поверхность фиксированной высоты. Жидкость «вытекает» из ячейки и распределяется между теми из ее соседей, высота которых меньше центральной ячейки.

Направление стока. В ArcGIS Desktop реализован алгоритм направления стока Deterministic Eight Neighbor (D8). Согласно ему, поток из рассматриваемой ячейки целиком направляется в ту из восьми соседних, которая имеет меньшую высоту и наибольший уклон линии, связующей центр текущей ячейки с центром соседней [2]. На выходе инструмента «Направление стока» будет целочисленный растр, значения которого находятся в диапазоне от 1 до 255 в зависимости от направления стока (рис. 1).

32	64	128
16		1
8	4	2

Рис. 1

Локальные понижения. Чтобы обеспечить корректную работу алгоритма D-8, необходимо предварительно устранить в ЦМР так называемые локальные понижения, которые представляют собой небольшие ошибки, возникшие из-за разрешения данных или округления высот до ближайшего целого значения. Локальные понижения

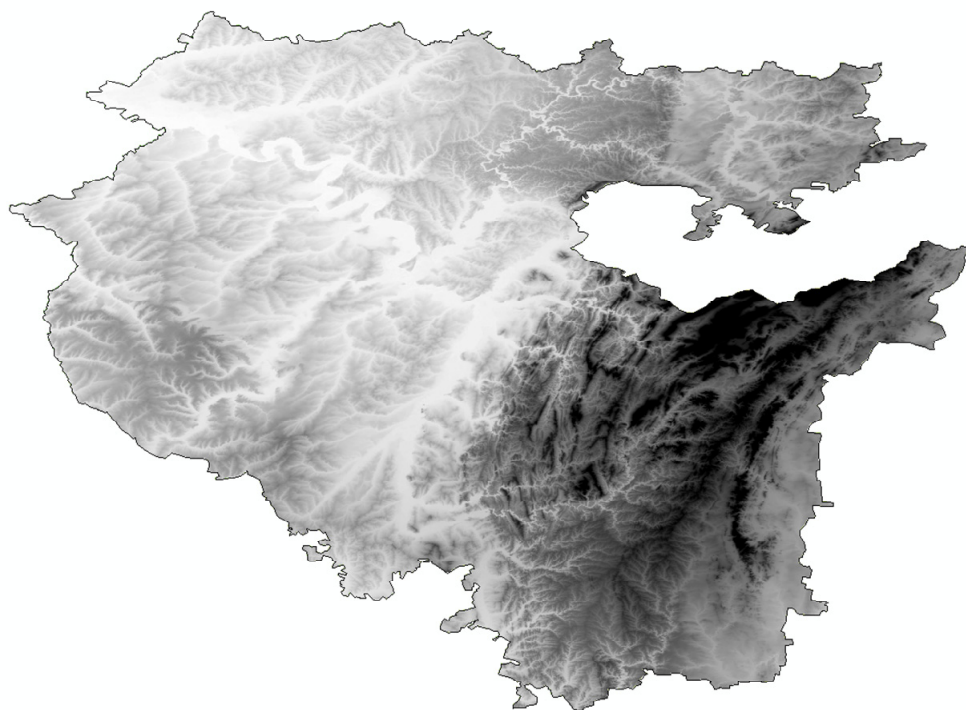


Рис. 2

необходимо заполнить для более грамотного выделения бассейнов и водотоков. Если этого не сделать, выделенная дренажная сеть может иметь разрывы.

Эта задача в ArcGIS Desktop решается с помощью инструмента «Заполнение». Инструмент будет выполняться, повторяясь до тех пор, пока не будут заполнены все без исключения локальные понижения с учетом заданного ограничения по Z (по высоте) [2]. На рис. 2 представлена цифровая модель рельефа после заполнения локальных понижений.

Суммарный сток. На основании раstra направления стока формируется растр суммарного стока, где каждая ячейка определяется суммой весов для всех ячеек, стекающих в каждую ячейку, расположенную вниз по склону [2].

Ячейки с неопределенным направлением стока будут накапливать поток; они не будут вносить вклад в сток в направлении вниз по склону. Считается, что ячейка имеет неопределенное направление стока в том случае, если ее значение в растре направления стока не равно 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 или 128. Суммарный сток основывается на количестве ячеек, из которых происходит сток в каждую конкретную ячейку в выходном растре. Та ячейка, которая обрабатывается в текущий момент времени, не учитывается в сумме. Ячейки на выходе с высоким суммарным стоком – это участки концентрированного стока; они используются для определения русел водотоков. Выходные ячейки с нулевым суммарным стоком – это локальные топографические пики; они могут быть использованы для выделения хребтов или линий водораздела. Алгоритм работы инструмента «Суммарный сток» представлен на рис. 3.

Сеть водотоков. Сети водотоков выделяют из ЦМР, используя выходные данные инструмента «Суммарный сток» с применением порогового значения в инструменте «Условие». Величина

порогового значения для определения водотоков будет соответствовать верхнему течению малых рек и ручьев. Наибольшие значения суммарного стока имеют ячейки, которые соответствуют руслам крупных рек. Для выделения не только крупных, но также и малых рек, а в последующем и границ водосборов, необходимо установить минимальное пороговое значение суммарного стока, соответствующее водотокам. В нашем случае минимальное пороговое значение установлено равным $2e+003$.

Порядок водотоков. Порядок водотоков определяет и классифицирует водотоки на основе количества их притоков. Так, потоки первого порядка имеют приоритет над потоком воды на суше; они не имеют сосредоточенного потока вверх по течению. Это является причиной их восприимчивости к проблемам загрязнения неточечных источников; они могут извлечь больше пользы из широких прибрежных буферов, чем из других областей водоразделов.

Инструмент «Порядок водотоков» имеет два метода для присвоения порядка [2]. Это методы, предложенные Стралером и Шреве. Хотя метод Стралера, используемый по умолчанию, является наиболее распространенным, преимущество метода Шреве состоит в том, что он не так чувствителен к добавлению и удалению связей при дальнейшем анализе.

В этих двух методах сегментам водотоков вверх по течению, или внешним связям, всегда присваивается порядок 1. Результат выделения водотоков различного порядка представлен на рис. 4.

Водосборная область. Водосборная область – это область вверх по склону, которая распределяет сток в общую точку слива (точку устья). Границы между водосборами называются линиями разграничения стока. Водосборные области выделяются из ЦМР посредством вычисления направления стока и использования его в инструменте «Водосборная область».

2	2	2	4	4	8
2	2	2	4	4	8
1	1	2	4	8	4
128	128	1	2	4	8
2	2	1	4	4	4
1	1	1	1	4	16

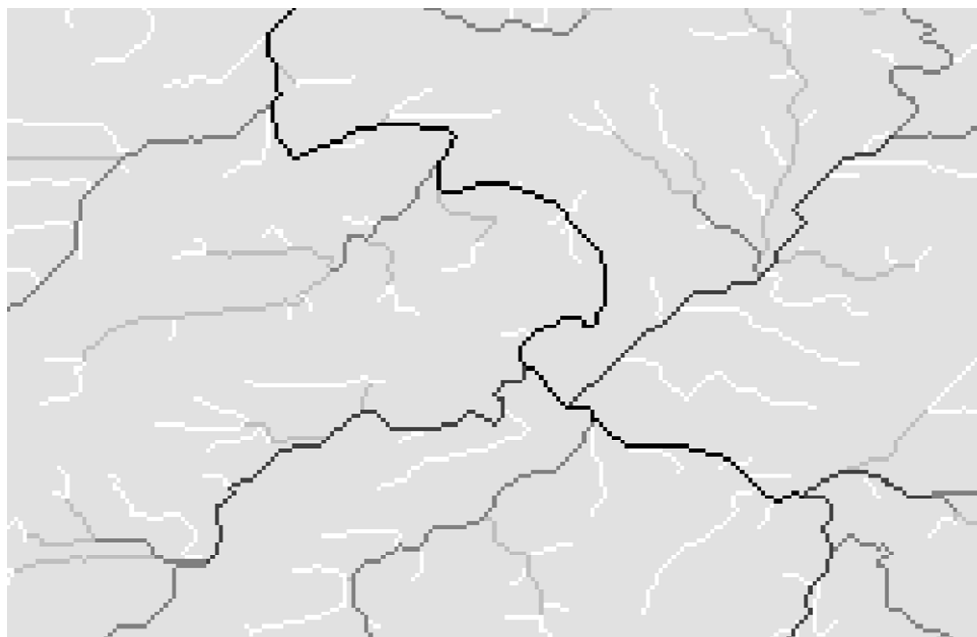
Направление стока

=

0	0	0	0	0	0
0	1	1	2	2	0
0	3	7	5	4	0
0	0	0	20	0	1
0	0	0	1	24	0
0	2	4	7	35	1

Суммарный сток

Рис. 3



Порядок водотоков: - 1; - 2; - 3; - 4; - 5

Рис. 4

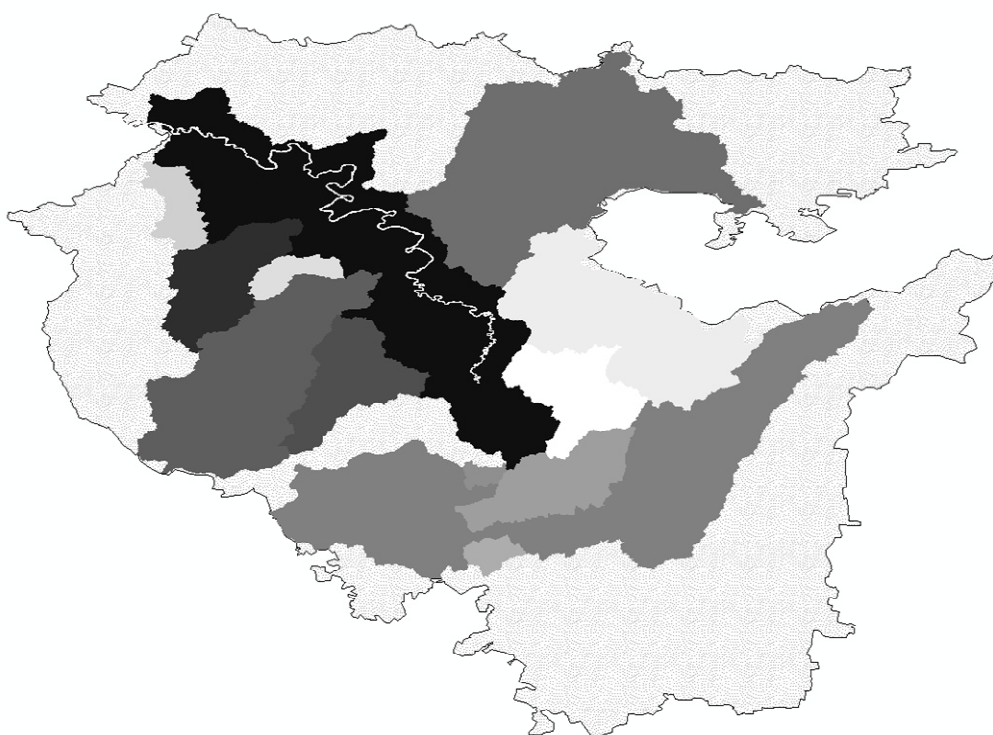


Рис. 5

Для автоматического выделения водосборной области необходимо установить точки устья, соответствующие линиям расчетного дренажа. Рекомендуется устанавливать точки устья вблизи гидропостов таким образом, чтобы они находились точно на оси расчетных потоков.

Для обеспечения выборки точек с высоким суммарным стоком при выделении водосборных бассейнов используется инструмент «Привязка точки устья». Данный инструмент ищет ячейки с наивысшим суммарным стоком в пределах допуска вокруг заданных точек устьев и сдвигает точку

устья в это положение. Полученные водосборные области представлены на рис. 5.

Векторизация раstra водосборов. Для расчета площади водосбора, а также различных морфометрических параметров необходимо конвертировать его контур из раstra в векторный формат.

Определение границ подтопления на основе ЦМР. Одним из методов определения зон подтопления средствами ГИС является метод превышений [3]. Для выявления территории подтопления необходима исходная цифровая модель рельефа и модель секущей плоскости поверхности воды при подъеме уровня воды на заданную высоту. Секущая плоскость должна также учитывать уклон реки, т. е. иметь постоянное понижение вдоль ее русла. В качестве такой модели используется растр, несущий данные об урезах воды. Прибавляя с помощью «Калькулятора раstra» к данному растру значение ожидаемого подъема уровня воды (одинаковое на всей области расчета) и вычитая цифровую модель рельефа, можно определить область затопления (в которой результат вычисления окажется больше нуля).

Для расчета зоны подтопления при половодье необходимо ввести в «Калькулятор раstra» соответствующее выражение:

$$(\text{Model} + H - \text{GMTED}) < 0,$$

где Model – значения урезов; H – заданная высота подъема уровня воды; GMTED – цифровая модель рельефа.

Результатом вычисления станет двоичный растр, где единичное значение соответствует затопленной территории, а нулевое – незатопленной.

Затем необходимо конвертировать полученный растр в векторное представление данных, чтобы использовать его для выполнения пространственных операций: например, вычислять площади подтопления, длину затопленных дорог, количество зданий, попадающих в зону подтопления, и т. п.

Алгоритм выделения зон подтопления реки Белая. Алгоритм определения границ зон подтопления территории с использованием инструментов ArcGIS и ЦМР представлен на рис. 6.

В начале с помощью инструмента «Заполнение» устраняются локальные понижения ЦМР, препятствующие корректной работе алгоритма расчета стока. Затем рассчитывается направление стока в заданной области и строится растр суммарного стока. Руководствуясь схемой гидрологических постов, вручную расставляют точки устья, чтобы отделить водосбор анализируемой реки от других водосборов. Расставленные точки устья, находящиеся в векторном формате, переводятся в растровый формат и привязываются к растру суммарного стока. С помощью инструмента «Водосборная область» выделяется водосборная область анализируемой территории. Затем водосборная область переводится в векторный формат и выби-

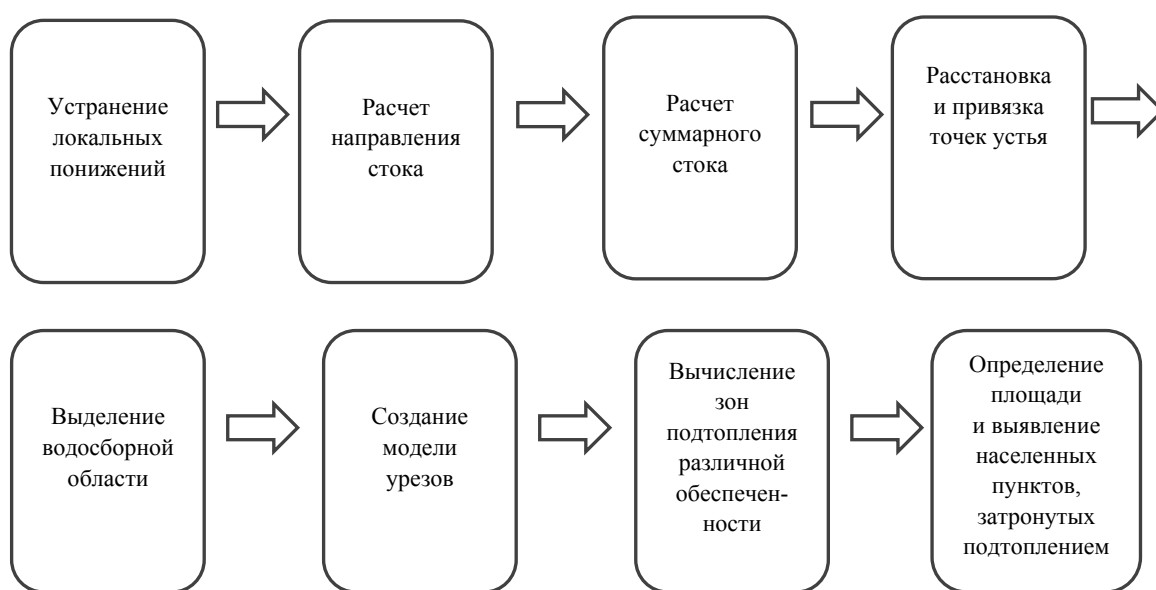


Рис. 6

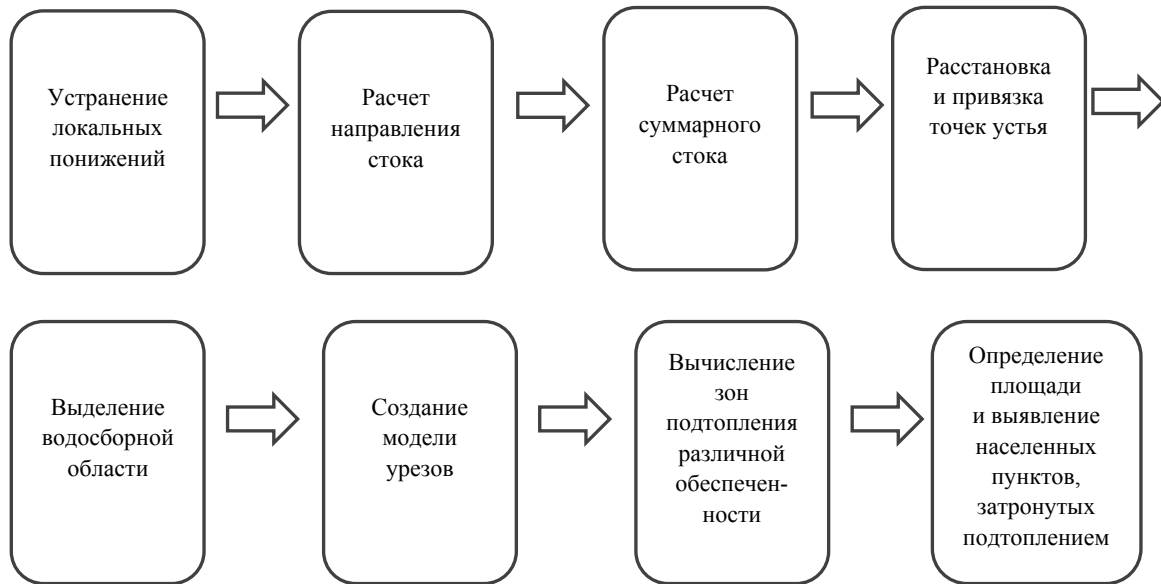
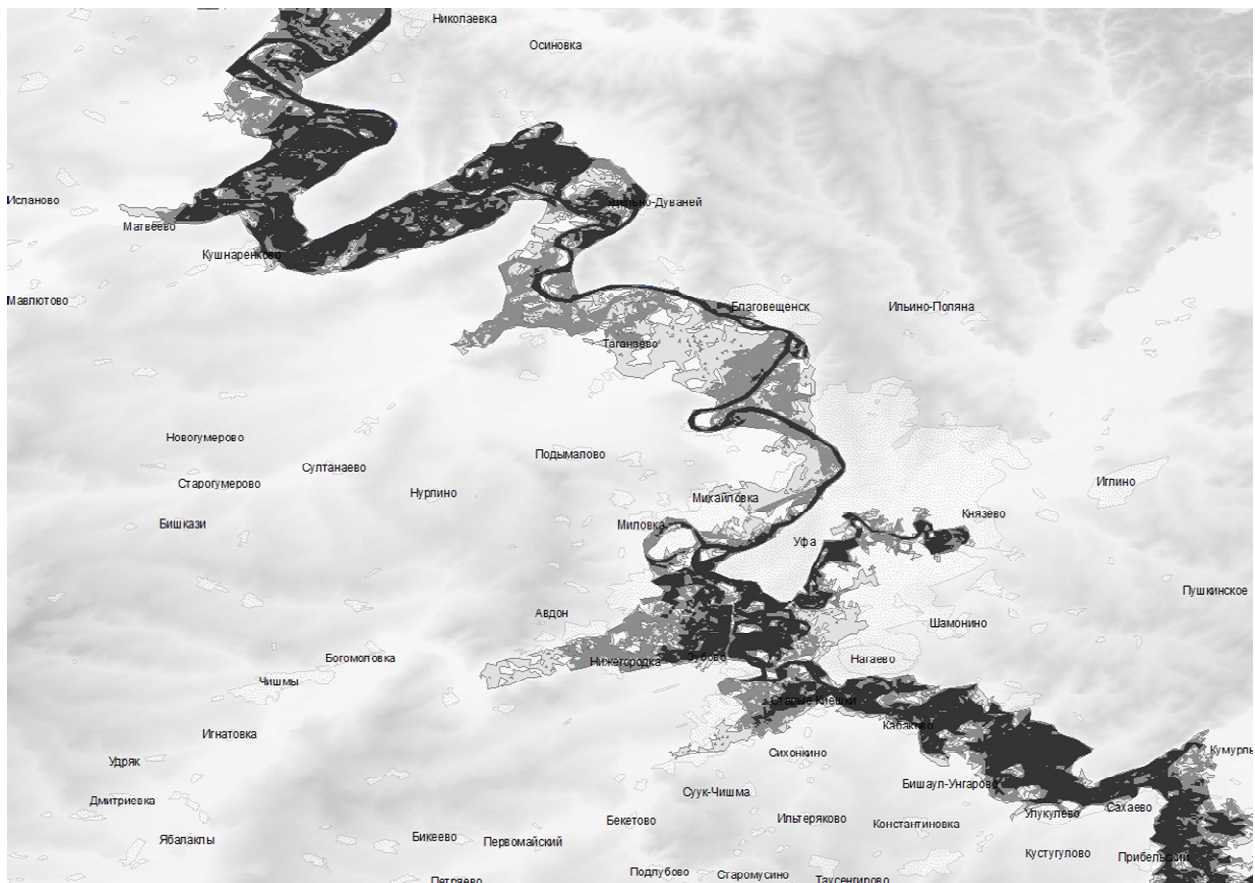


Рис. 6



 – зона подтопления 5 %-й обеспеченности; – зона подтопления 1 %-й обеспеченности;

 – зона подтопления 0.1 %-й обеспеченности

Рис. 7

рается водосборная область реки Белая. На основе схемы водосбора и ЦМР создается модель урезов, которая затем конвертируется в растровый формат. Зоны подтопления различной обеспеченности вычисляются с помощью «Калькулятора растра» со-

гласно формуле. Для определения площади зоны подтопления и выявления населенных пунктов, затронутых подтоплением, зоны подтопления конвертируются в векторный формат.



Рис. 8

Анализ и оценка результатов. С использованием инструментов «Гидрология» дополнительно модуля ArcGIS Spatial Analyst, был реализован вышеприведенный алгоритм, созданы слои зон подтопления при прохождении половодий различной обеспеченности и построена тематическая карта, представленная на рис. 7. Были смоделированы подтопления при весенних половодьях 5, 1 и 0.1 %-й обеспеченности [4].

Для оценки точности полученных результатов было проведено их сравнение с данными подтоплений на реке Белой по городу Уфа Государственного комитета республики Башкортостан по чрезвычайным ситуациям 2017 г. [5]. Исходя из данных, полученных при моделировании, в зону подтопления для каждого значения обеспеченности попадают микрорайоны Кооперативная поляна, Нижегородка, значительные участки Кировского и Демского и Ленинского района города Уфы (рис. 8).

Так, при подтоплении 0.1 % обеспеченности большая часть Кировского и Демского районов окажется подвержена подтоплению. Перечисленные районы также присутствуют в отчете комитета по ЧС Башкирии при всех значениях уровня подъема воды.

Проведенный сравнительный анализ позволяет сделать вывод о достоверности данных моделирования и возможности использования разработанного алгоритма для гидрологического моделирования зон подтопления в различных регионах.

Разработанный алгоритм моделирования зон подтопления служит информационной основой для решения задач прогнозирования наводнений и аварийных разливов. Наглядное отображение экологической ситуации на карте позволит своевременно предотвратить возможные чрезвычайные ситуации и эффективно решать задачи по устранению последствий опасных гидрологических явлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пьянков С. В., Шихов А. Н. Геоинформационное обеспечение моделирования гидрологических процессов и явлений: монография / Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2017.
2. Справочные данные ArcGISDesktop. URL: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.5/tools/spatial-analyst-toolbox/an-overview-of-the-hydrology-tools.htm> (дата обращения 9.03.2020).
3. Калинин В. Г., Пьянков С. В. Гидрография. Определение гидрографических характеристик рек и

их водосборов с применением цифрового картографического моделирования: учеб. пособие / Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2013.

4. Myshko R. A., Kurakina N. I., Kovchik V. S. Geoinformational generalized flow formation model for solving problems of prognostication and emergency prevention // Proc. of the IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. ElConRus 2019. SPb, 2019. С. 1314–1317.

5. Государственный комитет Республики Башкортостан по чрезвычайным ситуациям, данные по па-

водкам за 2017 год. URL: <https://gkchs.bashkortostan.ru/activity/1788/> (дата обращения 12.03.2020).

N. I. Kurakina, V. S. Kovchik
Saint Petersburg Electrotechnical University

GEOINFORMATIONAL MODELING SYSTEM OF THE TERRITORY FLOORING HYDROLOGICAL PROCESSES

The issues of landscape modeling of hydrological processes are studied in this paper. A generalized geoinformation model of runoff formation has been developed. The flow is schematized on the basis of the allocation within the basin of homogeneous landscape-hydrological areas and altitudes. This problem is solved by means of GIS technologies based on digital elevation models, soil and landscape maps of various scales, satellite imagery data and processing products. The allocation of zones of flooding given security is carried out using specialized tools "Hydrology" ArcGIS Spatial Analyst. For analysis, only the catchment area should be considered. This is the most significantly reducing time costs. The object of the study is the Belaya River in the Republic of Bashkortostan, the main water and drinking source of the region – a typical example of a water body subjected to intense annual spills. The analysis of the results is carried out in accordance with real statistics of flooding in the studied region.

Landscape modeling, hydrological processes, flooding of the territory, geographic information systems, analysis, ArcGIS for Desktop

УДК 681.3, 621.937:004.942

Ю. Т. Лячек, М. С. А. Мутанна
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Распределение трафика в сети LoRaWAN

Интернет вещей (IoT) позволяет подключать, измерять, контролировать миллионы устройств для автоматизации процессов и поддержки более эффективного принятия решений при их управлении. С другой стороны, эти устройства IoT требуют экономичных, дальнodayствующих и энергетически эффективных датчиков и исполнительных механизмов. Рассмотрена технология LoRaWAN – одна из технологий маломощных глобальных сетей (LPWAN), которой в последние годы уделяется значительное внимание исследовательского сообщества. LoRaWAN обеспечивает низкое энергопотребление и скорость передачи данных в широком диапазоне покрываемых областей. Использование протокола LoRaWAN в системах IoT позволяет оптимизировать энергопотребление, емкость, стоимость и охват системы. Исследуется проблема распределения трафика по радиочастотным каналам и предлагается подход к моделированию сети LoRaWAN, основанный на наличии нескольких независимых радиочастотных каналов. В рамках этого подхода предлагается модель и метод расчета сети LoRaWAN. В частности, описан метод решения с использованием подхода динамического программирования. Предложен метод решения задачи оптимального распределения трафика. Численные результаты показывают эффективность предложенного подхода, при котором максимально используется пропускная способность технологии LoRa. В ряде случаев предлагается передавать по сети только те участки изображения, которые изменяются во времени.

LoRaWAN, радиочастотные каналы, вероятность потери пакетов, вероятность столкновений, модель передачи, метод расчета трафика

Технология LoRaWAN позволяет реализовать дешевый и достаточно качественный способ доставки данных с использованием беспроводного канала от конечных устройств (точек) получения

данных до шлюза (входного устройства) сервера сети провайдера. При этом могут быть использованы различные режимы работы конечных устройств и шлюза [1], [2], которые позволяют