



УДК 551.4.013:551.43(470.44)

ПОСТРОЕНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИ-КОРРЕКТНОЙ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА (на примере Саратовской области)

А. Н. Чумаченко, Д. П. Хворостухин, В. А. Морозова

Чумаченко Алексей Николаевич, доктор географических наук, профессор кафедры геоморфологии и геоэкологии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, chumach1313@mail.ru

Хворостухин Дмитрий Павлович, старший преподаватель кафедры геоморфологии и геоэкологии, инженер лаборатории геоинформатики и тематического картографирования, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, khvorostukhin89@mail.ru

Морозова Валерия Андреевна, ассистент кафедры геоморфологии и геоэкологии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, riukarin@gmail.com

В статье представлен алгоритм построения гидрологически-корректной цифровой модели рельефа. Приведены основные тематические термины и определения. Проведено построение сети водотоков на территории Саратовской области и построение водосборных бассейнов рек с помощью ГИС-технологий. Отработан алгоритм построения зон затопления территории для выявления наиболее уязвимых объектов.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, геоинформационное моделирование, гидрологическая модель, моделирование водотоков, зоны затопления.

Construction of a Hydrologically-correct Digital Terrain Model (Using the Example of Saratov Region)

A. N. Chumachenko, D. P. Khvorostukhin, V. A. Morozova

Aleksey N. Chumachenko, ORCID 0000-0002-9482-1496, Saratov State University, 59, Universitetskaya Str., 410012, Russia, chumach1313@mail.ru

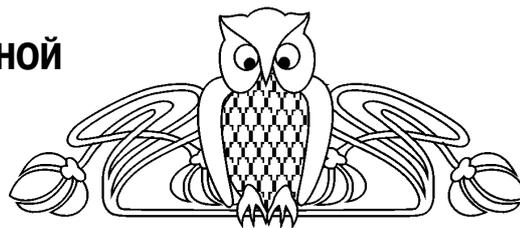
Dmitriy P. Khvorostukhin, ORCID 0000-0002-5146-7773, Saratov State University, 61, Moskovskaya Str., 410012, Russia, khvorostukhin89@mail.ru

Valeriya A. Morozova, ORCID 0000-0002-5768-1201, Saratov State University, 59, Universitetskaya Str., 410012, Russia, riukarin@gmail.com

The article provides an algorithm for constructing of hydrologically correct digital terrain model. The main thematic terms and definitions are given. The construction of watercourse network on the territory of Saratov region and construction of watershed basins has been carried out by GIS-technologies. An algorithm for constructing flood zones of the territory has been developed to identify the most vulnerable objects.

Key words: digital terrain model, geoinformation modelling, hydrological model, construction of watercourse network, flood zones.

DOI: 10.18500/1819-7663-2018-18-2-104-109



Изучение речных бассейнов – неотъемлемая часть географических исследований и ключ к решению многих задач территориального анализа и планирования. Бассейновый подход важен как при комплексном исследовании территории, так и при изучении отдельных природных или природно-антропогенных явлений. Особенно эффективным представляется использование этого подхода при изучении опасных природных процессов. К таким явлениям, в частности, относятся наводнения (подъем уровня воды) на реках [1].

Наводнения представляют существенный риск и угрозу для жизнедеятельности человека. Они могут привести к повреждению и разрушению зданий, нарушению работы объектов инфраструктуры, ускоренному развитию экзодинамических процессов (абразия, оползание и т. п.) и многим другим опасным для человека последствиям.

Характерны эти явления и для рек Саратовской области. По повторяемости (раз в 4 года), площади распространения и суммарному материальному ущербу в масштабах Саратовской области наводнения занимают первое место среди прочих чрезвычайных ситуаций на водных бассейнах: лесные пожары в бассейнах рек, оползни, снежные заносы, ураганы и штормовые ветры [2]. Традиционно в области от наводнений страдает более половины муниципальных районов [3].

По степени опасности подъема воды в реках выделяют шесть типов районов:

– чрезвычайно опасные, где максимальные уровни воды более чем на 3,2 метра превышают уровни начала затопления прибрежных территорий;

– весьма опасные, где максимальные уровни на 2,1–3,2 м превышают уровни начала затопления;

– опасные, где максимальные уровни на 1,5–2,0 м превышают уровни начала затопления;

– умеренно опасные, где максимальные уровни на 0,8–1,4 м превышают уровни начала затопления;

– малоопасные, где максимальные уровни на 0,3–0,7 м превышают уровни начала затопления;

– незначительные, где максимальные уровни менее чем на 0,3 м превышают допустимую норму [4].

Саратовскую область можно отнести к опасному типу районов «с периодическим проявлением характера, соответствующего весьма опасному типу».



Для разработки необходимых защитных мер от затоплений нужно иметь четкое представление об изучаемой территории. Анализ данных за 2000–2016 гг., полученных из различных источников [5–6], позволил определить реки Саратовской области, наиболее подверженные наводнениям, и отметить территории, которые чаще всего затопляются (покрытие водой днища долины или территории, прилегающей к реке) [7].

Анализ зон затопления в различные годы, конечно же, позволяет сделать некий прогноз будущих разливов рек. Однако провести качественную оценку риска затопления территорий, опираясь только на эти данные, невозможно. Нужен серьезный анализ совокупного действия причин, вызывающих затопления, и изучение факторов, в той или иной степени влияющих на это явление.

К основным причинам, вызывающим затопления, относятся: обильные осадки, провоцирующие паводки; заторы на реках, способствующие резкому подъему уровня вод в реках; традиционное половодье, вызванное быстрым таянием снега в весенний период; загромождение живого сечения русла реки во время ледохода и стеснение живого сечения – затор; зажоры – закупорка живого сечения реки в период начала осеннего или зимнего ледостава массой внутриводного льда, шуги, обломков заберегов или небольших льдин. Это, по сути, основные причины, определяющие возможность подъема воды в реках.

При анализе необходимо рассматривать и группу факторов, непосредственно влияющих на уровень подъема воды в реке:

- высота и структура рельефа территории;
- тип и размер водосборного бассейна рек;
- средний многолетний уровень воды в реке;
- влагозапас снежного покрова перед началом весеннего снеготаяния;
- осадки в период снеготаяния и половодья;
- осеннее и зимнее увлажнение почвы к началу весеннего снеготаяния;
- глубина промерзания почвы к началу таяния снежного покрова [8].

Одним из наиболее важных факторов является рельеф территории. Его анализ является необходимым при изучении причин, последствий затопления и выработки эффективных мер борьбы с данным неблагоприятным для жизнедеятельности человека процессом.

Последние годы изучение особенностей рельефа территории и его влияния на различные процессы и явления в основном базируется на построении и анализе цифровых моделей рельефа (ЦМР). Под ЦМР обычно понимают непрерывное цифровое представление топографической поверхности в виде регулярной сети ячеек. Основными источниками данных для построения такой модели служат аэрофотосъемка, космосъемка, полевые работы, гидролокационные съемки и т. д. По форме представления ЦМР делятся на регулярные и нерегулярные модели: первые представляют

собой GRID поверхность (значения интерполируются по высотам в нескольких соседних ячейках), вторые – TIN поверхность (построенные на основе триангуляции Делоне).

Однако далеко не всегда цифровые модели рельефа можно использовать для решения широкого круга задач из-за наличия неточностей и артефактов. В частности, для анализа наводнений, моделирования зон затопления, проведения различных гидрологических расчетов необходимо создание гидрологически-корректной цифровой модели рельефа (гидро-ЦМР). Гидро-ЦМР представляет собой модель, в которой форма и направление смоделированных водотоков совпадают с реальными в пределах исследуемой территории. Результатом построения такой модели является отражение настоящего характера движения водных потоков.

Такая модель, в отличие от обычной ЦМР, позволяет проводить построение наиболее корректных морфометрических карт, определять границы водосборных бассейнов, моделировать гидрографическую сеть с определением порядков водотоков, строить зоны потенциального затопления территории и т. д.

Для апробации алгоритма построения подобной цифровой модели на территорию Саратовской области в качестве исходной информации были взяты данные радарной топографической съемки SRTM 1 с разрешением 30 м, или одна угловая секунда. Разрешение и точность данной модели вполне подходят для построения зон потенциального затопления. При проведении исследования также рассматривались другие глобальные ЦМР, например ASTER GDEM, однако из-за наличия некоторых артефактов они оказались непригодны для построения Гидро-ЦМР в пределах Саратовской области. Для создания модели был выбран программный комплекс ESRI ArcGIS [9], а также использовались методики, указанные в источниках [10–12].

Первое, на что следует обратить внимание при работе с SRTM, это то, что эти данные получены при радарной интерферометрической съемке земной поверхности, поэтому они фактически являются цифровой моделью местности, а не рельефа, т. е. в них учтены объекты, находящиеся на земной поверхности, например здания, растительность и т. д. Поэтому каждый раз необходима соответствующая корректировка данных на каждом конкретном участке территории.

Второй важный момент при работе с SRTM – множественные артефакты и ошибки в значениях высот. Чтобы максимально приблизить модель к действительной поверхности рельефа, нужно заполнить все локальные понижения (некорректные области внутреннего стока) и устранить погрешности и неточности в значениях ячеек раstra. Если не выполнить описанные выше операции, то в дальнейшем при моделировании сеть водотоков может иметь разрывы, что, безусловно, является недопустимым.



Первым шагом при корректировке данных SRTM является устранение всех ошибочных локальных понижений модели. На первом этапе заполняются локальные понижения от 0,1–0,5 м, т. е. устраняются ошибки исходной модели. На втором этапе ликвидируются максимальные отклонения модели от поверхности рельефа, которые выявляются путем сравнения модели с данными топографических карт. После проведения этой операции можно перейти к дальнейшему анализу ЦМР.

Для оценки зон затопления территории в программном комплексе ESRI ArcGIS необходимо провести несколько операций, взаимосвязанных между собой (рис. 1):

- определить направление стока;
- определить суммарный сток;
- выделить линии водотоков;
- выделить звенья водотоков;
- определить порядки водотоков;
- определить границы водосборных бассейнов.

В рамках первой операции определялись направления стока в каждой ячейке модели путем анализа углов и экспозиций склонов, определенных по ЦМР.

Вторая операция – вычисление суммарного стока, т. е. количества всех ячеек, чей сток попадает в ячейку, лежащую ниже по склону. Ячейки с самым большим значением суммарного стока образуют некие линии, выделяющиеся относительно всего остального фона. Эти линии послужат каркасом для создания в дальнейшем сети водотоков. Ячейки, суммарный сток которых принимает значение «0», – это территориальные «пики» (возвышения), с помощью которых визуализируются линии водоразделов.

Для создания раstra, содержащего информацию о форме водотоков, необходимо провести

третью операцию – перекодировку, т. е. задать некое пороговое значение показателя суммарного стока, при котором ячейка будет считаться водотоком. Экспериментальным путем авторами данной статьи установлено, что для наших данных оптимальный нижний порог значения суммарного стока равен 100. При такой величине показателя сеть водотоков получается достаточно подробной для проведения дальнейших расчетов, при этом образуется минимальное количество артефактов – некорректных водотоков.

Описанные выше три операции преобразования исходных данных составляют основу для построения новой гидрологически-корректной ЦМР. После их проведения можно приступить к четвертой операции – выделению звеньев на основе раstra водотоков. Звено водотока – это участок, ограниченный истоком или устьем либо местами впадения в него других водотоков. В результате получим гидрологическую сеть на территорию Саратовской области и прилегающие к ней территории. Однако она не имеет никакой классификации и упорядоченности. Поэтому необходимо выполнить пятую операцию – определить порядок имеющихся водотоков на основе метода Страллера – Философова, по которому порядок повышается только в случае слияния водотоков с одинаковым порядком (например, при слиянии двух водотоков с порядком 3 образуется 4-й порядок).

Завершающим этапом будет служить автоматизированное выделение водосборных бассейнов. Однако для этого в ArcGIS необходимо обозначение «точек устьев» – мест впадения одного водотока в другой. К сожалению, в данном программном комплексе такая операция проводится вручную с помощью инструмента «Snap Pour Point». Он используется для выбора точек с максимальным суммарным стоком при построении водосборных



Рис. 1. Алгоритм построения гидрологически-корректной ЦМР и проведения гидрологических операций



бассейнов. Данный инструмент будет выполнять поиск ячеек с наивысшим суммарным стоком в пределах величины допуска вокруг заданных точек устьев и сдвигать их, т. е. фактически привязывать к ячейке с наибольшим суммарным стоком в пределах заданного расстояния.

Так как объектом нашего исследования является довольно обширная территория, а следовательно, и разветвленная сеть водотоков, выделить все точки устьев вручную не представляется возможным. В связи с этим нами было принято решение на завершающем этапе воспользоваться инструментарием другого открытого ПО – QGIS – с последующей конвертацией данных обратно в ArcGIS.

В QGIS был задействован модуль SAGA, оператор «Watershed basins» с минимальным размером для выделения бассейна 500 км², наиболее подходящим для Саратовской области, что было установлено экспериментальным путем. Результатом проведения данной операции являются растровые границы водосборных бассейнов.

После преобразования растрового изображения в векторное (посредством функции – «raster to vector») стоит обратить внимание на то, что полученные области имеют пиксельные дефекты контуров. Для того чтобы получить более сглаженные границы водосборных бассейнов, применяется инструмент «генерализация» из инструментария GRASS. После преобразования получаются более корректные границы.

При сравнении имеющихся векторных картографических слоев речной сети и границ речных бассейнов Саратовской области, с одной стороны,

и смоделированных водосборных бассейнов – с другой, можно наблюдать, что при использованных параметрах моделирования они очень близки между собой по конфигурации. Таким образом, учитывая предыдущий опыт создания подобных гидрологически-корректных ЦМР и построения речных бассейнов, описанный в источнике [13], можно утверждать, что подобное построение гидро-ЦМР на основе данных SRTM 1 в геоинформационной среде является достаточно точным и пригодным для моделирования водотоков и речных бассейнов. С помощью полученных данных можно проводить ряд гидрологических операций: расчет густоты речной сети в пределах водосборных бассейнов, определение их площадей, расчет зон затопления и пр.

Чтобы оценить точность полученной модели, проведем сравнительный анализ речной сети Саратовской области, отображенной на топографической карте масштаба 1 : 100 000 (серый сплошной цвет на рис. 2), и построенных по гидро-ЦМР водотоков (черный пунктир на рис. 2). Очевидно, что конфигурация смоделированных водотоков несколько отличается от данных карты, однако необходимо отметить, что в целом форма водотоков соответствует действительности. Разумеется, сеть построенных водотоков является более разветвленной за счет того, что учитываются не только реки, но и вся остальная эрозионная сеть (овраги, балки, промоины и т. д.).

Еще одной гидрологической операцией, проводимой на основе гидро-ЦМР, является построение зон потенциального затопления. Для выпол-

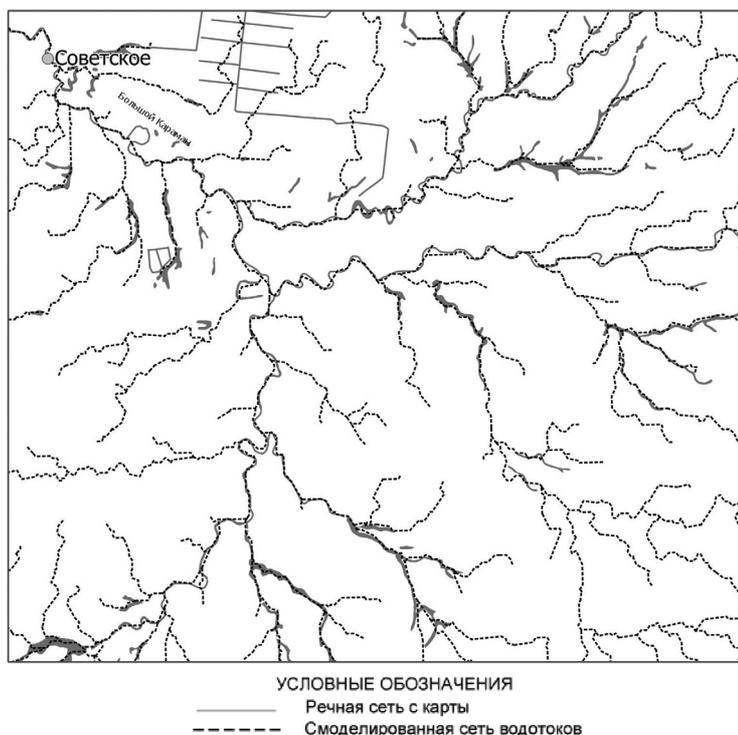


Рис. 2. Сравнение контуров смоделированной сети водотоков с сетью водотоков на топографической карте масштаба 1 : 100 000



нения данной операции необходимо определение территории, находящейся ниже максимального уровня воды в период паводка или половодья.

В рамках нашего исследования гидро-ЦМР Саратовской области разбивалась на несколько модельных участков, находящихся в непосредственной близости от гидрологических постов. Далее с помощью сведений об уровнях воды в период паводка определялись участки территории, находящиеся ниже уровня максимального подъема воды за определенный период. Полученные области и являются зонами потенциального затопления для конкретного уровня воды.

В качестве примера были выбраны территории вблизи населенных пунктов пгт. Лысье Горы и г. Балашов, находящиеся на реках Медведица и Хопер соответственно. Данные территории отличаются регулярным высоким подъемом уровня воды в период весеннего половодья. Сравнивая полученные зоны потенциального затопления с фактическими, определенными по космоснимкам за период с 1 марта по 30 июля 2016 г., можно утверждать, что построенная модель вполне адекватно отражает границы затопления территории (рис. 3).

Как отмечалось ранее, SRTM в формализованном виде является цифровой моделью мест-



Рис.3. Фактические и смоделированные зоны затопления территории в пределах гидропостов Лысье горы и Балашов



ности (ЦММ), а не цифровой моделью рельефа (таковой ее можно рассматривать только для безлесных и незастроенных территориях). Поэтому на участках с обилием лесной растительности (например, байрачные леса в пгт. Лысые горы) зоны затопления выделяются менее точно, так как кроны деревьев мешают верно оценить рельеф участка. В связи с этим возникают погрешности в определении зон потенциального затопления.

На территориях без обильной растительности (например, степная зона в г. Балашов) затопление моделируется более корректно. Таким образом, для улучшения качества моделирования необходимо использовать гибридную модель рельефа, сочетающую в себе пространственный охват ЦММ и точность ЦМР. Для того чтобы добиться такой основы, необходимо комплексировать данные SRTM1 с данными топографических карт масштаба 1:100 000 и крупнее.

Важным фактором является наличие гидрологического поста вблизи моделируемой территории для оценки возможного уровня поднятия воды. В связи с этим наиболее интересными для моделирования участками являются бассейны рек Большой Иргиз, Хопер, Медведица и ее притоков: Аткары, Идолги, Баланды, Карамыша и Терсы.

Безусловно, данный метод определения зон потенциального затопления имеет ряд недостатков. Не учитываются такие важные параметры, как скорость течения, конфигурация русла, уклон реки и т. д. Однако очевидно, что на небольших по площади территориях данный метод может быть использован для оценки площади затопления территории при определенном прогнозируемом поднятии уровня воды.

Таким образом, гидро-ЦМР, построенная на основе SRTM1 и данных топографических карт, может быть использована для решения широкого круга гидрологических задач, в частности определения зон потенциального затопления. Сведения, получаемые на основе подобных моделей, несомненно, являются важным инструментом территориального анализа и управления рисками.

Библиографический список

1. Географический словарь : наводнение. URL: <http://www.ecosystema.ru/07referats/slovgeo/507.htm> (дата обращения: 01.02.2017).
2. Правительство Саратовской области. Официальный портал : Предупреждая стихийные бедствия. URL: <http://ex.saratov.gov.ru/news/events/detail.php?ID=8312> (дата обращения: 01.02.2017).
3. Главное управление МЧС России по Саратовской области : Прогноз циклический чрезвычайных ситуаций и происшествий, обусловленных весенним половодьем 2015 года на территории Саратовской области. URL: <http://64.mchs.gov.ru/operationalpage/dailyforecast/item/2605297>(дата обращения: 01.02.2017).
4. Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций. Российская Федерация / под общ. ред. С. К. Шойгу. М. : Дизайн. Информация. Картография, 2010. 696 с.
5. Regnum информационное агенство : Саратовская область. Максимальный уровень весеннего половодья. URL: <https://regnum.ru/news/24945.html/> (дата обращения: 01.02.2017).
6. Новости Саратова : В области разрушены еще три плотины. URL:http://www.vzsar.ru/news/2010/04/13/v_oblasti_razrusheny_esche_tri_plotiny.html/ (дата обращения: 01.02.2017).
7. Географический словарь : затопление. URL: <http://www.ecosystema.ru/07referats/slovgeo/295.htm> (дата обращения: 01.02.2017).
8. *Коронкевич Н. И.* Наводнения и борьба с ними. М. : Знание, 1982. 48 с
9. ESRI жизни : creating a hydrologically conditioned DEM. URL: <http://video.esri.com/watch/1899/creating-a-hydrologically-conditioned-dem/> (дата обращения: 03.02.2017).
10. *Шихов А. Н., Черепанова Е. С., Пономарчук А. И.* Геоинформационные системы : применение ГИС-технологий при решении гидрологических задач : практикум : учеб. пособие / Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2014. 91 с.
11. *Минеев А. Л., Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б., Полякова Е. В.* Подготовка цифровой модели рельефа для исследования экзогенных процессов северных территорий Российской Федерации // Журн. Пространство и Время. 2015. Вып. № 3 (21). С. 278–291.
12. *Тесленок С. А., Василькина Д. Н., Тесленок К. С.* Создание гидрологически корректной цифровой модели рельефа для последующего использования в практике сельскохозяйственного производства // Геоинформационное картографирование в регионах России : материалы VII Всерос. науч.-практ. конф. Воронеж : Науч. кн., 2015. С. 138–143.
13. *Павлова А. Н.* Геоинформационное моделирование речного бассейна по данным спутниковой съемки SRTM (на примере бассейна р. Терешки) // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Науки о Земле. 2009. Т. 9, вып. 1. С. 39–44.

Образец для цитирования:

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. Сер. Науки о Земле. 2018. Т. 18, вып. 2. С. 104–109. DOI: 10.18500/1819-7663-2018-18-2-104-109.

Cite this article as:

Chumachenko A. N., Khvorostukhin D. P., Morozova V. A. Construction of a Hydrologically-correct Digital Terrain Model (Using the Example of Saratov Region). *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Earth Sciences*, 2018, vol. 18, iss. 2, pp. 104–109 (in Russian). DOI: 10.18500/1819-7663-2018-18-2-104-109.