ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАСТРОВОЙ МОДЕЛИ ПРИ РАСЧЕТЕ ГИДРОГРАФИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

*С.В. Пьянков, В.Г. Калинин
Пермский государственный национальный исследовательский университет
Пермь, Россия, pyankovsv@gmail.com, vgkalinin@gmail.com*

DETERMINATION OF OPTIMAL PARAMETERS OF RASTER MODELS IN CALCULATING THE HYDROGRAPHIC CHARACTERISTICS OF WATER BODIES

*S.V. Pyankov, V.G. Kalinin
Perm State University
Perm, Russia, pyankovsv@gmail.com, vgkalinin@gmail.com*

Abstract. The algorithm features for creating correct DEM for the decision of hydrological problems are considered. The necessity of selecting the optimal parameters of the linear dimensions of raster cells and threshold value sums of flow directions for modeling the river network are proved.

Keywords: GIS-technologies, raster models, DEM, optimal parameters, modeling of river network.

Использование современных геоинформационных технологий для определения гидрографических и морфометрических характеристик водных объектов и их водосборов возможно при наличии корректных цифровых моделей рельефа (ЦМР). Создание и дальнейшее использование таких ЦМР в гидрологических расчетах связано с решением ряда самостоятельных задач, таких как:

- выбор исходных пространственных данных и способов их представления;
- оценка правил соблюдения топологических отношений;
- выбор методов интерполяции с необходимыми параметрами;
- используемое разрешение при построении ЦМР (линейные размеры раstra);
- подбор оптимальных параметров моделирования речной сети и водосборов.

Рассмотрим ряд возможных подходов к оптимальному построению ЦМР на примере одного из участков Камского водохранилища и прилегающей к нему территории.

Определение гидрографических характеристик водных объектов выполняется с использованием топографических карт [4]. Поэтому в качестве исходных данных для создания ЦМР исследуемой территории использованы цифровые топографические карты масштаба 1:100 000 и крупномасштабные (1:25 000 – 1:50 000) карты дна Камского водохранилища, построенные по результатам эхолотной съемки, выполненной Верхнекамским районом водных путей (1993–1995 гг.) (рис. 1).

Выбор данных продиктован задачей построения ЦМР с учетом природных и антропогенных объектов, влияющих на формирование поверхностного стока. С этой целью использовались следующие послayers векторные данные: реки, озера, водохранилища, пруды, горизонталы, характерные точки рельефа и урезы воды, глубины, изобаты, обрывы (табл. 1). При решении других тематических задач набор слоев может быть изменен. В таблице 1 указан не только перечень пространственных данных, но и способ их представления, параметры и требования к топологии (направление течения реки, впадение одной реки в другую, правильность расположения объектов при совмещении карт разных масштабов и т.д.), соблюдение которых является необходимым и важным условием для создания корректной ЦМР и моделирования поверхностного стока. Проверка и редактирование топологических отношений выполняется средствами ГИС-технологий (EaseTrace, ArcGIS и др.).

Одним из наиболее часто используемых представлений пространственных данных является растровое (GRID). Это связано с его особенностями, такими как непрерывность, дискретность и регулярность. Точность построения GRIDa определяется в первую очередь разрешением (линейными размерами раstra).

Среди большого количества методов получения растровых данных [ПО «ArcGIS Spatial Analyst»] наиболее эффективным является инструмент «Топо в растр (Toro to Raster)» в составе ArcGIS. Этот метод интерполяции специально разработан для создания гидрологически корректных ЦМР по точечным, линейным и полигональным данным с использованием разных видов топографических объектов. Метод предназначен для создания раstra путем интерполяции значений высот с введением ограничений, обеспечивающих связанную дренажную структуру и корректное представление водоразделов и тальвегов (рис. 2).

Процедура интерполяции разработана так, чтобы воспользоваться общедоступными типами входных данных и известными характеристиками высот поверхностей. Метод использует итеративный алгоритм интерполяции конечных разностей. Он оптимизирован, чтобы повысить вычислительную эффективность методов локальной интерполяции («ОВР») без потери непрерывности поверхности методов глобальной интерполяции («Кригинг» и «Сплайн») [3]. По существу, это дискретизованный метод плоского сплайна, в котором изменен фактор шероховатости.

Рис. 1. Послойное представление исходных данных

Рис. 2. Использование модуля «Топо в растр (r)»

Таблица 1

Характеристика пространственных данных, используемых для построения ЦМР, и требования к ним

№	Вид объекта	Способ представления	Параметр	Требования к топологии	Слой
1	Высоты точек (PointElevation)	Точка (Point)	Поле (Field) содержит высоты точек.	Нет	Характерные точки рельефа, урезы воды, глубины
2	Изолинии (Contour)	Полилиния (Polyline)	Поле (Field) содержит высоты изолиний (горизонталей)	Нет	Горизонталы, изобаты, контуры водохранилищ и прудов
3	Водотоки (Stream)	Полилиния (Polyline)	Поле (Field) не предусмотрено.	Все линии должны быть ориентированы вниз по течению. Класс пространственных объектов должен содержать только одиночные линии водотоков.	Реки
4	Локальные понижения (Sink)	Точка (Point)	Поле (Field) может содержать значения высоты. Если выбрана опция NONE (НЕТ), используется только положение локального понижения.	Нет	Искусственные выемки
5	Граница (Boundary)	Полигон (Polygon)	Поле (Field) не предусмотрено.	Нет	Контуры водосборов рек, водохранилища, пруды
6	Озера (Lake)	Полигон (Polygon)	Поле (Field) не предусмотрено.	Нет	Реки, озера, водохранилища, пруды.
7	Обрывы (Cliff)	Полилиния (Polyline)	Поле (Field) не предусмотрено.	Линейные объекты – обрывы должны иметь направление, при этом левая сторона линии должна соответствовать низкой стороне обрыва, а правая – высокой.	Обрывы

Таким образом, скорректированная ЦМР может отвечать резким изменениям поверхности (таким, как ущелья, горные хребты, крутые обрывы) в отличие от других общепринятых интерполяционных методов.

При решении гидрологических задач возникает необходимость вычисления гидрографических характеристик. Рассмотренные ниже инструменты гидрологического анализа могут применяться по отдельности или последовательно для построения речной сети, выделения линий водоразделов, моделирования движения воды по поверхности, расчета гидрографических характеристик на основе ЦМР [ПО «ArcGIS Spatial Analyst»]. На рис. 3а показана исходная ЦМР, созданная инструментом «Топо в растр (Topot raster)» на основе комплексного учета всех исходных векторных данных. С использованием модуля «Гидрология» вычислена ЦМР без локальных понижений (рис. 3б) (после обработки инструментом «Заполнение (Fill)»), которая необходима для вычисления растровой модели направлений стока («Направление стока (FlowDirection)») (рис. 3в).

Следующим этапом обработки данных является получение растра суммарного стока («Суммарный сток (FlowAccumulation)») (рис. 3г). Такая последовательность действий необходима для моделирования речной сети рассматриваемой территории [1].

Важнейшим условием создания гидрологически корректной ЦМР, используемой для вычисления гидрографических характеристик рек и их бассейнов, является выбор линейных размеров растра. В работе [5] рассмотрен алгоритм оценки влияния размеров ячейки на точность расчета структурного деления по ЦМР. Минимальным значением размера ячейки a_{min} , при котором полностью отражаются все характерные черты рельефа в данном масштабе карты, является величина 0,2 мм в масштабе карты $a_{min} = 0,2 \cdot 10^{-6}$ М (км) (толщина линии горизонтали). В работе [6] предложена немасштабная формула для оценки минимального размера ячейки растра: $\frac{a \cdot i}{\sigma_z} > 1$, где a – размер ячейки, i – средний уклон, σ_z – стандартное отклонение

ошибки высот для данной модели местности.

Рис. 3. Последовательность моделирования гидрографических характеристик с использованием модуля «Гидрология»: а – ЦМР; б – ЦМР без локальных понижений; в – направления линий стока (по основным румбам); г – суммарный сток.

Собственно величина $\frac{\sigma_z}{i}$ по порядку близка к среднему размеру неоднородностей рельефа (ложбина, бугор), выраженных в исходных горизонталях в плане. Обобщение формулы [6], по мнению [5], может использоваться для оценки $a_{min} = \min(0,2 \cdot 10^{-6} M, \frac{\sigma_z}{i_{max}})$. При расчете площади водосбора можно использовать следующее выражение для относительной ошибки (в процентах): $\Delta_F = \frac{100 \cdot \delta F}{F} = \frac{400 \cdot a}{\sqrt{F}}$. В этом случае

размер ячейки при допустимой ошибке Δ_F должен быть меньше или равен:

$$a_{\max} = 2,5 \cdot 10^{-3} \Delta_F \sqrt{F}(\hat{e}i) = 2,5 \cdot \Delta_F \cdot \sqrt{F}(i).$$

При моделировании речной сети и границ водосборов необходимо знать не только оптимальные значения линейных размеров ячеек раstra, но и пороговые значения сумм направлений стока, оказывающих существенное влияние на длину и количество восстанавливаемых водотоков. Эта задача может быть решена путем сравнительного анализа модельной и топографической карт заданного масштаба (как визуального послойного сравнения, так и рассчитанных значений суммарной длины рек в пределах какого-либо водосбора).

Для моделирования речной сети и водосборов необходим подбор оптимальных параметров, которые представляют собой комбинацию линейных размеров раstra и пороговых значений сумм направлений стока [2, 5]. Последние ограничивают длину и количество восстанавливаемых водотоков: чем выше пороговое значение, тем меньше количество водотоков и их длина и наоборот. Таким образом, пороговое значение представляет собой параметр генерализации речной сети, при соответствующих линейных размерах раstra (рис. 4).

Рассмотрим эти особенности моделирования более подробно на примере бассейна р. Чолвы ($A = 234,33 \text{ км}^2$), представленной на фрагменте карты масштаба 1:100000. Для площади водосбора р. Чолвы, при $\Delta_F = 1\%$, $i_{\max} = 0,925$, $i = 0,046$, $\sigma_z = 2,5 \text{ м}$, линейные размеры ячеек раstra будут находиться в пределах $2,7 \text{ м} < a < 38,2 \text{ м}$.

На рисунке 4 показана восстановленная речная сеть с фиксированным пороговым значением сумм направлений стока 5000 и разными размерами ячеек раstra (25×25 и $10 \times 10 \text{ м}$). Даже при визуальном анализе на рисунке 4а заметны существенные отклонения рисунка речной сети (истоки в большинстве случаев не совпадают, речная сеть генерализована, количество модельных водотоков значительно ниже по сравнению с фактическим), в то время, как на рис. 4б отмечается практически полная их сходимость.

Для количественной оценки правильности подбора оптимальных параметров выполнен расчет суммарной длины рек в пределах водосбора р. Чолвы (табл. 2) для разных комбинаций линейных размеров ячеек раstra и пороговых значений сумм направлений стока (k).

Таблица 2

Модельные значения суммы длин рек в пределах водосбора р. Чолвы и их отклонения (%) от фактической суммы (212631 м) при разных размерах ячеек ЦМР и значений параметра k

k	Линейные размеры ячейки ЦМР, м							
	7,5×7,5		10×10		25×25		50×50	
	м	%	м	%	м	%	м	%
1000	446952	110,20	374795	76,27	192364	-9,53	105409	-50,43
2000	355120	67,01	295721	39,08	143514	-32,51	74472	-64,98
3000	308287	44,99	258874	21,75	120153	-43,49	58978	-72,26
4000	277582	30,55	231298	8,78	106863	-49,74	48818	-77,04
5000	256219	20,50	212700	0,03	98593	-53,63	43725	-79,44

Как видно из таблицы 2, наибольшая сходимость суммы длин рек модельных и фактических достигается при линейных размерах ячейки раstra в $10 \times 10 \text{ м}$ и пороговом значении сумм направлений стока – 5000. Именно при таких параметрах генерализации восстановленная речная сеть практически полностью совпадает с фактической (рис. 4б).

Таким образом, определение гидрографических и морфометрических характеристик водных объектов и их водосборов должно базироваться на корректной ЦМР, построенной с учетом максимально возможного набора исходных топографических данных, способов их представления, соблюдения топологии, параметров интерполяции, оптимальных размеров раstra и пороговых значений дренажной сети. Такой методический подход дает возможность проводить морфологический анализ, уточнять характеристики речной сети, выделять границы водосборов, определять порядки рек по разным схемам деления и, в конечном счете, более качественно учитывать условия формирования поверхностного стока.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-05-00317/14

Рис. 4. Исходная и модельная речная сеть при пороговом значении сумм направлений стока 5000 и разных линейных размерах ячейки растра: а – 25×25 м; б – 10×10 м

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК REFERENCES

1. Калинин В.Г., Пьянков С.В. Гидрография. Определение гидрографических характеристик рек и их водосборов с применением цифрового картографического моделирования: учеб. пособие. Перм. гос. нац. иссл. ун-т. – Пермь, 2013. – Ч. II. – 71 с.
Kalinin V.G., P'jankov S.V. Hidrografija. Opredelenie gidrograficheskikh harakteristik rek i ih vodosborov s primeneniem cifrovogo kartograficheskogo modelirovanija: ucheb. posobie. Perm. gos. nac. issl. un-t. – Perm', 2013. – Ch. II. – 71 s. (In Russian).
2. Погорелов А.В., Думит Ж.А. Рельеф бассейна р. Кубани: морфологический анализ. – М.: ГЕОС, 2009. – 208 с.
Pogorelov A.V., Dumit Zh.A. Rel'ef bassejna r. Kubani: morfologicheskij analiz. – M.: GEOS, 2009. – 208 s. (In Russian).
3. Пьянков С.В., Калинин В.Г. Гидрография. Создание цифровых моделей рельефа для определения гидрографических характеристик рек и их водосборов: учеб. пособие. Перм. гос. нац. иссл. ун-т. – Пермь, 2014. – Ч. I. – 63 с.
P'jankov S.V., Kalinin V.G. Hidrografija. Sozdanie cifrovyyh modelej rel'efadlja opredelenija gidrograficheskikh harakteristik rek i ih vodosborov: ucheb. posobie. Perm. gos. nac. issled. un-t. – Perm', 2014. – Ch. I. – 63 s. (In Russian).
4. Руководство по определению гидрографических характеристик картометрическим способом. Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 92 с.
Rukovodstvo po opredeleniju gidrograficheskikh harakteristik kartometricheskim sposobom. L.: Gidrometeoizdat, 1986. – 92 s. (In Russian).
5. Яковченко С.Г. Создание геоинформационных систем в инженерной гидрологии: дис. д-ра техн. наук. Барнаул, 2007. 406 с.
Jakovchenko S.G. Sozdanie geoinformacionnyh system v inzhenernoj gidrologii: dis. d-ratehn. nauk. Barnaul, 2007. 406 s. (In Russian).
6. Gyasy-Agyei Y., Wilgoose G.R. and De Troch P.P. Effects of vertical resolution and map scale of digital elevation models on geomorphological parameters used in hydrology, Hydrol. Processes, 1995, v.9, pp 363–382.
7. ПО «ArcGIS Spatial Analyst» [Электронный ресурс]. URL: <http://dataplus.ru/products/spatialanalyst/detail/review>.