

А.Л. Энтин, С.М. Кошель, И.К. Лурье, Т.Е. Самсонов

МОРФОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА ДЛЯ ОЦЕНКИ И КАРТОГРАФИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА

Введение

Современные инструменты пространственного анализа позволяют использовать цифровые модели рельефа (ЦМР) в качестве исходных данных как для трёхмерного моделирования территорий, так и для создания производных моделей: водосборных бассейнов, сетей водоразделов и потенциальных водотоков, а также вычисления морфометрических параметров, характеризующих распределение поверхностного стока. Это направление цифрового анализа рельефа в зарубежной литературе обычно называется гидрологическим анализом (англ. *hydrological analysis*). Основными морфометрическими параметрами в рамках гидрологического анализа служат общая и удельная водосборная площадь; они имеют самостоятельную применимость, а также используются в качестве «отправной точки» для расчёта производных характеристик и различных индексов (например, топографического индекса влажности – TWI, или компонентов универсального уравнения смыва почвы – USLE).

Ключевая процедура в расчёте водосборной площади – трассировка потока (англ. *flow routing*), то есть моделирование течения воды вниз по склону между ячейками ЦМР (рис. 1). Разработано более десяти различных алгоритмов определения направлений стока, не считая их специфических модификаций. Эти алгоритмы различаются между собой в зависимости от используемых концепций моделирования стока или деталей процедур распределения потока.

Несмотря на наличие большого числа различных алгоритмов, при их описании отсутствует убедительное обоснование преимуществ одного над другим, и не выявлены факторы, позволяющие оценить достоверность результатов расчёта и их пригодность для различных задач. Предпринимаемые попытки верификации алгоритмов распределения потока – как путём анализа результатов их работы на абстрактных математических поверхностях, так и с помощью спе-

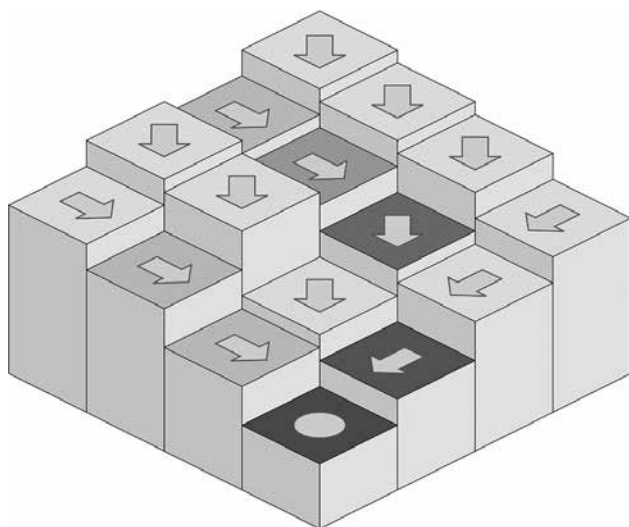


Рис. 1. Концепция стока «из ячейки в ячейку» в наиболее простом способе распределения потока

циально организованных полевых экспериментов – пока не позволяют существенно продвинуться в этом направлении. В связи с этим, задачи разработки оптимального алгоритма и обоснования его оптимальности сохраняют свою актуальность.

В статье предлагаются классификация алгоритмов трассировки потока и рекомендации по их применению. Изложен также авторский алгоритм расчёта общей водосборной площади, основанный на построении линий тока, выпускаемых из центров ячеек ЦМР; при этом линии тока имеют «естественную», не зависящую от положения ячеек растра форму.

Классификация алгоритмов моделирования стока

Алгоритмы определения направлений стока обычно идентифицируются двумя способами: либо количеством направлений стока, которые могут быть рассмотрены для ячейки, либо итоговым результатом распределения. В рамках первого подхода выделяется две группы алгоритмов: *SFD* (*single flow direction*), рассчитывающие единственное направление стока для ячейки, и *MFD* (*multiple flow directions*), оперирующие несколькими направлениями стока (Кошель, Энтин, 2016; Wilson

et al., 2008; Wilson, 2012). Иногда отдельно выделяется группа *BFD* (*bi-flow direction*) – к ней относятся алгоритмы, которые распределяют сток между двумя соседними ячейками (Pan et al., 2004). По итоговому результату распределения потока алгоритмы разделяются на дисперсивные» (*dispersive*) и «недисперсивные» (*non-dispersive*) (Orlandini et al., 2003; Orlandini, Moretti, 2009; Paik, 2008; Shin, Paik, 2017). Группа недисперсивных алгоритмов практически полностью идентична SFD, дисперсивные алгоритмы объединяют подходы BFD и MFD.

Описанные группировки алгоритмических построений подходят для структурных описаний создаваемых моделей, но не способствуют оценке пригодности рассчитываемых параметров для решения практической задачи: разделение по количеству рассматриваемых направлений стока не позволяет делать обоснованных выводов о результате расчёта, а разделение алгоритмов на дисперсивные и недисперсивные никак не соотносится с процедурами расчёта. Кроме того, существует группа подходов, в которых основой для моделирования потока служит построение линий тока, а ячейки ЦМР выступают как вспомогательные конструкции.

Для повышения обоснованности выбора алгоритма и верификации результатов моделирования предлагается следующая иерархическая классификация алгоритмов трассировки потока. Поскольку базовым структурным элементом ЦМР служит ячейка, то описанные выше алгоритмы целесообразно разделять на «локальные», то есть использующие ячейку ЦМР в качестве основной единицы анализа и принимающие в расчёт некоторую ограниченную окрестность ячейки, и «региональные», в рамках которых моделирование опирается на построение линий тока, причём заранее неизвестно, какую форму имеют линии и как они соотносятся с ячейками ЦМР. Локальные алгоритмы разделяются на группы SFD (одно направление стока) и MFD (несколько направлений стока), описанные выше. Алгоритмы группы SFD дополнительно разделены на недисперсивные и дисперсивные; для группы MFD такое разделение не имеет смысла, поскольку все алгоритмы, входящие в эту группу, дисперсивны. Региональные алгоритмы подразделяются на алгоритмы, позволяющие строить линии тока, и алгоритмы, использующие «площадные» конструкции («полоса потока» алгоритма DEMON). Полная схема классификации с перечислением алгоритмов, рассмотренных в настоящей статье, представлена на рис. 2.

Рассмотрим алгоритмы, представленные на схеме, с точки зрения пригодности для расчетов гидрографических характеристик. Алгоритм

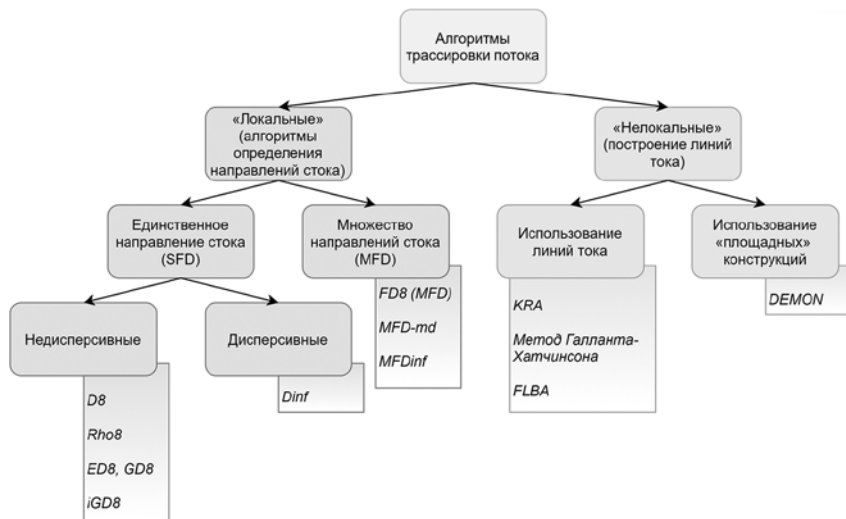


Рис. 2. Классификация алгоритмов трассировки потока

D8 (O'Callaghan, Mark, 1984) – один из широко распространённых алгоритмов расчёта направлений стока. Для произвольной ячейки ЦМР он рассматривает восемь направлений (отрезков), соединяющих её центр с центрами соседних ячеек, присваивает концам отрезка высоты соответствующих ячеек ЦМР и рассчитывает уклоны отрезков. Сток из рассматриваемой ячейки целиком направляется по линии наибольшего уклона, при этом азимут направления стока обязательно кратен 45° . Алгоритм D8 определяет для ячейки единственное направление стока и «недисперсивен». Это позволяет связать ячейки модели в единый граф («сеть потока»), который может быть затем использован для автоматического построения сети потенциальных водотоков или выделения границ бассейнов. Тем не менее, ограниченность алгоритма D8 с точки зрения доступных направлений стока в некоторых ситуациях приводит к недостоверному распределению потока – появлению сети параллельно текущих потоков с заметно отличающейся водосборной площадью («псевдо-таллвеги»). Это побуждало разработчиков создавать более сложные подходы к моделированию распределения потока.

Алгоритмы Rho8, ED8 и GD8 можно рассматривать как модификации алгоритма D8. Алгоритм Rho8 (Fairfield, Leymarie, 1991) вычисляет уклоны так же, как и D8, но дополнительно умножает их на случайную величину, что приводит к изменению направлений стока и устранению

одной из проблем D8 – формированию сети «псевдо-талвегов», то есть протяжённых линейных участков с одинаковыми направлениями стока. Однако использование случайных величин приводит к недетерминированности расчёта с помощью алгоритма Rho8 – на одних и тех же данных будут получаться разные результаты. Алгоритмы ED8 и GD8 (Paik, 2008) «расширяют» окрестность расчёта направлений стока, используя дополнительные ячейки из области, лежащей ниже по склону. Для всех исследуемых ячеек рассчитываются направления стока по D8, которые впоследствии корректируются, если для группы ячеек выполняются некоторые условия. В результате для каждой ячейки определяется единственное направление стока из восьми доступных направлений, как и при использовании «простого» алгоритма D8.

Качественно иной подход применяется в алгоритме D_{∞} (Tarboton, 1997). Для определения направлений стока используются не отрезки, а треугольники, образованные центрами исследуемой (центральной) ячейки и двух её соседей, являющихся одновременно соседями друг друга. Азимут направления стока, рассчитанный по алгоритму D_{∞} , может принимать произвольное значение в пределах от 0° до 360° . Если направление получается кратным 45° , поток воды переносится в одну соседнюю ячейку; в противном случае водная масса распределяется между двумя соседями в определённой пропорции. Таким образом, появляется возможность распределять поток между несколькими ячейками при сохранении однозначности направления стока. Алгоритм D_{∞} относится к «дисперсивным», хотя и рассчитывает единственное направление стока для ячейки. Направление стока, рассчитываемое по D_{∞} , также используется в некоторых модификациях D8, рассматриваемых ниже.

Алгоритмы D8-LAD, D8-LTD и iGD8 модифицируют стандартные процедуры алгоритмов D8 и GD8, используя направление стока, рассчитываемое алгоритмом D_{∞} . D8-LAD и D8-LTD (Orlandini et al., 2003) рассчитывают разность между направлением стока по D_{∞} и одним из восьми направлений стока, кратных 45° . В LAD-варианте (*least angular deviation*) рассчитывается разность азимутов, в LTD (*least transverse deviation*) – расстояние между центром ячейки, соответствующей «кратному» направлению, и лучом «теоретического» направления. Алгоритм iGD8 (Shin, Paik, 2017) является модификацией GD8, учитывающей опыт D: iGD8 добавляет к процедуре выбора направления условие минимизации отклонения от «теоретического» направления стока (несущественно отличающегося от того, которое рассчитывается алгоритмом D_{∞}).

Отклонение рассчитывается сложным образом с использованием как угловой, так и линейной разности между направлениями.

Все перечисленные алгоритмы, кроме D^∞ , рассчитывают единственное направление стока и распределяют поток из ячейки строго в одну ячейку. D^∞ также рассчитывает направление стока для ячейки и выражает его единственным числом, но позволяет распределять поток между двумя соседними ячейками. Алгоритмы, охарактеризованные ниже, не вычисляют и не хранят направление стока в явном виде. Алгоритм $FD8$, называемый также MD или MFD (Freeman, 1991; Quinn et al., 1991), даёт возможность распределять поток между всеми соседними ячейками, высота которых меньше, чем высота центральной ячейки. Доля потока f_i , приходящегося на соседнюю ячейку, пропорциональна уклону линии, соединяющей центры ячеек (β_i – угол наклона линии):

$$f_i \propto \frac{\text{tg}\beta_i}{\sum_{i=1}^8 \text{tg}\beta_i}$$

В общем случае, чем больше уклон (тангенс угла наклона линии), тем большая доля потока приходится на соответствующую соседнюю ячейку. Однако во всех разновидностях $FD8$ уклон модифицируется путём умножения на дополнительный параметр или возведения в степень. Существует также модификация $FD8$, в которой коэффициент модификации рассчитывается индивидуально для каждой ячейки – $MFD-md$ (Qin и др., 2007).

Алгоритм MD^∞ (Seibert, McGlynn, 2007) распределяет поток между всеми доступными соседними ячейками, используя способ расчёта по восьми треугольникам, аналогичный применяемому в алгоритме D^∞ . Получающееся распределение отличается меньшим «дисперсностью» по сравнению с $FD8$.

В целом «дисперсивные» алгоритмы (или алгоритмы группы MFD) не определяют единственное направление стока для ячейки ЦМР и потому непригодны для задач автоматического выделения сети потенциальных водотоков и построения границ бассейнов. Однако они лучше подходят для расчёта таких морфометрических параметров, как общая и удельная площадь водосбора (Orlandini, Moretti, 2009; Pan et al., 2004; Qin et al., 2007; Quinn et al., 1995; Wilson, 2012).

Существует также группа алгоритмов, использующих для моделирования стока трассировку потока и построение линий тока. Они от-

личаются от всех описанных ранее алгоритмов тем, что не рассматривают ячейку ЦМР как элементарную единицу анализа. Вместо этого они используют высоты ЦМР для построения линий тока и проводят расчёт морфометрических характеристик на основе анализа линий.

Метод «катящегося шарика» (*Kinematic Routing Algorithm, KRA, Lea's method*) был исторически первым таким алгоритмом (Lea, 1992). Каждая ячейка ЦМР представлена как фрагмент наклонной плоскости, уклон которой определяется высотами соседних ячеек. Проекция нормали к этой плоскости на горизонтальную плоскость определяет азимут направления стока. Движение элементарной водной массы уподобляется шарик, «катящемуся» по поверхности ЦМР. Поток, «появившись» в некоторой ячейке ЦМР, движется в пределах этой ячейки по рассчитанному азимуту; при переходе в другую ячейку направление движения изменяется в соответствии с новым значением азимута. Результатом такого построения служит линия, подобная линии тока. Суммирование всех линий, проходящих через некоторую ячейку, позволяет вычислить водосборную площадь или объём стока для этой ячейки. По формальным признакам алгоритм может быть отнесён к группе SFD, поскольку вычисляет единое направление стока для ячейки, и назван дисперсивным, поскольку фактически распределяет поток между несколькими ячейками. Однако фактически элементарной единицей анализа служит не ячейка, а линия тока; регулярная сетка ЦМР используется как вспомогательная конструкция.

Идеи KRA используются в методе *DEMON (Digital Elevation Model Networks)* (Costa-Cabral, Burges, 1994). Направления стока и линии тока здесь рассчитываются так же, как в алгоритме Ли, разница же заключается в интерпретации потока. В рамках KRA водная масса считается сконцентрированной в центре ячейки и перемещающейся далее как единое целое («катящийся шарик»). DEMON использует более сложную конструкцию, называемую «полоса потока» (*flow tube*). Эта полоса строится из каждой ячейки ЦМР вниз по склону и ограничена двумя линиями тока, начинающимися из углов соответствующей ячейки. При построении положение каждой линии тока определяется независимо, и полоса потока имеет переменную ширину. Ширина полосы и площадь её пересечения с ячейкой ЦМР используются для расчёта морфометрических параметров.

KRA и DEMON позволяют получить адекватные результаты при использовании их на реальных ЦМР, но на абстрактных поверхностях

их результаты заметно отличаются от ожидаемых, что вызывает сомнения в достоверности результатов расчёта (Tarboton, 1997).

Качественно новый подход был обоснован Галлантом и Хатчинсоном (Gallant, Hutchinson, 2011). Авторы вывели дифференциальное уравнение, связывающее удельную водосборную площадь a с длиной линии тока l и горизонтальной кривизной поверхности рельефа κ_c :

$$da/dl = 1 - a\kappa_c$$

На практике это означает, что для вычисления удельной водосборной площади в произвольной точке внутри экстенга ЦМР необходимо построить линию тока *вверх* по склону вплоть до водораздела и затем проводить численное интегрирование вдоль линии в обратном порядке. Алгоритм, реализующий такой подход, был представлен совсем недавно в работе (Qin et al., 2017). Сравнивая результаты расчёта на абстрактных моделях рельефа с теоретически ожидаемым распределением, авторы отмечают существенно лучший результат нового подхода по сравнению с традиционными алгоритмами, основанными на переносе «из ячейки в ячейку» (в том числе и их собственным алгоритмом MFD-md). Однако на реальных моделях алгоритм сталкивается с трудностями: корректному построению линий тока мешают локальные максимумы. Проблема локальных максимумов появляется в гидрологическом анализе ЦМР впервые; для всех предшествующих алгоритмов основной проблемой были не максимумы, а замкнутые локальные понижения («ямы»). Для борьбы с ними разработано множество способов, позволяющих привести ЦМР к «гидрологически корректному» виду (см., например, Jenson, Domingue, 1988; Lindsay, 2016; Wang, Liu, 2006). Другая проблема нового метода – его высокая вычислительная сложность по сравнению с традиционными подходами.

В таблице приведены сведения о реализации алгоритмов расчёта направлений стока в современных программных средствах ГИС.

Все охарактеризованные выше алгоритмы обладают общими ограничениями применимости – жёсткая «привязанность» к регулярной сетке ЦМР или специфические требования к исходным данным, что побуждает создавать новые, более совершенные подходы к моделированию стока. На кафедре картографии и геоинформатики географического факультета МГУ был разработан алгоритм, идейно схожий

Таблица. Реализация алгоритмов расчёта направлений стока в современных ГИС-пакетах. По материалам (Кошель, Энтин, 2016), с изменениями.

	D8	Rho8	D ∞	FD8 (MFD)	MFD-md	MD ∞	KRA	DEMON
SAGA GIS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Whitebox GAT	✓	✓	✓	✓		✓		
GRASS	✓			✓				
TauDEM	✓		✓					
ArcGIS	✓							
Ilwis	✓							

с KRA и подходом, предложенным Галлантом и Хатчинсоном, но не требующий построения линий тока вверх по склону и решения проблемы локальных максимумов.

Расчёт водосборной площади на основе построения линий тока

Разработанный алгоритм использует специальную процедуру построения линий тока для расчёта общей площади водосбора. При этом форма линий тока и положение её узлов относительно свободны и не привязаны к исходной регулярной сетке ЦМР.

Формально строящаяся на модели поверхности рельефа в виде непрерывной дифференцируемой функции $f(x,y)$ линия тока, выходящая из точки x_0, y_0 вниз по склону, в параметрическом представлении $(x(t), y(t))$ является решением задачи Коши для системы дифференциальных уравнений первого порядка при значениях параметра $t > 0$ (Кошель, 2004):

$$\begin{cases} x'(t) = -\frac{\partial f}{\partial x}(x, y) \\ x'(t) = -\frac{\partial f}{\partial x}(x, y) \end{cases}; x(0) = x_0, y(0) = y_0$$

Результат численного интегрирования этой системы определяется двумя факторами: способом вычисления правой части в произвольной точке исследуемой области (при условии, что нам известны значения высот только в узлах регулярной сетки) и выбранным методом численного интегрирования. Восстановление непрерывных частных производных на основе высот в узлах сеточной модели рельефа можно

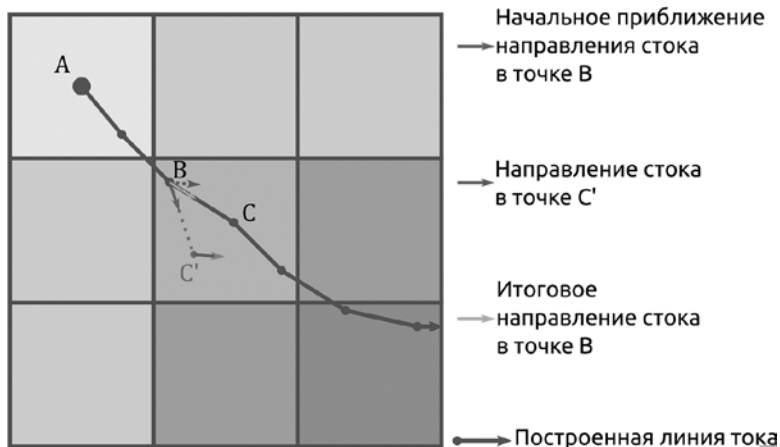


Рис. 3. Построение линии тока с использованием неявного метода Эйлера. Для точки B сначала определяется приближённое направление стока (направление, противоположное направлению вектора градиента), затем в этом направлении строится сегмент линии до точки C' . В точке C' также вычисляется направление стока. Для окончательного определения направления стока в точке B используется начальное приближение и направление, рассчитанное для точки C'

выполнять разными способами; в рассматриваемом случае использовалась билинейная интерполяция по значениям в четырёх ближайших узлах сетки. При выборе способа интегрирования были опробованы: метод Эйлера первого порядка, неявный метод Эйлера первого порядка и метод Рунге-Кутты четвертого–пятого порядка. Метод Эйлера оказался практически непригоден для задачи восстановления линий тока из-за часто возникающих осцилляций. Метод Рунге-Кутты позволяет получить наиболее плавные линии, но весьма вычислительно сложен. По соотношению затрат вычислительных мощностей и качества получаемой линии оптимальным оказался неявный метод Эйлера. Иллюстрация работы этого метода представлена на рис. 3.

Для расчёта водосборной площади и объёма стока выполняется построение линий тока из центра каждой ячейки ЦМР. С линией тока ассоциируется значение рассчитываемой величины (водосборной площади или объёма стока), соответствующее той ячейке, из которой она начинается. Когда линия построена, анализируется её положение относительно ячеек регулярной сетки. Предлагается два варианта такого анализа: «простой» и «точный». В «простом» спосо-

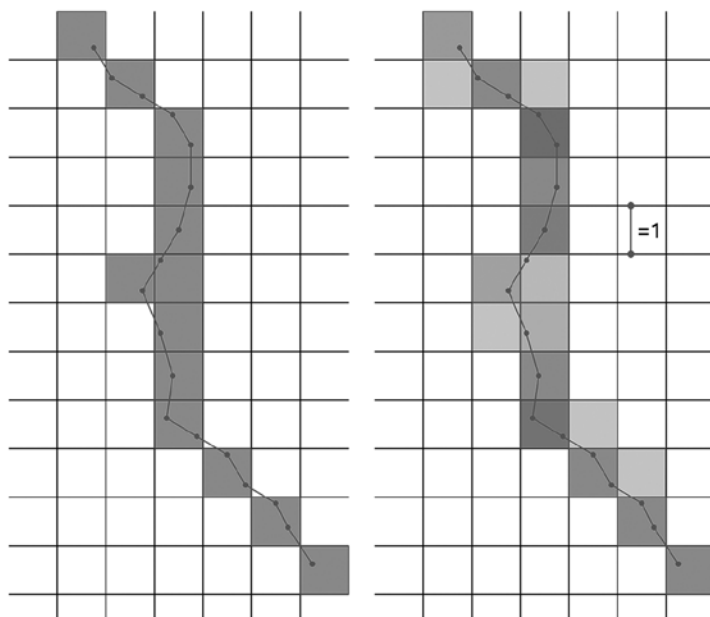


Рис. 4. Растеризация построенной линии тока – «простой» (слева) и «точный» (справа) способы

бе используется только положение вершин построенной ломаной; к значениям рассчитываемой величины в тех ячейках, куда попала хотя бы одна вершина, добавляется значение, ассоциированное с данной линией. Если в ячейку не попала ни одна вершина, значение в ней не увеличивается, даже если часть линии фактически проходит по этой ячейке. «Точный» вариант основан на подсчёте длин сегментов линии тока. Для каждой ячейки, через которую проходит линия, определяется длина той части ломаной, которая находится в пределах ячейки. Эта длина используется как весовой коэффициент при добавлении новой «порции» водосборной площади к ячейке. Процедура анализа положения линии тока относительно ячеек сетки ЦМР показана на рис. 4.

Алгоритм, названный нами FLBA (FlowLine-Based Algorithm), реализован как самостоятельная программа на языке Fortran. Исходными данными служат сеточная цифровая модель рельефа и параметры метода. В результате работы программы создаётся сеточная модель распределения водосборной площади, параметры регулярной сетки которой соответствуют параметрам регулярной сетки исходной ЦМР. Подробное

описание алгоритма представлено в работе (Кошель, Энтин, 2017). При идейном сходстве с подходом Галланта-Хатчинсона, FLBA имеет существенное практическое преимущество – для него не актуальна проблема недостоверных локальных максимумов, которая была отмечена (Qin et al., 2017). Это позволяет комбинировать разработанный алгоритм с существующими способами «гидрологической коррекции» ЦМР, направленными прежде всего на борьбу с локальными минимумами.

Результаты расчёта водосборной площади с использованием различных алгоритмов трассировки потока

На рис. 5 и рис. 6 показаны результаты расчёта водосборной площади с использованием различных алгоритмов определения направлений стока по цифровой модели рельефа, построенной по данным воздушного лазерного сканирования. Площадка имеет неправильную форму и небольшие размеры (около 300 × 500 м), абсолютные высоты изменяются от 695 до 895 м, рельеф представлен преимущественно эрозионными формами (водосборные воронки, каналы стока, конуса выноса).

Расчёт водосборной площади проводился с использованием инструментария SAGA GIS и разработанной программы. Результаты различаются прежде всего распределением относительно высоких (на порядок выше, чем соседние) значений водосборной площади. Некоторые алгоритмы (D8 и его аналоги) концентрируют сток в узкой полосе шириной в одну ячейку вблизи тальвегов. Другие (группа MFD) формируют широкие полосы высоких значений водосборной площади; при этом конкретные значения величины плавно уменьшаются от центральных линий тальвегов к склонам. Другая группа особенностей – «артефакты», то есть области недостоверного распределения стока, вызванные несовершенством алгоритмов или особенностями их реализации. Эти особенности хорошо известны для D8, который формирует сети параллельно текущих потоков на склонах и «изгибает» тальвеги под углами, кратными 45° (Orlandini et al., 2012; Pan et al., 2004). Подобные же детали, но в гораздо меньшей степени, заметны и на результатах расчёта по алгоритмам, использующим построение линий тока – KRA и DEMON (см. рис. 6, небольшие «ответвления» от основных линий тальвегов). Разработанный авторами алгоритм FLBA, использующий схожий принцип расчёта, лишён этого недостатка.

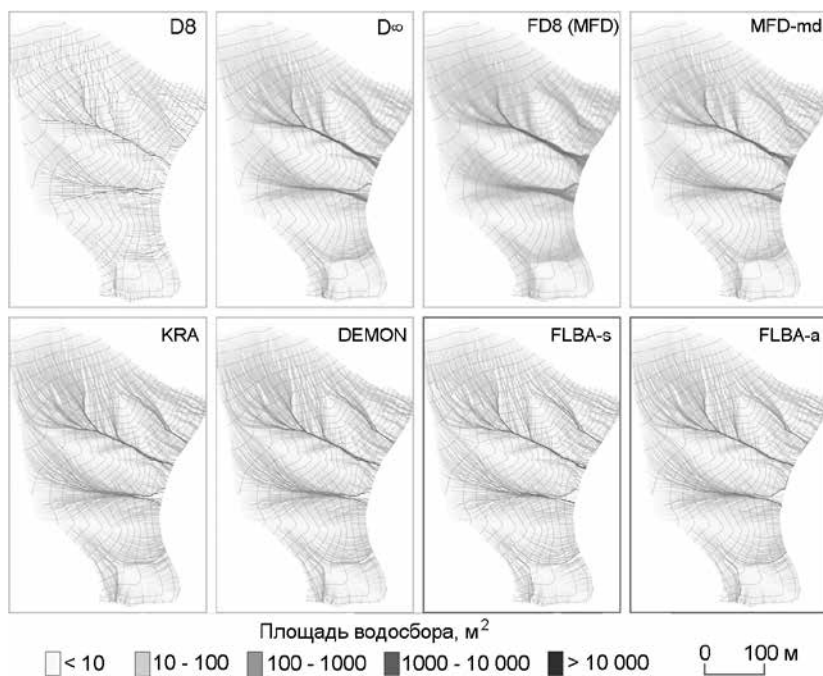


Рис. 5. Распределение водосборной площади, рассчитанной при помощи различных алгоритмов определения направлений стока. Красной рамкой выделены результаты работы авторского алгоритма

Проведённый расчёт не позволяет сделать окончательных выводов о большей или меньшей пригодности алгоритмов, однако можно проследить некоторые общие особенности. В целом они примерно соответствуют описанному выше разделению алгоритмов на «недисперсивные» (D8 и его производные) и «дисперсивные» (D^∞ и алгоритмы группы MFD). Алгоритмы, использующие построение линий тока, формально относятся к «дисперсивным», но распределение, получаемое с их помощью, в большей степени напоминает результат расчёта с использованием D8, чем MFD – они концентрируют потоки в узких каналах, а не распределяют воду равномерно по склону. Эти особенности необходимо учитывать при расчёте водосборной площади в разных условиях.

Для детальных моделей с выраженным эрозионно-денудационным рельефом, к числу которых относится представленный пример, применение «недисперсивных» подходов может привести к сужению области высоких значений площади водосбора в днищах эрозионных

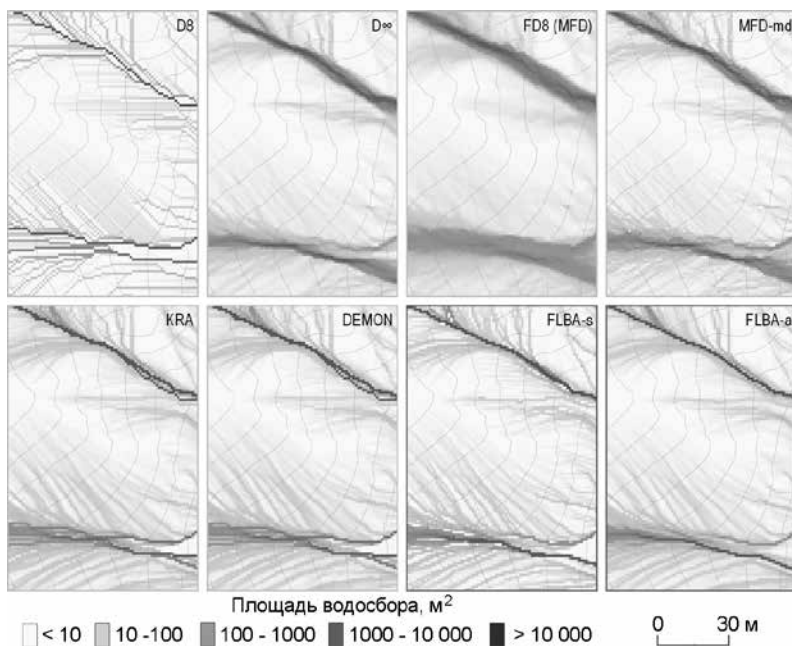


Рис. 6. Распределение водосборной площади, рассчитанной при помощи различных алгоритмов определения направлений стока (детальное изображение фрагментов, представленных на рис. 5). Красной рамкой выделены результаты работы авторского алгоритма

форм. В ситуациях, заметно отличающихся от приведённой, например, на моделях с низким пространственным разрешением, «недисперсивность», наоборот, может оказаться желательным фактором, позволяющим предотвратить разбегание потока по широкой речной долине. Полагаем, что несколько лучшее соответствие физике процесса, составляющего концептуальную основу предлагаемого алгоритма (FLBA), может служить одним из независимых критериев оценки достоверности получаемого результата, по крайней мере, на детальном ЦМР.

Приведённые характеристики позволяют оценить ситуации, для которых будут пригодны разные алгоритмы трассировки потока. В отдельную группу следует сразу выделить недисперсивные алгоритмы (D8 и его аналоги), поскольку, несмотря на недостоверное распределение воды, они обладают одной важной особенностью – однозначностью в указании направлений стока. Это обуславливает их применение в таких задачах, как автоматическое построение сети потенциальных водото-

ков и границ водосборных бассейнов. Однако для расчёта водосборной площади их следует применять с осторожностью. Это замечание будет особенно важным для пользователей ПО ArcGIS, где алгоритм D8 – это единственный доступный алгоритм определения направлений стока.

«Региональные» алгоритмы, использующие построение линий тока, в целом показывают заметно меньшую «дисперсивность», чем алгоритмы группы MFD. Они концентрируют поток в узких каналах (шириной порядка одной ячейки ЦМР). Такое поведение оптимально для ЦМР, где характерные размеры показываемых эрозионно-денудационных форм рельефа сопоставимы с размерами ячейки: например, если ширина днища оврага не превышает 5 м, а размер ячейки ЦМР составляет 3–4 м. При этом следует помнить, что результаты расчётов с использованием алгоритмов KRA и DEMON, по крайней мере в SAGA GIS, не свободны от артефактов.

При значительных различиях между размером форм изучаемого рельефа и размера ячейки ЦМР (ширина днища около 5 м при размере ячейки менее метра), следует пользоваться алгоритмами группы MFD; на наш взгляд, предпочтительным вариантом является MFD-md, поскольку, во-первых, избавляет исследователя от необходимости самостоятельно настраивать параметры алгоритма (степень разделения потока для «классического» MFD), а во-вторых, демонстрирует хорошее (по сравнению с аналогами) сходство с ожидаемыми результатами при расчёте на абстрактных поверхностях.

Определённые ожидания связаны с появившимися в последние годы алгоритмами трассировки потока, не использующими «регулярно-сеточную» модель распространения воды – метод Галланта-Хатчинсона и FLBA, – но примеров их применения пока ещё недостаточно.

Заключение

Несмотря на значительное развитие приёмов моделирования движения воды по цифровой модели рельефа, к настоящему времени не выработано единых критериев оценки корректности работы алгоритмов трассировки потока и определения направлений стока. Существующие оценки основываются, как правило, на сравнении результатов расчёта морфометрических параметров по ЦМР, представляющим абстрактные поверхности или реальный рельеф; в единичных работах сделаны попытки экспериментальной полевой верификации. Диффе-

ренциальное уравнение, связывающее удельную водосборную площадь с длиной линии тока и горизонтальной кривизной поверхности, предложенное Галлантом и Хатчинсоном, представляет интерес для моделирования, но его применение ограничивается трудностями практического характера, связанными с проблемой локальных максимумов на ЦМР.

Алгоритм, разработанный коллективом авторов (FLBA), в этих условиях имеет некоторые преимущества. Во-первых, идея моделирования движения водных масс по непрерывной поверхности более близка физике процесса, чем моделирование стока «из ячейки в ячейку». Второе преимущество алгоритма состоит в том, что при идейном сходстве с подходом Галланта-Хатчинсона, FLBA не требует построения линий тока вверх по склону и, таким образом, не сталкивается с необходимостью предварительного устранения локальных максимумов. Иными словами, для коррекции модели перед использованием FLBA достаточно уже существующих алгоритмов заполнения локальных понижений.

Результаты расчёта водосборной площади при помощи различных алгоритмов (в том числе FLBA) не выявляют наиболее достоверную картину распределения. Можно говорить о большем или меньшем «разбросе» стока различными алгоритмами: минимальный разброс характерен для D8, максимальные – для группы MFD. Алгоритмы, использующие построение линий тока, позволяют получить промежуточный результат – с концентрацией стока в единственной ячейке, но без формирования нереалистичной сети «псевдо-талъвегов» на склонах. При этом результат расчёта по FLBA отличается от результатов расчёта по KRA и алгоритму DEMON меньшим количеством или почти полным отсутствием нереалистичных сегментов тальвегов, ориентированных под углами, кратными 45°. Это позволяет предположить, что результаты расчёта по FLBA могут быть использованы непосредственно для морфометрического анализа рельефа или в качестве опорных данных для верификации других алгоритмов.

Исследования Т.Е. Самсонова и А.Л. Энтина выполнены при поддержке Гранта Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-4829.2016.5.

Литература

Кошель С.М. Теоретическое обоснование структуры и функций блока моделирования рельефа в ГИС. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. М., 2004. 105 с.

- Кошель С.М., Энтин А.Л. Современные методы расчета распределения поверхностного стока по цифровым моделям рельефа // Геоморфологи. Современные методы и технологии цифрового моделирования рельефа в науках о Земле. Вып. 6. М.: Медиа-Пресс, 2016. С. 24–34.
- Кошель С.М., Энтин А.Л. Вычисление площади водосбора по цифровым моделям рельефа на основе построения линий тока // Вест. МГУ. Сер. 5. География. 2017. № 3, с. 42–50.
- Costa-Cabral M.C., Burges S.J. Digital elevation model networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas // Water Resources Research. 1994. V. 30. № 6. P. 1681–1692.
- Fairfield J., Leymarie P. Drainage networks from grid digital elevation model // Water Resources Research. 1991. V. 27. № 5. P. 709–717.
- Freeman T. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid // Computers and Geosciences. 1991. V. 17. P. 413–422.
- Gallant J.C., Hutchinson M.F. A differential equation for specific catchment area // Water Resources Research. 2011. V. 47. № 5. P. W05535.
- Jenson S.K., Domingue J.O. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1988. V. 54. № 11. P. 1593–1600.
- Lea N.L. An aspect-driven kinematic routing algorithm // Overland Flow: Hydraulics and Erosion Mechanics / Ed. A.J. Parsons, A.D. Abrahams. New York: UCL Press, 1992. P. 374–387.
- Lindsay J.B. The practice of DEM stream burning revisited // Earth Surface Processes and Landforms. 2016. V. 41. № 5. P. 658–668.
- O'Callaghan J.F., Mark D.M. The extraction of drainage networks from digital elevation data // Computer vision, graphics, and image processing. 1984. V. 28. № 3. P. 323–344.
- Orlandini S., Moretti G., Franchini M., Aldighieri B., Testa B. Path-based methods for the determination of nondispersive drainage directions in grid-based digital elevation models // Water Resources Research. 2003. V. 39. № 6. P. 1144–1151.
- Orlandini S., Moretti G., Corticelli M.A., Santangelo P.E., Capra A., Rivola R., Albertson J.D. Evaluation of flow direction methods against field observations of overland flow dispersion // Water Resources Research. 2012. V. 48. № 10. P. 1–13.
- Orlandini S., Moretti G. Determination of surface flow paths from gridded elevation data // Water Resources Research. 2009. V. 45. № 3. P. W03417.
- Paik K. Global search algorithm for nondispersive flow path extraction // Journ. of Geophys. Research. 2008. V. 113. № F4. P. F04001.
- Pan F., Peters-Lidard C.D., Sale M.J., King A.W. A comparison of geographical information systems-based algorithms for computing the TOPMODEL topographic index // Water Resources Research. 2004. V. 40. № 6. P. W06303.
- Qin C., Zhu A.-X., Pei T., Zhou C., Yang L. An adaptive approach to selecting a flow-partition exponent for a multiple-flow-direction algorithm // Intern. Journ. of Geographical Information Science. 2007. V. 21. № 4. P. 443–458.

- Qin C.-Z., Ai B.-B., Zhu A.-X., Liu J.-Z. An efficient method for applying a differential equation to deriving the spatial distribution of specific catchment area from gridded digital elevation models // *Computers & Geosciences*. 2017. V. 100. № 2. P. 94–102.
- Quinn P., Beven K., Chevallier P., Planchon O. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models // *Hydrological Processes*. 1991. V. 5. № 1. P. 59–79.
- Quinn P.F., Beven K.J., Lamb R. The $\ln(\alpha/\tan \beta)$ index: How to calculate it and how to use it within the topmodel framework // *Hydrological Processes*. 1995. V. 9. № 2. P. 161–182.
- Seibert J., McGlynn B.L. A new triangular multiple flow direction algorithm for computing upslope areas from gridded digital elevation models // *Water Resources Research*. 2007. V. 43. № 4. P. 1–8.
- Shin S., Paik K. An improved method for single flow direction calculation in grid digital elevation models // *Hydrological Processes*. 2017. V. 31. № 8. P. 1650–1661.
- Tarboton D.G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models // *Water Resources Research*. 1997. V. 33. № 2. P. 309–319.
- Wang L., Liu H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling // *International Journ. of Geographical Information Science*. 2006. V. 20. № 2. P. 193–213.
- Wilson J.P., Aggett G., Yongxin D., Lam C.S. *Water in the landscape: A review of contemporary flow routing algorithms* // *Advances in Digital Terrain Analysis*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. P. 213–236.
- Wilson J.P. Digital terrain modeling // *Geomorphology*. 2012. V. 137. № 1. P. 107–121.

A.L. Entin, S.M. Koshel, I.K. Lurie, T.E. Samsonov

MORPHOMETRIC ANALYSIS OF DIGITAL ELEVATION MODELS FOR ASSESSMENT AND MAPPING OF SURFACE FLOW DISTRIBUTION

The article presents a brief review of algorithms for computing morphometric parameters to model water movement over digital elevation model (DEM) surface – the sphere of hydrological DEM analysis. A brief description and analysis of contemporary flow routing algorithms is given, and a new algorithm for catchment area computation is presented. The evaluation of functionality of the new algorithm is performed through its comparison with other algorithms which are implemented in modern GIS software. The article also gives recommendations for application of flow routing algorithms for catchment area computation.