

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА ПО ЦИФРОВЫМ МОДЕЛЯМ РЕЛЬЕФА

Введение. Моделирование поверхностного стока – важная область анализа рельефа средствами геоинформационных систем (ГИС). Расчет направлений стока служит основой для вычисления площади водосбора и объема стока – базовых гидрологических параметров, которые используются как в собственно гидрологических расчетах, так и при решении исследовательских и практических задач во многих других разделах географической (и не только) науки. В качестве примера можно привести расчет факторов подверженности почв эрозии, моделирование природных и техногенных опасностей, связанных с движением потоков вещества на поверхности под действием гравитации (например, оползней, селей, наводнений, прорывов трубопроводов и т. д.) [1, 2]. Сразу оговоримся, что речь идет о базовых показателях, в которых отражается только геометрия (форма) земной поверхности. Во многих расчетах помимо этих базовых параметров используются данные по составу и различным характеристикам почв, характеристики вещества, распределение потоков которого изучается и т. д.

К результатам обработки данных, выполненных средствами ГИС, всегда следует относиться с известной долей скептицизма. Необходимо тщательно анализировать полученные результаты и, главное, тем или иным способом оценивать их достоверность, что, собственно, составляет основу научного подхода к анализу данных. Такой подход требует от пользователя не только знаний в предметной области исследований, но и знаний об особенностях работы, налагаемых ограничениях, областях применимости того конкретного метода анализа, который реализован в используемом программном модуле. Нелишним будет и знание об альтернативных методах решения той же задачи и о том, в каких программных продуктах такие методы реализованы.

К сожалению, практически отсутствуют русскоязычные издания, в которых бы подробно излагались и анализировались методы анализа рельефа (в том числе и гидрологического), реализованные в соответствующих модулях современных ГИС. При этом на английском языке издано множество монографий и обзорных статей, посвященных этим вопросам (например, [1]).

Положение усугубляется еще и тем, что большинство активно используемых в нашей стране программных средств ГИС не русифицированы в полной мере, а изложение используемых методов в справочных материалах для пользователя практически отсутствует, в лучшем случае приводятся ссылки на статьи в зарубежных изданиях.

В данной обзорной работе рассматриваются и анализируются алгоритмы, составляющие основу той части анализа рельефа, которую в западной литературе принято называть гидрологическим анализом. Обилие терминов на английском языке носит вынужденный характер, поскольку в большинстве случаев не существует их устоявшихся русскоязычных аналогов (хотя мы предлагаем и варианты перевода). Кроме того, знание оригинальных названий методов и вычисляемых показателей позволяет без проблем ориентироваться в англоязычном интерфейсе программных продуктов.

Алгоритмы расчета направлений стока. Моделирование поверхностного стока в модулях анализа современных ГИС в большинстве случаев основывается на следующей идее: сеточная цифровая модель рельефа (ЦМР), на основе которой выполняется анализ, рассматривается как поверхность, составленная из горизонтальных ячеек фиксированной высоты. Вода «вытекает» из ячейки и распределяется между теми из ее соседей, чья высота меньше высоты центральной ячейки (рис. 1).

Процедура определения ячеек, «принимающих» поток воды из данной ячейки, называется расчетом направлений стока. Направления стока (помимо основы для вычисления площади водосбора и объема стока) имеют и самостоятельную ценность – с их помощью можно организовать ячейки ЦМР в связную сеть и определить положение потенциальных водотоков.

В настоящее время разработано большое количество алгоритмов расчета направлений стока, различающихся по сложности и сферам применения.

Алгоритм **Deterministic Eight-Neighbor (D8)** был впервые применен в начале 1980-х гг. [3] и до сих пор является наиболее популярным ввиду своей простоты

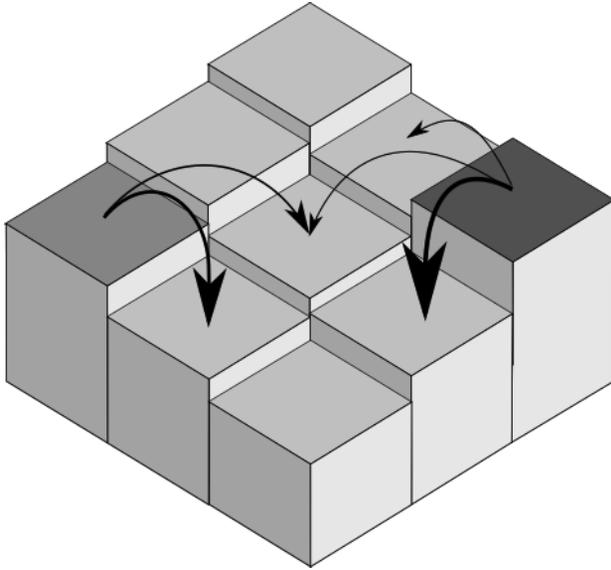


Рис. 1. Идея распространения воды «из ячейки в ячейку» при обработке ЦМР в современных ГИС

(см. таблицу). Поток из рассматриваемой ячейки целиком направляется в ту из восьми соседних (рис. 2), которая имеет, во-первых, меньшую высоту и, во-вторых, наибольший уклон линии, соединяющей центр текущей ячейки с центром соседней.

Помимо простоты идеи и реализации, алгоритм характеризуется однозначностью в определении направления стока – вода по поверхности перемещается дискретными порциями и не разделяется между ячейками. Однако в некоторых ситуациях D8 генерирует недостоверный результат. Например, если реальное направление стока на поверхности отличается от одного из восьми предлагаемых алгоритмом направлений, возможно весьма существенное отклонение рассчитанного потока от действительного. Другой известной проблемой является некорректная работа алгоритма на относительно плоских поверхностях: вместо того, чтобы «соединить» все потоки в одно течение, D8 формирует сеть водотоков, текущих параллельно друг другу по азимуту, кратному 45° .

Инструменты гидрологического анализа ЦМР в современных ГИС

Программные продукты	ArcGIS	SAGA	GRASS	Whitebox GAT	Illwis
Алгоритмы заполнения локальных понижений и предварительной обработки ЦМР					
Углубление участков ЦМР	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Алгоритм Дженсона-Доминго	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>
Алгоритм Планшона-Дарбу		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	
Алгоритм Ванга-Лю		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Алгоритмы расчета направлений стока					
D8	<input checked="" type="checkbox"/>				
Rho8		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	
D_∞		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	
MFD		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
MFD_∞		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	
MFD-md		<input checked="" type="checkbox"/>			
KRA		<input checked="" type="checkbox"/>			
DEMON		<input checked="" type="checkbox"/>			

Примечание: – алгоритм реализован, – алгоритм не реализован в явном виде, но есть возможность «сконструировать» его из имеющихся инструментов.



Рис. 2. Расчет направлений стока по алгоритму D8

Существуют модификации алгоритма D8, позволяющие хранить направления, не кратные 45°. Например, в работе [4] предложена специальная кодировка, позволяющая хранить для каждой ячейки 256 различных вариантов направлений стока, а если возникает необходимость перевода этих значений в кратные 45°, используются специальные перекодировочные таблицы.

Алгоритм **Random Eight-Neighbor** (в литературе используется сокращение **c8** или **Rho8**) был создан как попытка решить проблему дискретности направлений стока, присущую алгоритму D8 [5]. По идее авторов, если реальное направление стока имеет азимут, например, 30°, то можно распределить поток по соседним ячейкам таким образом, чтобы сток части ячеек был направлен на северо-запад (азимут 45°), а часть – на север (азимут 0°). Общая картина распределения стока должна в данном случае получиться более достоверной.

В алгоритме Rho8 уклоны вычисляются таким же образом, как и в D8, но при этом каждой ячейке приписывается дополнительно некоторая случайная величина ρ . Распределение ρ подобрано так, чтобы при перемножении рассчитанных уклонов и случайных величин

максимальные значения в большинстве случаев все равно соответствовали направлению наибольшего уклона, как и в D8; в тех же случаях, когда результат будет отличаться, и происходит устранение нежелательного эффекта «дискретности» (рис. 3).

Поскольку алгоритм использует случайные величины, результаты его применения к одной и той же ЦМР могут несколько различаться в разных программных реализациях (используются разные датчики случайных чисел), что можно отнести к его минусам.

Алгоритм **Deterministic Infinity (D ∞)** [6] рассчитывает направление стока по треугольникам, вершинами которых являются середины центральной и соседних ячеек. Всего таких треугольников восемь (рис. 4), каждый из них, с учетом значений высот в вершинах, однозначно определяет некоторую плоскость в пространстве. Для каждой из этих восьми плоскостей вычисляется вектор, противоположный градиенту, с началом в середине центральной ячейки. В качестве направления стока выбирается направление того из построенных векторов, который имеет наибольшую длину и при этом находится в пределах угла, образованного сторонами соответствующего треугольника.



Рис. 3. Расчет направлений стока по алгоритму Rho8

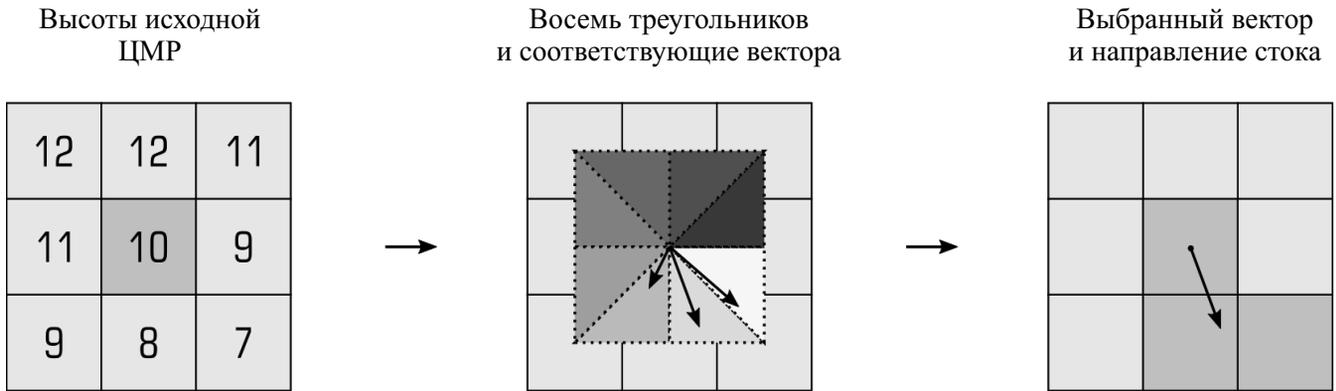


Рис. 4. Расчет направления стока по алгоритму D_{∞}

Азимут, рассчитанный по алгоритму D_{∞} , может принимать любое 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 определенной пропорции. Таким образом, появляется возможность распределять поток между несколькими ячейками при сохранении однозначности определения направления стока.

Группа алгоритмов, носящих название **Multiple Flow Direction (MFD)**, дает возможность распределять поток между всеми соседними ячейками, высота которых меньше, чем высота центральной ячейки (рис. 5). Доля потока, приходящегося на каждого соседа, как правило, рассчитывается на основе уклонов линий, соединяющих центры ячеек.

Например, в работе Фримена [7] эта доля определяется формулой:

$$f_i = \frac{\max(0, (tg(\beta_i))^p)}{\sum_{i=1}^8 \max(0, (tg(\beta_i))^p)}$$

$$f_i = \frac{\max(0, L_i \cdot tg(\beta_i))}{\sum_{i=1}^8 \max(0, L_i \cdot tg(\beta_i))}$$

Здесь β_i – угол наклона линии, соединяющей центры ячейки и ее i -го соседа, p – специальный показатель степени, в который возводится тангенс угла наклона. В дальнейшем этот показатель степени часто обсуждался в литературе и получил название *flow partition exponent* (примерный перевод – «степень разделения потока»); как эквивалентные используется также названия *convergence index* («индекс конвергенции») и *convergence factor* («фактор конвергенции»). Максимум из двух значений (одно из которых равно нулю) берется для того, чтобы не учитывать соседей, имеющих большую высоту. Значение показателя p сам Фримен определял равным 1.1, подобрав его на основании визуального анализа результатов расчета.

В другой работе [8] используется схожая формула, но тангенс угла наклона не возводится в степень, а дополнительно умножается на величину, зависящую от положения соседа:



Рис. 5. Распределение стока алгоритмом MFD

Здесь L_i – величина, равная половине шага сетки для прямых соседей и $\frac{1}{2\sqrt{2}} \approx 0.354$ от шага сетки для соседей по диагонали. Авторы разрабатывали свой вариант алгоритма в целях расчета удельной площади водосбора.

В дальнейшем эти два подхода (возведение в степень и умножение на коэффициент) совмещались, разные авторы предлагали величины степени в пределах от 1.1 до 10, или даже специальные процедуры для ее расчета [9]. Наиболее сложные из этих вариантов вполне могут считаться самостоятельными алгоритмами. К ним относится, например, **MFD-md**. Это модификация алгоритма MFD, предложенная группой ученых из Китая [10]. Пользуясь концепцией степени разделения потока, они предлагают следующую формулу для его вычисления:

$$p = f(e) = 8.9 \cdot \min(e, 1) + 1.1.$$

Здесь p – искомая степень разделения потока, e – максимальный из уклонов отрезков, соединяющих центральную ячейку и ее более низких соседей (*maximum downslope gradient* в терминологии авторов). Коэффициенты подобраны опытным путем. Создатели алгоритма, проводя тестирование на абстрактных математических поверхностях (плоскость, выпуклая сфера, седловина), сравнивали результаты расчета удельной площади водосбора с использованием разных алгоритмов. По результатам серии тестов утверждается, что MFD-md дает значения показателя, более близкие к ожидаемым на абстрактных поверхностях (по сравнению с D8 и «простым» MFD).

Алгоритм **MD ∞** , как и MFD, распределяет поток между всеми доступными соседними ячейками, но для определения пропорции пользуется способом расчета, который применен в алгоритме D ∞ [11]. То есть поток сначала разделяется по возможным направлениям пропорционально длине рассчитанных векторов, а затем та часть потока, которая направлена вдоль конкретного вектора, распределяется между теми ячейками, которые он затрагивает. Получающееся распределение отлича-

ется меньшим «разбросом» воды по соседним ячейкам, чем результат действия классического MFD, и, по словам авторов, большей правдоподобностью в условиях сильно расчлененного рельефа.

Еще один похожий подход, называемый **Mass-Flux**, реализован в пакете RiverTools [12]. Разработчики пока не выпустили подробное описание метода, однако краткая его характеристика приводится в [1]. Суть метода состоит в следующем: каждая ячейка ЦМР первоначально делится на четыре одинаковые ячейки меньшего размера; каждая такая четверть имеет общую границу с двумя соседними ячейками. Высоты этих соседей, а также высота исходной ячейки позволяют сопоставить каждой четверти определенную плоскость (подобно тому, как это делается в алгоритмах D ∞ и MFD ∞). Эта плоскость, в свою очередь, задает направление вектора градиента и, соответственно, направление стока из своей четверти ячейки. Метод Mass-Flux имеет преимущество при обработке ячеек, находящихся на локальных водоразделах – поток может быть направлен из одной ячейки в две противоположные стороны, при этом есть возможность оперировать конкретными значениями направлений стока для каждой четверти ячейки.

Разработано также несколько алгоритмов, выходящих за рамки операций над скользящим окном из девяти ячеек и предназначенных для построения более или менее условных линий тока. Исторически первым таким алгоритмом был **Kinematic routing algorithm (KRA)**, называемый также метод «катящегося шарика» (*rolling-ball method*) или, по имени автора, алгоритм Ли (*Lea's method*) [13]. В рамках этого алгоритма каждая ячейка исходной ЦМР представляется как фрагмент наклонной плоскости, причем для определения положения этой плоскости и направления потока на ней привлекаются также значения в вершинах соседних ячеек. Таким образом, каждой ячейке сопоставляется некоторый азимут направления стока. Процесс проиллюстрирован на рис. 6.

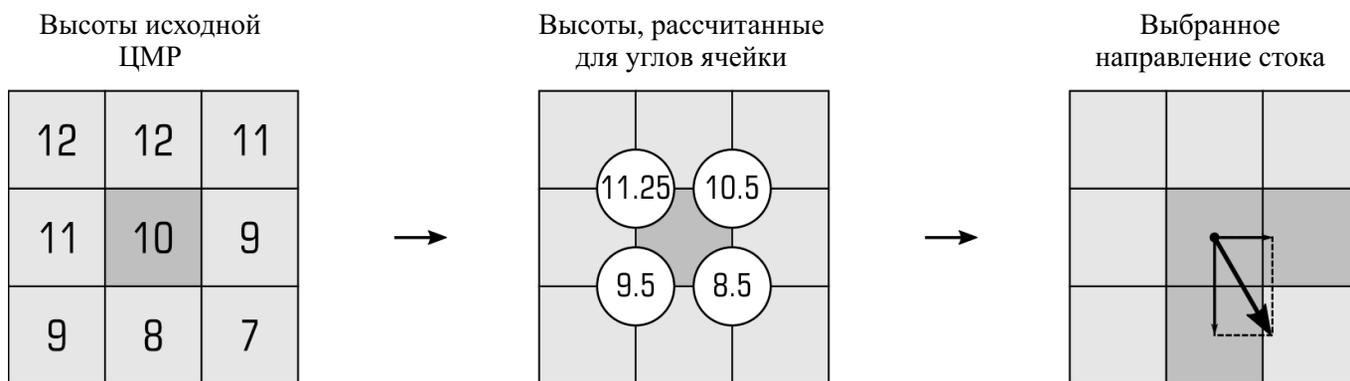


Рис. 6. Алгоритм «катящегося шарика» (алгоритм Ли); поток не распределяется в ячейки, являющиеся соседями по диагонали – только в ячейки, примыкающие к центральной по одной из сторон

Алгоритм предполагает, что поток начинается из центра произвольной ячейки, далее течет по азимуту, рассчитанному для данной ячейки, до ее границы. Переходя границу, поток попадает в новую ячейку и поворачивает так, чтобы соответствовать новому азимуту. Движение элементарной водной массы, таким образом, уподобляется шарикю, катящемуся по поверхности ЦМР. Суммирование всех потоков, проходящих через некоторую ячейку, позволяет вычислить площадь водосбора или объем стока для этой ячейки.

На основе алгоритма Ли был разработан метод **DEMON** [14]. Направления в нем рассчитываются так же, как в алгоритме Ли, разница же заключается в интерпретации потока. В алгоритме Ли водная масса считается сконцентрированной в центре ячейки и перемещающейся далее как единое целое («катящийся шарик»), **DEMON** использует введенное авторами понятие «полоса потока» (*flow tube*). Эта полоса ограничена двумя линиями тока, и гидрологические характеристики рассчитываются на основе ее ширины (рис. 7).

Форма и положение линий тока, конструируемых в алгоритме Ли и методе **DEMON**, тесно связаны с положением ячеек регулярной сетки ЦМР. В 2015 г. авторами данной статьи предложен способ вычисления базовых гидрологических характеристик, основанный на конструировании линий тока, форма и поведение которых не зависит от границ ячеек ЦМР и определяется исключительно направлением вектора градиента в любой точке поверхности [15]. Этот подход назван **FLBA (Flowline-Based Algorithm)**. Дискретная сеточная функция высот дополняется до непрерывной функции с помощью билинейной интерполяции (внутри каждой ячейки билинейная функция однозначно определяется значениями ЦМР в четырех ее углах), что дает возможность вычислять значения высот и частные производные в произвольной точке внутри области определения ЦМР, а не только в узлах регулярной сетки. Линия тока, выходящая из конкретной точки, рассчитывается путем численного решения системы дифференциальных уравнений, выражающих тот факт, что линия тока касательна к вектору градиента в каждой своей точке.

При вычислении площади водосбора или объема стока алгоритм **FLBA** строит линии тока из центра каждой ячейки ЦМР. Искомый параметр для каждой ячейки подсчитывается на основе количества линий тока, проходящих через нее, причем предусмотрено два способа расчета. В более сложном из вариантов учитывается длина линии тока в пределах ячейки и вводится связанный с ней поправочный коэффициент.

Вопрос о том, какой из алгоритмов позволяет наиболее достоверно рассчитывать гидрологические параметры, в настоящее время остается открытым. При

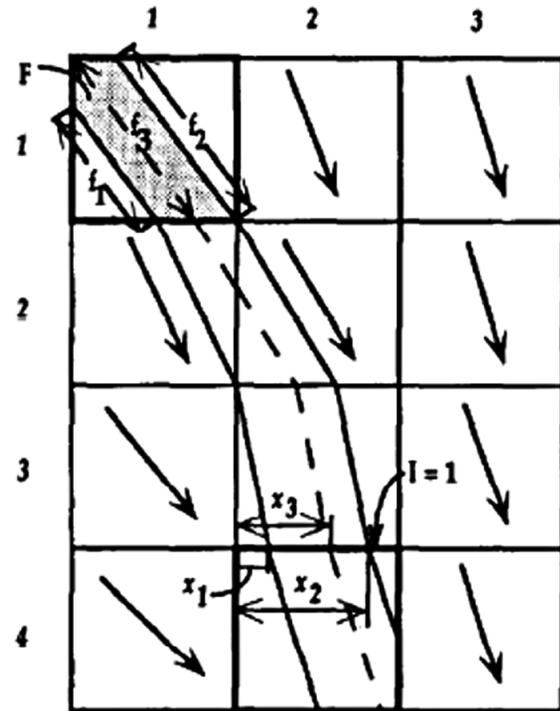


Рис. 7. «Полоса потока», используемая в алгоритме **DEMON** (иллюстрация из работы [14])

необходимости строить связную сеть ячеек единственным пригодным к использованию алгоритмом оказывается **D8**; при расчете площади водосбора и объема стока обычно пользуются теми алгоритмами, которые реализованы в программных средствах ГИС, доступных или привычных исследователям.

Алгоритмы предварительной обработки ЦМР.

Главным препятствием для корректного расчета направлений стока и вычисления производных гидрологических параметров по цифровым моделям рельефа являются замкнутые локальные понижения – в таких областях движущийся поток останавливается, независимо от используемого алгоритма определения направлений стока. Локальные понижения могут отражать реальные неровности земной поверхности, а могут появиться в процессе создания ЦМР ввиду недостаточности исходных данных, особенностей работы алгоритмов интерполяции или по иной причине.

В любом случае, для корректного определения направлений стока и построения связной сети водотоков необходимо устранить влияние тех локальных понижений на ЦМР, которые не существуют на местности или недостаточно велики, чтобы являться реальной конечной точкой для потоков воды. Этого можно добиться двумя путями: заполнением локальных понижений (увеличением высот в пределах понижения) либо «про-

резанием» их границ (уменьшением высот как в пределах понижения, так и за его пределами таким образом, что понижение перестает быть замкнутым). В современных программных средствах ГИС реализованы алгоритмы, заполняющие локальные понижения таким образом, что на их месте формируется горизонтальная или наклонная плоскость.

Алгоритм **Дженсона-Доминго** (1988) был одним из первых таких алгоритмов [16]. Он состоит из следующих шагов:

1) Заполняются замкнутые локальные понижения, состоящие из одной ячейки. Для этого каждая ячейка модели сравнивается с ее соседями, и если ее высота оказалась минимальной, ей присваивается новое значение высоты, равное наименьшему значению среди высот соседей. Этот шаг позволяет уменьшить количество понижений, которые требуется обработать на последующих этапах.

2) Для каждой ячейки по алгоритму D8 рассчитываются направления стока. Неоднозначности разрешаются путем заимствования значений из соседних ячеек по определенным правилам. Группы ячеек, для которых направление стока не определено по причине отсутствия поблизости ячеек с более низким значением высоты, считаются «ядрами» локальных понижений.

3) Для каждого «ядра» локального понижения восстанавливается его водосбор.

4) Для каждой пары водосборов отыскивается высота «точки истечения» из одного водосбора в другой.

5) Из всех найденных точек для данного водосбора выбирается наиболее низкая. От нее строится линия тока (используется все тот же алгоритм D8). Дальнейшие действия зависят от результата построения:

а. Если линия вернулась в исходный водосбор, то все водосборы, по которым она прошла, объединяются; для них рассчитывается новая точка истечения.

б. Если линия тока достигла границы ЦМР, то выход из понижения считается найденным. Наибольшая из высот ячеек, соответствующих линии тока, принимается как пороговое значение высоты; все ячейки водосбора, имеющие более низкое значение высоты, «приподнимаются» до порогового значения.

Алгоритм позволяет устранять понижения на относительно плоских участках модели, где западины могут образовывать сложные взаимосвязанные системы. Кроме того, авторы предусматривают возможность сохранения замкнутых понижений без изменений, если максимальная разность высот между исходной и формируемой поверхностью больше некоторой пороговой величины.

В результате работы алгоритма на месте замкнутого локального понижения формируется горизонтальная плоскость, что приводит к неоднозначности определе-

ния направлений стока в пределах скорректированной области. Существует ряд модификаций алгоритмов расчета направлений стока (прежде всего D8), позволяющих решить эту проблему [17, 18].

Можно, однако, избежать проблемы горизонтальной поверхности, формируя на месте локального понижения наклонную плоскость или более сложную поверхность. Два описанных ниже алгоритма заполнения могут замещать локальное понижение наклонной поверхностью с уклоном в сторону точки выхода из понижения.

Алгоритм **Планшона-Дарбу** был предложен в 2002 г. [19] и состоит из следующих операций. Матрица высот W , в которой будет сформирован результат, инициализируется в граничных ячейках модели значениями из исходной матрицы высот Z , всем остальным ячейкам W присписывается значение z_{∞} , существенно превышающее максимальную высоту в пределах исходной ЦМР (в дальнейшем ячейки с таким значением рассматриваются как еще не обработанные и исключаются из рассмотрения в качестве соседей). На основе заданного минимального уклона вычисляется минимальная допустимая разность высот между соседними ячейками; для прямых соседей и соседей по диагонали значения e отличаются, поскольку учитывается разность расстояний между центрами ячеек. Затем все ячейки результирующей модели просматриваются в определенном порядке и над ними проводится следующая операция ($Z(c)$ – исходная высота текущей обрабатываемой ячейки, $W(n)$ – высота наиболее низкой соседней ячейки результата): если $Z(c)$ больше или равна $W(n) + e$, то высота ячейки результирующей модели $W(c)$ принимается равной $Z(c)$ (рис. 8А); в противном случае $W(c)$ принимается равной $W(n) + e$ (рис. 8Б). Указанная операция повторяется до тех пор, пока в результирующей матрице W не останутся значений z_{∞} .

Значение пороговой величины e определяет форму результирующей поверхности. При $e = 0$ формируется горизонтальная плоскость, при значениях $e > 0$ формируется наклонная поверхность с уклоном в сторону «выхода» из понижения. В существующих реализациях алгоритма (например, в SAGA GIS) для удобства обычно задается не сама разность e , а минимальный угол наклона линии, соединяющей центры соседних ячеек (о чем уже упоминалось выше).

Алгоритм Планшона-Дарбу обрабатывает ЦМР за меньшее время, чем алгоритм Дженсона-Доминго, позволяет формировать наклонные поверхности, однако не предусматривает возможности сохранять некоторые локальные понижения. Кроме того, при заполнении наклонной поверхностью модификации могут подвергаться ячейки ЦМР, которые изначально не входили в локальное понижение.

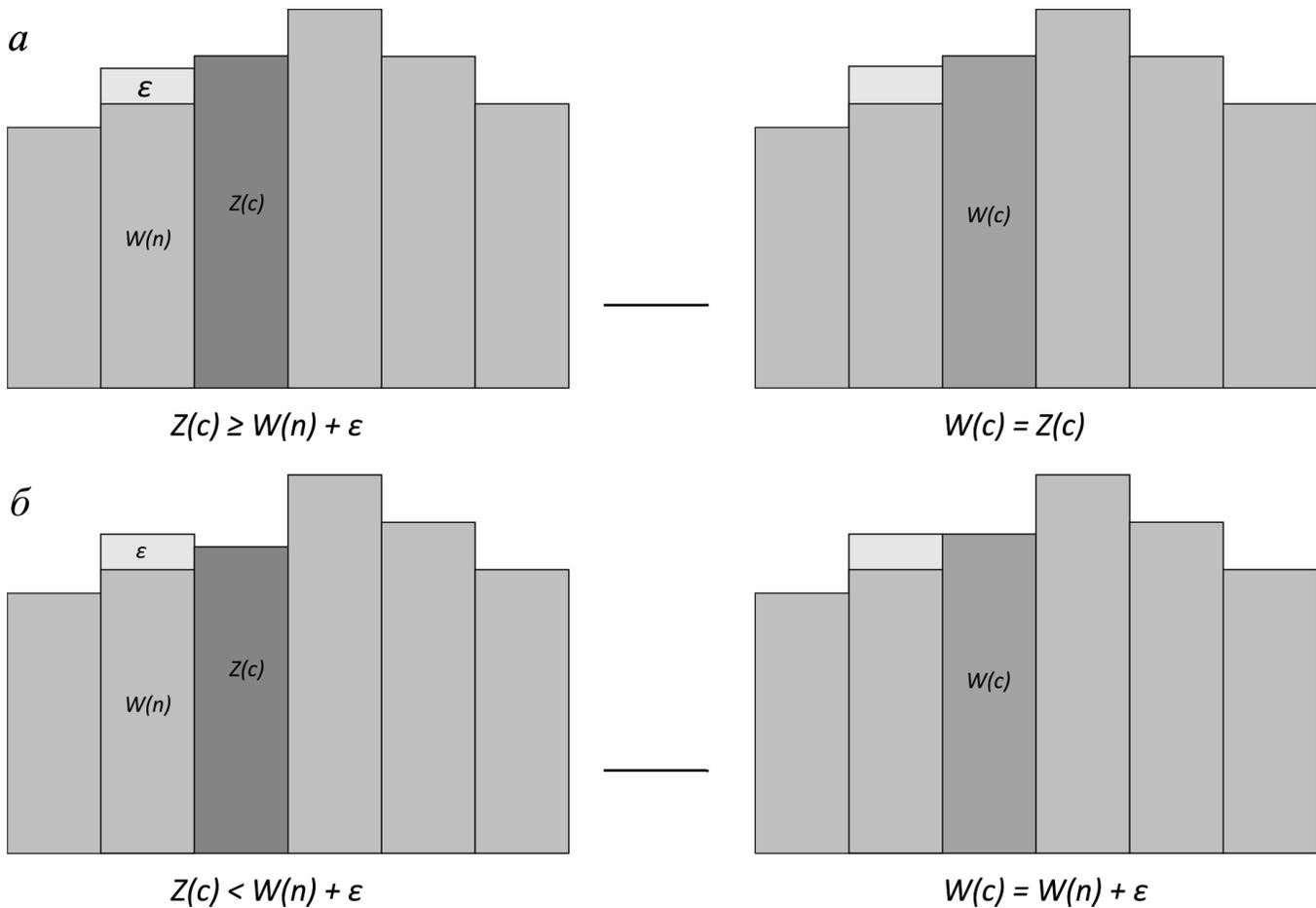


Рис. 8. Схема работы алгоритма заполнения локальных понижений Плансона-Дарбу

Алгоритм **Ванга-Лю** [20] отличается от представленных ранее алгоритмов тем, что не требует неоднократных проходов по всем ячейкам ЦМР, а представляет результат уже после единственного просмотра и обработки некоторых (не всех) ячеек.

Для описания работы алгоритма авторы вводят понятие «высота истечения» (*spill elevation*), которая, собственно, и является искомой высотой ячейки результирующей ЦМР. Для ячейки, имеющей соседей с меньшей высотой, высота истечения считается равной исходной высоте ячейки. В противном случае высота истечения считается равной высоте одной из соседних ячеек (возможно, с некоторой «добавкой» ε , аналогичной значению из предыдущего алгоритма, для формирования наклонной поверхности). Главной особенностью алгоритма является способ перебора ячеек ЦМР. Для определения высоты истечения каждой точки, алгоритм выстраивает путь стока из каждой граничной ячейки ЦМР вверх по склону с использованием подхода, называемого *A^T least-cost path (LCP) search algorithm* [21, 22] – алгоритма поиска на графах путей с наимень-

шей стоимостью, точнее, его реализацией для сеточных ЦМР. В современной литературе эта реализация часто упоминается под названием *Priority-Flood Algorithm*, или *PFA* [23–25]. Ячейки обрабатываются в порядке общей очереди по возрастанию их высот; на начальном этапе в очередь записываются только граничные ячейки, затем после просмотра каждой ячейки она выбывает из списка, в очередь добавляются ее соседи, и список сортируется заново. Следующей на обработку поступает ячейка, высота которой минимальна среди всех ячеек в текущем списке. Алгоритм прекращает работу, когда в очереди на просмотр не останется ни одной ячейки.

Как и алгоритм Плансона-Дарбу, алгоритм Ванга-Лю может формировать наклонные поверхности в результате заполнения впадин, но не предоставляет возможности сохранять некоторые локальные понижения без изменений. Также при использовании алгоритма Ванга-Лю может происходить модификация высот за пределами локального понижения.

Алгоритмы Плансона-Дарбу и Ванга-Лю дают одинаковый результат при одинаковых входных пара-

метрах (минимальном угле наклона между соседними ячейками); при нулевом угле наклона результаты их работы аналогичны заполнению по алгоритму Дженсона-Доминго.

Разработаны также алгоритмы, заполняющие локальные понижения с использованием более сложных процедур, выходящих за рамки анализа соседних ячеек. Коллектив ученых из университетов Италии представил алгоритм заполнения, основанный на геофизических закономерностях [26, 27]. Этот алгоритм использует площади водосбора, среднее значение высоты в окрестности, углы наклона и кривизну поверхности, рассчитываемые для каждой ячейки, чтобы вычислить добавочное значение высоты и устранить понижение. Процедура обработки применяется не к понижению, а ко всей области, из которой осуществляется сток в понижение. В результате формируется наклонная поверхность сложной формы, высоты которой сильно изменены по сравнению с высотами исходной ЦМР. Этот алгоритм пока не реализован в доступных ГИС.

Еще один алгоритм, названный создателями **PDEM**, предполагает проведение интерполяции между граничными ячейками понижения и ячейкой, интерпретируемой как выход из понижения [24]. Алгоритм начинает работу с определения положения замкнутых локальных понижений, затем для каждого такого понижения конструирует отрезки, соединяющие граничные ячейки и ячейку-выход. Если отрезок целиком располагается в пределах понижения, то все высоты ячеек понижения, расположенных вдоль отрезка, модифицируются; новая высота рассчитывается путем линейной интерполяции между высотами границы и выхода. В случае если часть отрезка располагается за пределами понижения, интерполяция не производится. Алгоритм работает итеративно – на n -ом шаге интерполяции подвергаются все возможные ячейки, затем положения локальных понижений определяются заново, и на $(n+1)$ -м шаге интерполяция повторяется. Работа прекращается, когда на ЦМР не остается ни одного замкнутого понижения.

Алгоритм PDEM также не реализован в современных ГИС, но доступен в виде открытого кода на персональной интернет-странице одного из разработчиков (<http://geography.unt.edu/~fpan/>). Программа выполняется в среде Processing (<https://processing.org/>) версии 1.5.1.

Заполнение локальных понижений – не единственный способ приведения ЦМР к гидрологически корректному виду. Могут также применяться и следующие подходы:

- создание ЦМР путем интерполяции с учетом векторных данных о водотоках [28] (алгоритм реализован в ArcGIS);

- понижение высот ячеек, соответствующих водотокам, на готовой ЦМР;

- «прорезание» своеобразных каналов через границы локальных понижений, или уменьшение высот ячеек, не соответствующих реальным водотокам [29];

- комбинация заполнения локальных понижений и вышеперечисленных способов [17].

Существует также подход, который позволяет корректно рассчитать базовые гидрологические параметры, не проводя коррекцию исходной ЦМР [30]. Он реализован в модуле *r.watershed* пакета GRASS и использует уже упоминавшийся выше алгоритм A^T поиска путей с наименьшей стоимостью на графе. Обработка начинается от границ ЦМР: каждой ячейке присваивается направление стока по алгоритму D8 (для локальных понижений оно выбирается так, чтобы общий поток был направлен в сторону выхода из понижения), а также порядковый номер для последующей обработки. На следующем шаге ячейки ЦМР обрабатываются по алгоритму MFD в соответствии с присвоенным ранее порядком; для тех ячеек, которые относятся к локальным понижениям, пропорции распределения стока не вычисляются, а заимствуется результат, полученный по D8. Фактически результат аналогичен заполнению локальных понижений плоскостями и последующим применением специальных подходов для разрешения неоднозначностей, однако такая реализация позволяет уделять меньше внимания промежуточным шагам.

Сравнение результатов работы алгоритмов. Теоретическое описание алгоритмов расчета направлений стока было бы неполным без сравнения результатов их работы на примере ЦМР реальной территории. Выбранный нами тестовый участок представляет собой западный склон небольшого хребта, находящегося на севере Западного Саяна (Хакасия). Рельеф участка снят при помощи воздушного лазерного сканера летом 2013 г. На основе данных лазерного сканирования (облака точек) в программном пакете ArcGIS методом естественного соседа (*Natural Neighbor*) построена сеточная ЦМР с шагом 1 м. Затем полученная модель была обработана с целью заполнения замкнутых локальных понижений; обработка производилась в SAGA GIS по алгоритму Ванга-Лю, минимальный уклон установлен равным 0.1° . Другие виды коррекции (сглаживание и т. п.) не применялись.

Площадка неправильной формы имеет размеры 333×477 м, абсолютные высоты изменяются на ней в пределах от 695 до 895 м. На площадке присутствуют эрозионные формы рельефа (водосборные воронки, каналы стока, конусы выноса) размером порядка 50–100 м.

На основе ЦМР были построены модели площади водосбора с использованием разных алгоритмов расчета

направлений стока. Все расчеты (кроме метода FLBA) выполнены в SAGA GIS версии 2.1.4; использовались модули *Catchment Area (Flow Tracing)*, *Catchment Area (Recursive)*, *Catchment Area (Top-Down)*. Моделирование методом FLBA выполнялось в отдельной программе, написанной авторами.

Результаты расчетов каждым из методов приведены на рис. 9, цв. вкл. (весь участок) и рис. 10, цв. вкл. (увеличен наиболее интересный с точки зрения сравнения алгоритмов фрагмент участка). Изображения наглядно демонстрируют тот факт, что применение разных алгоритмов определения направлений стока могут приводить к существенно отличающимся результатам при расчете площади водосбора. Например, алгоритм D8 формирует узкие (шириной не более одной ячейки ЦМР) «каналы», текущие и неестественно изгибающиеся под азимутами, кратными 45° . При этом, если ширина днища эрозионной формы превышает одну ячейку, алгоритм D8 может создать два разных потока, каждый со своим водосбором (рис. 10). Алгоритм MFD в классическом варианте создает противоположную картину – вблизи тальвегов формируется широкая полоса с относительно высокими значениями площади водосбора. Экстремальные значения этого параметра, однако, заметно ниже (в данном примере – в полтора-два раза), чем в результате расчета по D8. Другие алгоритмы дают картину промежуточного характера: ширина полосы высоких значений несколько меньше, чем для MFD, а наибольшие значения в пределах этой полосы заметно выше и сопоставимы с результатом D8. При этом результаты, показываемые с8, D ∞ и различными модификациями MFD, больше схожи с результатом классического MFD, а KRA, DEMON и, в меньшей степени, FLBA производят распределение, похожее на D8, но заметно более плавное, без неестественных изгибов под углами, кратными 45° .

Большой интерес представляет поведение алгоритмов на поверхностях с положительной профильной и касательной кривизной (выпуклых в плане и в профиле) – например, на конусах выноса (рис. 10, юго-восточная часть участка). На таких поверхностях линии тока демонстрируют дивергентное поведение, что в идеале должно привести к «рассеянию» высоких значений площади водосбора из каналов стока более-менее равномерно по всему конусу. Видно, однако, что большинство алгоритмов находят в пределах конуса один-два канала (вовсе не обязательно соответствующих реальным углублениям на поверхности), куда направляется основная часть потока. Некоторое распределение площади водосбора производят алгоритмы группы MFD, а также D ∞ и с8 (последний, возможно, из-за особенностей его реализации в SAGA GIS).

При всем разнообразии алгоритмов, к настоящему времени не представляется возможным рекомендовать какой-либо из них в качестве универсального, подходящего для любых территорий. При выборе алгоритма расчета направлений стока следует сопоставлять результат применения этого алгоритма с известными особенностями распределения стока на исследуемом участке.

В таблице представлены сведения о реализации алгоритмов предварительной обработки ЦМР и расчета направлений стока в современных ГИС, как коммерческих, так и свободно распространяемых: ArcGIS (модуль Spatial Analyst), GRASS, SAGA GIS, Whitebox GAT, Ilwis. Довольно популярная QGIS (бывшая Quantum GIS) не упоминается в таблице по той причине, что для гидрологического анализа в ней используются модули из GRASS и SAGA. Надеемся, что наряду с приведенным выше описанием особенностей работы каждого из методов, эти сведения помогут читателю данной работы при выполнении гидрологического анализа ЦМР сделать правильный выбор программного обеспечения и алгоритма, наиболее подходящего для данной конкретной ситуации, и, тем самым, получить наиболее достоверные (насколько это возможно) результаты исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Geomorphometry: concepts, software, applications / T. Hengl, H.I. Reuter. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2007. 565 p.
2. Эрозия почв и русловые процессы / Р.С. Чалов. М.: Изд-во МГУ, 2000. Вып. 12. 297 с.
3. O'Callaghan J.F. and Mark D.M. The extraction of drainage networks from digital elevation data // Computer vision, graphics, and image processing. 1984. Vol. 28. No. 3. P. 323–344.
4. Greenlee D.D. Raster and vector processing for scanned linework // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1987. Vol. 53. P. 1383–1387.
5. Fairfield J. and Leymarie P. Drainage networks from grid digital elevation model // Water Resources Research. 1991. Vol. 27. No. 5. P. 709–717.
6. Tarboton D.G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models // Water Resources Research. 1997. Vol. 33. No. 2. P. 309–319.
7. Freeman T. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid // Computers and Geosciences. 1991. Vol. 17. P. 413–422.
8. Quinn P.F., Beven K.J., Chevallier P., and Planchon O. The prediction of hillslope flow paths for distribut-

ed hydrological modelling // *Hydrological Processes*. 1991. Vol. 5. No. 5. P. 59–79.

9. *Quinn P.F., Beven K.J., and Lamb R.* The $\ln(6/\tan\alpha)$ index: How to calculate it and how to use it within the TOPMODEL framework. // *Hydrological Processes*. 1995. Vol. 9. No. 4. P. 161–182.

10. *Qin C., Zhu A., Pei T., Li B., Zhou C., and Yang L.* An adaptive approach to selecting a flow partition exponent for a multiple flow direction algorithm // *International Journal of Geographical Information Science*. 2007. Vol. 21. No. 4. P. 443–458.

11. *Seibert J. and McGlynn B.L.* A new triangular multiple flow direction algorithm for computing upslope areas from gridded digital elevation models // *Water Resources Research*. 2007. Vol. 43. No. 4. P. 1–8.

12. Rivix.com: Introduction to RiverTools [Electronic resource]. URL: <http://rivix.com/intro.php> (accessed: 25.09.2015).

13. *Lea N.L.* An aspect-driven kinematic routing algorithm // *Overland Flow: Hydraulics and Erosion Mechanics*. New York, 1992.

14. *Costa-Cabral M.C. and 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. Vol. 30. No. 6. P. 1681–1692.

15. *Koshel S. and Entin A.* Gradient-based algorithm for computing basic hydrological parameters from gridded DEMs // *IGU 2015 Book of Abstracts*. International Geographical Union Moscow, 2015. P. 1069.

16. *Jenson S.K. and Domingue J.O.* Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1988. Vol. 54. No. 11. P. 1593–1600.

17. *Zhu Q., Tian Y., and Zhao J.* An efficient depression processing algorithm for hydrologic analysis // *Computers & Geosciences*. 2006. Vol. 32. No 5. P. 615–623.

18. *Barnes R., Lehman C., and Mulla D.* An efficient assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models // *Computers and Geosciences*. 2014. Vol. 62. P. 128–135.

19. *Planchon O. and Darboux F.* A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models // *Catena*. 2002. Vol. 46. P. 159–176.

20. *Wang L. and Liu H.* An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling // *International Journal of Geographical Information Science*. 2006. Vol. 20. No. 2. P. 193–213.

21. *Hart P.E., Nillson N., and Raphael B.* Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths // *IEEE Transactions of Systems Science and Cybernetics*. 1968. Vol. ssc-4. No. 2. P. 100–107.

22. *Ehlschlaeger C.* Using the AT Search Algorithm to Develop Hydrologic Models from Digital Elevation Data // *Proceedings of International Geographic Information Systems (IGIS) Symposium'89*. 2001. P. 275–281.

23. *Jones R.* Algorithms for using a DEM for mapping catchment areas of stream sediment samples // *Computers and Geosciences*. 2002. Vol. 28. No. 9. P. 1051–1060.

24. *Pan F., Stieglitz M., and McKane R.B.* An algorithm for treating flat areas and depressions in digital elevation models using linear interpolation // *Water Resources Research*. 2012. Vol. 48. No. 2. P. 1–13.

25. *Barnes R., Lehman C., and Mulla D.* Priority-flood: An optimal depression-filling and watershed-labeling algorithm for digital elevation models // *Computers and Geosciences*. 2014. Vol. 62. P. 117–127.

26. *Grimaldi S., Nardi F., Benedetto F., Istanbuluoglu E., and Bras R.L.* A physically-based method for removing pits in digital elevation models // *Advances in Water Resources*. 2007. Vol. 30. No. 10. P. 2151–2158.

27. *Santini M., Grimaldi S., Nardi F., Petroselli A., and Rulli M.C.* Pre-processing algorithms and landslide modeling on remotely sensed DEMs // *Geomorphology*. 2009. Vol. 113. No. 1–2. P. 110–125.

28. *Hutchinson M.F.* A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits // *Journal of Hydrology*. 1989. Vol. 106. No. 3–4. P. 211–232.

29. *Soille P.* Optimal removal of spurious pits in grid digital elevation models // *Water Resources Research*. 2004. Vol. 40. No. 12. P. 1–9.

30. *Metz M., Mitasova H., and Harmon R.S.* Efficient extraction of drainage networks from massive, radar-based elevation models with least cost path search // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2011. Vol. 15. No. 2. P. 667–678.