СОДЕРЖАНИЕ

Применение ГИС-технологий

Карпачевский А.М., Новаковский Б.А. Возможности использования инструментов ГИС-пакета ArcGIS для структурного анализа электрических сетей 4
Karpachevsky A.M., Novakovsky B.A. Capabilities of ArcGIS tools for structure analysis of power grids

Титов И.Е., Панов А.В., Кречетников В.В., Шубина О.А., Микаилова Р.А. Прикладные ГИС для поддержки радиационно-экологического мониторинга в регионах размещения ядерно- и радиационно-опасных объектов 12
Titov I.E., Panov A.V., Krechetnikov V.V., Shubina O.A., Mikailova R.A. Applied GIS for supporting radioecological monitoring in the vicinity of nuclear and radiation hazardous facilities

Моделирование геообъектов и геопроцессов

Злобина А.Г., Журбин И.В. Комплексные геофизические исследования археологических памятников и принципы интерпретации данных 17
Zlobina A.G., Zhurbin I.V. Complex geophysical surveys of archeological sites and principles of data interpretation

Гордеев Н.А., Молчанов А.Б. Автоматизация структурно-геоморфологического метода реконструкции сдвиговых тектонических напряжений Л.А. Сим 25
Gordeev N.A., Molchanov A.B. Automation of L.A. Sim structural-geomorphological method for reconstruction of shear tectonic stresses

Васильев В.И., Васильева Е.В., Жатнуев Н.С., Санжиев Г.Д. Параметры образования и эволюции мантийно-корового мигранта 34
Vasiliev V.I., Vasilieva E.V., Zhatnuev N.S., Sanzhiev G.D. Parameters of origin and evolution of the mantle-crust migrant

Кошель С.М., Энтин А.Л., Самсонов Т.Е. Устранение локальных понижений на цифровых моделях рельефа с сохранением особенностей исходного поля высот 43
Koshel S.M., Entin A.L., Samsonov T.E. Feature-preserving removal of local depressions on digital elevation models

Геоэкология

Кравцова В.И., Чалова Е.Р. Аэрокосмическое картографирование уникальных ландшафтов Витязевской пересыпи 57
Kravtsova V.I., Chalova E.R. Aerospace mapping of the Vityazevskiy bay bar Unicom landscapes

Рефераты 70
Наши авторы 75

УДК 004.942

© С.М. Кошель, А.Л. Энтин, Т.Е. Самсонов

С.М. Кошель, А.Л. Энтин, Т.Е. Самсонов

УСТРАНЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ПОНИЖЕНИЙ НА ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЯХ РЕЛЬЕФА С СОХРАНЕНИЕМ ОСОБЕННОСТЕЙ ИСХОДНОГО ПОЛЯ ВЫСОТ

1. Введение

Гидрологическое моделирование с использованием цифровых моделей рельефа (ЦМР) позволяет решать такие задачи, как автоматическое определение границ бассейнов, выделение сетей потенциальных водотоков, расчет нелокальных морфометрических параметров [1, 2] и др. Гидрологическое моделирование, как правило, базируется на регулярно-сеточных ЦМР в качестве входных данных и основывается на идее о том, что вода перемещается из ячейки ЦМР с большей высотой в соседнюю ячейку с меньшей высотой. Такой подход позволяет имитировать распространение воды по склону с приемлемой достоверностью, если только на пути потока не встречаются замкнутые понижения или горизонтальные участки. Указанные особенности поля высот представляют препятствие для гидрологического моделирования [3-5], поскольку построение дренажной сети через них невозможно. Это в свою очередь приводит к разрыву дренажной сети и некорректному вычислению гидрологических параметров.

Замкнутые понижения могут иметь «естественное» происхождение, то есть отражать реальные неровности земной поверхности, или быть «искусственными» неровностями, возникающими из-за особенностей исходных данных или алгоритмов интерполяции, используемых для создания ЦМР [1, 6]. «Естественные» понижения могут быть важны для анализа, поэтому их в некоторых случаях стремятся сохранить при выполнении коррекции ЦМР [7]; «искусственные» же понижения необходимо устранять перед выполнением гидрологического моделирования [4, 8]. Горизонтальные участки практически всегда являются артефактами и требуют применения специальных алгоритмов для корректного моделирования стока через них.

Современная практика гидрологического моделирования предполагает предварительную обработку ЦМР – приведение ее к так называемой «гидрологически корректной» форме [4]. Условие гидрологической корректности – осуществление беспрепятственного стока из любой ячейки модели вниз по склону вплоть до краевых ячеек ЦМР. Разработано множество алгоритмов, модифицирующих ЦМР для обеспечения беспрепятственного стока. Их можно разделить на три группы: алгоритмы заполнения понижений, алгоритмы разрушения границ понижений, гибридные подходы. Задача алгоритмов заполнения понижений (*filling*) – увеличить высоты ячеек ЦМР таким образом, чтобы понижение перестало быть замкнутым. Первые алгоритмы этой группы идентифицировали отдельные понижения, а затем увеличивали высоты внутри ячеек до высоты самой низкой ячейки границы понижения [9, 10]. В итоге на месте понижения формируется участок, высоты ячеек в пределах которого равны (горизонтальная плоскость). Такой результат не обеспечивает беспрепятственного стока, однако для решения этой проблемы были разработаны способы «искусственной» трассировки потока через горизонтальные поверхности [11]. Существенным недостатком описанных подходов являлась их невысокая вычислительная эффективность. Позже были предложены алгоритмы, использующие специальные структуры данных, что позволило производить заполнение понижений «на лету», без предварительной их идентификации [12, 13]. Подходы, аналогичные алгоритму [13], в современной англоязычной литературе получили собственное название «заполнение с использованием очереди с приоритетом» (англ. *Priority-Flood*) [14]; их дальнейшее развитие направлено на повышение вычислительной эффективности и оптимизацию для использования с ЦМР большого размера [15-17]. Идея другой группы алгоритмов – разрушения границ понижений (*breaching*) – состоит в снижении высот соседних ячеек и формировании «канала» шириной в одну ячейку, соединяющего локальные минимумы высоты внутри понижения с областью за его пределами [5,18-20]. При использовании разрушения границ модификация затрагивает небольшое число ячеек внутри понижения и за его пределами, но само изменение высоты может быть достаточно большим, если исходное понижение было глубоким. К третьей группе относятся комбинированные

подходы, сочетающие увеличение и уменьшение высот ячеек. Эти подходы могут быть нацелены на минимизацию изменений, вносимых в ЦМР [21, 22], или использовать физические закономерности для восстановления «исходного» рельефа вдоль линий тока [23, 24]. Разработаны также специальные процедуры, позволяющие создавать ЦМР без замкнутых локальных понижений – например, такая процедура реализована в программе ANUDEM [25, 26].

В современных программных средствах ГИС чаще всего применяется заполнение локальных понижений [5]. В результате выполнения этой операции на месте понижения формируется горизонтальная или наклонная поверхность, не отражающая особенности исходного рельефа. Это приводит к тому, что структура потоков, построенных по «исправленной» ЦМР, выглядит нереалистично: например, вместо одного канала стока формируется сеть параллельных потоков, ориентированных по азимуту, кратному 45°. Кроме того, при использовании алгоритмов заполнения понижений, формирующих наклонные поверхности, возможно значительное увеличение области модификации ЦМР – далеко за пределы собственно локального понижения [21]. Обе эти проблемы вынуждают искать специальные процедуры для расчета новых высот или трассировки потока, применение которых сделает результат моделирования сети потоков более реалистичным. Так, алгоритм, описанный в работе [11], выполняет заполнение с использованием очереди с приоритетом для непосредственного вычисления реалистичных направлений стока по исходной ЦМР, что позволяет вовсе отказаться от устранения локальных понижений. Хотя алгоритм, представленный в работе, оперирует направлениями стока по схеме D8 [4], не составляет труда адаптировать его под любой другой алгоритм определения направлений стока, оперирующий локальным соседством [2]. Однако такой способ решения проблемы замкнутых понижений не годится для некоторых алгоритмов моделирования стока – например, алгоритмов, использующих построение линий тока по непрерывной поверхности [27-29]. Для применения этих алгоритмов все же требуется модифицировать матрицу высот таким образом, чтобы получающаяся поверхность была пригодна для построения линий тока, но при этом, по возможности, сохраняла особенности исходной ЦМР, влияющие на распределение стока. Примером подхода, реализующего эту идею, является программа PDEM; в ней используется линейная интерполяция высот вдоль прямолинейных отрезков внутри понижений и горизонтальных участков [30]. Это позволяет получить поверхность, пригодную для построения линий тока, но особенности рельефа внутри понижений, как правило, не сохраняются.

В настоящей работе представлен алгоритм устранения замкнутых локальных понижений на ЦМР (увеличения высот соответствующих ячеек) путем их заполнения, позволяющий формировать на месте замкнутых локальных понижений и горизонтальных участков наклонные поверхности сложной формы, обеспечивающие реалистичное поведение потоков. При этом модификация высот охватывает только непосредственно область понижения (горизонтального участка) и соседние ячейки.

2. Алгоритм заполнения локальных понижений

2.1. Термины и определения

В зарубежной литературе для обозначения замкнутых понижений используются термины *pit* и *depression*. Эти термины употребляются как синонимы, хотя в отдельных работах предлагается проводить различие между ними [5]. В русскоязычной литературе, как правило, используются термины «понижение» [2] или «депрессия» [31, 32], реже «западина» [32]. При этом определения понятий, используемые различными авторами, допускают некоторую вольность трактовок. В настоящей работе мы будем использовать термин «замкнутое понижение» и дадим его математически строгое определение.

Введем сначала несколько вспомогательных определений. Ячейки сетки ЦМР $C_{i,j}$ и $C_{k,l}$ будем называть **соседними**, если $\max\left(\left|i-k\right|,\left|j-l\right|\right)\le 1$ (здесь i, j, k, l – индексы ячеек). Это соответствует соседству по восьми направлениям («правило ферзя»). Термином «**путь**» будем обозначать упорядоченную последовательность ячеек (C^1, C^2, C^3, …, C^n), такую, что любая пара ячеек C^i, C^{i+1} (i = 1, …, n –1) включает только соседние ячейки. Назовем множество ячеек **связным**, если можно построить путь, соединяющий любые две ячейки этого множества и целиком принадлежащий этому множеству. Ячейка называется **граничной** для некоторого множества ячеек, если она не принадлежит этому множеству, но является соседом хотя бы одной ячейки множества. Границей множества ячеек будем называть множество всех его граничных ячеек. С учетом введенных определений, **замкнутое локальное понижение** – это максимальное связное множество ячеек, такое, что высота любой его ячейки ниже высоты любой его граничной ячейки. «Максимальное» означает, что мы не можем добавить к этому множеству ни один дополнительный элемент, не нарушив при этом условие.

Определим отдельно краевые ячейки ЦМР. Множество краевых ячеек ЦМР составляют ячейки крайних столбцов и строк ЦМР (за исключением тех из них, которым присвоено значение «нет данных»),

а также ячейки, у которых есть соседи, высоты которых определены как «нет данных».

Граничную ячейку будем называть **ячейкой выхода** для данного понижения, если она принадлежит границе этого понижения, имеет минимальную высоту среди ячеек границы, и при этом выполняется одно из двух условий: либо у нее есть соседняя ячейка с более низкой высотой, не принадлежащая к данному локальному понижению, либо она является краевой ячейкой ЦМР. Одно понижение может иметь несколько ячеек выхода (с одинаковой высотой), одна и та же ячейка ЦМР может являться ячейкой выхода для нескольких разных понижений. Пример замкнутого локального понижения с его границей и ячейкой выхода приведен на рис. 1a.

Далее, **горизонтальным участком** (или горизонтальной плоскостью) на цифровой модели рельефа назовем максимальное связное множество ячеек равной высоты. На высоты граничных ячеек здесь никаких условий не накладывается, а ячейкой выхода считается любая ячейка горизонтального участка, у которой есть сосед с меньшей высотой. Пример горизонтального участка приведен на рис. 1b.

2.2. Заполнение с использованием очереди с приоритетом

Алгоритм заполнения с использованием очереди с приоритетом, или «приоритетное заполнение» (англ. *Priority-Flood*, от *priority queue* – «очередь с приоритетом» и *flood* – «затопление»), является на настоящий момент самым вычислительно эффективным алгоритмом заполнения замкнутых понижений. Кроме того, применение приоритетного заполнения позволяет рассчитывать направления стока и маркировать области, относящиеся к разным бассейнам, поэтому данный алгоритм можно назвать одним из универсальных алгоритмов гидрологического моделирования с использованием ЦМР. Подробное описание приоритетного заполнения приведено в работе [14], но поскольку алгоритм, разработанный нами, использует этот подход на некоторых этапах, мы считаем необходимым кратко объяснить принцип его работы здесь.

Заполнение с использованием очереди с приоритетом работает следующим образом. Ячейки ЦМР обрабатываются в порядке возрастания их высоты и в порядке добавления в общую очередь. Сначала в очередь помещаются все краевые ячейки ЦМР. Затем на каждом шаге из очереди изымается ячейка с наименьшей высотой, ее соседи добавляются в общую очередь, если они не были добавлены в нее ранее. Проводится сравнение высоты V соседней ячейки с высотой H обрабатываемой ячейки. Если $V \geq H$, модификация высот не требуется. Если $V < H$, соседняя ячейка принадлежит понижению и ее высота увеличивается до H; ее место в общей

a

14	13	12	13	13	13	14	15	16	15	14	14
12	13	12	12	12	13	13	14	15	14	13	13
11	12	11	11	9	9	9	9	14	9	12	13
11	13	12	12	9	9	11	9	9	9	11	12
12	14	12	11	9	11	12	9	9	8	11	12
12	13	12	9	9	9	9	9	7	9	12	11
11	11	12	9	8	8	8	7	9	9	12	11
11	11	9	9	9	8	9	8	9	15	14	14
10	10	11	11	12	13	14	14	13	14	15	15
9	10	11	12	13	14	15	14	14	14	15	16

b

14	13	13	12	12	11	12	13	15	16
13	12	12	12	11	11	12	13	13	14
13	12	11	10	10	11	11	12	13	14
14	12	10	10	10	10	11	11	12	13
13	12	10	10	10	10	10	11	13	14
11	11	10	10	10	10	10	10	11	14
12	11	10	10	10	10	10	10	12	13
13	12	10	10	10	10	10	10	12	13
13	12	10	11	11	11	12	10	12	14
14	9	9	9	12	12	9	11	8	15

ячейки понижения ячейки горизонтальной плоскости

граничные ячейки ячейки выхода

Рис. 1. Замкнутое понижение (a) и горизонтальный участок (b)

Fig. 1. A closed depression (a) and a flat area (b)

очереди тем не менее по-прежнему определяется исходной высотой *V*. Впоследствии, когда соседняя ячейка сама будет помещена в обработку, высоты ее соседей будут сравниваться с модифицированным значением высоты *H*.

Применение заполнения с использованием очереди с приоритетом позволяет не только устранять локальные понижения, но и однозначно определять направления стока для всех ячеек ЦМР. Для краевых ячеек ЦМР направления стока определяются как «нулевые» (отсутствие стока из ячейки). При добавлении новой ячейки в очередь ее направление стока задается так, чтобы оно указывало на ячейку, обрабатываемую на текущем шаге. Таким образом, по завершении работы алгоритма результатом может являться не только скорректированная ЦМР, но и готовый растр кодированных направлений стока.

В алгоритме, предлагаемом в настоящей работе, процедуры алгоритма заполнения с использованием очереди с приоритетом применяются для идентификации понижений и для построения путей сложной формы внутри них.

2.3. Алгоритм заполнения локальных понижений

Задача алгоритма обработки замкнутых понижений – увеличить высоты в пределах понижения таким образом, чтобы полученная поверхность удовлетворяла некоторым критериям. Во-первых, форма поверхности должна обеспечивать беспрепятственный сток вниз по склону из каждой граничной ячейки и ячейки понижения в ячейку выхода. Во-вторых, изменение высот не должно затрагивать ячейки за пределами понижений (исключая, возможно, граничные ячейки). В-третьих, получающаяся поверхность должна отражать особенности исходного рельефа. Один из возможных способов построить такую поверхность – проводить интерполяцию высот вдоль специально построенных кривых, соединяющих граничные ячейки и выход и проходящих через локальные минимумы внутри понижения.

Алгоритм состоит из нескольких этапов. На первом выполняется поиск и маркировка понижений, их границ и ячеек выхода. Последующие этапы выполняются отдельно для каждой ячейки выхода. На втором конструируются оптимальные пути внутри понижения от ячейки выхода до всех ячеек понижения и граничных ячеек. На третьем выполняется линейная интерполяция высот вдоль построенных путей между границей и ячейкой выхода. Четвертый этап – экстраполяция высот для тех ячеек, которые не были затронуты процедурой интерполяции. По завершении заполнения результат сохраняется в виде новой матрицы высот.

Поиск и идентификация локальных понижений, их границ и точек выхода – первый этап работы алгоритма заполнения. Для идентификации понижений применяется схема приоритетного заполнения: ячейки, высоты которых должны быть модифицированы в соответствии с условием, описанным выше, маркируются как ячейки понижения. На этом же этапе маркируются ячейки выхода и границы. Ячейка помечается как выход, если среди ее соседей, еще не добавленных в список отсканированных, имеется ячейка с меньшей высотой (которая, в свою очередь, помечается как понижение). Ячейка помечается как граничная, если она не принадлежит понижению, не является ячейкой выхода, но при этом у нее есть хотя бы один сосед, маркированный как понижение.

Когда все понижения, ячейки выхода и граничные участки промаркированы, начинается непосредственно процедура заполнения. В начале этой процедуры всем ячейкам всех понижений присваиваются значения «нет данных». Все последующие этапы выполняются отдельно для каждой ячейки выхода в порядке возрастания их высот. Если к одной ячейке выхода прилегает несколько понижений, то эти понижения обрабатываются совместно. Если у одного понижения несколько ячеек выхода, то понижение обрабатывается несколько раз – столько, сколько у него ячеек выхода.

Для выполнения интерполяции высот внутри понижения строятся пути сложной формы. Построение путей также опирается на заполнение с использованием очереди с приоритетом: вначале в очередь добавляется ячейка-выход, затем на каждом шаге из очереди выбирается ячейка с наименьшей высотой и строятся сегменты путей, соединяющие эту ячейку с ее соседями, еще не добавленными в очередь. В процедуре участвуют ячейки понижения, ячейка выхода и ячейки границы. При этом граничные ячейки не добавляются в общую очередь, так что одна ячейка границы может быть связана с несколькими ячейками понижения.

В результате выполнения процедуры построения путей для каждой ячейки понижения конструируется единственный путь, соединяющий ее с ячейкой выхода. Для граничных ячеек также создаются такие пути, но, в отличие от ячеек понижения, одной ячейке границы может соответствовать несколько (теоретически – не более восьми) путей. Вся совокупность путей хранится в виде структуры дерева, корнем которого является ячейка выхода, а листьями – ячейки границы и некоторые ячейки понижений. При этом для построения оптимальных путей нужны только ссылки на родителей (рис. 2). Применяемая процедура создания дерева обеспечивает построение

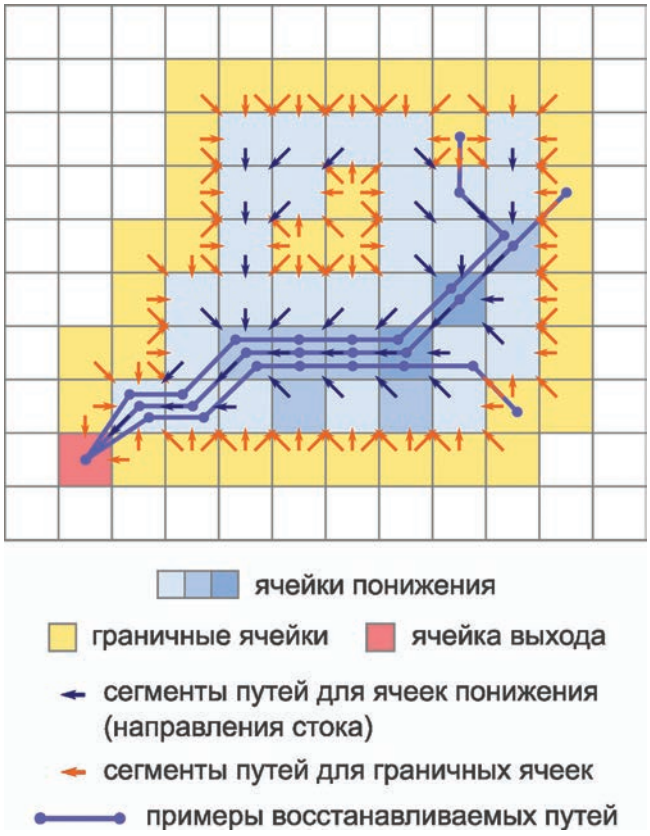

Рис. 2. Пример замкнутого понижения с сегментами путей и примерами отдельных путей. Изображения путей, проходящих через одни и те же ячейки, разделены для наглядности

Fig. 2. An example of local depression with path segments and full paths. Lines of paths going through similar cells are split up for clarity

путей, тяготеющих к локальным минимумам и «идущим в обход» локальных максимумов высоты внутри понижения. Это, собственно, и позволяет сохранять особенности исходного рельефа на этапах интерполяции и экстраполяции.

Линейная интерполяция высот выполняется вдоль всех возможных оптимальных путей, соединяющих граничные ячейки с ячейкой выхода. При этом оптимальные пути геометрически интерпретируются как ломаные, состоящие из отрезков, соединяющих центры последовательных пар ячеек, образующих путь (см. рис. 3). Для каждой ломаной известны: высота Z_b начальной точки (граничной ячейки), высота Z_{out} конечной точки (ячейки-выхода) и длина всей ломаной L. Высота Z в любой внутренней точке ломаной определяется путем линейной интерполяции по формуле:

$$Z = Z_{out} + \frac{Z_b - Z_{out}}{L} \cdot l\,,$$

где l – длина части ломаной от этой точки до конечной. Полученное значение Z присваивается соответствующей ячейке понижения в том случае, если ее текущее значение больше вычисленного либо помечено как «нет данных», поскольку одна и та же ячейка может входить в различные оптимальные пути.

На рис. 3 приведен пример оптимального пути через локальное понижение. Высота точки выхода – 10, высота граничной точки, в которой оканчивается оптимальный путь – 15. Ячейка внутри понижения имеет высоту 8. Полная длина пути составляет примерно 9,2, длина пути от точки выхода до отмеченной ячейки понижения составляет примерно 4,8. В таком случае новая высота Z для ячейки будет равна $10 + (15 - 10) \div 9{,}2 \times 4{,}8 \approx 12{,}6$.

Как было сказано выше, при построении дерева путей его листьями могут оказаться не только ячейки границы, но и ячейки понижения. Такие ячейки, а также части путей, ведущие к ним, не обрабатываются процедурой интерполяции. Для вычисления высот этих ячеек применяется процедура экстраполяции. На оптимальном пути, соединяющем ячейку понижения (лист дерева) с точкой выхода, отыскивается ближайшая к его началу ячейка, которой уже присвоено значение высоты Z_0. Расстояние от этой ячейки до конца ломаной обозначим как l_0. Всем последующим ячейкам, находящимся на ломаной, значение высоты уже присвоено, поскольку оставшаяся часть ломаной уже была частью другого оптимального пути на этапе интерполяции или экстраполяции. Тогда для каждого узла ломаной, который еще не имеет вычисленного значения высоты (включая начальную точку), значение высоты Z вычисляется по формуле линейной экстраполяции:

$$Z = Z_{out} + \frac{Z_b - Z_{out}}{L} \cdot l,$$

где l – длина части ломаной от этого узла до конечной точки. Полученное значение Z присваивается соответствующей ячейке понижения.

Выполнение алгоритма завершается, когда обработаны все точки выхода; результатом работы алгоритма является матрица высот, не содержащая замкнутых локальных понижений.

В заключение отметим, что при описании алгоритма мы рассматривали только замкнутые понижения. Однако та же процедура без изменений может быть применена и к горизонтальным участкам для формирования на их месте наклонной поверхности; но, поскольку форма оптимальных путей определяется исходным полем высот (которое абсолютно одинаково в пределах горизонтального участка), результат работы алгоритма не будет отличаться от результатов работы более простых

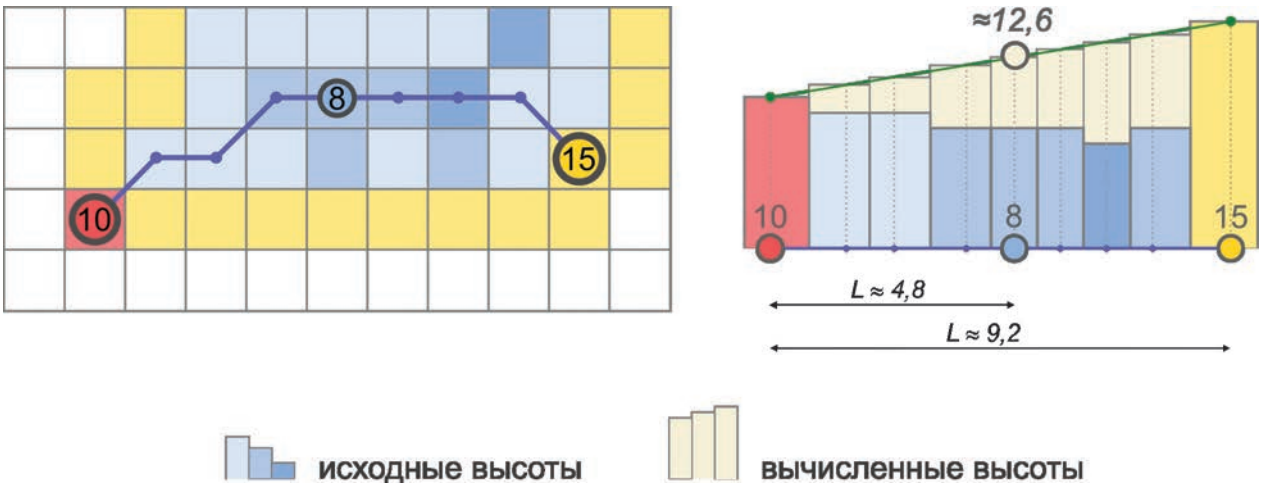

Рис. 3. Пример интерполяции вдоль пути, соединяющего граничную ячейку понижения с ячейкой выхода

Fig. 3. An example of interpolation along path connecting boundary cell with outlet cell

решений, формирующих наклонную поверхность на месте проблемного участка.

2.4. Дополнительные процедуры

Процедуры, описанные в этом разделе, не являются ключевыми для алгоритма заполнения замкнутых понижений, но позволяют в некоторых ситуациях повысить качество формируемой им поверхности.

Разность высот между граничными ячейками и ячейкой выхода зачастую бывает настолько мала, что не позволяет при выполнении линейной интерполяции в рамках используемой точности вычислений рассчитать значения, непрерывно убывающие вдоль построенного пути (появляются соседние ячейки с одинаковой высотой). Дополнительные процедуры предназначены для увеличения перепада высот между начальной и конечной точками пути, используемого для интерполяции. Сюда относятся: процедура обработки каскадов локальных понижений, процедура повышения высот граничных ячеек и процедура уменьшения высоты ячейки-выхода.

Каскадом локальных понижений будем называть максимальную группу локальных понижений, если их можно представить в виде цепочки, в которой для каждых двух последовательных понижений ячейка-выход первого из них является граничной ячейкой (но не выходом) для следующего. При обработке каждого понижения каскада отдельно уклон поверхности, полученной в результате заполнения, может быть очень мал для некоторых из них. Обработка каскада как единого целого позволяет увеличить уклон для таких понижений, хотя при этом для других понижений каскада уклон поверхности уменьшится. На рис. 4 приведен пример каскада из трех замкнутых понижений. Верхняя пунктирная ломаная иллюстрирует уклоны после интерполяции при обработке каждого из понижений отдельно, нижняя – при совместной обработке. При этом для понижения 1 уклон уменьшается, для понижения 2 практически не изменяется, а для понижения 3 практически нулевой уклон поверхности существенно увеличивается.

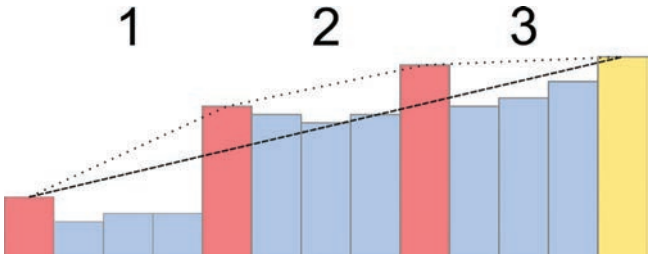

Рис. 4. Обработка каскада замкнутых понижений

Fig. 4. The processing of a cascade of depressions

Для обработки каскада целиком достаточно перемаркировать все ячейки-выходы понижений каскада, кроме выхода с минимальной высотой, как ячейки понижения. В этом случае процедура построения оптимальных путей и последующие процедуры интерполяции и экстраполяции будут применены к каскаду целиком.

Следующие две процедуры позволяют увеличить перепад высот вдоль оптимальных путей, используемых для интерполяции, и тем самым увеличить уклон создаваемой на месте замкнутого понижения поверхности. В обеих процедурах при

вычислении новых высот используется определяемое заранее значение ε – минимально допустимый перепад высот между соседними ячейками.

Для увеличения высоты граничной ячейки нужно найти минимальное значение Z_{min} среди высот соседних с ней ячеек, имеющих большую высоту. Если разность между Z_{min} и текущей высотой больше ε, то граничной ячейке присваивается новое значение высоты, равное $Z_{min}-\varepsilon$. Процедура увеличения высот может быть применена как к отдельным, так и ко всем граничным ячейкам локального понижения.

Уменьшение высоты ячейки выхода выполняется по аналогичному принципу. Среди высот всех соседних с ней ячеек ищется минимальное значение Z_{min}. Если разность высот между текущей высотой ячейки-выхода и Z_{min} больше ε, а также если среди соседей ячейки-выхода нет ячейки с высотой, большей Z_{min}, но меньшей $Z_{min}+\varepsilon$, то ячейке выхода присваивается новое значение $Z_{min}+\varepsilon$.

3. Результаты и обсуждение

Демонстрация результатов заполнения замкнутых понижений обычно осложнена тем, что, как правило, глубина локального понижения значительно (иногда на несколько порядков) меньше, чем амплитуда высот цифровой модели рельефа. Результат заполнения наглядно проявляется после применения к модели рельефа процедур гидрологического анализа, таких, как расчет модели общей водосборной площади или выделение векторной сети потенциальных водотоков. Мы проведем сравнение работы различных алгоритмов устранения локальных понижений на двух моделях. Одна из них – искусственно созданная модель небольшой размерности, вторая – фрагмент модели GMTED2010 [33]. В сравнение не включается анализ вычислительной эффективности разработанного алгоритма, поскольку она заведомо ниже, чем у более простых алгоритмов, основанных на подходе «приоритетного заполнения»; нас же больше интересует географическая корректность результата моделирования.

3.1 «Искусственная» ЦМР с понижением сложной формы

«Искусственная» ЦМР создана специально для тестирования разработанного алгоритма. Размеры модели составляют 15×30 ячеек, высоты варьируют от 1 до 20. В центральной части модели находится понижение сложной формы с двумя выраженными «руслами» шириной в одну ячейку. Выход из понижения находится на его южной оконечности и открывается на поверхность пирамидальной формы, имитирующей конус выноса. Изображение исходной ЦМР представлено на рис. 5a.

Устранение локальных понижений на «искусственной» ЦМР выполнено с использованием следующего программного обеспечения:

- Инструмент Fill среды ArcGIS; в этом модуле реализован алгоритм Дженсон-Доминго [9], формирующий на месте понижения горизонтальную поверхность (рис. 5b).
- Инструмент Fill Sinks (Wang & Liu) программы SAGA [34], реализующий модификацию алгоритма приоритетного заполнения на основе работы Ванга-Лю [13]. В этой модификации понижения заполняются «на лету» с формированием наклонной поверхности с уклоном, задаваемым пользователем. В нашем случае был установлен уклон, равный 0,01° (рис. 5c).
- Программа PDEM [30], реализующая заполнение локальных понижений путем интерполяции (рис. 5d).
- Инструмент Breach Depressions (Fast) программы Whitebox GAT [35], устраняющий локальные понижения с ЦМР путем разрушения их границ [5] (рис. 5e).
- Авторская программа, реализующая заполнение локальных понижений по алгоритму, представленному в настоящей работе (рис. 5f).

Сравнение изображений исходной ЦМР и ее модифицированных вариантов, представленных на рис. 5, не позволяет установить заметных различий между результатами заполнения горизонтальной плоскостью (алгоритм Дженсон-Доминго, b), наклонной поверхностью (модификация приоритетного заполнения, c) и модификацией, осуществляемой в предлагаемом алгоритме (f). В то же время отличия этих результатов от результатов работы PDEM и разрушения границ понижений видны наглядно. PDEM, в силу особенностей авторской реализации, снижает высоты краевых ячеек ЦМР до нулевых значений, что приводит к формированию недостоверного выхода из понижения возле левого края ЦМР на рис. 5d. Разрушение границ понижений сформировало канал петлеобразной формы внутри понижения, а также за его пределами (рис. 5e).

Чтобы выяснить, как соответствующие изменения высот ячеек повлияют на рассчитываемое распределение поверхностного стока, был выполнен расчет водосборной площади по модифицированным ЦМР. Расчет производился в SAGA при помощи инструмента Flow Accumulation (Recursive), используемый алгоритм определения направлений стока – MFD. Визуализация результатов расчета представлена на рис. 6. Из анализа исключена ЦМР, модифицированная при помощи алгоритма Дженсон-Доминго, поскольку этот алгоритм формирует горизонтальную плоскость, а получаемое расчетное распределение

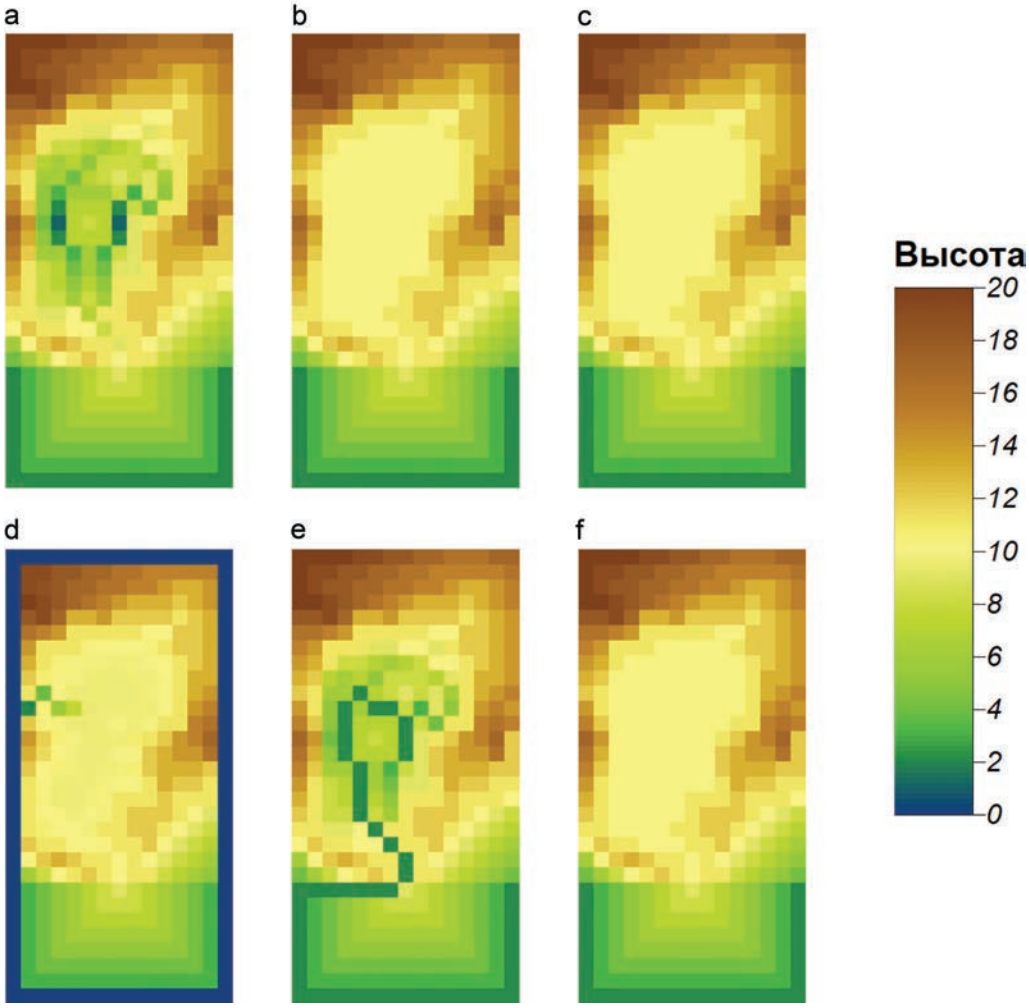

Рис. 5. «Искусственная» ЦМР (a) и результаты ее гидрологической коррекции при помощи алгоритмов: b – Дженсон-Доминго (реализация ArcGIS); c – модификация приоритетного заполнения (реализация SAGA); d – PDEM; e – разрушения границ понижений (Whitebox GAT); f – авторского

Fig. 5. «Artificial» DEM (a) and the results of its hydrological conditioning with: b – Jenson & Domingue algorithm (ArcGIS implementation); c – modification of priority-flood (SAGA implementation); d –PDEM; e – depression breaching (Whitebox GAT); f – the algorithm proposed in this paper

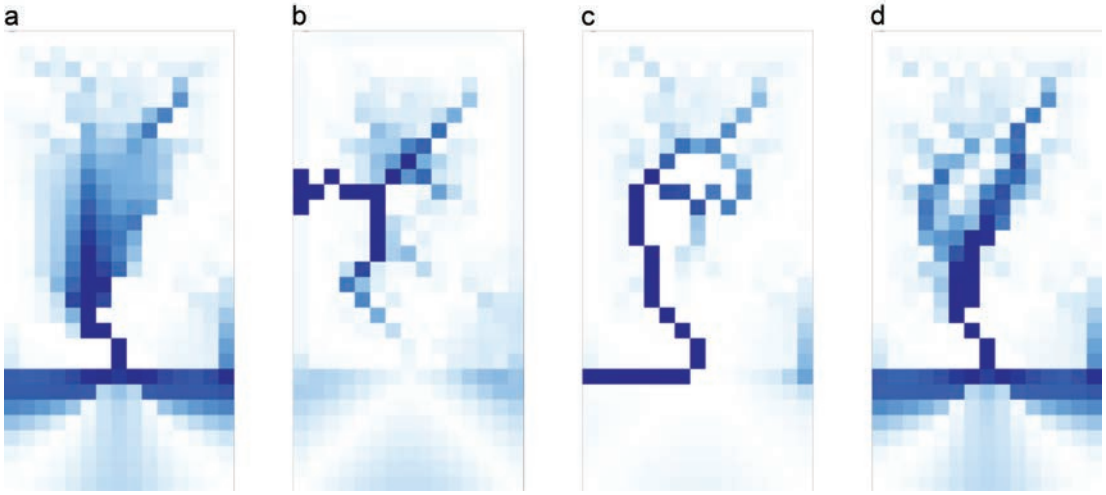

Рис. 6. Водосборная площадь, рассчитанная по «искусственной» ЦМР, модифицированной при помощи алгоритмов: модификация приоритетного заполнения (a), PDEM (b), разрушения границ понижений (c), авторского (d). Более темный цвет соответствует более высокому значению водосборной площади

Fig. 6. Catchment area derived from the models corrected by: the modification of priority-flood (a), PDEM (b), breaching (c), and the proposed approach (d)

водосборной площади на такой поверхности в большей степени зависит от программного обеспечения, используемого для расчета, чем от свойств поверхности. Расчет водосборной площади по ЦМР, скорректированной с помощью алгоритма модифицированного приоритетного заполнения (рис. 6a), дает широкий, сужающийся по направлению к выходу из понижения поток – это свидетельствует о том, что на месте понижения сформирована поверхность конической формы. Распределение водосборной площади, полученное по ЦМР, модифицированной программой PDEM (рис. 6b), подтверждает вывод о формировании недостоверного выхода из понижения вблизи левого края ЦМР: водосборная площадь закономерно увеличивается по направлению к выходу. При этом модификации, привнесенные приоритетным заполнением и PDEM, не затрагивают нижнюю часть модели – в этой области расчет предсказывает расходящиеся потоки. В этой связи заметно отличается модификация путем разрушения границ понижений (рис. 6c) – внутри понижения сформированы узкие «каналы» с относительно высокими значениями водосборной площади, которые сливаются и продолжаются за пределами понижения в виде единого «потока», направленного влево от ячейки выхода. Следовательно, хотя разрушение границ понижений в значительной степени сохраняет особенности рельефа внутри понижений, оно способно сильно изменять картину распределения стока за его пределами. Модификация высот ЦМР, осуществляемая предлагаемым нами алгоритмом, позволяет избежать такого эффекта, поскольку высоты ячеек за пределами понижения не изменяются (рис. 6d); при этом удается сохранить основные особенности рельефа внутри понижения – в данном случае два параллельных «русла».

Тестирование различных алгоритмов устранения замкнутых понижений на «искусственной» ЦМР показало, что применение предлагаемого алгоритма позволяет модифицировать ЦМР таким образом, чтобы структура потока внутри понижения и за его пределами в общих чертах сохранялась. Однако следует отметить, что условия, созданные на «искусственной» ЦМР, не вполне типичны для моделей, построенных по реальным данным. Для того чтобы иметь возможность делать более общие выводы, следует протестировать работоспособность алгоритмов на реальной модели.

3.2. «Реальная» ЦМР: фрагмент GMTED2010

Для изучения влияния алгоритмов гидрологической коррекции ЦМР на распределение потоков в реальных условиях используется фрагмент цифровой модели рельефа GMTED2010 на бассейн р. Алдан (приток р. Лена, Восточная Сибирь). Цифровая модель рельефа имеет исходное разрешение 15″, после перепроецирования в равнопромежуточную по меридианам коническую проекцию и передискретизации – 500 м. Высоты на модели изменяются от 42 м до 2649 м, средняя высота составляет порядка 706 м. Общий вид ЦМР представлен на рис. 7a; рис. 7b изображает участок в центральной части модели с наложенным на него контуром реки Алдан и притоками. Долина реки Алдан на этом участке представляет собой относительно плоскую аллювиальную равнину, абсолютные высоты не превышают 100 м, а локальные превышения составляют порядка 15 м – это на порядок меньше амплитуды высот модели в целом. Тем не менее, русло р. Алдан довольно четко выражено на модели.

Устранение локальных понижений с ЦМР было выполнено четырьмя способами: алгоритмом Дженсон-Доминго (ArcGIS), модификацией приоритетного заполнения (SAGA), разрушения границ понижений (Whitebox) и с использованием авторского алгоритма. К сожалению, модификацию с использованием алгоритма PDEM выполнить не удалось, поскольку предлагаемый авторами выполняемый модуль не предназначена для обработки больших по размеру моделей.

Непосредственное изучение изменений высот ЦМР, производимое алгоритмами устранения замкнутых понижений, не является показательным для больших моделей, представляющих реальные территории. Гораздо более информативно с этой точки зрения изучение результатов собственно гидрологического моделирования (расчета морфометрических параметров или определения положений объектов гидрографии). Чтобы определить, в какой степени применение того или иного алгоритма устранения локальных понижений влияет на результаты гидрологического моделирования, было выполнено восстановление сети потенциальных водотоков по скорректированным этими алгоритмами ЦМР. Сначала по исправленной модели рассчитываются направления стока (*Flow Directions*), затем вычисляется водосборная площадь (*Flow Accumulation*), после чего ячейки ЦМР, водосборная площадь которых превосходит некоторое пороговое значение (в нашем примере 1250 км^2, что соответствует 5000 ячеек ЦМР), маркируются как относящиеся к водотокам. Полученная растровая сеть векторизовалась и визуально сопоставлялась с известным положением водотоков. В качестве источника данных о реальном положении объектов гидрографической сети использовалась цифровая топографическая основа ВСЕГЕИ [36].

Изображения гидрографической сети, а также сетей потенциальных водотоков, восстановленных

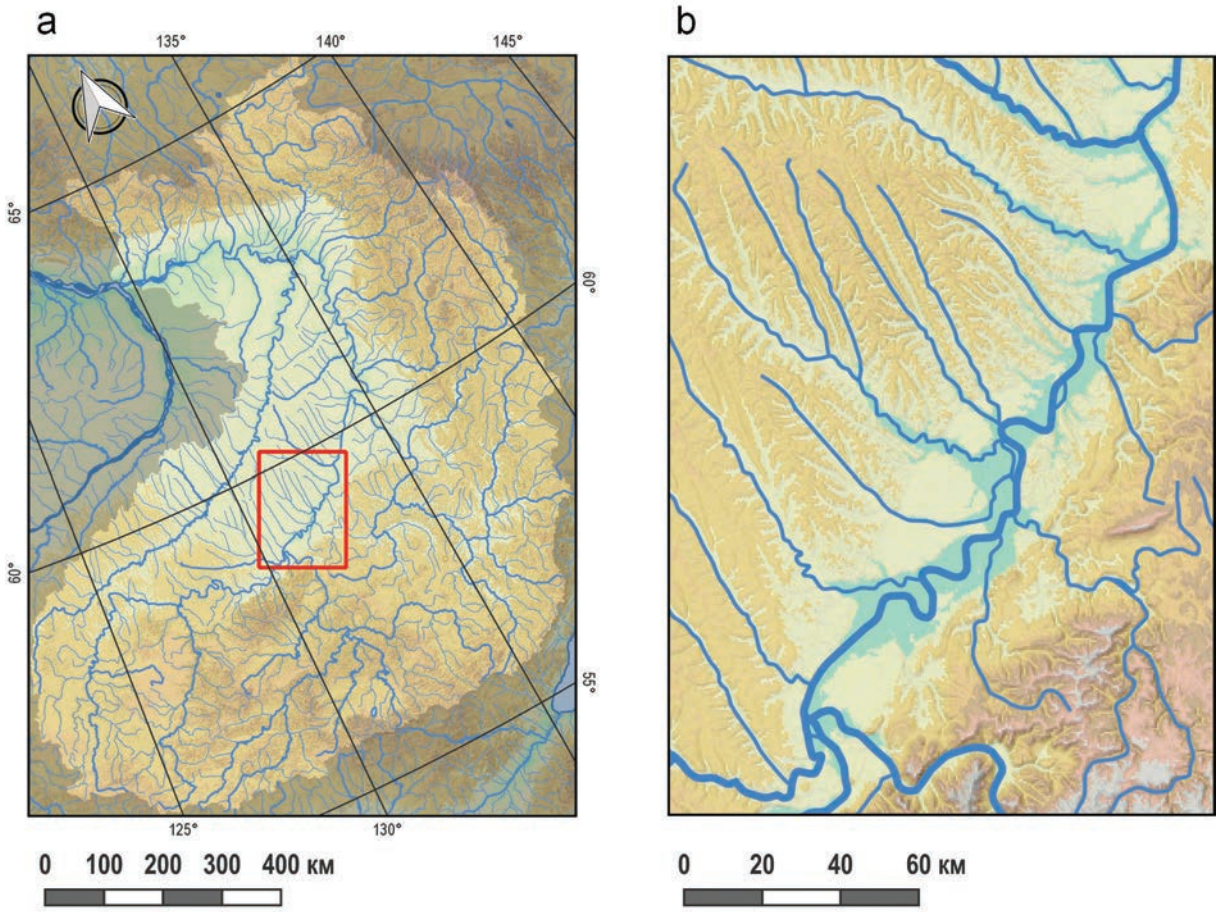

Рис. 7. Фрагмент цифровой модели рельефа GMTED2010 на бассейн реки Алдан (a) и увеличенное изображение части этого фрагмента (b). Синие линии показывают положение объектов гидрографической сети по данным цифровой географической основы ВСЕГЕИ [36]

Fig. 7. The fragment of GMTED2010 DEM on Aldan river basin (a) and zoomed image of its part (b). Blue lines shows position of hydrographic network according to VSEGEI basemap [36]

по ЦМР, скорректированным с помощью различных алгоритмов, приведены на рис. 8. Видно, что устранение понижений алгоритмами Дженсон-Доминго (ArcGIS) и приоритетным заполнением (SAGA), часто используемыми в современной практике гидрологического моделирования, приводит к некорректному результату. Положение потенциальных водотоков значительно (вплоть до нескольких километров) отличается от истинного положения гидрографической сети (рис. 8a, b). В то же время устранение понижений путем разрушения их границ (рис. 8c) и путем заполнения с использованием подхода, предлагаемого в настоящей работе (рис. 8d) позволяет сохранить особенности рельефа понижений, в результате чего потенциальные водотоки почти идеально повторяют очертания гидрографической сети. При этом не наблюдается описанное выше негативное влияние алгоритма разрушения границ понижений на области, находящиеся ниже по склону от точек выхода из понижений.

Таким образом, можно заключить, что разработанный алгоритм заполнения замкнутых локальных понижений позволяет устранить понижения на ЦМР и сохранить при этом особенности их рельефа, а следовательно, и особенности распределения стока внутри них. Похожий результат может быть достигнут путем применения алгоритма разрушения границ понижений, однако возможны ситуации, в которых разрушение границ будет существенно изменять структуру потоков за пределами понижения. В таком случае алгоритм, предлагаемый в настоящей работе, является оптимальным решением с точки зрения географической корректности последующего гидрологического моделирования.

4. Заключение

Разработанный алгоритм заполнения позволяет устранить замкнутые понижения на цифровой модели рельефа, не изменяя значения высот за их пределами. Он основан на широко распространенном

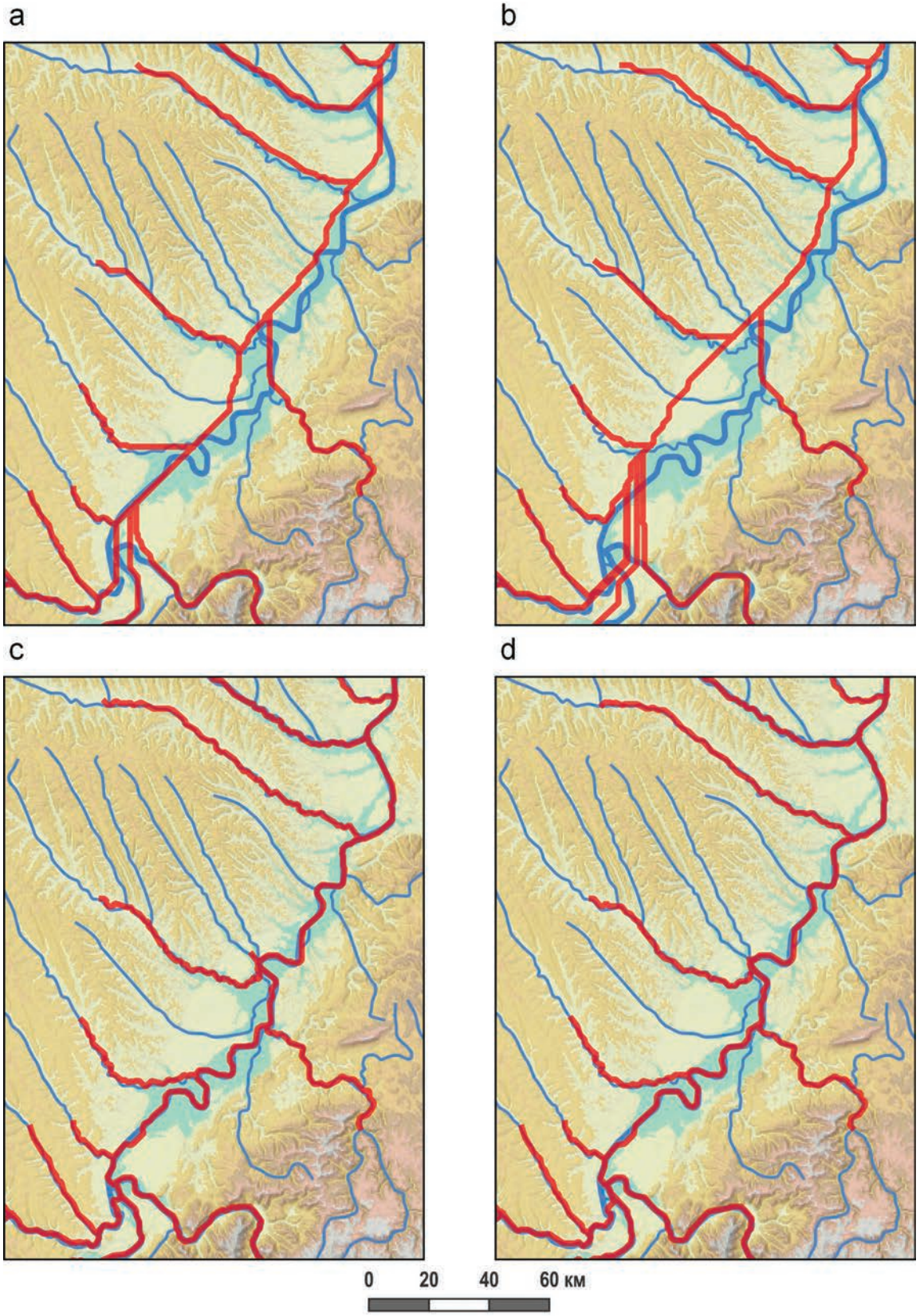

Рис. 8. Сравнение форм реальной речной сети (синий цвет) и сети потенциальных водотоков (красный цвет), построенной по модели GMTED, скорректированной алгоритмами: Дженсон-Доминго (a), модификацией приоритетного заполнения (b), разрушения границ понижений (c), авторского (d)

Fig. 8. A comparison of the real hydrographic network (blue lines) with potential lines derived from DEM corrected by: Jenson & Domingue algorithm (a), modification of priority-flood (b), breaching (c), the proposed approach (d)

подходе «приоритетного заполнения» (*Priority-Flood*), но отличается от аналогов использованием процедуры интерполяции высот вдоль специально построенных путей внутри понижений. Эта процедура позволяет сохранить особенности рельефа понижений, что подтверждается сравнением результатов вычисления гидрологических параметров по модели, обработанной предлагаемым алгоритмом, и модели, скорректированной методом разрушения границ понижений (*depression breaching*).

Предлагаемый нами алгоритм работает медленнее, чем аналогичные алгоритмы, выполняющие коррекцию «на лету», за счет операции интерполяции, которая существенно увеличивает вычислительную сложность алгоритма. Однако качество скорректированной модели заметно выше, и при этом, благодаря разделению процедур идентификации и заполнения понижений, сохраняется возможность не подвергать изменениям некоторые из понижений (реальные бессточные области).

Сходство результатов предложенного алгоритма заполнения локальных понижений и алгоритма разрушения границ не позволяет однозначно предпочесть тот или иной вариант гидрологической коррекции, однако делает эти подходы взаимозаменяемыми. К исключениям можно отнести случай относительно плоского рельефа, в том числе и с горизонтальными участками; здесь алгоритм заполнения работает лучше. В дальнейшем, после тщательного изучения достоинств и недостатков каждого из алгоритмов на реальных примерах, возможно их комбинирование для оптимальной коррекции модели.

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых российских ученых – кандидатов наук МК-4829.2016.5.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, гидрологический анализ, предварительная обработка ЦМР, замкнутые понижения, заполнение (устранение) понижений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gruber S., Peckham S. Land-Surface Parameters and Objects in Hydrology // Geomorphometry: concepts, software, applications / T. Hengl, H.I. Reuter (Eds). – Elsevier, 2009. – V. 33. – P. 171-194.
2. 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.
3. Jones R. Algorithms for using a DEM for mapping catchment areas of stream sediment samples // Computers and Geosciences. – 2002. – V. 28, Issue 9. – P. 1051-1060.
4. 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, Issue 3. – P. 323-344.
5. Lindsay J.B. Efficient hybrid breaching-filling sink removal methods for flow path enforcement in digital elevation models // Hydrological Processes. – 2016. – V. 30, Issue 6. – P. 846-857.
6. Lindsay J.B., Creed I.F. Distinguishing actual and artefact depressions in digital elevation data // Computers and Geosciences. – 2006. – V. 32, Issue 8. – P. 1192-1204.
7. Temme A.J.A.M., Schoorl J.M., Veldkamp A. Algorithm for dealing with depressions in dynamic landscape evolution models // Computers and Geosciences. – 2006. – V. 32, Issue 4. – P. 452-461.
8. Martz L.W., Garbrecht J. The treatment of flat areas and depressions in automated drainage analysis of raster digital elevation models // Hydrological Processes. – 1998. – V. 12, Issue 6. – P. 843-855.
9. Jenson S.K., Domingue J.O. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 1988. – Vol. 54, Issue 11. – P. 1593-1600.
10. Martz L.W., de Jong E. CATCH: A FORTRAN program for measuring catchment area from digital elevation models // Computers & Geosciences. – 1988. – V. 14, Issue 5. – P. 627-640.
11. Barnes R., Lehman C., Mulla D. An efficient assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models // Computers and Geosciences. – 2014. – V. 62. – P. 128-135.
12. Planchon O., Darboux F. A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models // CATENA. – 2002. – V. 46, Issue 2-3. – P. 159-176.
13. Wang L., 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. – V. 20, Issue 2. – P. 193-213.
14. Barnes R., Lehman C., Mulla D. Priority-flood: An optimal depression-filling and watershed-labeling algorithm for digital elevation models // Computers & Geosciences. – 2014. – V. 62. – P. 117-127.
15. Barnes R. Parallel Priority-Flood depression filling for trillion cell digital elevation models on desktops or clusters // Computers & Geosciences. – 2016. – V. 96. – P. 56-68.
16. Zhou G., Liu X, Fu S., Sun Z. Parallel identification and filling of depressions in raster digital elevation models // International Journal of Geographical Information Science. – 2017. – V. 31, Issue 6. – P. 1061-1078.

17. Zhou G., Sun Z., Fu S. An efficient variant of the Priority-Flood algorithm for filling depressions in raster digital elevation models // Computers and Geosciences. – 2016. – V. 90. – P. 87-96.
18. Rieger W. A phenomenon-based approach to upslope contributing area and depressions in DEMs // Hydrological Processes. – 1998. – V. 12, Issue 6. – P. 857-872.
19. Martz L.W., Garbrecht J. An outlet breaching algorithm for the treatment of closed depressions in a raster DEM // Computers & Geosciences. – 1999. – V. 25, Issue 7. – P. 835-844.
20. Soille P., Vogt J., Colombo R. Carving and adaptive drainage enforcement of grid digital elevation models // Water Resources Research. – 2003. – V. 39, Issue 12. – P. 1058.
21. Soille P. Optimal removal of spurious pits in grid digital elevation models // Water Resources Research. – 2004. – V. 40, Issue 12. – P. W12509.
22. Lindsay J.B., Creed I.F. Removal of artifact depressions from digital elevation models: Towards a minimum impact approach // Hydrological Processes. – 2005. – V. 19, Issue 16. – P. 3113-3126.
23. Grimaldi S., Nardi F., di Benedetto F., Istanbulluoglu E., Bras R.L. A physically-based method for removing pits in digital elevation models // Advances in Water Resources. – 2007. – V. 30, Issue 10. – P. 2151-2158.
24. Santini M., Grimaldi S., Nardi F., Petroselli A., Rulli M.C. Pre-processing algorithms and landslide modelling on remotely sensed DEMs // Geomorphology. – 2009. – V. 113, Issue 1-2. – P. 110-125.
25. Hutchinson M.F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits // Journal of Hydrology. – 1989. – V. 106, Issue 3-4. – P. 211-232.
26. Hutchinson M., Xu T., Stein J. Recent Progress in the ANUDEM Elevation Gridding Procedure // Geomorphometry. Redlands, 2011. – P. 19-22.
27. Gallant J.C., Hutchinson M.F. A differential equation for specific catchment area // Water Resources Research. – 2011. – V. 47, Issue 5. – W05535.
28. 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, No. 2. – P. 94-102.
29. Кошель С.М., Энтин А.Л. Вычисление площади водосбора по цифровым моделям рельефа на основе построения линий тока // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2017. – № 3. – С. 42-50.
30. Pan F., Stieglitz M., McKane R.B. An algorithm for treating flat areas and depressions in digital elevation models using linear interpolation // Water Resources Research. – 2012. – V. 48, Issue 2. – W00L10.
31. Мальцев К.А., Ермолаев О.П. Использование цифровых моделей рельефа для автоматизированного построения границ водосборов // Геоморфология. – 2014. – № 1. – С. 45-52.
32. Гарцман Б.И., Бугаец А.Н., Тегай М.Д., Краснопеев С.М. Анализ структуры речных систем и перспективы моделирования гидрологических процессов // География и природные ресурсы. – 2008. – № 2. – С. 20-29.
33. Danielson J.J., Gesch D.B. Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010): U.S. Geological Survey Open-File Report 2011–1073. – 2011. – 26 p.
34. Conrad O. et al. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4 // Geoscientific Model Development. – 2015. – V. 8, Issue 7. – P. 1991-2007.
35. Lindsay J.B. Whitebox GAT: A case study in geomorphometric analysis // Computers & Geosciences. – 2016. – V. 95. – P. 75-84.
36. Цифровые географические основы – ВСЕГЕИ [Электронный ресурс]. – URL: http://www.vsegei.com/ru/info/topo/ (дата обращения: 27.10.2018).

REFERENCES

1. Gruber S., Peckham S. Land-Surface Parameters and Objects in Hydrology // Geomorphometry: concepts, software, applications / T. Hengl, H.I. Reuter (Eds). Elsevier, 2009. V. 33. P. 171-194.
2. Koshel S.M., Entin A.L Contemporary methods of the overland flow distribution calculation from digital elevation models // Geomorphologists. Modern methods and techniques of digital elevation modeling in Earth sciences. Moscow: Media-Press, 2016. P. 24-34.
3. Jones R. Algorithms for using a DEM for mapping catchment areas of stream sediment samples // Computers and Geosciences. 2002. V. 28, Issue 9. P. 1051-1060.
4. 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, Issue 3. P. 323-344.
5. Lindsay J.B. Efficient hybrid breaching-filling sink removal methods for flow path enforcement in digital elevation models // Hydrological Processes. 2016. V. 30, Issue 6. P. 846-857.
6. Lindsay J.B., Creed I.F. Distinguishing actual and artefact depressions in digital elevation data // Computers and Geosciences. 2006. V. 32, Issue 8. P. 1192-1204.
7. Temme A.J.A.M., Schoorl J.M., Veldkamp A. Algorithm for dealing with depressions in dynamic landscape evolution models // Computers and Geosciences. 2006. V. 32, Issue 4. P. 452-461.
8. Martz L.W., Garbrecht J. The treatment of flat areas and depressions in automated drainage analysis of raster digital elevation models // Hydrological Processes. 1998. V. 12, Issue 6. P. 843-855.

9. 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, Issue 11. P. 1593-1600.
10. Martz L.W., de Jong E. CATCH: A FORTRAN program for measuring catchment area from digital elevation models // Computers & Geosciences. 1988. V. 14, Issue 5. P. 627-640.
11. Barnes R., Lehman C., Mulla D. An efficient assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models // Computers and Geosciences. 2014. V. 62. P. 128-135.
12. Planchon O., Darboux F. A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models // CATENA. 2002. V. 46, Issue 2-3. P. 159-176.
13. Wang L., 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. V. 20, Issue 2. P. 193-213.
14. Barnes R., Lehman C., Mulla D. Priority-flood: An optimal depression-filling and watershed-labeling algorithm for digital elevation models // Computers & Geosciences. 2014. V. 62. P. 117-127.
15. Barnes R. Parallel Priority-Flood depression filling for trillion cell digital elevation models on desktops or clusters // Computers & Geosciences. 2016. V. 96. P. 56-68.
16. Zhou G., Liu X, Fu S., Sun Z. Parallel identification and filling of depressions in raster digital elevation models // International Journal of Geographical Information Science. 2017. V. 31, Issue 6. P. 1061-1078.
17. Zhou G., Sun Z., Fu S. An efficient variant of the Priority-Flood algorithm for filling depressions in raster digital elevation models // Computers and Geosciences. 2016. V. 90. P. 87-96.
18. Rieger W. A phenomenon-based approach to upslope contributing area and depressions in DEMs // Hydrological Processes. 1998. V. 12, Issue 6. P. 857-872.
19. Martz L.W., Garbrecht J. An outlet breaching algorithm for the treatment of closed depressions in a raster DEM // Computers & Geosciences. 1999. V. 25, Issue 7. P. 835-844.
20. Soille P., Vogt J., Colombo R. Carving and adaptive drainage enforcement of grid digital elevation models // Water Resources Research. 2003. V. 39, Issue 12. P. 1058.
21. Soille P. Optimal removal of spurious pits in grid digital elevation models // Water Resources Research. 2004. V. 40, Issue 12. P. W12509.
22. Lindsay J.B., Creed I.F. Removal of artifact depressions from digital elevation models: Towards a minimum impact approach // Hydrological Processes. 2005. V. 19, Issue 16. P. 3113-3126.
23. Grimaldi S., Nardi F., di Benedetto F., Istanbulluoglu E., Bras R.L. A physically-based method for removing pits in digital elevation models // Advances in Water Resources. 2007. V. 30, Issue 10. P. 2151-2158.
24. Santini M., Grimaldi S., Nardi F., Petroselli A., Rulli M.C. Pre-processing algorithms and landslide modelling on remotely sensed DEMs // Geomorphology. 2009. V. 113, Issue 1-2. P. 110-125.
25. Hutchinson M.F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits // Journal of Hydrology. 1989. V. 106, Issue 3-4. P. 211-232.
26. Hutchinson M., Xu T., Stein J. Recent Progress in the ANUDEM Elevation Gridding Procedure // Geomorphometry. Redlands, 2011. P. 19-22.
27. Gallant J.C., Hutchinson M.F. A differential equation for specific catchment area // Water Resources Research. 2011. V. 47, Issue 5. W05535.
28. 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.
29. Koshel S.M., Entin A.L. Catchment area derivation from gridded digital elevation models using the flowline-tracing approach. Moscow University Bulletin. Series 5. Geography. 2017. No. 3. P. 42-50.
30. Pan F., Stieglitz M., McKane R.B. An algorithm for treating flat areas and depressions in digital elevation models using linear interpolation // Water Resources Research. 2012. V. 48, Issue 2. W00L10.
31. Mal'tsev K.A., Ermolaev O.P., Using DEMs for automatic plotting of catchments // Geomorpholgy. 2014. V. 1. P. 45-52.
32. Gartsman B.I., Bugayets A.N., Tegay N.D., Krasnopeev S.M. Analysis of the structure of river systems and the prospects for modeling hydrological processes // Geography and natural resources. 2008. V 2. P. 116-123.
33. Danielson J.J., Gesch D.B. Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010): U.S. Geological Survey Open-File Report 2011-1073. 2011. 26 p.
34. Conrad O. et al. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4 // Geoscientific Model Development. 2015. V. 8, Issue 7. P. 1991-2007.
35. Lindsay J.B. Whitebox GAT: A case study in geomorphometric analysis // Computers & Geosciences. 2016. V. 95. P. 75-84.
36. Digital geographic basemaps – VSEGEI [Electronic resource]. URL: http://www.vsegei.com/ru/info/topo/ (date of access: 27.10.2018).