

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М. В. Ломоносова  
ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

*На правах рукописи*



Энтин Андрей Львович

**Методы повышения достоверности  
цифровых моделей рельефа  
для гидрологического моделирования  
и картографирования**

25.00.33 — Картография

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата географических наук

Москва, 2019

Работа выполнена на кафедре картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова

**Научный руководитель** – *Лурье Ирина Константиновна, доктор географических наук, профессор*

**Официальные оппоненты** – *Тикунов Владимир Сергеевич, доктор географических наук, профессор, заведующий лабораторией комплексного картографирования географического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова*

*Пьянков Сергей Васильевич, доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой картографии и геоинформатики ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (ПГНИУ)*

*Погорелов Анатолий Валерьевич, доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой геоинформатики ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет»*

Защита диссертации состоится 19 декабря 2019 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета МГУ.11.04 Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова по адресу: Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д.1, Географический факультет, 21 этаж, ауд. 2109.

E-mail: [malyn2006@yandex.ru](mailto:malyn2006@yandex.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/243979859/>.

Автореферат разослан 14 ноября 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета МГУ.11.04,  
кандидат географических наук



А. Л. Шныпарков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Цифровые модели рельефа (ЦМР) являются востребованным источником данных в задачах геоинформационного анализа и картографирования. К настоящему времени они нашли широкое применение в геоморфологии, гляциологии, гидрологии, общей физической географии и ландшафтоведении. ЦМР используются как базовые пространственные данные и как источник данных для пространственного моделирования. На базе ЦМР решаются такие задачи, как расчёт крутизны и экспозиции склона, характеристик кривизны поверхности. К этой же области исследований относится гидрологическое моделирование на основе ЦМР. Оно включает задачи моделирования распределения потенциального поверхностного стока: определение границ бассейнов, выделение сети тальвегов, расчёт водосборной площади как морфометрической величины, характеризующей поверхность рельефа. Результаты решения этих задач находят самостоятельное применение в геоморфологии и гидрологии, а также могут использоваться в гляциологических, геохимических и физико-географических моделях.

Число доступных ЦМР глобального и регионального охвата в последние годы значительно выросло; детальность доступных данных также заметно повысилась. Это приводит к возрастанию потребности в использовании ЦМР в географических исследованиях, и особенно в гидрологическом моделировании и картографировании. При этом качество доступных данных, как правило, не соответствует требованиям, предъявляемым к ним, а алгоритмы, используемые для анализа и моделирования, не обеспечивают нужную достоверность результата.

**Актуальность темы работы** обусловлена потребностью в разработке новых и совершенствовании существующих методов повышения достоверности ЦМР, обеспечивающих их пригодность для географических исследований и картографирования.

**Цель диссертационной работы** состоит в разработке методов повышения достоверности ЦМР, реализуемых комплексом методик и алгоритмов их преобразования и использования для гидрологического моделирования и картографирования.

Для достижения сформулированной цели требуется решить следующие научные задачи:

1. Выполнить анализ существующих методов и алгоритмов гидрологического моделирования с использованием ЦМР; выявить процедуры, критически влияющие на достоверность получаемых результатов.

2. Усовершенствовать существующие и разработать новые методики приведения ЦМР к гидрологически корректному виду, согласования ЦМР и гидрографической сети, а также расчёта водосборной площади.
3. Апробировать разработанные алгоритмы на примере расчёта морфометрических величин и выделения пространственных объектов по ЦМР высокого, среднего и низкого пространственного разрешения.
4. Выполнить анализ и оценку получаемых результатов.

**Научная новизна работы:**

1. Для расчёта водосборной площади впервые применено построение линий тока, обеспечивающее физически корректное моделирование поверхностного стока.
2. Предложен новый алгоритм устранения замкнутых понижений, позволяющий решить проблему искажения моделируемого распределения поверхностного стока, возникающую вследствие модификации высот ЦМР существующими алгоритмами;
3. Впервые сформулирована проблема и разработана методика пространственно-высотного согласования ЦМР с гидрографической сетью, обеспечивающая корректное гидрологическое моделирование в целях мелкомасштабного картографирования.

**Объектом исследования** являются цифровые модели рельефа.

**Предмет исследования** — методические и алгоритмические приёмы решения задач, требующих проведения гидрологического моделирования с применением ЦМР (в том числе задач предварительной обработки ЦМР).

**Защищаемые положения:**

1. Построение линий тока по восстановленной из ЦМР поверхности, представленной непрерывной дифференцируемой функцией, обеспечивает достоверность результатов расчёта водосборной площади.
2. Предложенный алгоритм модификации ЦМР, основанный на выполнении линейной интерполяции высот на специально конструируемых графах, позволяет устранить замкнутые понижения из ЦМР с сохранением основных особенностей поля высот.
3. Разработанная методика согласования ЦМР низкого пространственного разрешения с объектами гидрографической сети обеспечивает достоверное картографирование границ водосборных бассейнов.

**Методологической базой** исследования послужили труды представителей отечественных школ географической картографии и геоинформатики (К. А. Салищев, С. Н. Сербенюк, А. М. Берлянт, В. С. Тикунов, И. К. Лурье, Б. А. Новаковский, А. В. Кошкарёв, С. В. Пьянков), а также труды отечественных и зарубежных

учёных в области геоморфометрии и её приложений (Ю. Г. Симонов, А. Ю. Сидорчук, В. Н. Голосов, Б. И. Гарцман, О. П. Ермолаев, К. А. Мальцев, M. Hutchinson, D. Tarboton, J. Lindsay, R. Barnes, J. P. Wilson, B. Lehner).

В основе работы лежат исследования автора, проводимые с 2012 г. на кафедре картографии и геоинформатики географического факультета МГУ.

**Использованные материалы.** В качестве исходных данных в работе используются цифровые модели рельефа различного охвата и пространственного разрешения. Модели высокого пространственного разрешения (1 м) построены на основе облаков точек лазерного сканирования. Модели среднего пространственного разрешения (порядка 30 м) представляют собой фрагменты общедоступной ЦМР SRTM с исходным разрешением 1". В качестве моделей низкого пространственного разрешения использованы фрагменты ЦМР GMTED2010 с исходным разрешением 15".

**Внедрение.** Результаты выполненных исследований реализованы в рамках плана научных работ кафедры картографии и геоинформатики по теме «Методы и технологии картографии, геоинформатики и аэрокосмического зондирования в исследованиях изменений природной среды и общества» (№АААА-А16-116032810094-9), гранта Президента Российской Федерации для молодых российских ученых – кандидатов наук МК-4829.2016.5 «Адаптивные методы и алгоритмы обработки цифровых моделей рельефа для целей морфометрического анализа», гранта РГО № 21/2016-Р «Картографическая энциклопедия рельефа России», гранта РФФИ-РГО № 17-05-41030-РГО-а «Комплексное исследование и картографирование современного водного режима рек европейской территории России и его опасных проявлений».

**Апробация работы.** Результаты исследования были доложены на региональной конференции Международного географического союза (International Geographical Union (IGU) Regional Conference 2015) (Москва, 2015), IX и X международной школе-конференции «Меридиан» (Курская биосферная станция Института географии РАН, 2016, 2017), всероссийской научной конференции «Международный год карт в России: объединяя пространство и время» (Москва, 2016), V международной конференции молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского (Санкт-Петербург, 2017), XXIV международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов – 2017» (Москва, 2017), 28-й международной картографической конференции (Вашингтон, 2017), научной конференции «Ломоносовские чтения-2018» (Москва, 2018).

По теме диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 3 статьи в журналах из списка RSCI Web of Science (из них 2 входят в перечень Scopus).

**Структура и объём работы.** Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Список литературы содержит 141 наименование, в том числе 30 на русском языке и 111 на английском языке. Основной текст работы изложен на 106 страницах машинописного текста. Работа содержит 63 рисунка и 6 таблиц.

#### **Благодарности.**

Автор выражает благодарность научному руководителю, проф., д. г. н. И. К. Лурье за неоценимую помощь в подготовке работы; к. г. н. С. М. Кошелю, помощь которого в значительной степени обеспечила математическую базу этой работы; к. г. н., Т. Е. Самсонову за плодотворное обсуждение задач и многочисленные консультации; проф., д. г. н. Б. А. Новаковскому, при участии и поддержке которого автор значительно углубил свои знания в области цифрового моделирования рельефа. Автор также признателен сотрудникам кафедры картографии и геоинформатики д. т. н. М. В. Нырцову, к. г. н. П. Е. Каргашину, к. г. н. Л. А. Ушаковой, к. г. н. А. И. Прасоловой, к. г. н. С. В. Чистову; сотрудникам кафедры гидрологии суши проф., д. г. н. Н. Л. Фроловой, к. г. н. М. Б. Киреевой, М. А. Харламову, сотрудникам кафедры геоморфологии и палеогеографии к. г. н. И. С. Воскресенскому, к. г. н. С. В. Харченко, сотруднику НИЛ эрозии почв и русловых процессов, к. г. н. В. Р. Беляеву, аспиранту Д. А. Безухову за консультации и ценные советы.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Глава 1. Теоретические и технологические средства создания и использования цифровых моделей рельефа в географических исследованиях и картографировании.**

Цифровые модели рельефа (ЦМР) активно применяются в различных задачах географии, картографии и смежных наук. С помощью ЦМР выполняются измерения высот и превышений, определяются углы наклона, экспозиция склона, освещённость, области видимости с определённых точек. ЦМР используются для определения границ бассейнов, моделирования плоскостного смыва, линейной эрозии. Наконец, в современных программных средствах геоинформационных систем (ГИС) ЦМР широко применяются для общегеографического и тематического картографирования.

Моделирование движения воды по поверхности под действием гравитации называется гидрологическим моделированием с использованием ЦМР. Основные задачи, решаемые с помощью гидрологического моделирования: расчёт морфометрических величин, характеризующих распределение потенциального поверх-

ностного стока, и автоматическое построение пространственных объектов (границ бассейнов, сетей тальвегов).

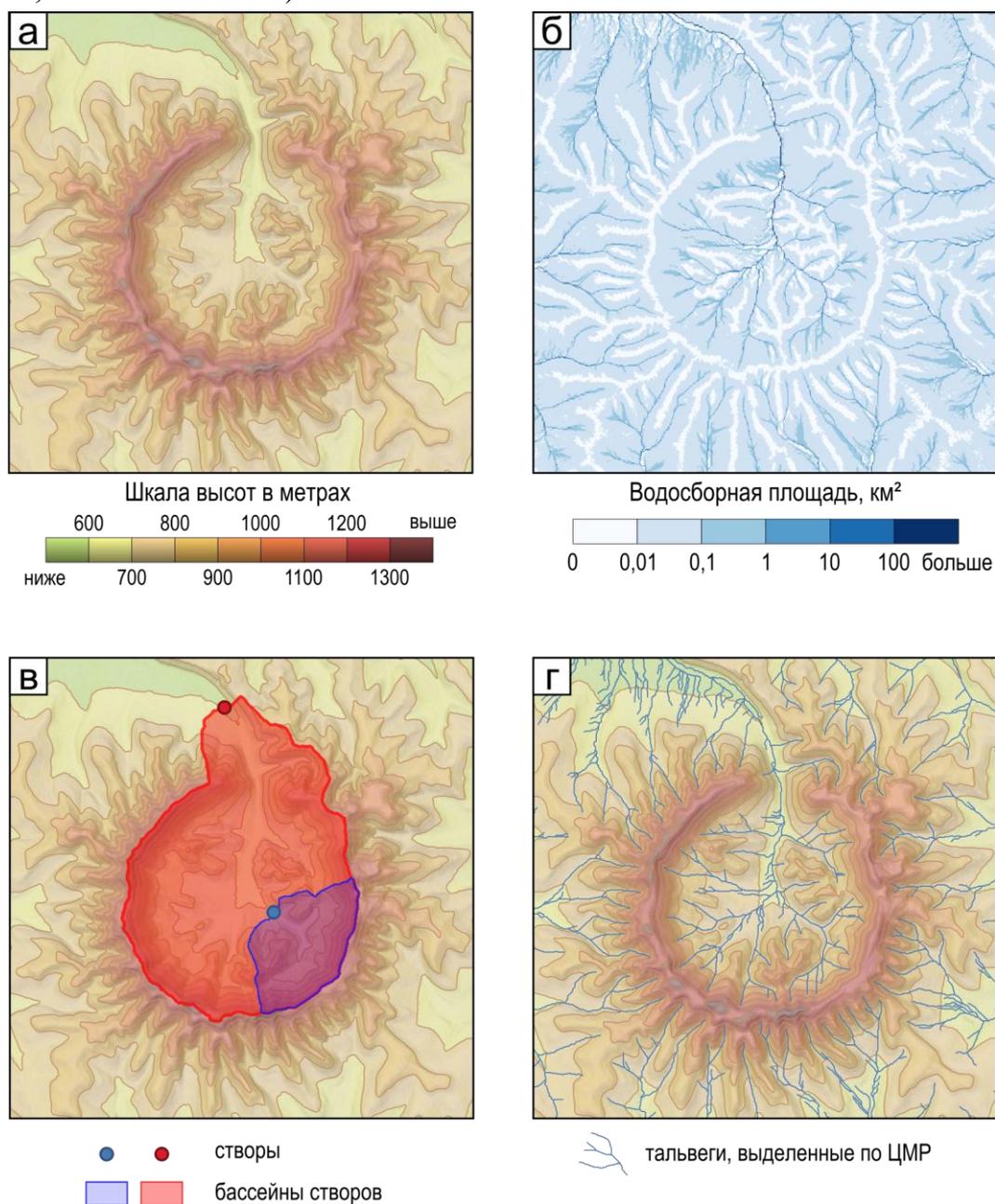


Рисунок 1 — ЦМР (а) и результаты гидрологического моделирования на её основе: растр водосборной площади (б), водосборные бассейны (в), сеть тальвегов (г).

Моделирование поверхностного стока, как правило, выполняется на основе регулярно-сеточных ЦМР. Элементарной единицей анализа в этом случае является ячейка ЦМР, а для вычисления используется её окрестность — восемь соседних ячеек (четыре прямых соседа и четыре соседа по диагонали) [Gruber, Rescham, 2009]. Моделируемый поток распределяется из центральной ячейки в одну или несколько соседних ячеек, имеющих меньшую высоту. Рассчитывая направления стока для всех ячеек ЦМР, можно отследить «путь» каждого элемен-

тарного объёма водной массы от любой точки поверхности до границы ЦМР или до локального минимума высоты (рисунок 2).

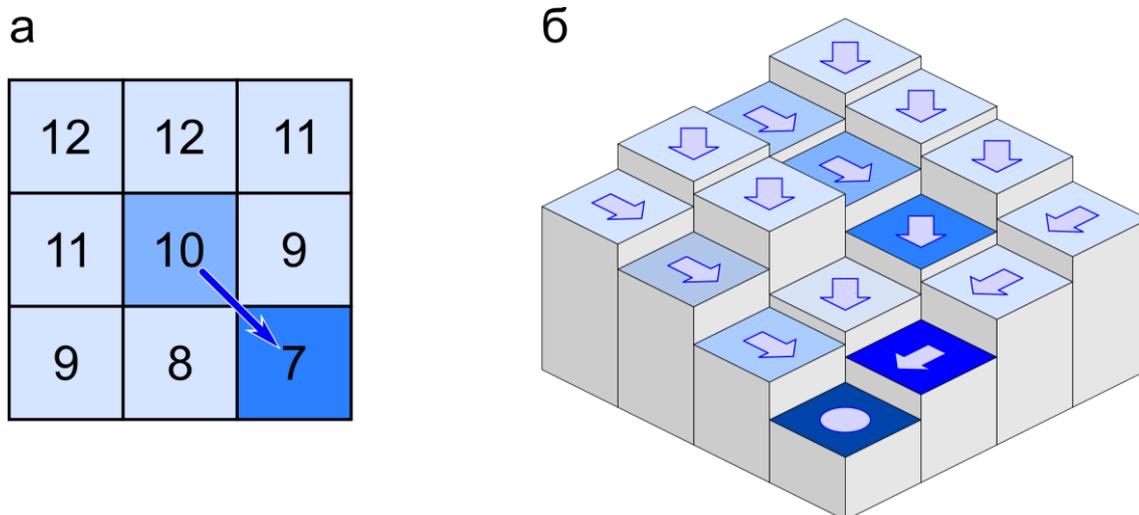


Рисунок 2 — Принцип моделирования поверхностного стока по ЦМР: центральная ячейка, восемь её соседей и заданное для неё направление стока (а), совокупность ячеек ЦМР с определёнными для них направлениями стока (б). Числа в ячейках соответствуют отметкам высот.

Описанный принцип позволяет моделировать распространение водных потоков по поверхности под действием силы тяжести. При этом не учитываются такие факторы, как испарение, инфильтрация в почву, шероховатость подстилающей поверхности, гидравлические эффекты. Моделирование опирается на процедуру *определения направлений стока*: для каждой ячейки указывается, между какими соседними ячейками и в какой пропорции распределяется моделируемый поток.

*Общая и удельная водосборная площадь* — базовые морфометрические величины, характеризующие распределение потенциального поверхностного стока. Их расчёт по ЦМР происходит путём применения к регулярной сетке логических процедур анализа, основанных на определении направлений стока. От выбранного алгоритма определения направлений стока целиком зависит результат расчёта водосборной площади [Кошель, Энтин, 2016; Wilson et al., 2008; Wilson, 2018]. Поскольку принципы распределения потока, реализованные в различных алгоритмах, существенно различаются, применение разных алгоритмов для вычисления водосборной площади приводит к получению значительно отличающихся результатов. Следовательно, необходимо обеспечить оценку точности и достоверности результатов вычисления при выборе алгоритма трассировки потока для наилучшего соответствия решаемой задаче исследования. Распространённый способ проведения такой оценки — анализ распределений, получаемых на элементарных абстрактных поверхностях; однако остаётся неясным, в какой мере

эти выводы могут быть перенесены на ЦМР, представляющие реальную местность.

Задачи построения пространственных объектов по ЦМР с использованием гидрологического моделирования включают: определение границ бассейнов, построение сетей тальвегов, определение положений водоразделов. Эти задачи также решаются на основе определения направлений стока. Если для каждой ячейки определено направление стока, связывающее её с соседней ячейкой (или указывающее на отсутствие связи — например, для краевых ячеек ЦМР), то все связанные друг с другом ячейки можно объединить в структуру, аналогичную древо-видному графу. Множество ячеек, сток из которых проходит (возможно, опосредованно) через некоторую выбранную ячейку, определяется как бассейн выбранной ячейки. Пометив ячейки как принадлежащие бассейну, можно построить соответствующий пространственный объект и таким образом получить границы бассейна выбранного створа (ячейки). Похожим образом выделяются ячейки, соответствующие тальвегам и водоразделам. Для тальвегов вводится критерий, при котором ячейка считается относящейся к тальвегу. В простейшем случае это может быть значение водосборной площади, более сложные подходы основаны на привлечении локальных морфометрических характеристик для определения вершин тальвегов и последующей трассировке потока вниз по склону. Выделение водораздельных линий проводится либо на основе границ бассейнов, либо путём инвертирования ЦМР по вертикали и применения к ней тех же процедур, что используются для выделения сети тальвегов.

Для выполнения гидрологического моделирования с использованием ЦМР необходимо обеспечить распространение моделируемого стока вниз по склону. В общем случае выполнение этого условия не гарантировано: практически на любых моделях имеются замкнутые локальные понижения, которые являются препятствием для распространения стока. Такие понижения могут отражать естественные неровности земной поверхности, но чаще они появляются на ЦМР вследствие зашумленности исходных данных либо как артефакты интерполяции. Поэтому перед выполнением собственно гидрологического моделирования, как правило, проводится специальная процедура приведения ЦМР к гидрологически корректному виду, которая подразумевает устранение замкнутых понижений [O'Callaghan, Mark, 1984; Lindsay, 2016a]. Если выполнять моделирование с использованием ЦМР, не приведённой к гидрологически корректному виду, значения морфометрических величин будут недооценёнными, а границы бассейнов и сети тальвегов — неправильными (рисунок 3).

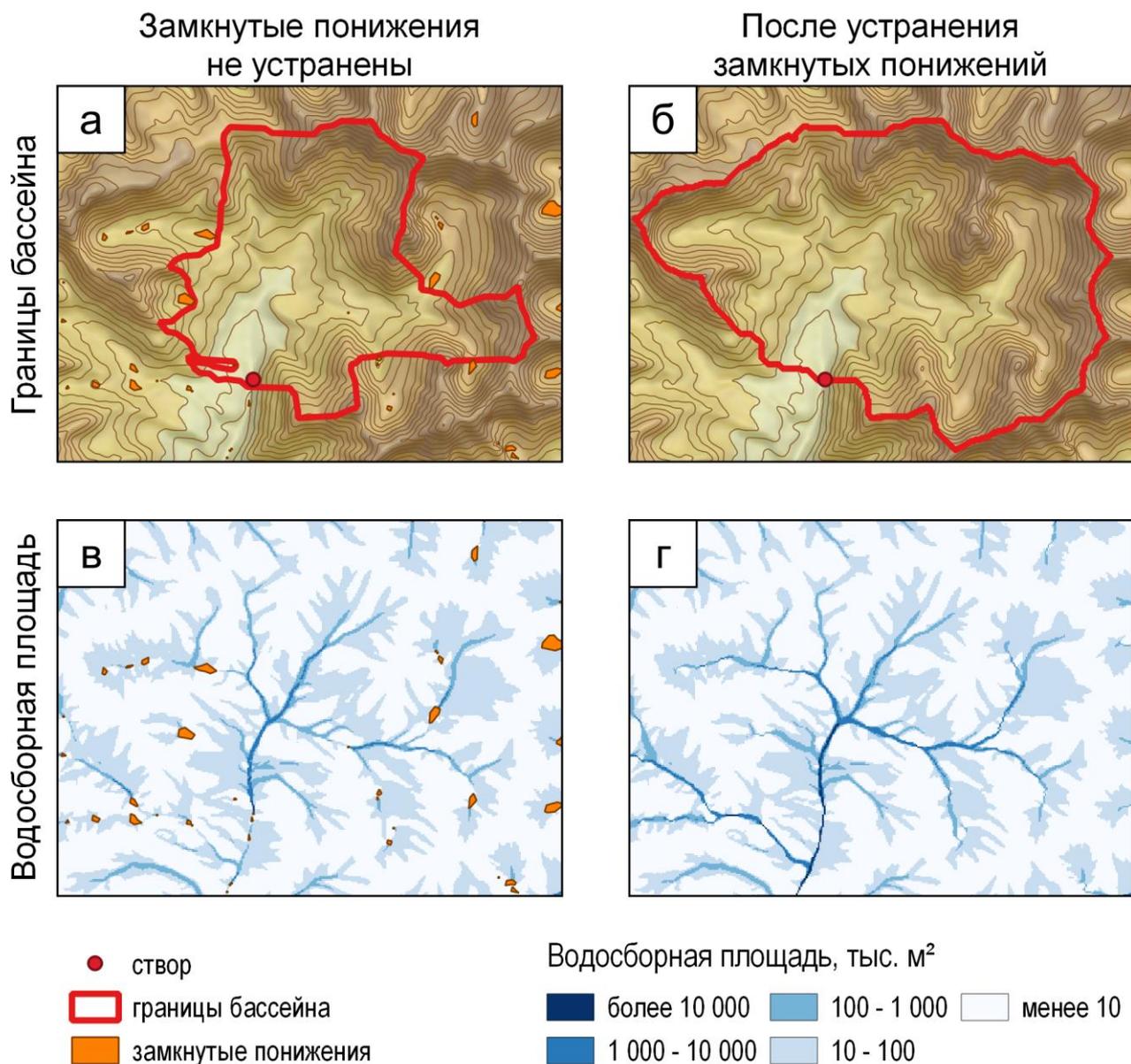


Рисунок 3 — Гидрологическое моделирование без устранения замкнутых понижений (а, в) и после устранения замкнутых понижений (б, г).

Существует несколько подходов, позволяющих решить задачу гидрологической коррекции путём увеличения или уменьшения высот ячеек ЦМР, но, как правило, при этом не сохраняются особенности исходного поля высот внутри понижения и смежных областей. Существующие алгоритмы не учитывают его и формируют на месте понижения горизонтальную плоскость или наклонную коническую поверхность. Вследствие этого в картину распределения поверхностного стока могут быть внесены серьёзные изменения, снижающие качество результата гидрологического моделирования.

Для многих задач требуется не только обеспечить беспрепятственный сток вниз по склону, но и добиться его соответствия реальной ситуации на местности, известной из независимых от ЦМР источников, например, векторных объектов гидрографической сети. Разработаны методики, позволяющие выполнить про-

странственное и высотное согласование цифровых моделей рельефа с гидрографической сетью. Такие процедуры, как правило, отличаются комплексностью и высокими требованиями к исходным данным для согласования. С использованием этих методик создано несколько баз пространственных данных для гидрологического моделирования, но их применение к настоящему моменту не очень широко распространено — исследователи предпочитают корректировать модели самостоятельно.

Итак, несмотря на значительное число разработанных к настоящему времени алгоритмов предварительной обработки и гидрологического моделирования с использованием ЦМР, сохраняется потребность в их усовершенствовании для повышения достоверности результатов моделирования.

## Глава 2. Методика расчёта водосборной площади на основе построения линий тока

Современные алгоритмы определения направлений стока и вычисления водосборной площади используют концепцию дискретного стока «из ячейки в ячейку». Такой подход затрудняет верификацию результатов вычисления и создаёт проблему выбора алгоритма для моделирования. Этой проблемы можно избежать, используя физически достоверный принцип моделирования стока: направление стока на местности противоположно направлению вектора градиента.

В работе предлагается алгоритм расчёта водосборной площади, основанный на трассировке потока путём построения линий тока по поверхности, представленной непрерывной дифференцируемой функцией  $f(x,y)$ . Тогда линию тока в параметрическом представлении  $(x(t), y(t))$ , выходящую из точки  $x_0, y_0$  вниз по склону, можно определить как решение задачи Коши для системы дифференциальных уравнений при  $t > 0$ :

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

Геометрическая форма линии тока зависит от способа вычисления производных в правой части системы (1), а также от выбранного метода численного интегрирования. По результатам экспериментов с использованием разных методов были применены билинейная интерполяция для расчёта производных в произвольной точке (не в узлах регулярной сетки исходной ЦМР) и неявный метод Эйлера для численного интегрирования.

Линии тока строятся из центров всех ячеек ЦМР. Водосборная площадь вычисляется на основе анализа прохождения построенных линий тока через ячейки сетки. Предлагается два варианта вычисления — «простой» и «точный». В «про-

стом» способе учитывается только факт прохождения линий тока через ячейку: к значениям водосборной площади в ячейках, через которые проходит линия, добавляется значение, ассоциированное с этой линией (рисунок 4). «Точный» вариант учитывает длину сегмента линии тока, пересекающего ячейку. Эта длина нормируется и используется как весовой коэффициент при добавлении значения параметра к ячейке.

Разработанный алгоритм назван FLBA (FlowLine-Based Algorithm); его реализации, отличающиеся способом анализа положения линий, обозначаются как FLBA-s (простой) и FLBA-a (точный).

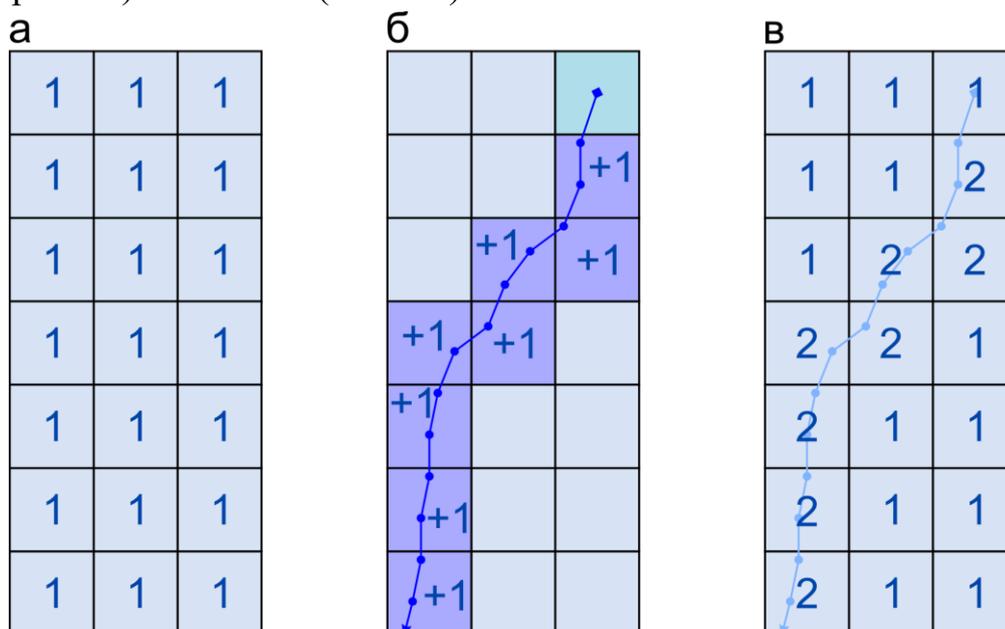


Рисунок 4 — Принцип расчёта водосборной площади на основе построения линий тока: исходная водосборная площадь (а), построение линии тока (б), рассчитанное значение водосборной площади с учётом линии тока (в)

Тестирование алгоритма расчёта водосборной площади проводилось на ЦМР различного пространственного разрешения. На рисунке 5 приводятся фрагменты результатов расчёта водосборной площади по ЦМР высокого пространственного разрешения (1 м), построенной по данным воздушного лазерного сканирования и представляющей малые эрозионные формы в гористой местности. Для сравнения водосборная площадь была рассчитана по той же ЦМР с применением алгоритмов определения направлений стока, реализованных в современных программных средствах ГИС.

Распределение водосборной площади, получаемое при помощи FLBA, отличается низким «разбросом» потока. Области высоких значений вблизи тальвегов формируют линии, ширина которых равна размеру ячейки ЦМР. Эти области уже, чем при использовании алгоритмов MFD и MFD-md, и сопоставимы с результатом расчёта по D8, KRA и DEMON. Однако указанные алгоритмы фор-

мируют неестественное распределение потока: сети параллельных сегментов, изгибающихся под углами, кратными  $45^\circ$ . Результат расчёта с использованием разработанного алгоритма лишён этого недостатка (рисунок 5).

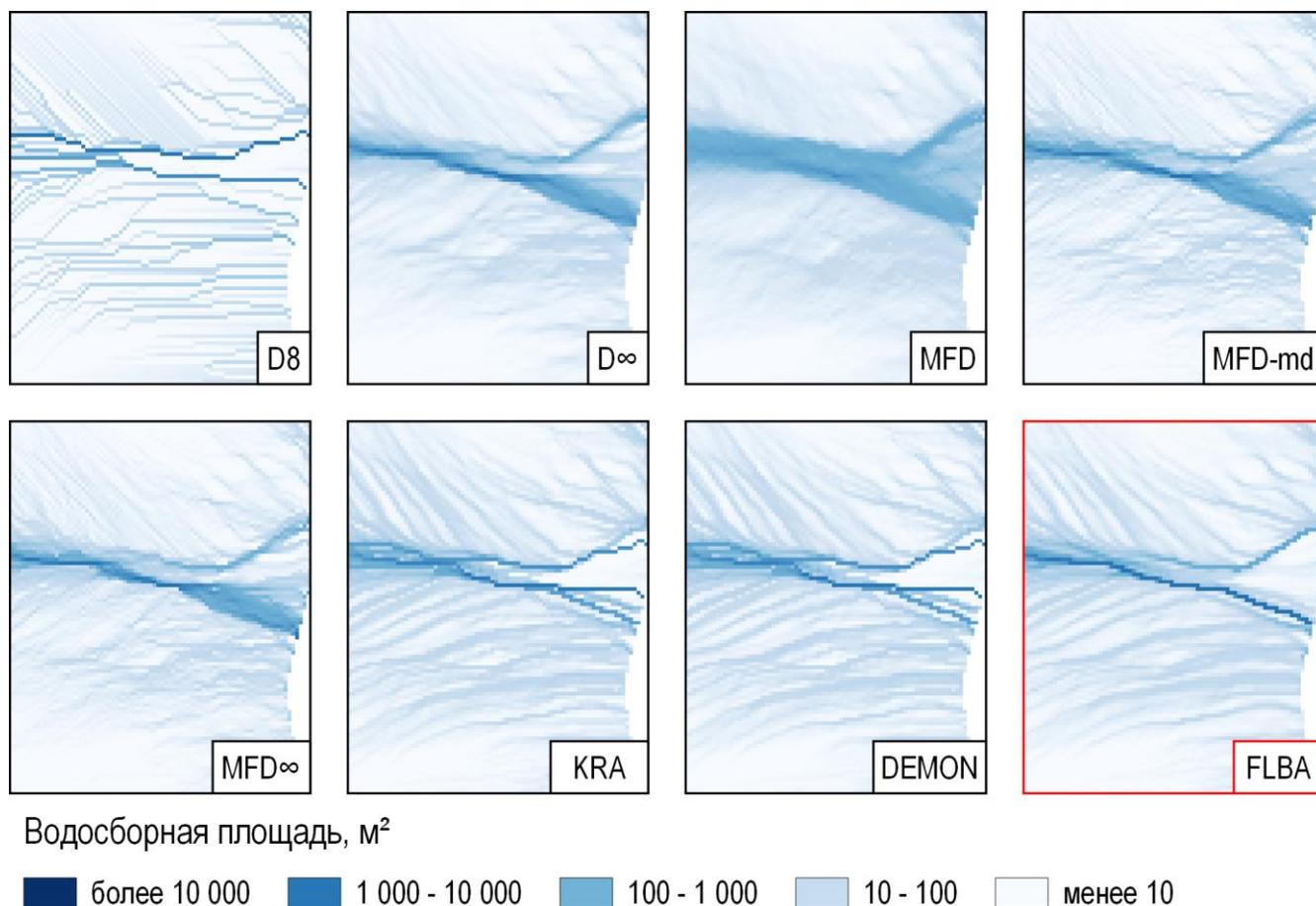


Рисунок 5 — Результаты расчёта водосборной площади с использованием различных алгоритмов трассировки потока. Результаты, полученные авторским алгоритмом (FLBA), выделены красной рамкой.

Точные значения водосборной площади, определённые в некоторых точках поверхности, приведены в таблице 1. Видно, что значения, получаемые с использованием различных алгоритмов, совпадают для точки на вогнутом склоне и отчётливо разделяются на две группы (группа MFD и подходы, использующие трассировку потока) в тальвегах. При этом для всех алгоритмов, кроме FLBA, наблюдается уменьшение рассчитанной площади водосбора в нижней части тальвега по сравнению со средней его частью. Такой результат получается вследствие распределения потока между несколькими ячейками в нижней части тальвега, однако он географически недостоверен. Расчёт с использованием FLBA позволит избежать ошибок такого рода, однако разработанный алгоритм также имеет некоторые ограничения в возможностях применения.

Таблица 1 — Значения водосборной площади (м<sup>2</sup>), рассчитанные для точек поверхности

Положение в рельефе	D8	Dinf	MFD	MFDmd	KRA	DEMON	FLBA-S	FLBA-A
Вогнутый склон	11,0	131,7	120,9	140,0	148,0	146,5	171,0	136,4
Тальвег (верхнее течение)	13,0	2 473,5	2 056,9	2 135,0	4 193,0	4 186,1	4 297,0	4 074,8
Тальвег (среднее течение)	22 594,0	11 404,9	10 256,2	15 756,6	22 131,0	22 107,5	22 038,0	28 910,9
Тальвег (нижнее течение)	142,0	8 537,1	5 679,6	5 422,0	20 765,0	20 622,6	31 197,0	46 108,0

Проведённый в работе сравнительный анализ с использованием моделей высокого и среднего пространственного разрешения позволяет считать, что распределение водосборной площади, рассчитываемое с помощью предложенного алгоритма (FLBA), отличается большей достоверностью по сравнению с результатами, которые можно получить с использованием инструментария современных программных средств ГИС. Достоверность обеспечивается физически корректным принципом моделирования поверхностного стока.

### Глава 3. Алгоритм заполнения замкнутых понижений путём интерполяции высот вдоль ломаных линий

Существующие алгоритмы предлагают в основном формальное, «механистическое» решение проблемы замкнутых локальных понижений: их устранение с ЦМР происходит, но особенности исходного рельефа (например, форма тальвегов внутри понижений) не сохраняются. В этом разделе описан разработанный алгоритм гидрологической коррекции ЦМР, позволяющий формировать на месте замкнутых локальных понижений и горизонтальных участков наклонные поверхности сложной формы, обеспечивающие реалистичное поведение потоков. При этом, во-первых, модификация высот охватывает только непосредственно область понижения и ближайшие соседние ячейки, а во-вторых, формируемая поверхность сохраняет особенности поля высот исходной модели.

Основная идея алгоритма устранения замкнутых локальных понижений состоит в конструировании линий специальной формы, начинающихся от границ понижения и проходящих через локальные минимумы высоты внутри него, с последующей линейной интерполяцией и экстраполяцией высот вдоль этих линий. Сначала выполняется идентификация локальных понижений, затем для каждого локального понижения выстраивается дерево путей на графе (рисунок 6), после чего выполняется интерполяция (для путей, начинающихся на границах понижения) или экстраполяция (для остальных путей) значений высот (рисунок 7). В результате удаётся сформировать на месте понижения наклонную поверхность

сложной формы, которая обеспечивает беспрепятственный сток, но в то же время сохраняет особенности исходного рельефа понижения. Хотя алгоритм предназначен для устранения замкнутых локальных понижений, технически он может быть применён и к горизонтальным участкам.

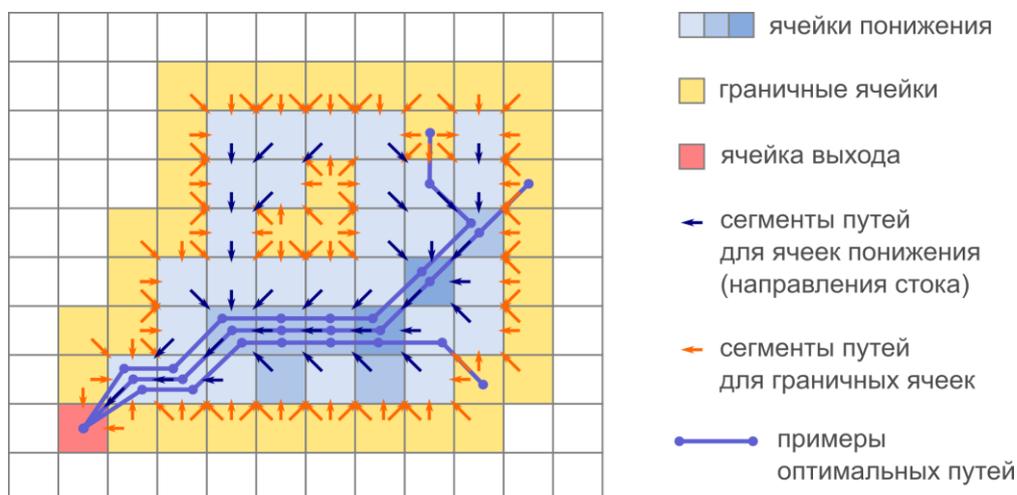


Рисунок 6 — Процедура построения ломаных линий (оптимальных путей на взвешенном ориентированном графе) для интерполяции и экстраполяции высот

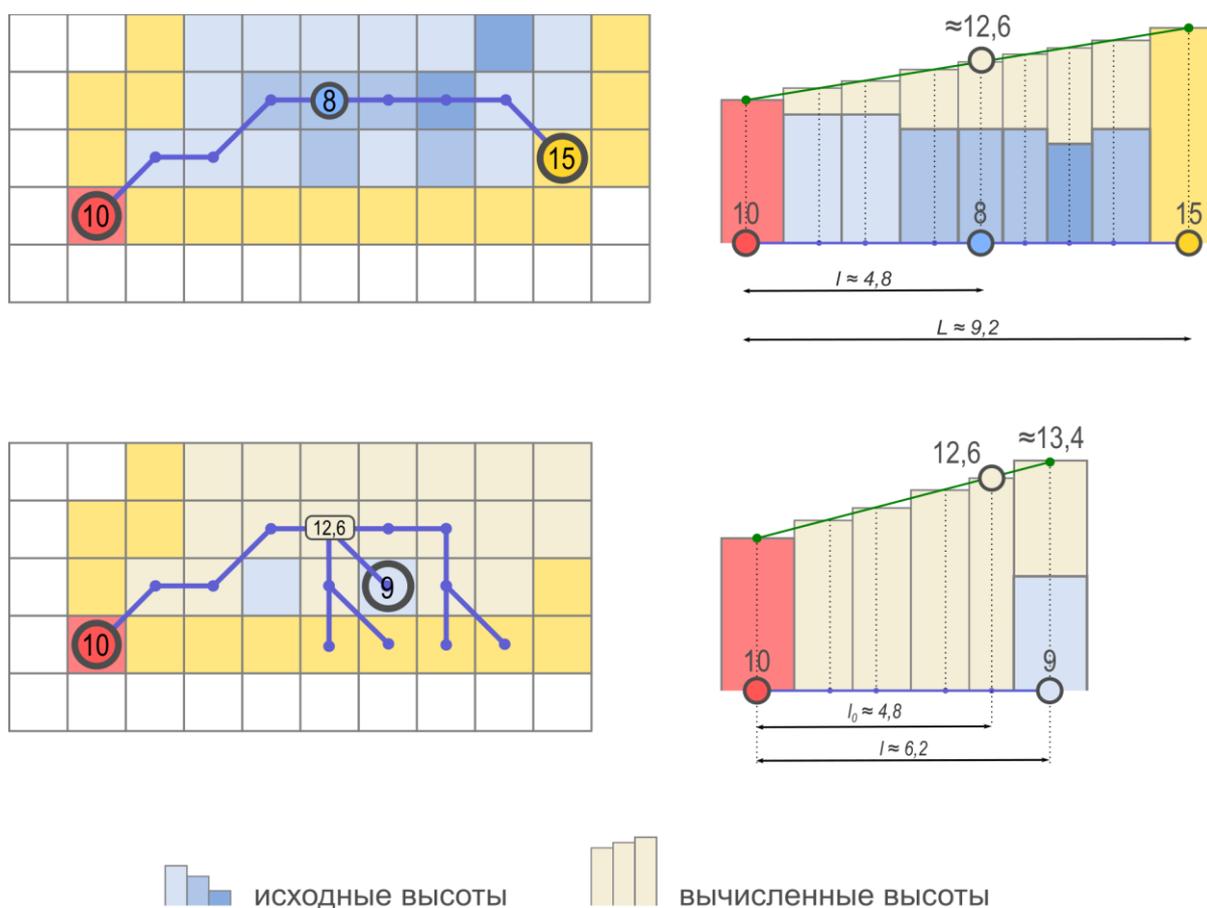


Рисунок 7 — Процедура интерполяции (вверху) и экстраполяции (внизу) высот вдоль специально построенных ломаных линий

Разработанный алгоритм заполнения замкнутых локальных понижений протестирован на моделях высокого (1 м), среднего (25 м) и низкого (500 м) пространственного разрешения. Ввиду того, что непосредственная демонстрация результата заполнения трудна и малоинформативна, оценка результатов была проведена не напрямую путём изучения поля высот, а косвенно — по влиянию алгоритмов предварительной обработки на расчёт водосборной площади и построение сети потенциальных водотоков. Для сравнения те же модели были подвергнуты предварительной обработке при помощи распространённых алгоритмов устранения локальных понижений — заполнения с формированием горизонтальной или наклонной поверхности, разрушения границ понижений.

На рисунке 8 показаны результаты построения сети тальвегов по фрагменту цифровой модели низкого пространственного разрешения, предварительно обработанной с использованием следующих алгоритмов устранения локальных понижений: заполнения с формированием горизонтальной плоскости [Jenson, Domingue, 1988], заполнения с формированием наклонной поверхности [Wang, Liu, 2006], разрушения границ понижений [Lindsay, 2016a] и предлагаемого алгоритма заполнения.

Из рисунка 8 следует, что разрушение границ замкнутых понижений и предложенный алгоритм заполнения дают лучшие результаты по сравнению с традиционными алгоритмами заполнения: восстановленные тальвеги практически идентичны реальной гидрографической сети. Расчётные распределения морфометрических параметров, получаемые по ЦМР высокого и среднего разрешения, исправленным с помощью разных алгоритмов предварительной обработки, подтверждают этот вывод. Дополнительно выявляются артефакты применения алгоритма разрушения границ понижений («каналы» стока вниз по склону от понижений). В ситуациях, когда сохранение формы поверхности за пределами локальных понижений принципиально для проведения исследования, предложенный алгоритм более пригоден для выполнения предварительной обработки ЦМР, чем алгоритм разрушения границ понижений.

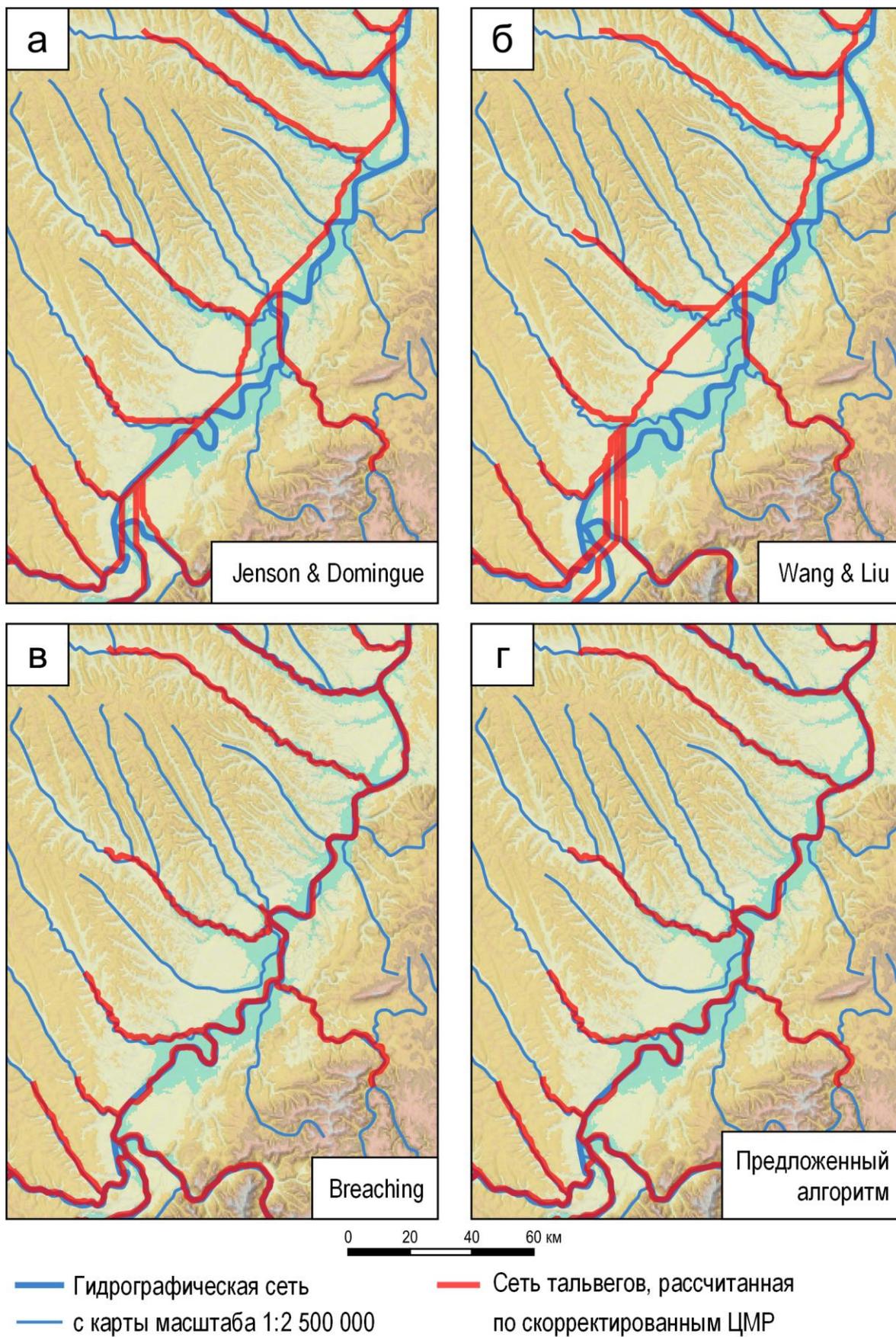


Рисунок 8 — Влияние алгоритма устранения замкнутых локальных понижений на гидрологическое моделирование (на примере построения сети тальвегов)

#### **Глава 4. Методика коррекции ЦМР низкого пространственного разрешения для расчёта границ бассейнов**

Существующие методики пространственного и высотного согласования ЦМР с базовыми пространственными объектами, представляющими гидрографическую сеть, как правило, имеют своей конечной целью получение модифицированной ЦМР, пригодной для выполнения различных задач гидрологического моделирования, и требуют детальных исходных данных для согласования [Ермолаев, Мальцев, Иванов, 2014; Мальцев, Ермолаев, 2014; Lehner, Verdin, Jarvis, 2013]. В настоящем исследовании предпринята попытка выяснить, каков минимальный набор шагов, необходимых для эффективного пространственно-высотного согласования ЦМР с гидрографической сетью в мелком масштабе для решения задачи определения границ бассейнов рек, озёр и водохранилищ. В качестве исходных данных взяты цифровая модель рельефа GMTED2010 (разрешение 15", или порядка 500 м в проекции) и цифровые топографические основы ВСЕГЕИ. Было последовательно апробировано несколько способов предварительной обработки (по возрастанию «сложности», начиная с простого устранения замкнутых локальных понижений), в результате были определены требуемые для согласования исходные данные и минимальный набор необходимых «шагов» методики. В окончательном варианте сделан вывод о том, что для согласования требуется использовать набор данных об объектах гидрографии, причём этот набор должен быть составлен в более крупном масштабе, чем целевой масштаб картографирования (в нашем случае использовались данные, соответствующие масштабу 1:2 500 000, при масштабе картографирования 1:10 000 000). Оверлей пространственных объектов, представляющих гидрографическую сеть (реки, озёра, водохранилища) применяется для снижения высот ЦМР в ячейках, соответствующих гидрографической сети, а также для создания искусственных границ поля высот внутри бессточных областей. Сначала выполняется углубление русел рек и водоёмов, затем — создание искусственных границ ЦМР в бессточных областях (для этого требуется вручную обозначить некоторые из таких областей, если на них нет объектов гидрографической сети). В последнюю очередь выполняется устранение замкнутых локальных понижений. Схема процедуры пространственно-высотного согласования представлена на рисунке 9.

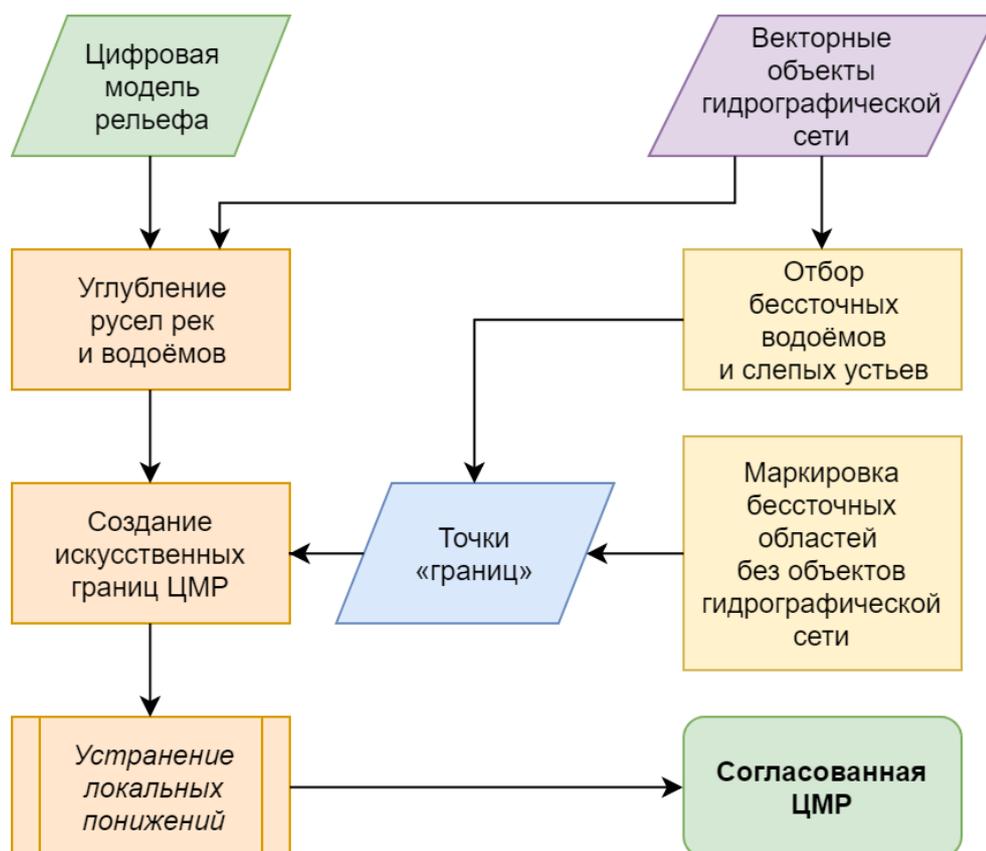


Рисунок 9 — Методика пространственно-высотного согласования ЦМР и гидрографической сети

На основе предложенной методики и с использованием в качестве исходных данных цифровой модели рельефа GMTED2010 и цифровой топографической основы ВСЕГЕИ, было выполнено построение бассейнов крупных объектов гидрографической сети на территории Российской Федерации. Всего было построено 1379 объектов, из которых 1050 соответствуют водотокам и 329 — водоёмам. Оценка корректности и достоверности построенных объектов проводилась в три этапа: 1) визуально, путём сравнения очертаний построенных бассейнов с изображением рельефа и гидрографической сети; 2) визуально, путём сравнения очертаний построенных бассейнов с бассейнами, извлечёнными из набора HydroBASINS; 3) аналитически, путём вычисления разности площадей бассейнов, построенных по ЦМР, и площадей бассейнов, приведённых в Государственном водном реестре.

На первом этапе визуального сравнения (сравнение с ЦМР и гидрографической сетью) были выявлены объекты, построенные с ошибками. Из 1379 объектов 1207 — построены корректно (без визуально заметных ошибок), 78 — с ошибками, достоверность построения ещё 92 объектов не оценивалась, поскольку они дублировали бассейны других объектов.

На втором этапе (сравнение с HydroBASINS) достоверность построения большинства объектов была подтверждена; в ряде случаев бассейны из построен-

ного набора заметно лучше согласованы с гидрографической сетью (рисунок 10). Удалось также установить, что основным источником ошибок при определении границ бассейнов выступают ошибки и неточности в исходных данных, используемых для согласования (например, неверные атрибуты объекта гидрографии).

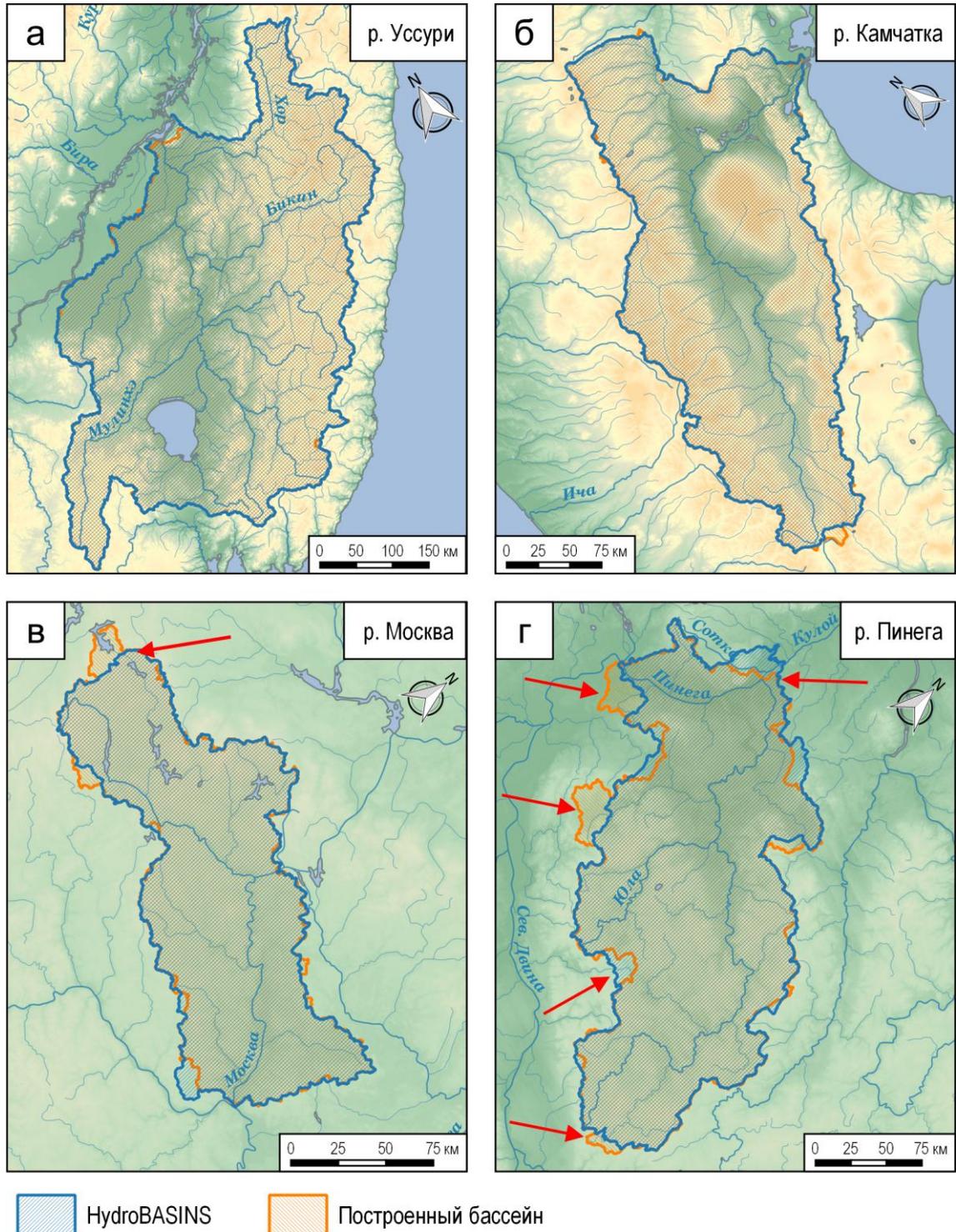


Рисунок 10 — Сравнение полученного набора данных с HydroBASINS. Красные стрелки указывают на ошибки построения (для р. Москва — полученного набора данных, для р. Пинега — HydroBASINS).

На третьем этапе было выполнено численное сравнение площадей полученных бассейнов с данными Государственного водного реестра. В сравнение включены те бассейны, которые по результатам визуального анализа определены как построенные верно, и их соответствие записям в Государственном водном реестре определяется однозначно. Для большинства бассейнов относительная величина отклонения не превышает 5 % и не связана с площадью бассейна (рисунок 11). Интересны также следующие наблюдения: среднее значение отклонения составляет порядка  $-2\%$  (т. е. происходит несущественная, но систематическая недооценка площади), также не обнаруживается ожидаемой связи между ошибкой вычисления площади и амплитудой высот бассейна. Эти наблюдения требуют дальнейшего изучения, но в целом можно говорить о высокой достоверности построенного набора данных.

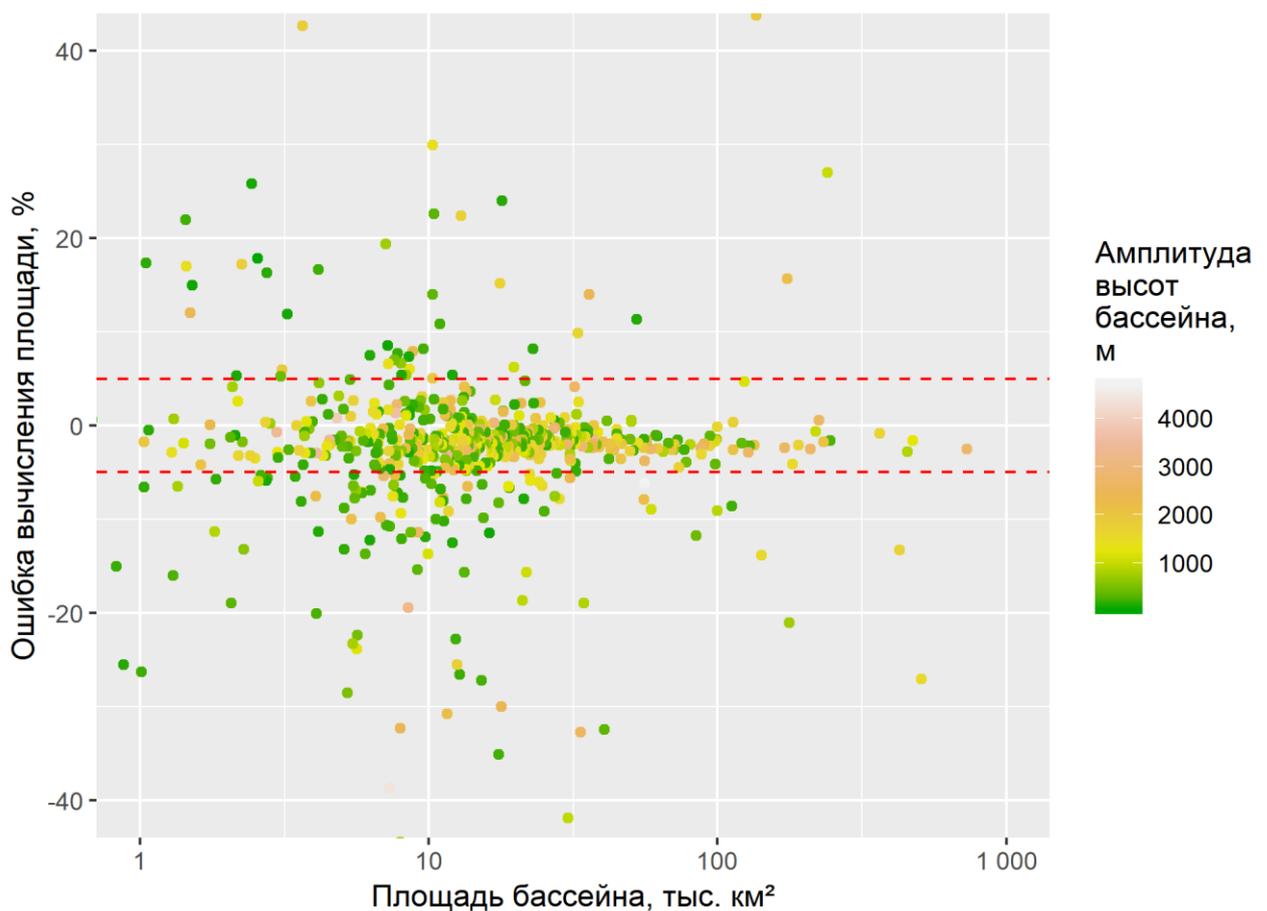


Рисунок 11 — Зависимость ошибки в определении площади от общей площади бассейна

## **Заключение**

В работе представлено теоретическое обоснование и практическая реализация методов использования ЦМР в географических исследованиях и картографировании, реализованных комплексом методик и алгоритмов. На основе анализа и оценки существующих методик и алгоритмов гидрологического моделирования с использованием ЦМР установлено, что для обеспечения достоверности моделирования необходимо применять специальные процедуры предварительной обработки, включая приведение ЦМР к гидрологически корректной форме и, если необходимо, согласование с базовыми пространственными объектами. Кроме того, для расчёта морфометрических величин принципиальное значение имеет выбор методического подхода для моделирования распределения поверхностного стока.

Основные результаты выполненных исследований:

1) Разработана методика расчёта базовой морфометрической величины — водосборной площади, основанная на алгоритме построении линий тока по поверхности, представленной непрерывной дифференцируемой функцией двух переменных. Алгоритм реализует физически корректный принцип моделирования поверхностного стока, что позволяет повысить достоверность результатов расчёта водосборной площади по сравнению с подходами, реализованными в современных программных средствах ГИС.

2) Разработан оригинальный алгоритм устранения замкнутых локальных понижений ЦМР, сохраняющий особенности исходного поля высот (локальные неровности и положения тальвегов) внутри понижений. Использование этого алгоритма для предварительной обработки ЦМР позволяет повысить достоверность последующего моделирования с использованием ЦМР высокого, среднего и низкого пространственного разрешения. Это подтверждается сравнением распределений водосборной площади и положений тальвегов, определённых по ЦМР, подвергнутых различным процедурам предварительной обработки.

3) Сформулирована проблема и обоснована методика пространственно-высотного согласования ЦМР и независимых от неё базовых пространственных объектов, представляющих гидрографическую сеть, для целей картографирования в мелком масштабе. Методика предназначена для использования данных обзорного разрешения и позволяет корректировать значения высот ЦМР в соответствии с положением объектов гидрографической сети, сохраняя существующие на местности бессточные области. Апробация разработок выполнена на примере ЦМР низкого пространственного разрешения GMTED2010 и цифровых географических основ ВСЕГЕИ; построенные границы бассейнов характеризуются высокой достоверностью в выбранном масштабе картографирования.

## Основные публикации по теме диссертационной работы

### *Статьи, опубликованные в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus:*

1. 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 (5-летний импакт-фактор РИНЦ: 0,733).
2. **Энтин А. Л.**, Самсонов Т. Е., Лурье И. К. Согласование цифровых моделей рельефа и гидрографической сети для определения границ бассейнов // Геодезия и картография. — 2019. — № 1. — С. 94–101 (5-летний импакт-фактор РИНЦ: 0,318).

### *Статьи, опубликованные в изданиях из списка RSCI Web of Science:*

3. Кошель С. М., **Энтин А. Л.**, Самсонов Т. Е. Устранение локальных понижений на цифровых моделях рельефа с сохранением особенностей исходного поля высот // Геоинформатика. — 2019. — № 2. — С. 43–56 (5-летний импакт-фактор РИНЦ: 0,601).

### *Прочие публикации:*

4. Koshel S., **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.
5. 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.
6. **Энтин А.Л.**, Кошель С.М. Алгоритм расчёта площади водосбора, основанный на построении линий тока // Сборник тезисов Всероссийской научной конференции «Международный год карт в России: объединяя пространство и время», Москва, Российская государственная библиотека, 25-28 октября 2016 г. — М.: Географический факультет МГУ, 2016. — С. 313–316.
7. **Энтин А.Л.** Расчёт площади водосбора по цифровым моделям рельефа с использованием различных алгоритмов определения направлений стока // Сборник материалов 9-й международной молодёжной школы-конференции Меридиан: Методы и средства исследования природы и общества. — М.: ИГ РАН, 2016. — С. 170–173.

8. **Энтин А.Л.**, Кошель С.М., Лурье И.К., Самсонов Т.Е. Морфометрический анализ цифровых моделей рельефа для оценки и картографирования распределения поверхностного стока // Вопросы географии — 2017. — С. 169–186.
9. **Энтин А.Л.**, Кошель С.М. Алгоритм устранения замкнутых локальных понижений на цифровых моделях рельефа для моделирования поверхностного стока // Материалы V Международной конференции молодых ученых и специалистов памяти академика А. П. Карпинского (28 февраля – 3 марта 2017 г., ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург) [Электронный ресурс]. — Изд-во ВСЕГЕИ Санкт-Петербург, 2017. — С. 699–702.
10. **Энтин А. Л.** Заполнение замкнутых локальных понижений на цифровых моделях рельефа с использованием линейной интерполяции высот // Материалы Международного молодежного научного форума ЛОМОНОСОВ-2017 / Отв. ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов. — МАКС Пресс Москва, 2017.
11. **Энтин А.Л.** Опыт автоматического определения границ бассейнов крупных объектов гидрографии для территории Российской Федерации // Современные подходы к изучению проблем в физической и социально-экономической географии: X Международная молодёжная школа-конференция; 24-28 мая 2017 г.; Курская биосферная станция ИГРАН: Сборник статей. — М.: «11-й ФОРМАТ», 2017. — С. 205–207.