# ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертацию Энтина Андрея Львовича на тему «Методы повышения достоверности цифровых моделей рельефа для гидрологического моделирования и картографирования», представленную на соискание ученой степени кандидата географических наук по специальности 25.00.33 – «Картография»**

Диссертационное исследование Энтина А.Л. посвящено разработке новых и совершенствованию существующих методов повышения достоверности цифровых моделей рельефа (ЦМР), обеспечивающих их пригодность для географических (гидрологических) исследований и дальнейшего картографирования.

Актуальность темы диссертации не вызывает сомнений, т.к. в настоящее время существует нехватка новый методических подходов и решений при формировании гидрологически корректных ЦМР для топографических карт различного масштаба, а описание (тем более изменение) используемых алгоритмов в среде зарубежных ГИС зачастую не доступны для конечного пользователя.

Автор ставит целью своего диссертационного исследования совершенствование существующих и разработку новых методов повышения достоверности ЦМР, которые реализуются предлагаемым комплексом методик и алгоритмов их преобразования для корректного гидрологического моделирования и дальнейшего картографирования.

Традиционно первая задача, которую решает автор для достижения конечной цели - анализ существующих методов и алгоритмов гидрологического моделирования с использованием ЦМР, а также выявление процедур, критически влияющих на достоверность получаемых конечных результатов. На основе анализа предшествующих теоретических разработок Энтин А.Л. предлагает усовершенствовать существующие и разработать новые методики приведения ЦМР к гидрологически корректному виду для более точного вычисления гидрографических, морфометрических и морфологических характеристик рек и их бассейнов. При этим разработанные методики необходимо апробировать на примере выделения гидрологических объектов и расчета их морфометрических величин по ЦМР высокого, среднего и низкого пространственного разрешения. Выполненный анализ и оценка полученных результатов должны подтвердить предлагаемые методы и алгоритмы.

Таким образом, **объектом исследования** являются цифровые модели рельефа, а **предметом исследования** являются методические и алгоритмические приёмы решения задач, требующих проведения гидрологического моделирования с применением ЦМР (в том числе задач их предварительной обработки).

**К защите представлены три защищаемых 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.

**Научная новизна работы** заключается в расчёта водосборной площади, где впервые применено построение линий тока, обеспечивающее физически корректное моделирование поверхностного стока; новом алгоритме устранения замкнутых понижений, позволяющем решить проблему искажения моделируемого распределения поверхностного стока, возникающую вследствие модификации высот ЦМР существующими алгоритмами; методике пространственно-высотного согласования ЦМР с гидрографической сетью, обеспечивающая корректное гидрологическое моделирование в целях мелкомасштабного картографирования.

В качестве **исходных данных** в работе используются цифровые модели рельефа различного охвата и пространственного разрешения, а также (что важно) полученные технологически различными способами: лидарными, радарными, а также расчетным способом на основе существующих цифровых топографических карт.

**Практическая значимость** не вызывает сомнений, т.к. при гидрологических расчетах для строительного проектирования, а также при проведении комплексных гидрологических исследований для изучения водного режима территории широко используются основные гидрографические характеристики водных объектов и поверхности их водосборов. Поэтому предлагаемые методы остро необходимы инженерам-гидрологам для проведения картометрических работ по расчету гидрографических и гидрологических характеристик рек (в том числе неизученных) и их бассейнов (длина, извилистость водотока, площадь водоема, водосбора и его центра тяжести и т.п.).

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.

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).

В **первой главе** Энтин А.Л. рассматривает классические методы и подходы, используемые в большинстве ГИС-пакетов. Как правило они связаны с созданием и анализом регулярно-ячеистых моделей. Далее, на основе соотношений ячейки с соседними ячейками строится связный набор линий тока. Именно он в дальнейшем служит основой для выделения тальвегов и водотоков различного порядка, вычислению топологически корректной гидрологической сети для карт разного масштаба. Удаление из

дальнейшего рассмотрения «бессточных» областей – еще одна задача, которой требуется оптимальное решение. В противном случае можно получить значения гидрографических и морфометрических величин которые будут недооценены, а границы бассейнов и сети тальвегов неправильны по форме.

В конце первой главы автор справедливо делает вывод, что 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.

Во **второй главе** Энтин А.Л. предлагает авторские решения рассмотренных в первой главе задач. В первую очередь это относится к алгоритму расчёта водосборной площади, основанному на трассировке потока путём построения линий тока по поверхности, представленной непрерывной дифференцируемой функцией $f(x,y)$ (решение задачи Коши для системы дифференциальных уравнений первого порядка при значениях параметра $t > 0$).

Конечный результат численного интегрирования системы уравнений определяется двумя факторами: способом вычисления правой части в произвольной точке исследуемой области и выбранным методом численного интегрирования. При выборе способов интегрирования автором были опробованы разные алгоритмы: метод Эйлера первого порядка, неявный метод Эйлера, метод Рунге-Кутта четвертого и пятого порядка. В результате экспериментов с использованием ЦМР на участках с различными типами рельефа для решения системы уравнений автор, в качестве оптимального, выделяет неявный метод Эйлера. Он оказался наиболее оптимальным, с точки зрения соотношения получаемого качества результата и затрат на вычисления.

Далее рассмотрены особенности построения линий тока (длина, направление, включение в дальнейшее рассмотрение ячеек соотнесенных с линией тока) и делается вывод, что дальнейшем алгоритм (автор назвал его и FLBA (Flow Line Based Algorithm) может быть рассмотрен в двух модификациях «простой» и «точной».

Другими словами говоря, происходит совмещение двух типов представления пространственных данных (растровое и векторное), которое, по мнению автора, наиболее качественно позволит использовать достоинства того и другого из представлений. Программная реализация разработанного алгоритма реализована на языке Fortran (стандарт Fortran 90).

Для изучения возможностей и ограничений применения разработанного алгоритма расчёта водосборной площади, особенностей распределения водосборной площади, рассчитываемого с его помощью, был выполнен расчёт водосборной площади по ЦМР высокого, среднего и низкого пространственного разрешения, представляющих реальную местность. Одновременно для сравнения на основе тех же ЦМР был выполнен расчёт водосборной площади с использованием алгоритмов определения направлений стока, реализованных в современных

программных средствах ГИС. В главе делается вывод, что разработанный алгоритм — FLBA — позволяет определять водосборную площадь и другие морфометрические величины, вычисляемые аналогичным способом, опираясь на построение линий тока по поверхности, представленной непрерывной функцией. Такой способ моделирования движения воды оказался более достоверен по сравнению с принятыми в практике геоинформационного анализа подходами, основанными на перераспределении потока между соседними ячейками ЦМР. Тестирование FLBA выполнено на моделях различного пространственного разрешения.

Анализ полученных результатов выявил, что на модели высокого и (в меньшей степени) среднего пространственного разрешения, причём с уменьшением разрешения, сглаживаются различия между результатом расчёта, получаемым с помощью FLBA и альтернативными подходами, а для обработки моделей низкого разрешения использование FLBA требует применения другого метода интегрирования или способа вычисления градиента.

В **третьей главе** автор сосредотачивает свои исследования на совершенствовании алгоритма заполнения замкнутых понижений путём интерполяции высот вдоль ломаных линий. Он разделяет алгоритм заполнения замкнутых понижений на следующие этапы: поиск и идентификация локальных понижений; построение дерева оптимальных путей в пределах локальных понижений; интерполяция и экстраполяция высот; отладочные процедуры.

Особенностью предложенного автором алгоритма заполнения замкнутых понижений ЦМР является развитие широко распространённого подхода «приоритетного заполнения» (PriorityFlood), но в отличии от него последовательно применяются процедуры идентификации понижений, построения ломаных линий специальной формы, интерполяции и экстраполяции высот, что не изменяет значения высот за пределами замкнутых понижений и позволяет сохранить особенности поля высот внутри них.

Анализ результатов работы алгоритма был проведён на ЦМР высокого, среднего и низкого пространственного разрешения. Оценка выполнялась путём изучения результатов гидрологического моделирования (расчёта морфометрических величин и построения пространственных объектов) по ЦМР, приведённых к гидрологически корректному виду с помощью различных алгоритмов.

Делается вывод, что для ЦМР высокого и среднего разрешения предлагаемый алгоритм позволяет добиться заметного улучшения достоверности гидрологического моделирования, что видно из сравнения распределений водосборной площади, полученных по скорректированным моделям. На ЦМР низкого разрешения результат его работы сравним с результатом гидрологической коррекции путём разрушения границ понижений и позволяет получить географически достоверный результат последующего гидрологического моделирования: положения тальвегов, определённые по скорректированным ЦМР, совпадают с реальными

положениями водотоков. Альтернативные алгоритмы заполнения понижений, предлагаемые в современных программных средствах ГИС, не достигают необходимого результата.

**Четвертая глава** посвящена созданию методике пространственно-высотного согласования ЦМР с базовыми пространственными объектами, представляющими гидрографическую сеть (реки, озёра, водохранилища). Целевое назначение методики — подготовка ЦМР низкого пространственного разрешения для анализа и картографирования в мелком масштабе. Она включает в себя алгоритм снижения высот ячеек, соответствующих гидрографической сети, создание искусственного края ЦМР и устранение замкнутых локальных понижений.

Предложенной методикой автор произвел расчет границ бассейнов крупных рек (всего 1285) и выполнил оценку достоверности путём визуального сопоставления рассчитанных границ с изображением рельефа и гидрографической сети. По результатам визуального анализа было установлено, что 93,9 % полученных границ бассейнов (1209 объектов) рассчитаны без заметных ошибок согласования. Остальные границы были скорректированы вручную, и в половине случаев изменение площади после редактирования не превысило 5 %, что соответствует традиционной вероятности получить ошибку вычисления.

Сравнение площадей водосборных бассейнов с данными Государственного водного реестра показывает более значительное расхождение, чем визуальный анализ. Однако для большинства проанализированных пространственных объектов, представляющих границы бассейнов, разность площади не также не превышает 5 %, а среди остальных объектов несоответствие может быть объяснено различной детальностью и неточностями в исходных данных.

**К работе имеется несколько замечаний и вопросов:**

1. В работе не уделено внимание соотношению линейных размеров растрового представления данных (ЦМР) (размер растр оказывает существенное влияние на вычислении морфометрических и гидрографических характеристик рек и их бассейнов) с традиционным масштабным рядом.
2. Не уделено внимание качеству восстановления гидрографической сети для речных бассейнов, расположенных в разных физико-географических условиях (горная, равнинная части) и, как следствие, разной степенью меандрирования (вычисление различных видов коэффициентов извилистости водотока).
3. К сожалению автор остановился только на оценке восстановленной длины водотока и площади водосбора и не уделил внимание вычислению морфометрических характеристик водосборов, основанных на значениях расчлененности рельефа.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М. В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 25.00.33 – «Картография» (по географическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1–2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова, а также оформлена согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Энтин А.Л. заслуживает присуждения ученой степени кандидата географических наук по специальности 25.00.33 – «Картография» (по географическим наукам).

Официальный оппонент:

Доктор географических наук, профессор, зав. кафедрой картографии и геоинформатики географического факультета ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

ПЬЯНКОВ Сергей Васильевич

20.11.2019

Контактные данные:

тел.: +7(912)7869365, e-mail: pyankovsv@gmail.com

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 25.00.36 – «Геоэкология», профессор по специальности 25.00.33 – «Картография».

Адрес места работы:

614990, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15, ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», географический факультет.

Тел.: +7(342)2396435; e-mail: info@psu.ru

Подпись сотрудника ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» Пьянкова С.В. удостоверяю:

Ученый секретарь Е.П. Антропова