

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук Андрея Львовича Энтина на тему «Методы повышения достоверности цифровых моделей рельефа для гидрологического моделирования и картографирования»

В диссертации А.Л. Энтина представлены результаты исследования, нацеленного на разработку новых методов повышения достоверности цифровых моделей рельефа (ЦМР) и одновременно некоторой модернизации существующих в геоморфометрии приемов в аспекте их использования для гидрологического моделирования и картографирования. Новизна в разработке новых методов достигается путем совершенствования расчетов направлений стока на ЦМР, гидрологически корректных алгоритмов определения площади водосборов и алгоритма заполнения замкнутых понижений (локальных впадин). Кроме того, решается задача коррекции ЦМР низкого пространственного разрешения, т.е. при мелкомасштабном картографировании, для расчёта границ речных бассейнов.

Исходный материал диссертации представлен цифровыми моделями рельефа разного пространственного разрешения – в основном общедоступными ЦМР (GMTED2010, SRTM), а также высокоточной ЦМР по данным воздушного лазерного сканирования. Линейка из ЦМР низкого, среднего и высокого (сверхвысокого) разрешения позволяет выполнить тестирование авторских алгоритмов с соблюдением экспериментальной корректности.

Диссертация объемом 106 с. состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы (141 наименование, в том числе 111 иностранных источников). Содержит 63 рисунка и 6 таблиц. Содержание диссертации и представленные разработки автора вполне соответствуют теме исследования и ее цели. Работа прошла апробацию в виде соответствующих публикаций автора (всего 11, из которых 3 из списка WoS и Scopus) и выступлений на конференциях разного уровня.

Методические предпосылки диссертационного исследования очевидны. Работа А.Л. Энтина вносит определенный вклад в многообразные исследования и результаты анализа ЦМР в сфере цифрового моделирования поверхностей с гидрологических позиций. На практике в геоинформационном анализе на основе ЦМР в подавляющем большинстве случаев встроенные инструменты тех или иных программных средств (SAGA, ArcGIS, GRASS, ILWIS, QGIS и др.) используются не критически, путем «нажатия кнопки», без учета особенностей способов расчета. Результаты расчетов по умолчанию далеко не всегда способны адекватно отразить

гидрографическую ситуацию. Так, при построении топографических планов нередко случаи несовпадения расчетных линий тальвегов / водотоков по данным ЦМР с их действительным положением. Особенно известна проблема недостоверности расчёта направлений стока на плоских равнинных поверхностях, причем независимо от пространственного разрешения модели. В свою очередь эта недостоверность влечет за собой неточность в оценках других гидрографических характеристик.

Кроме того, как отмечает диссертант, с развитием технологий съемки повышение детальности моделей земной поверхности (уже менее 1 м) на большие площади стимулировало в свою очередь буквально в последние годы развитие новых комплексных алгоритмов, предназначенных для ЦМР высокого и сверхвысокого разрешения. Последние уже стали стандартом в инженерных изысканиях. Пространственная детализация – один из трендов современной географии, опирающийся на технологии дистанционных и наземных измерений. Понятно, что в гидрографии и гидрологии вслед за детализацией ЦМР геометрия линий тальвегов и водоразделов должна приближаться к своим физическим аналогам; впрочем, это относится к любым пространственным объектам и их характеристикам.

Следует отметить, что анализ ЦМР имеет понятные прикладные аспекты. Причем не только при создании общегеографических и тематических карт, но и в случае построения топографических планов со слоем гидрографической сети (в том числе сети постоянных и временных водотоков), а также в инженерных и прочих изысканиях с последующими оценками перемещения вещества, линейной и площадной эрозии и т.п.

В **первой главе** диссертации с необходимой подробностью описаны, вкупе с раскрытием базовых понятий, основные средства создания и применения ЦМР в географических исследованиях и картографировании. В частности, описаны распространенные доступные глобальные и региональные ЦМР, включая ЦМР на территорию России, методы расчета морфометрических показателей, связанных со стоком, а также используемые в геоморфометрической практике способы коррекции ЦМР. Повышенное внимание в этой главе уделено существующим алгоритмам определения направлений стока, а также методикам расчета картометрических и морфометрических показателей (положение линий водоразделов и сети тальвегов, общая и удельная водосборная площадь, топографический индекс и др.), имеющим отношение к предмету исследования. Среди рассматриваемых алгоритмов –

установление и устранение на ЦМР замкнутых локальных понижений в качестве артефактов, без чего невозможно добиться гидрологически корректной модели поверхности.

Выполненный в первой главе обзор дает достаточное представление об имеющихся подходах при моделировании поверхностного стока с расчетами направлений стока на ЦМР и наборе алгоритмов для решения стандартных задач гидрологической коррекции ЦМР. Полезными выглядят выполненные в главе обобщения и классификации алгоритмов, описания свойств – преимуществ и особенностей этих алгоритмов, их реализация в современных программных средствах ГИС.

В последующих главах диссертации представлены собственно методические разработки автора.

Методике расчета водосборной площади на основе линий тока посвящена **вторая глава**. Расчет направлений стока предваряет расчет водосборной площади и локализацию водоразделов, в этом его важность. Реализованные в ряде программ алгоритмы (например, D8), действительно приводят к сомнительной геометрии и положению полученных линий – образованию сети параллельных, зачастую очень близко расположенных сегментов, изгибающихся под углами, кратными 45° в соответствии с растровой структурой ЦМР. Диссертант предлагает собственный алгоритм построения линий тока, названный им FLBA (FlowLine-Based Algorithm), в основе которого – представление модели физической поверхности в виде непрерывной дифференцируемой функции. Линия тока в этом случае определяется решением задачи Коши для системы дифференциальных уравнений первого порядка. Для обеспечения непрерывности интерполяции значений высот в ячейках ЦМР выбран один из методов Эйлера. Критерий выбора метода – соотношение получаемого качества результата и затрат на вычисления.

Апробация авторского алгоритма при расчетах водосборной площади выполнена на ЦМР разного пространственного разрешения; особенно детально сделан анализ на ЦМР с разрешением 1 м, т.е. на уровне микрорельефа. Для этого уровня автором установлено, что «значения водосборной площади, получаемые при помощи FLBA, имеют тенденцию концентрироваться вдоль отдельных, относительно узких (1-2 ячейки шириной) линий» (с. 51). Подобный эффект отмечен и при использовании алгоритмов D8, KRA и DEMON. Для ЦМР среднего и низкого разрешения наблюдается нивелирование различий между результатом расчёта, получаемым с помощью FLBA, и альтернативными подходами – алгоритмами KRA,

DEMON, MFD и др. По справедливому суждению диссертанта для моделей низкого разрешения использование FLBA требует применения другого метода интегрирования (неявный метод Эйлера) или способа вычисления градиента.

В **третьей главе** анализируется проблема замкнутых понижений, представлен разработан алгоритм заполнения локальных замкнутых понижений и показаны результаты реализации алгоритма. Именно процедура заполнения выявленных локальных понижений-артефактов посредством увеличения внутри них высот делает ЦМР гидрологически корректной. Известные алгоритмы (Fill, Fill Sinks) устраняют замкнутые понижения путем образования в этом месте поверхности, что действительно может привести к изменению высот в ячейках ЦМР в окрестностях понижения. Оригинальный алгоритм, разработанный диссертантом, предусматривает построение дерева путей на ориентированном графе с интерполяцией / экстраполяцией высот в границах понижения. В итоге, и это очевидное преимущество разработки, формируется локальная наклонная поверхность вдоль линий направления стока с сохранением общей формы поверхности. Показано, что на ЦМР высокого и среднего разрешения предлагаемый алгоритм позволяет добиться улучшения достоверности гидрологического моделирования, т.е. близости совпадения с существующей сетью водотоков.

Заключительная **четвертая глава** посвящена методике коррекции ЦМР низкого пространственного разрешения для расчета границ речных бассейнов с согласованием модели рельефа и гидрографической сети. Поскольку объекты гидрографии на картах мелкого масштаба подлежат генерализации (смещение, отбор, сглаживание, утрирование и др.) с изменениями геометрии, может возникнуть пространственная и высотная несогласованность между используемой ЦМР и векторными объектами (реки, водоемы) на стандартной географической основе. Методика согласования, по сути – одностороннее преобразование ЦМР, предполагает оверлей пространственных объектов гидрографической сети с последующим снижением высот ЦМР в ячейках, соответствующих этой гидрографической сети, а также создание искусственных границ поля высот внутри бессточных областей. Результаты сравнения рассчитанных площадей бассейнов с данными Государственного водного реестра показали, что для большинства проанализированных пространственных объектов разность площади не превышает 5 %, что можно считать приемлемой ошибкой метода при использовании ЦМР с разрешением около 0,5 км.

Касательно **общей оценки** стиля изложения и оформления работы: диссертация написана хорошим слогом, качественно и полно проиллюстрирована и оформлена согласно необходимым техническим требованиям, предъявляемым к научным работам, включая, в том числе, ссылки на авторов и источники заимствования материалов. Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации.

В заключение отзыва приведу **замечания и пожелания**.

На с. 19 в названии нижнего абзаца вместо «Реализация алгоритмов определения стока...» следует писать «...алгоритмов определения направлений стока...».

Следовало бы указать источник данных воздушного лазерного сканирования (ВЛС), а также характер обработки полученных исходных данных ВЛС для построения и последующих манипуляций с ЦМР высокого пространственного разрешения (1 м) (с. 22, 51, 70 диссертации). Качество ЦМР по данным ВЛС зависит как от самой съемки, так и от обработки полученных данных.

Вместо тавтологичного словосочетания «модель поверхности рельефа» (с. 47) следует ограничиться «моделью поверхности».

На рисунках 2.5, 2.7 и 2.9 необходимо дать масштабную линейку.

Выражение «ЦМР была маскирована» (с. 81) лучше заменить на «к ЦМР применена маска».

На с. 83 и 86 (рис. 4.5) диссертации и с. 18 и 19 автореферата в выражении «...углубление русел рек и водоёмов...» слово «углубление» надо хотя бы взять в кавычки, поскольку речь идет о цифровой модели русел и водоемов.

Относительно авторского алгоритма FLBA. Из свойств алгоритма понятно, что он имеет некоторые ограничения в применении, на что указывает сам автор (с. 13 автореферата). Следовало, на мой взгляд, конкретизировать эти ограничения.

Наконец, выражу пожелание: довести авторские методы построения линий тока (с учетом формализованных ограничений) и заполнения замкнутых понижений до работающих инструментов в составе ГИС (SAGA и др.).

Приведенные замечания, имеющие преимущественно редакторский характер, не умаляют значимости диссертационного исследования. В России в настоящее время мало специалистов, имеющих опыт оригинальных разработок в активно развивающейся сфере геоморфометрии.

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного

жание диссертации соответствует паспорту специальности 25.00.33 – «Картография», 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 Андрей Львович заслуживает присуждения ученой степени кандидата географических наук по специальности 25.00.33 – «Картография».

Официальный оппонент:

доктор географических наук

зав. кафедрой геоинформатики

Института географии, геологии, туризма и сервиса

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет»

ПОГОРЕЛОВ Анатолий Валерьевич



09.12.2019

Дата подписания

Контактные данные:

тел.: 7(905)4084744, e-mail: pogorelov_av@bk.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

25.00.23 – Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов

Адрес места работы:

350040 г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет»

Тел.: (861)2199580; e-mail: science@kubsu.ru

Подпись сотрудника ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет»

А.В. Погорелова удостоверяю:

