

УДК 004.942: 556.507

На правах рукописи



00306846 1

Постнова Ирина Святославовна

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Ирина Постнова'.

**РАЗРАБОТКА ГИС- МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА ДЛЯ
ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ**

25.00.35 – геоинформатика

Автореферат

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Барнаул – 2007

Работа выполнена в Институте водных и экологических проблем СО РАН

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Яковченко Спартак Геннадьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Цхай Александр Андреевич

кандидат географических наук
Крупочкин Евгений Петрович

Ведущая организация: ФГУП "Российский научно-
исследовательский институт
комплексного использования и охраны
водных ресурсов", г. Екатеринбург

Защита диссертации состоится "27" апреля 2007 года в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.005.04 в ГОУ ВПО "Алтайский государственный университет" по адресу: 656049, г. Барнаул, пр. Ленина, 61, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Алтайского государственного университета по адресу: 656049, г. Барнаул, пр. Ленина, 61.

Автореферат разослан "26" марта 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор



С.А. Безносюк

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и состояние исследований

Рельеф, как один из компонентов природных комплексов, играет важную роль в формировании гидрологических процессов. Появившиеся в конце 80-х годов XX века геоинформационные системы дают возможность представления рельефа в форме цифровых моделей рельефа (ЦМР) для решения различных задач, в том числе гидрологических расчетов. Целесообразно применение ЦМР для проведения структурного деления территории на используемые в гидрологии элементы и расчетов усредненных морфометрических, а также физико-географических характеристик этих элементов. Высокую степень востребованности имеют вычисления с помощью ЦМР характеристик зон затопления. основополагающими в этих направлениях явились работы ряда ведущих зарубежных специалистов в области геоинформационных систем и гидрологии Hutchinson M.F., Maidment D.R., Olivera F., Wang X. и др. Разработанные ими алгоритмы построения и применения ЦМР, их реализация в форме независимых приложений широко используются в мире.

Однако прямое применение существующих зарубежных подходов в российских условиях затруднительно. С одной стороны, имеет место проблема усложненного доступа к существующим цифровым картографическим данным необходимого масштаба и их отсутствия для ряда территорий. С другой стороны, специфика методик, применяемых российскими гидрологами, требует иных структуры и объема данных. В связи с этим необходима разработка подходов к построению и использованию ГИС-моделей рельефа для гидрологических расчетов в условиях разнородности и неполноты исходной информации. Под ГИС-моделями рельефа понимаются: ЦМР; продольный профиль русла (ППР); "псевдорельеф" для расчета гидрологических характеристик при отсутствии данных крупного масштаба; упрощенная триангуляционная модель рельефа (TIN) для расчета коэффициента вертикальной расчлененности водосбора. Создание таких моделей должно базироваться на потенциале современных ГИС и использовать, по мере возможности, существующие методические, информационные и программные решения.

Таким образом, разработка ГИС-моделей рельефа для гидрологических приложений и алгоритмов их использования в гидрологических расчетах является актуальной проблемой, имеющей большое научное и практическое значение.

Целью работы является разработка гидрологически согласованных ГИС-моделей рельефа и на их основе способов определения характеристик территорий для гидрологических расчетов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- создание гидрологически согласованных ГИС-моделей рельефа, в том числе в условиях неполноты исходной информации;
- уточнение способов расчета характеристик и структурных элементов водосборной территории средствами ГИС;
- разработка методики оценки точности характеристик, используемых в

- гидрологических расчетах;
- создание ГИС-приложений для расчета уровней воды в речной сети и зон затопления при паводках различной степени обеспеченности.

Объект диссертационного исследования – информационное обеспечение гидрологических расчетов для бассейнов рек.

Предметом исследования являются цифровые модели рельефа и алгоритмы вычислений гидрологических характеристик территории.

Методы исследований. При решении задачи создания гидрологически согласованных ГИС-моделей рельефа, структуризации местности и поэлементного расчета ее гидрологических характеристик, оценки зависимостей рассчитываемых характеристик от свойств исходных данных применялись математическое моделирование с применением методов: пространственного анализа, математической статистики и теории вероятности, компьютерной обработки данных. Предлагаемые алгоритмы расчетов, а так же созданные по ним ГИС-приложения, реализованы методами картографической алгебры.

Научная новизна:

- разработаны технологии создания гидрологически согласованных ГИС-моделей рельефа, путем использования при задании высот продольного профиля русла расчетных значений, обеспечивающих реальное направление потоков и корректный спад высоты;
- для проведения гидрологических расчетов, в отсутствие крупномасштабных карт, обоснован способ использования псевдорельефа, полученного при дополнении карт мелкого масштаба (или космоснимков) уточненной информацией по гидрографии и продольному профилю русел водотоков;
- обоснованы алгоритмы оценки точности расчета гидрологических характеристик территории в зависимости от масштаба исходного картографического материала и величины дискретизации ЦМР;
- автоматизирован метод превышения, основанный на предположении о равенстве уклонов водной поверхности в межень и при подъеме уровня воды, что позволяет выполнять в ГИС расчет затопления паводком малой обеспеченности.

На защиту выносятся:

- способы автоматизированного создания гидрологически согласованных ГИС-моделей рельефа, основанные на интеграции и обработке разнородных цифровых картографических данных;
- приемы автоматизированного расчета в ГИС основных гидрологических характеристик территории, в том числе горизонтальной и вертикальной расчлененности, среднего уклона речной сети, длины склонов;
- способы оценки точности гидрологических характеристик, рассчитанных по ЦМР
- способы расчета затопления паводком различной обеспеченности при минимальном объеме исходных данных по территории.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

- предложены подходы к интеграции разномасштабных и разнородных

векторных топографических данных и данных дистанционного зондирования (ДДЗ) рельефа, позволяющие проводить необходимые гидрологические расчеты, в том числе в условиях дефицита крупномасштабных цифровых данных, характеризующих рельеф;

- разработаны практические рекомендации по созданию ЦМР для основных типов гидрологических расчетов;
- предложены подходы для оценки необходимого масштаба и дискретности ЦМР для проведения расчетов характеристик территории;
- разработаны специализированные программные средства, доступные пользователю-гидрологу, имеющему подготовку в области ГИС: а) "SnipCalc" – для автоматизированного расчета параметров водосборов, б) "Реестр водных объектов" и в) ГИС-приложения, ориентированные на решение задачи оценки зон затопления паводком при различных объемах исходных данных.

Результаты работы применяются и могут быть использованы при планировании и проведении мероприятий по изучению, рациональному использованию, восстановлению и охране вод, геоэкологическом и гидрологическом обосновании проектов и программ, гидрологических расчетах для строительного проектирования. Программные продукты используются в ИВЭП СО РАН, проектном институте ОАО "ГорноАлтайскавтодор", территориальном Фонде геологической информации по Республике Алтай (г. Горно-Алтайск), Отделе водных ресурсов по Алтайскому краю, Кемеровской области Верхне-Обского БВУ, ОАО "Алтайводпроект" (г. Барнаул) при проведении расчетов максимального стока и оценке зон затопления и ведении реестра водных объектов.

Базовым геоинформационным программным обеспечением (ПО), в рамках которого выполнялась работа, является ПО фирмы ESRI: © ArcView 3.2 с расширениями Spatial Analyst и 3D Analyst, © Arc/Info 7.1.2. с модулями TIN и GRID, Topogrid.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных научных конференциях: ENVIROMIS 2002 "Измерения, моделирование и информационные системы как средства снижения загрязнений на городском и региональном уровне" (Томск, 2002), "ГИС для устойчивого развития территорий: Intercarto 8" (Санкт-Петербург, 2002), "ГИС для устойчивого развития территорий: Intercarto 10" (Владивосток-Чаньчунь, 2004), Международная конференция и школа молодых ученых по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде Cites – 2005 (Новосибирск, 2005), ENVIROMIS 2006 "Международной конференции по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды"; а так же на IX Всероссийском гидрологическом съезде (Санкт-Петербург, 2004), Научном конгрессе ГЕО-Сибирь-2005 (Новосибирск, 2005), Научной конференции "Фундаментальные проблемы изучения и использования воды и водных ресурсов" (Иркутск, 2005).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 4 в рецензируемых журналах, 1 монография (в соавторстве).

Объем и содержание работы. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Работа изложена на 141 стр., иллюстрирована 33 рисунками и 15 таблицами. Список литературы содержит 106 наименования, в том числе 51 на иностранном языке.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность работы в данном научном направлении, формулируются цель и задачи исследования, приводится краткое содержание работы по главам.

В первой главе "Цифровые модели рельефа для гидрологических расчетов" изложены алгоритмы создания ЦМР для гидрологических расчетов. В настоящее время в ГИС используется два основных способа представления данных по рельефу: растровая модель данных (GRID) и TIN. В случае, когда источником информации для построения рельефа являются топографические карты, основными данными при создании как растровой ЦМР, так и TIN, являются точки высот и изолинии рельефа. Стандартные процедуры построения ЦМР реализованы, например, в модулях Spatial Analyst (GRID) и 3D Analyst (TIN) ArcView, модулях GRID и TIN Arc/Info, в программном комплексе MAG, созданном в МГУ. Также применяется ряд специальных программ для интерполяции и анализа геополей, например, SurfMapper (ТГТУ). Вопросы построения ЦМР для решения гидрологических задач посвящен ряд работ, в которых предложены специализированные алгоритмы, реализованные, например, в расширениях Hydrologing Modeling (Sample), Hydrologing Modeling 1.1 (Sample) ArcView, модуле GRID Arc/Info. Лучшие результаты в этом направлении дает программное средство Arc/Info TopoGrid (Michael Hutchinson, 1989), позволяющее использовать при интерполяции дополнительные данные о рельефе и гидрографии. Однако, рассчитанные этими программными средствами ЦМР не всегда отвечают требованиям, предъявляемым при гидрологических вычислениях.

Построенные для решения гидрологических задач ЦМР, прежде всего, должны удовлетворять дополнительному требованию гидрологической согласованности, выполнение которого гарантирует корректность расчета линий водоразделов и тальвегов. Гидрологическая согласованность ЦМР базируется на следующих основных принципах. Во-первых, в ЦМР должны отсутствовать фиктивные точки стока, под которыми понимают точки, высота которых меньше, чем в соседних. Встроенные в стандартные ГИС алгоритмы позволяют решить эту проблему во всех случаях, за исключением бессточных областей. Во-вторых, дренаж, проведенный по ЦМР, должен совпадать с соответствующими отрезками исходной речной сети. В растровой модели рельефа понятие "дренаж" включает некоторую связанную совокупность ячеек, представляющую собой "линии наискорейшего спуска". Ширина дренажа равна одной ячейке.

При использовании только стандартных ДДЗ рельефа или данных, снимаемых с цифровых топографических карт местности (ЦКМ), расчет такой ЦМР не всегда возможен в силу погрешностей съемки (ДДЗ) или "разреженности" исходных данных по рельефу (ЦКМ). В процедуре построения ЦМР необходимо учитывать

данные по гидрографии. Существующие способы повышения согласованности дренажа с речными потоками (способ "вычитания речной сети", "принудительный алгоритм", реализованный в модуле Arc/Info TopoGrid), в целом не решают проблему.

Основная идея предложенного в работе подхода повышения согласованности состоит во включении в исходные данные для построения ЦМР дополнительных точек, принадлежащих речной сети (продольного профиля русла - ППР). Точки ППР рассчитываются по растровой ЦМР, построенной только по точкам пересечения горизонталей с векторной речной сетью и урезам воды (рис.1).

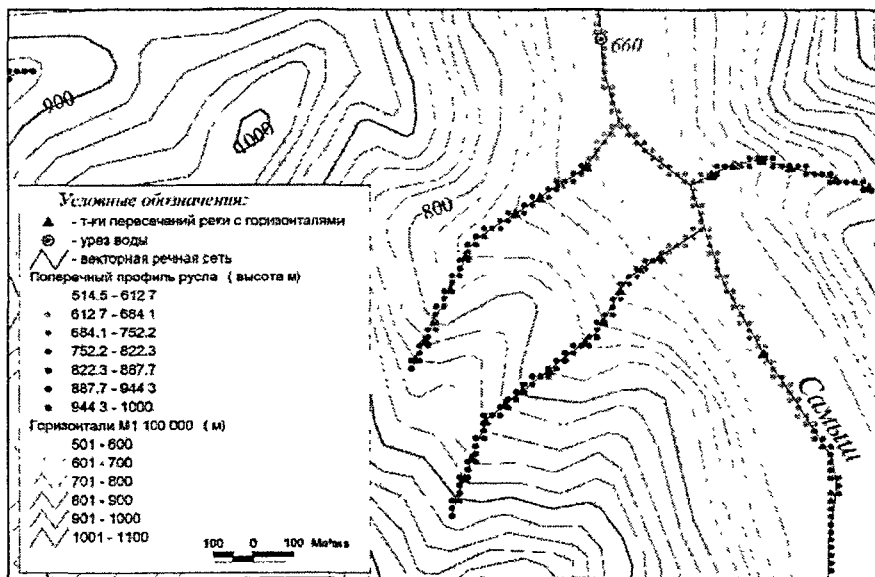


Рис. 1. Пример построения продольного профиля русла (р. Самыш, бассейн р. Бия, Алтай-Саянская горная система)

Поскольку плотность точек пересечения речной сети с горизонталями у притоков всегда больше, чем у главного русла (вследствие большего уклона), при всех интерполяционных алгоритмах в ячейках, через которые проходят потоковые линии рек больше первого порядка, т.е. начиная с ручейковой сети, возникает неверный результат расчета высоты. С целью исключения таких ошибок проводится раздельная интерполяция высот для рек разного порядка. В начале растрованная речная сеть с использованием операции StreamLink разбивается на притоки, после чего им присваивается соответствующий порядок с применением операции StreamOrder. Далее выполняется цикл по порядкам, начиная с самого высокого (порядка главной реки), в ходе которого строится ЦМР. Рассчитанные в ходе каждого цикла высоты для рек соответствующего порядка добавляются в число точек, используемых при интерполяции высот рек более низкого порядка. При таком подходе могут появляться плоские участки

только на отрезках дуг у истоков, в других местах наблюдается корректное понижение высоты дренажа вдоль направления потоков речной сети. Чтобы исключить плоские участки, предлагается задавать высоту наивысшей точки отдельной дуги каждого порядка из условия сохранения среднего уклона данного потока. Использование полученных таким способом точек ППР при построении ЦМР гарантирует гидрологическую согласованность и корректное падение высоты вдоль дренажных потоков.

В процессе вычисления водосборного деления и других гидрологических характеристик по ЦМР необходим расчет дренажных потоков. Известные в настоящее время способы расчета дренажа по ЦМР средствами ГИС требуют либо наличия покрытия точек истоков, либо задания минимальной водосборной площади $S_{кр}$, характеризующей речную сеть на всей территории, что возможно, только при условии однородности гидрологических свойств территории. В работе предложен способ расчета дренажа для отдельных бассейнов, использующий информацию по фактическим длинам речной сети в них. При этом способе минимальная водосборная площадь $S_{кр}$ и дренаж определяются для каждого бассейна индивидуально, исходя из равенства длин расчетной и реальной речной сети.

Помимо гидрологической согласованности для решения ряда гидрологических задач (прежде всего, оценки затопления территории) ЦМР должна отражать особенности поверхности пойм, которые обозначены на топографической карте в виде линий (обрывы и дамбы). В ГИС-инструментарии заложена возможность в процессе интерполяции рассматривать обрывы как структурные линии типа "BARRIER", но при этом не учитывается перепад высот, указанный для таких объектов на карте. В работе предложено в процесс интерполяции включать добавочные точки по обе стороны структурной линии, учитывающие информацию о перепаде высоты. Получены формулы для вычисления высоты в этих точках, рассчитанные из условия минимизации средней кривизны рельефа и сохранения первой производной вдоль потоковых линий вне обрыва. Описан способ их построения средствами ГИС.

На рисунке 2 для сравнения приведены схемы зон затопления разных уровней превышения, построенные с применением возможностей ГИС ArcInfo и с использованием предложенного подхода учета обрывов. [Dem] и [DemAI] – ЦМР, полученные в ArcInfo триангуляционным способом, без учета и с учетом обрыва в качестве барьера соответственно, [DemEnd] – ЦМР, построенная по предлагаемой выше технологии. По модели рельефа, построенной с использованием предложенного алгоритма, для уровня превышения 6.1 м территория за кромкой обрыва не затопляется, а при 7.5 м граница затопления участка выходит за линии обрыва, в то время как по ЦМР с применением функции BARRIER ArcInfo вода не затопляет эту территорию. Таким образом, использование предложенного алгоритма позволяет более точно оценить контур зоны затопления за счет лучшего соответствия ЦМР исходным картографическим данным.

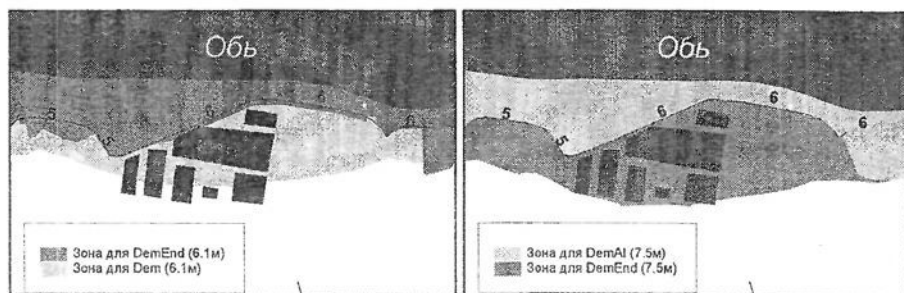


Рис. 2. Сравнение зон затопления, построенных с применением возможностей стандартных ГИС и использованием предложенного подхода

В таблице 1 обобщены возможности стандартных подходов к созданию ЦМР и предложены их модификации с использованием разнотипных данных.

Таблица 1. Основные подходы к созданию гидрологически согласованных ЦМР и предложенные в работе их модификации.

Подход /используемое ПО	Описание базового подхода)	Дополнительные слои	Предлагаемая модификация
1 "вычитание" речной сети/ ArcView Spatyal Analyst	а) уменьшение высоты ЦМР на речной сети б) заливка депрессий	1) речная сеть (линия)	1) нет
2. учет гидрографии с помощью TOPOGRID /ArcInfo	использование непрерывной речной сети (линии) с корректными направлениями	1) речная сеть (линия) 2) озера с инф. о высотах и острова 3) речная сеть (область), 4) бессточные озера	1) использование крупномасштабной речной сети 2) расчет отметок высот на территории озера, затем расчет ЦМР с использованием данных отметок 3) расчет продольного профиля реки (ППР) интерполяцией по точкам 4) вывод областей бессточных озера за границу заливки фиктивных депрессий
3. учет гидрографии в TIN/Arcview, ArInfo	а) включение контуров речной сети без учета высоты б) включение контуров обрывов без учета перепада высот в) озера с постоянной высотой	1) озера с информацией о высотах 2) речная сеть (линия, область), ППР 3) экстрапол. высот внутри замкнутых горизонталей	1) создание TIN ППР 2) создание регулярного покрытия точек в плоской области и присвоение ему высот на основе информации о высоте ближайшей горизонтали и расстояния до неё
4. учет линий излома / ArcView Spatyal Analyst	использование контуров обрывов без учета перепада высот (метод обратных взвешенных расстояний)	1) учет обрывов и овражной сети 2) учет искусственных упрессий (насыпи, дамбы)	1) к основным источникам данных по рельефу добавляются дополнительные точки по обе стороны от линии излома (обрыва), высоты которых рассчитываются из условия минимальной кривизны ЦМР вне обрыва 2) вдоль линий упрессий к высоте ЦМР, рассчитанной без учета упрессии, добавляется высота упрессии

Выбор метода создания ЦМР определяется: а) целью построения ЦМР, б) масштабом исходных данных, в) географическими особенностями территории. В таблице 2 приведены рекомендации по использованию способа создания ЦМР для наиболее часто встречающихся гидрологических приложений.

Таблица 2. Сводная таблица способов создания ЦМР в зависимости от целей

Цель создания ЦМР	Масштаб исходных данных	Оптимальный способ	Учет водных поверхностей (озера)	Учет водных поверхностей с уклоном (речная сеть)	Вычитание речной сети	"Заливка" ЦМР	Учет линий излома рельефа и насыпей	№ метода (см табл.1)
визуализация	1:200 000 и мельче	триангуляционный или Topogrid (без учета речной сети) в зависимости от террасированности	-	-	-	+	-	
	1:100 000 и крупнее	триангуляционный или Topogrid (без учета речной сети) в зависимости от террасированности	+	-	-	+	+	2, 4
расчет водораздельного деления, частных водосборов и зон добегания	1:500 000 и мельче	Topogrid (с учетом речной сети)	+	-	+	+	-	1,2
	1:200 000 и крупнее	триангуляционный, конечная модель – растровая	+	-	+	+	-	1,2,3
расчет коэффициентов расчлененности рельефа, морфометрических параметров территории	1:500 000 и крупнее	Topogrid (с учетом речной сети)	-	-	-	-	-	
	1:200 000	триангуляционный, конечная модель – растровая; Topogrid (без учета речной сети)	+	+	+/-	-	-	1,2,3
	1:100 000							
	1:50 000 и крупнее	триангуляционный, конечная модель – растровая; Topogrid (без учета речной сети)	+	+	+/-	-	+	1,2,3,4
расчет зон затопления	1:50 000 и крупнее	триангуляционный, конечная модель – растровая	+	+	-	-	+	2,3,4

При расчетах гидрологических характеристик территории предъявляются строгие требования к масштабу исходного картографического материала. Так, например, для водосборов горных сильнорасчлененных территорий, площадью от 10 до 50 км², масштаб используемых цифровых карт должен быть крупнее 1:50 000 (Пособие по использованию расчетных гидрологических характеристик, 1984).

В условиях отсутствия крупномасштабных цифровых карт на исследуемую территорию предлагается создавать псевдорельеф крупного масштаба с

использованием мелкомасштабной гипсометрии и ППР крупного масштаба. Основная идея построения псевдорельефа состоит в том, что к полю высот, рассчитываемому по мелкомасштабной карте, добавляется поправка, использующая данные с крупномасштабной карты. К псевдорельефу предъявляется ряд требований. Во-первых, получаемые на его основе дренаж и контуры водоразделов должны быть близки к рассчитываемым с помощью рельефа крупного масштаба. Во-вторых, псевдорельеф должен иметь не только топологически корректное положение дренажа, но и корректное понижение высоты вдоль него. В-третьих, псевдорельеф должен иметь близкие к рассчитанным по рельефу крупного масштаба морфометрические показатели, характеризующие склоновую часть территории, в частности, средние уклоны, склоновую длину и распределение зон добегания. Кроме того, отклонение новой ЦМР от исходной мелкомасштабной не должно превышать допустимую для этого масштаба ошибку высот. Для расчета высоты псевдорельефа предлагается использовать формулу:

$$H = H_M + (H_m - H_M + \xi \cdot d_m / l_m) \cdot \exp(-\mu \cdot d_m / l_m), \quad (1)$$

где H_M – ЦМР, построенная по данным мелкого масштаба M ; H_m – ЦМР, построенная по данным ППР крупного масштаба m ; l_m – локально или глобально усредненная склоновая длина, оцениваемая по густоте речной сети, d_m – расстояние от ближайшего контура речной сети или озера крупномасштабной карты. Коэффициент ξ подбирается так, чтобы выполнялось равенство средних значений по высотам $\langle H \rangle = \langle H_M \rangle$. Минимальное значение коэффициента μ вычисляется из условия, что поправка к высоте по модулю не должна превышать максимальной погрешности мелкомасштабной ЦМР по ГОСТ Р 51608-2000. Оптимальное значение μ аппроксимируется функцией от среднего модуля отклонения высот ППР масштаба m от мелкомасштабной ЦМР на речной сети $|dH|_p = \langle |H_m - H_M| \rangle$. Например, для условий горного рельефа бассейна оз. Телецкое получена формула $\mu_{opt} = 1.76 \cdot \ln(112 / |dH|_p)$.

Предложенный способ апробирован для участка бассейна р. Бия в её устьевой области, на выходе из Телецкого озера. В таблице 3 приведены значения характеристик рельефа и псевдорельефа, рассчитанного с использованием ППР масштаба m 1: 50 000 по формуле (1) (максимальных, минимальных, средних, стандартного отклонения), а также отклонения высотного поля $|dH|$ и поля уклонов $|dI|$ от соответствующих величин крупного масштаба. Также приведены оптимальные значения μ , при которых были рассчитаны уточненные ЦМР (следует отметить, что при отклонении μ на величину до 0.2-0.5 значения параметров ЦМР изменяются незначительно). Анализ данных показывает, что учёт речной сети оказывает тем большее влияние на согласование крупномасштабных и мелкомасштабной ЦМР, чем значительнее разница в их масштабах.

Данный способ позволяет получить необходимую точность ЦМР для расчета параметров водосборов с расчлененностью рельефа, близкой к расчлененности ЦМР крупного масштаба для сильнорасчлененных территорий. Эти области, как правило, расположены в горных районах и наименее обеспечены векторными топографическими картами крупного масштаба. Особенностью предлагаемого способа является эффективная коррекция мелкомасштабной ЦМР не только по сети тальвегов, но и водораздельным линиям.

Таблица 3. Пример рассчитанных характеристик по ЦМР разных масштабов, в том числе по псевдорельефу ("п") при уточнении ППР масштаба $m=1:50\ 000$.

Масштаб	H_{max}	H_{min}	H_{cp}	H_{std}	I_{max}	I_{min}	I_{cp}	I_{std}	$ dH $	$ dI $	μ
1:50 000	1900	520	1167.6	242.8	76.47	0.00	19.88	8.95	0	0	-
1:100 000	1900	520	1167.8	243.4	61.98	0.00	18.67	8.91	12.15	4.97	-
1:100 000 "п"	1900	520	1167.9	243.8	59.91	0.00	19.00	8.16	10.61	4.58	3.9
1:200 000	1903	520	1166.4	244.2	69.99	0.00	16.48	9.09	19.16	7.08	-
1:200 000 "п"	1900	520	1166.4	244.7	67.64	0.00	17.93	7.88	15.89	6.08	2.7
1:1 000 000	1800	500	1173.3	246.1	85.05	0.00	8.87	8.38	81.17	12.81	-
1:1 000 000 "п"	1935	520	1172.4	248.9	70.47	0.01	19.04	7.00	29.53	7.17	0.3
SRTM	1893	514	1174.0	240.3	84.68	0.00	18.42	7.61	22.23	5.17	
SRTM "п"	1923	514	1173.6	242.5	84.72	0.04	21.19	8.29	11.19	5.27	4.2

Во второй главе "Использование ЦМР для расчета структурного деления и характеристик территории" рассмотрены алгоритмы выделения из полученной ЦМР структурных и расчетных элементов водосборов с использованием ГИС-инструментария для задач моделирования стока (водосборное деление территории, деление на эквидистанты и высотные зоны). Определены способы вычисления характеристик речного водосбора и его расчетных элементов.

К числу основных структурных и расчетных элементов рельефа относят тальвеги и водоразделы, границы зон постоянной длины добегаания, а в ряде случаев положения вершин, седловин, днищ, подошв и бровок. При их расчете учитывается, что при инверсии рельефа $H \rightarrow -H$ положение структурных линий и точек сохраняется, но происходит их переопределение. Большинство функций по определению водосборного деления по растровой ЦМР (сети тальвегов и гидрографической сети) реализовано в расширении ArcView Spatial Analyst. Проблемы возникают только в случае определения водосборного деления бессточных территорий. В работе предложен и апробирован способ выделения из ЦМР водораздельных линий бессточных областей, расширяющий область применимости средств ГИС для заливки фиктивных депрессий. В ЦМР предлагается заменять ячейки, покрывающие бессточное озеро, ячейками со значениями NoData. Точки стока, граничащие со значениями NoData, не интерпретируются как фиктивные депрессии, следовательно, не удаляются при процедуре заливки Fill. Преимущество данного подхода заключается в том, что он

может использоваться для растровых ЦМР, построенных стандартными методами интерполяции.

В работе рассмотрены способы разделения территории на склоновую и русловую части, определения зон постоянной длины добегания, выделения конечных и транзитных (с наличием транзитного стока) водосборов, лево- и правобережной частей транзитных водосборов с использованием функций ГИС FlowLength, FlowAccumulation RegionGroup, GetStatistics и др.

Использование триангуляционной ЦМР позволяет оценить коэффициенты вертикальной и горизонтальной расчлененности рельефа, являющиеся важными гидрологическими характеристиками территории. Предложен способ расчета горизонтальной расчлененности с использованием функций TIN модуля Arcinfo, учитывающий наличие плоских (flat) участков, создаваемых при триангуляционном представлении элементов рельефа. Для вертикальной расчлененности, не являющейся однозначно определенным параметром, предложен геометрический способ оценки, использующий выделение дуг водоразделов, тальвегов, подошв и бровок. В созданной по ним упрощенной триангуляционной модели рельефа склон представляется набором треугольников (фасеток), у каждого из которых основание лежит на линии бровки или подошвы, а две другие стороны (далее именуемые склоновыми) направлены вдоль склона. Для каждого из склоновых ребер могут быть рассчитаны высоты верхнего и нижнего концов (соответственно Z_{from} и Z_{to} на рисунке 3).

Тогда коэффициент вертикальной расчлененности участка оценивается как:

$$K_v = \frac{\sum [S_i^L + S_i^R] \cdot (Z_{from_i} - Z_{to_i})}{\sum [S_i^L + S_i^R]}, \quad (2)$$



Рис. 3. Схема расположения фасеток и узлов на TIN

где суммирование ведется по всем склоновым ребрам i , а величины S_i^L, S_i^R , соответственно, площади левой и правой фасеток для ребра i . Далее в главе предлагаются способы вычисления характеристик речного водосбора и его расчетных элементов.

Во многих гидрологических расчетах, в частности, при расчетах стока, необходимым шагом является вычисление усредненных гидрографических характеристик элементов структуризации территории водосборов:

- 1) длины и извилистости речной сети;
- 2) площади водосбора и длины водораздельной линии, графиков нарастания водосборной площади и изменения ширины водосбора вдоль течения реки, ареографической и гипсографической кривых, коэффициентов асимметрии водосбора, среднего уклона склонов и русла, средних длин склонов и добегания, продольного профиля русла;
- 3) коэффициентов залесенности, заозёрности и заболоченности,

гидрографической кривой.

Расчет этих характеристик производится с использованием растровой ЦМР по алгоритмам, реализованным в ГИС Arcview. Проведенный предварительно анализ показал, что значения среднего уклона речной сети при применении стандартных функций ГИС завышаются, в среднем, в два раза. С целью решения этой проблемы предлагается вычислять средний уклон речной сети по дополнительному гриду, ячейки которого имеют значение высоты только на дренаже (все остальные - NoData). С использованием оператора FocalStats возможен расчет перепада высот в окрестности укрупненной ячейки (3x3 от первоначального размера) дренажа (стандартная операция Slope неверно рассчитывает уклон в ячейками без данных). Вычисляя грид суммарной дренажной длины в окрестности 3x3, и зная величину перепада высоты, можно рассчитать средний уклон речной сети. Гидрологическую склоновую длину предложено рассчитывать как удвоенное значение средней потоковой длины по склону до русла (через оператор FlowLength ГИС ArcView).

Определяющее влияние на точность расчета контуров и параметров водосборов оказывают размер ячейки ЦМР и масштаб используемой топографической основы, выбор которого определяется СНиП 2.01.14-83. Размер ячейки также влияет на длину дренажа и морфометрические параметры территории. Поскольку объем проводимых вычислений обратно пропорционален квадрату размера ячейки a , а точность растет с уменьшением ее размера, необходима оценка максимального размера ячейки, при котором достигается заданная погрешность вычисления параметров водосборов. В работе обоснован способ определения зависимости ошибки расчета физико-географических и структурных характеристик территории от масштаба карты и размера ячейки, основанный на геометрической оценке влияния генерализации и расчлененности рельефа на контур и площадь водосбора. Полученный результат близок к формуле, предложенной (Gyasy-Agyei, Wilgoose et al, 1995) при оценке минимального размера ячейки грида, необходимого для корректного расчета дренажа. Показана возможность использования степенной зависимости для оценки погрешности ε расчета прочих параметров, в частности, среднего уклона и склоновой длины:

$$\varepsilon(a) = C \cdot a^k. \quad (3)$$

Также предложен способ определения параметров этой зависимости для произвольной территории и исходного масштаба картографического материала, основанный на использовании результатов расчета характеристик водосбора при нескольких значениях a . При рассмотрении сильнорасчлененных горных территорий Алтая значение a_0 при $\varepsilon = 10\%$ для большинства морфометрических параметров территории равно $2.5 \cdot a_{\min}$.

Предложенные алгоритмы расчета усредненных характеристик территории реализованы в ГИС-приложении "SnipCalc" (рис. 4).

Третья глава "Применение ЦМР для оценки характеристик затопления территории" посвящена использованию ГИС-технологий при расчетах затопления территорий в период половодья и паводков разной обеспеченности. Помимо создания корректной ЦМР для решения задачи расчета характеристик затопления, проблематичным является собственно вычисление уровней водной поверхности, которое, в общем случае, должно проводиться с использованием специальных программных пакетов, при этом выбор метода решения зависит от постановки задачи.

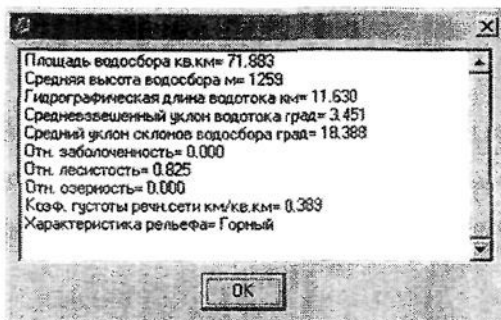


Рис. 4. Результаты расчета для реки Ороктой (Алтай-Саянская горная система)

Для задач расчета уровней затопления паводками различной обеспеченности предложено несколько методов расчета, реализованных в форме приложения ГИС Arcview, что позволяет в ряде случаев отказаться от использования внешнего ПО. Необходимость применения разных методов расчета обусловлена различным объемом имеющихся исходных данных и разными требованиями к точности расчета области затопления. Большая стоимость проведения русловой съемки рельефа дна и поймы для расчета уровней затопления обуславливает необходимость применения методов оценки уровней, основанных на использовании данных ППР в межень, данных по рельефу поймы с цифровых карт и ДДЗ, а также материалов гидрологических наблюдений в створе водпоста (створе-аналоге), что делает крайне необходимым подключение средств ГИС к расчетам.

При оценке затопления различной обеспеченности P (повторяемостью 1 раз в $t=100/P$ лет) подъем уровня $dZ_{P\%}$ вычисляется с помощью соответствующих данных по уровням $h_{P\%}$ гидрологического пункта. Если известны: уровень обеспеченности $h_{P\%}$ по материалам наблюдений гидрологического пункта; высота отметки нуля в Балтийской системе высот $h_{БСВ}$; картографическая высота водной поверхности в створе гидрологических наблюдений $h_{П}$, $dZ_{P\%}$ находится по формуле:

$$dZ_{P\%} = h_{БСВ} + h_{P\%} - h_{П} \quad (4)$$

В работе также обоснован подход для оценки уровней в исследуемом створе u , заключающийся в интеграции данных по рельефу поймы и полевых измерений или ДДЗ в паводок на основе использования кривых уровней (зависимостей уровень-расход) в виде формулы:

$$\frac{dZ_{P\%}}{dZ_u} = \left[\frac{dZ_{P\%}^0}{dZ_u^0} \right]^{K/K_0} \quad (5)$$

где величины с индексом "0" относятся к гидропункту, dZ_u – превышение над

меженным уровнем в момент космической съемки или полевых измерений, $dZ_{P\%}$ – расчетное превышение над меженным уровнем обеспеченности P (повторяемостью $t=100/P$), $\kappa=5/3+1/n$, n – параметр, характеризующей поперечное сечение поймы, и оцениваемый с использованием рассчитанных по ЦМР поперечников долины.

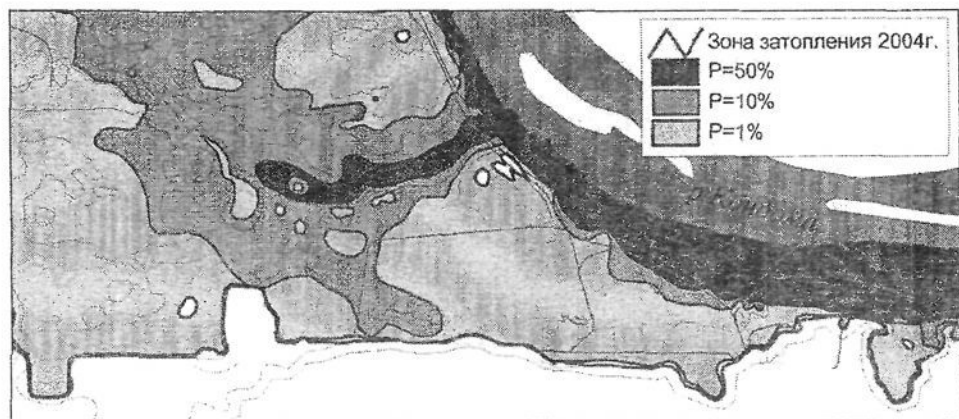


Рис. 5. Контур зоны затопления паводком 2004 г. и зон затопления паводками 1%, 10% и 50% обеспеченности (п. Куртуково, Кемеровская область)

Использование информации по рельефу поймы позволяет провести оценку зон затопления в ГИС при наличии данных о расчетных уровнях водной поверхности. Применение такого подхода позволяет полностью автоматизировать расчеты уровней и зон затопления с использованием только функций ГИС Arcview, не снижая при этом точность расчета.

Данная технология апробирована при определении зон затопления в паводки различной обеспеченности для нескольких населенных пунктов Кемеровской области, расположенных на р. Кондома, наиболее пострадавших в результате наводнения весной 2004 г. (рис. 5).

Приложение 1 представляет список основных операций над гридами, используемых в ГИС, на базе которого реализованы описанные в работе алгоритмы.

Приложение 2 содержит акты о внедрении результатов диссертационной работы и свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ.

Основные результаты.

1. Разработан новый подход к созданию гидрологически согласованных ГИС-моделей рельефа для гидрологических расчетов, суть которого состоит в использовании дополнительных точек продольного профиля русла с рассчитанными значениями высот. В условиях неполноты исходных данных обоснован и реализован способ создания псевдорельефа, полученного на основе рельефа мелкого масштаба и точек продольного профиля русла крупного масштаба.

2. Разработаны и реализованы методики расчетов по ЦМР структурных элементов водосборного бассейна и характеристик территории, используемых в гидрологических приложениях.

3. Обоснованы численные критерии оценки точности ЦМР в зависимости от степени ее дискретизации и масштаба исходной картографической информации.

4. Предложен и реализован в виде ГИС-приложения способ расчета уровней водной поверхности для оценки зон затопления в паводок различной обеспеченности, основанный на предположении о равенстве уклонов водной поверхности в межень и при подъеме уровня воды.

Автор выражает благодарность научному руководителю к.ф.-м.н. С.Г. Яковченко, всем сотрудникам лаборатории гидрологии и геоинформатики Института водных и экологических проблем СО РАН, оказавшим поддержку при выполнении работы.

Публикации по теме диссертации

1. Bazhin S. GIS technologies and models for assessment of the state of the environment in education / S. Bazhin, N. Borsheva, O. Lovtskaya, I. Postnova, S. Shirokova, K. Vorob'ov, Ye. Vorob'ov, S. Yakovchenko // Teaching Cartography for Environmental Mapping: International Cartographic Association : proceedings of the Seminar. – Barnaul : ICA Commission on Education and Training, 1998. - P. 15-20.
2. Яковченко С.Г. Расчет гидрологических параметров водосборов средствами ГИС / С.Г. Яковченко, В.А. Жоров, И.С. Постнова // "Enviromis-2002" : матер. междунар. конф. - Томск : Из-во ГУ "Томский ЦНТИ", 2002. – С. 104-108.
3. Яковченко С.Г. Расчет морфологических параметров водосборов средствами ГИС для целей моделирования стока / С.Г. Яковченко, И.С. Постнова, В.А. Жоров // ГИС для устойчивого развития территорий : матер. междунар. конф. – Санкт-Петербург : ЗАО "Карта", 2002. – С. 295-300.
4. Яковченко С.Г. Технология создания гидрологически корректных моделей рельефа / С.Г. Яковченко, И.С. Постнова, В.А. Жоров // ГИС для устойчивого развития территорий : матер. междунар. конф. – Санкт-Петербург : ЗАО "Карта", 2002. – С. 137-142.
5. Яковченко С.Г. "SNIPCALC" – геоинформационное приложение для автоматизированного расчета параметров водосборов / С.Г. Яковченко, В.А. Жоров, И.С. Постнова, О.В. Ловцкая, Е.К. Воробьев // ГИС для устойчивого развития территорий : матер. междунар. конф. – Новороссийск-Севастополь, 2003. – С. 216-221.
6. Яковченко С.Г. Использование ГИС-технологий при расчетах русловой трансформации / С.Г. Яковченко, В.А. Жоров, И.С. Постнова // Региональные проблемы устойчивого развития природоресурсных регионов и пути их решения : труды IV Всерос. научно-практич. конф. – Том 1. – Кемерово : Изд-во ИУУ СО РАН, 2003. - С. 194-204.
7. Яковченко С.Г. Создание и использование цифровых моделей рельефа в гидрологических и геоморфологических исследованиях / С.Г. Яковченко, В. А. Жоров, И. С. Постнова. – Кемерово : Изд-во ИУУ СО РАН, 2004. – 92 с.

8. Яковченко С.Г. Учет информации об обрывах в цифровой модели рельефа / С.Г. Яковченко, И.С. Постнова, В.А. Жоров // ГИС для устойчивого развития территорий : матер. междунар. конф. – Владивосток-Чанчунь, 2004. – С. 49-52.
9. Яковченко С.Г. Опыт использования ГИС для оценки зон затопления / С.Г. Яковченко, И.С. Постнова, В.А. Жоров, О.В. Ловцкая // ГИС для устойчивого развития территорий : матер. междунар. конф. – Владивосток-Чанчунь, 2004. – С. 574-577.
10. Жоров В.А. Геоинформационное обеспечение водохозяйственных расчетов для решения задач устойчивого водопользования / В.А. Жоров, С.Г. Яковченко, О.В. Ловцкая, И.С. Постнова, Т.А. Зырянова // ГИС для устойчивого развития территорий : матер. междунар. конф. - Владивосток-Чанчунь, 2004. - С. 139-142.
11. Постнова И.С. Технология оценки с помощью ГИС зон затопления весенними паводками малой обеспеченности / И.С. Постнова, С.Г. Яковченко, В.О. Дмитриев // Вычислительные технологии. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2005. – Т. 10, Спецвыпуск: SITES - 2005. – Ч. 2. – С. 39-45.
12. Ловцкая О.В. Геоинформационное обеспечение водохозяйственных и гидрологических расчетов для экологических прогнозов / О.В. Ловцкая, С.Г. Яковченко, И.В. Жерелина, В.А. Жоров, И.С. Постнова // Сибирский экологический журнал. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2005. – Т. 6. – С. 1013-1023.
13. Яковченко С.Г. Подготовка смешанных ЦМР с использованием данных по рельефу русла и речной сети для расчета морфометрических характеристик водосборов / С.Г. Яковченко, В.А. Жоров, И.С. Постнова // ГЕО-СИБИРЬ - 2005 : матер. науч. конгресса. – Т. 4, Геоинформатика. – Новосибирск, 2005. – С. 83-88.
14. Жерелина И.В. Реестр водных объектов как инструмент управления водопользованием / И.В. Жерелина, О.В. Ловцкая, И.С. Постнова, С.Г. Яковченко, В.И. Кормаков // Фундаментальные проблемы изучения и использования воды и водных ресурсов : матер. междунар. конф. – Иркутск : Изд-во ИГ СО РАН, 2005. – С. 183-185.
15. Жоров В.А. Планирование рисков наводнений с использованием ГИС-технологий / В.А. Жоров, И.С. Постнова, В.О. Дмитриев, С.Г. Яковченко // Ползуновский вестник. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2006. – № 1-2. – С. 190-197.
16. Яковченко С.Г. Районирование территории по степени опасности и оценка рисков наводнений с использованием ГИС-технологий / С.Г. Яковченко, И.С. Постнова, В.А. Жоров, О.В. Ловцкая, В.О. Дмитриев // Вычислительные технологии. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2006. – Т. 11. Спецвыпуск : ENVIROMIS - 2006. – Ч. 2. – С. 87-93.
17. Жерелина И.В., Ловцкая О.В., Постнова И.С., Яковченко С.Г., Кормаков В.И. Реестр водных объектов Алтайского края ("Reestr_Altay") // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007611012 от 06.03.2007. (Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам). – 2007.