

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**ГИДРОГРАФИЯ.  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОГРАФИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
РЕК И ИХ ВОДОСБОРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВОГО  
КАРТОГРАФИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**ЧАСТЬ 2**

*Допущено методическим советом Пермского государственного национального  
исследовательского университета в качестве учебного пособия для студентов  
географического факультета*

Пермь, 2013

2

УДК 556.51  
ББК 26.222  
Г 46

Составители: *проф. В.Г. Калинин, проф. С.В. Пьянков*

**Г 46 Гидрография.** Определение гидрографических характеристик рек и их водосборов с применением цифрового картографического моделирования: учеб. пособие / сост. В.Г. Калинин, С.В. Пьянков; Перм. гос. нац. иссл. ун-т. – Пермь, 2013. – Ч. II. – 71 с.

ISBN 978-5-7944-2234-4 (Ч.2)  
ISBN 978-5-7944-2233-7

Учебное пособие соответствует программе курса «Гидрография». Рассматриваются вопросы использования цифровых карт и математико-картографического моделирования поверхности водосборов, расчета основных морфометрических и морфологических характеристик рек и их водосборов.

Учебное пособие направлено на формирование у студентов знаний и получение навыков работы с цифровыми топографическими картами и ГИС-технологиями.

Издание предназначено для студентов 1–4-го курсов географического факультета направления «Гидрометеорология», «Картография и геоинформатика», «География».

**УДК 556.51  
ББК 26.222**

Печатается в соответствии с решением редакционно-издательского совета Пермского государственного национального исследовательского университета.

Рецензенты: д-р геогр. наук, зав. кафедрой геоинформатики *А.В. Погорелов* (Кубанский государственный университет); Пермский филиал ФБУ «Территориальный фонд геологической информации» по Приволжскому федеральному округу.

ISBN 978-5-7944-2234-4 (Ч.2)  
ISBN 978-5-7944-2233-7

© Калинин В.Г., Пьянков С.В., 2013

Введение.....	4
1. Использование цифровых карт для расчета гидрографических характеристик.....	6
2. Математико-картографическое моделирование поверхности водосборов.....	14
3. Расчет средних высот и уклонов водосбора, вычисление изогипс с заданным и переменным шагом, построение продольных профилей водотоков.....	42
4. Вычисление параметров водных объектов и их бассейнов по отношению к другим водным объектам и их бассейнам на основе оверлейных операций и MAP-алгебры.....	57
Литература.....	70

Карты, как основные модели реальной действительности, характеризуются рядом особенностей. В них обеспечивается взаимно однозначное соответствие по наиболее существенным элементам содержания, в том числе топологического. Они характеризуются непрерывностью, метричностью, обзорностью и наглядностью изображения, возможностью избирательного отображения процессов и явлений. Карты обладают определенными информационными свойствами и обеспечивают возможность передавать географические закономерности размещения объектов и явлений, могут оперативно отображать изменения, происходящие в природе и обществе.

Геометрические особенности, полнота получаемой информации зависят, прежде всего, от используемой математической основы, методов проектирования и составления карт, от достоверности, полноты и подробности содержания, а также от подготовленности читателя карты, его знаний математических и других методов выполнения исследований по картам, от уровня его специальной подготовки, наличия современной техники (Бугаевский, Цветков, 2000).

В настоящее время цифровые топографические и тематические карты широко используются для определения и уточнения гидрографических и гидрологических характеристик рек и их бассейнов. Применение современных геоинформационных технологий позволяет проводить картометрические работы по расчету координат, линейных и площадных параметров водных объектов и их бассейнов (длина, извилистость водотока, площадь водоема, водосбора и его центра тяжести).

Цифровое картографическое моделирование применяется при расчете гидрографических и гидрологических показателей, в том числе для вычисления параметров водных объектов и их бассейнов по отношению к другим водным объектам и их бассейнам на основе оверлейных операций и картографической алгебры (коэффициенты лесистости, озерности, заболоченности, карста, распаханности, в том числе дополнительных характеристик, таких как показатели горизонтальной и вертикальной расчлененности рельефа, порядки рек, густота речной сети и др.).

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 (Руководство..., 1986).

Термин «гидрографические характеристики» определяется как совокупность морфометрических и морфологических характеристик водных объектов и их водосборов, дающих достаточно полное представление о характере, форме, размерах, протяженности водных объектов и некоторых физико-географических особенностях их водосборов.

Морфометрические характеристики представляют собой количественные показатели водных объектов и водосборов, а морфологические – качественно-количественные показатели строения поверхности водосборов.

Морфометрические характеристики подразделяются на три группы:

а) морфометрические характеристики водотоков – количественные показатели, дающие представление о размерах, форме, уклонах различных водотоков. К ним относятся: длина, гидрографическая длина, средний уклон, координаты продольного профиля, извилистость, координаты поперечного профиля;

б) морфометрические характеристики водосмов, которые представляют собой также количественные показатели, характеризующие вид, форму, высотное положение, размеры ложа водоемов и объемы воды в них. К ним относятся: площадь водосма, площадь водосбора, уровень воды, нормальный подпорный уровень (НПУ) водохранилища, уровень мертвого объема (УМО) водохранилища, средняя глубина, максимальная глубина, объем озера или объем водохранилища (полный и полезный), длина, максимальная ширина и координаты батиграфической кривой водосма;

в) морфометрические характеристики водосборов – количественные показатели, дающие представление о форме, размерах и пространственном положении водосбора. К этим характеристикам относятся: площадь, средняя высота, средний уклон склонов, густота речной сети, густота русловой сети, площадь замкнутых впадин, координаты гипсографической кривой, коэффициент канализованности речной сети.

Морфологические характеристики водосборов – качественно-количественные показатели, характеризующие особенности строения водосбора. К ним относятся: озерность, взвешенная озерность, количество и суммарная площадь естественных сточных и бессточных водоемов, количество и суммарная площадь искусственных водосмов, заболоченность, распаханность, лесистость, оледененность, урбанизированность, закарстованность, характер почво-грунтов водосбора, мерзлотность (Руководство..., 1986).

## 1. Использование цифровых карт для расчета гидрографических характеристик

Картографические методы исследования позволяют определять геодезические, прямоугольные и полярные координаты точек; относительные и абсолютные высоты, глубины, мощности, т.е. аппликаты отображенных на картах объектов и явлений; длины прямых и кривых линий, расстояния между объектами, углы и направления в горизонтальной и вертикальной плоскостях; площади участков плоских и криволинейных поверхностей, объемы участков этих поверхностей или объектов (объемы ледников, осадков, океанических котловин и т.п.).

Картометрические измерения могут выполняться по картам разных масштабов, аэро- и космоснимкам, с помощью ручных (настольных) измерительных инструментов и приборов или с использованием автоматических средств (устройств ввода картографической информации, состыкованных с ЭВМ). В зависимости от этого применяются различные способы выполнения картометрических измерений и получения искомых характеристик.

В наибольшей мере разработаны и освещены в литературе способы решения этих задач по крупномасштабным и среднемасштабным топографическим и гипсометрическим картам с использованием ручных измерительных инструментов и устройств.

При этом разработано большое число морфометрических показателей. Они в большинстве случаев являются относительными величинами и выражают соотношение между длинами и высотами, длинами и площадями, углами наклона и площадями и т.п.

К основным из них можно отнести:

- коэффициенты частоты и плотности;
- показатели горизонтального и вертикального расчленений;
- уклоны поверхностей;
- коэффициенты извилистости линий и контуров, изображенных на карте;
- показатели формы контуров, объектов и др.

Показатели горизонтального и вертикального расчленений рассчитываются по природным районам, территориальным единицам, ландшафтам, элементарным бассейнам или по геометрическим фигурам. Устанавливают расчленяющие линии, к которым относят оси максимумов и минимумов поверхности: линии водоразделов и тальегов (для рельефа); оси циклонов и антициклонов (для барического рельефа); оси валов и антиклиналей, прогибов и синклиналей (для геолого-структурных поверхностей) и т.д.

К показателям горизонтального расчленения можно отнести: среднюю площадь элементарных участков, общую длину орографических (расчленяющих) линий, суммарную длину рек, коэффициент густоты орографических (расчленяющих) линий, среднюю относительную высоту элементарных участков (Бугаевский, Цветков, 2000).

При расчетах гидрографических показателей используют три способа представления цифровых картографических данных: векторное, растровое и

TIN. Цифровое представление пространственных объектов в виде совокупности ячеек называется растровым. В нем каждой ячейке соответствует значение класса объекта и его позиционирование с указанием положения в соответствующей растру прямоугольной матрице. Векторное представление данных есть цифровое описание точечных, линейных и полигональных пространственных объектов в виде набора координатных пар с описанием их геометрии. В TIN при создании цифровой модели используется треугольная полигональная сеть, образуемая на множестве точечных объектов путем их соединения непересекающимися отрезками.

Наиболее распространенным способом представления земной поверхности является создание цифровых моделей рельефа (ЦМР). Эти данные используются в качестве исходных для количественной и качественной характеристики поверхности Земли. ЦМР является растровым представлением непрерывной поверхности (GRID), точность построения которой определяется в первую очередь разрешением (линейными размерами растра).

При наличии корректной цифровой модели рельефа существует возможность использовать современные геоинформационные технологии для определения гидрографических и морфометрических характеристик водных объектов и их водосборов.

Наиболее качественно эти задачи можно решать с помощью программного продукта ArcGIS, в частности инструментов модуля Spatial Analyst, который предназначен для выполнения пространственного анализа растрового представления данных. Среди возможностей модуля Spatial Analyst следует отметить следующие: построение и анализ поверхностей, гидрологические расчеты и моделирование, растровая статистика, методы нечеткой логики, оптимизация размещения объектов, поиск кратчайшего пути и многое другое. Это самый функциональный модуль ArcGIS for Desktop с богатой историей применения в разных отраслях.

С помощью Spatial Analyst решаются следующие задачи:

- создание, отображение, анализ растровых слоев, атрибутивные запросы к растрам;
- классификация, передискретизация и генерализация растров;
- статистический анализ в локальной окрестности, заданной стандартным окном или в пределах выделенных зон;
- многомерный кластерный анализ и выделение главных компонент;
- растровый оверлей и поклеточный анализ нескольких растров;
- анализ на основе методов нечеткой логики;
- моделирование поверхностей с использованием методов обратного взвешенных расстояний, сплайнов с натяжением, кригинга, по изолиниям и др.;
- построение изолиний и вычисление производных характеристик поверхностей: отмывки, зон видимости, уклонов, кривизн, экспозиций, поступления солнечной радиации;
- гидрологические расчеты: поверхностный сток, инфильтрация грунтовых вод, построение речных бассейнов, выделение и порядковая классификация тальвегов.

- анализ расстояний и путей с учетом затрат на проезд;
- буферизация растровых и векторных объектов;
- алгебра карт (булевы запросы и алгебраические вычисления);
- конвертация объектов (точек, линий и полигонов) в растровое представление и, наоборот, векторизация растров (ПО «ArcGIS Spatial Analyst», <http://dataplus.ru/products/spatialanalyst/detail/review/>).

Spatial Analyst полностью интегрирован в ArcGIS Desktop и содержит более 150 инструментов, которые можно использовать в Model Builder, скриптах, диалоговых окнах, командной строке. Помимо этого, модуль имеет самостоятельную панель инструментов в ArcMap. Его функции могут применяться к слоям, добавляемым в ArcMap, по выборке, сделанной в слоях по атрибутивным или пространственным критериям, а также к растровым и векторным наборам данных, которые выбираются при помощи браузера файлов, доступного в каждом из диалоговых окон модуля.

### Моделирование рельефа поверхностей путем интерполяции

Интерполяция позволяет вычислить значения для всех ячеек растра по значениям ограниченного числа точек опробования или на основе горизонталей. Может использоваться для предсказания значений для любых географических данных, измеряемых в определенных точках: рельефа, уровня осадков, концентраций химических веществ, уровней шума и т.д. В Spatial Analyst реализованы методы обратного взвешенных расстояний, кригинга и сплайнов, естественного соседа и тренда, которые основаны на разных предположениях о наилучшей оценке. Подходящий метод выбирается исходя из того, какое явление необходимо представить в виде поверхности и как распределены точки опробования.

Для моделирования по горизонталям используется метод Хатчинсона (Topo to Raster), позволяющий принимать во внимание объекты гидрографии – реки и озера – для построения гидрологически корректных ЦМР. Сплайновая интерполяция даст возможность учитывать разрывные нарушения поверхности (обрывы, овраги и т.д.) (рис. 1.1).

### Анализ поверхностей

На основе ЦМР можно получать производные модели, а также рассчитывать необходимые морфометрические характеристики. Для этого в Spatial Analyst имеются следующие функции:

- построение изолиний с заданным шагом;
- вычисление уклона и экспозиции склонов, которые используются для определения скорости и направления склонового и поверхностного стока (рис. 1.2);
- отмывка рельефа, используемая как для реалистичного отображения его поверхности, так и для анализа освещенности местности в различное время суток;

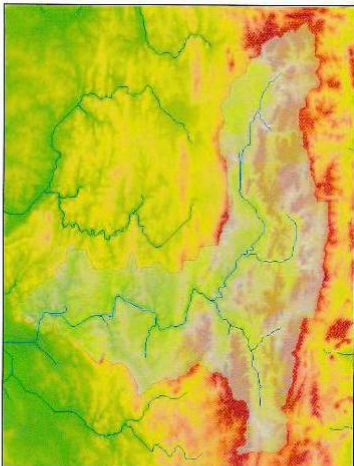


Рис. 1.1. Цифровая модель рельефа водосбора реки



Рис. 1.2. Картографирование и анализ углов наклона на основе ЦМР

- вычисление профильной и поперечной кривизны поверхности. Они характеризуют динамические свойства поверхности, ее конвергентное и дивергентное поведение;
- расчет видимости определяет то, какие участки поверхности видны из заданных точек наблюдения.

### Гидрологическое моделирование

Spatial Analyst содержит специализированные инструменты, позволяющие моделировать поверхностный и грунтовый сток, извлекать на основе ЦМР водоразделы и сеть тальвегов (рис. 1.3).

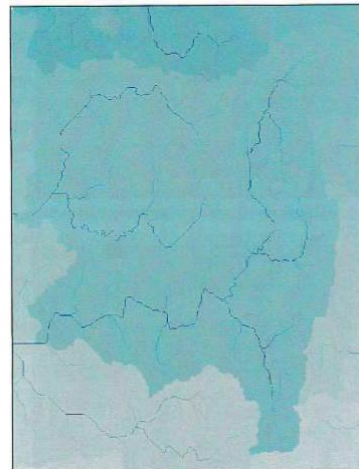


Рис. 1.3. Порядковая классификация тальвегов и выделение водосборных бассейнов

С помощью гидрологических инструментов можно, например, анализировать временные изменения в осадконакоплении или построить модель прогноза половодья, а затем определить территории, попадающие в зону затопления (рис. 1.4).

### Функции статистики

Spatial Analyst позволяет вычислять следующие статистические показатели: большинство, меньшинство, максимум, минимум, среднее, медиана, диапазон, среднее квадратичное отклонение, сумма и многообразие (рис. 1.5).



Рис. 1.4. Моделирование зоны затопления при половодье

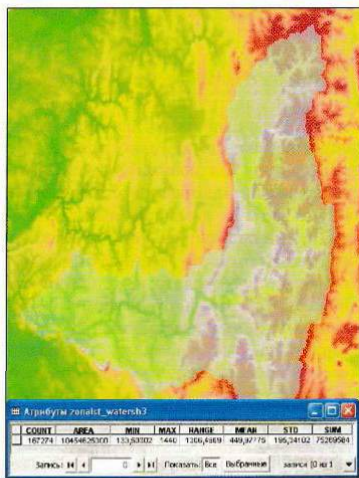


Рис. 1.5. Функции статистики

Принцип отбора значений для вычисления показателей определяется одним из четырех методов:

- Статистика по ячейкам предназначена для вычисления характеристик между многими растровыми слоями, например для анализа диапазона летних температур за десятилетний период.
- Статистика соседства (фокальная статистика) вычисляется на основе значения обрабатываемой ячейки и значений ячеек в заданной окрестности и может быть использована в том числе при выявлении зависимостей, например стока от определяющих факторов.
- С помощью функции зональной статистики статистические характеристики вычисляются по значениям одного набора данных для зон, определяемых другим набором. Таким образом вычисляются коэффициенты закарстованности, лесистости и др. для исследуемого бассейна.
- Многомерная статистика позволяет определять отношения между несколькими слоями на основе значений множества атрибутивных полей.

Эти инструменты могут быть использованы для решения традиционных задач по обработке снимков, например преобразования многозонального снимка в растр, показывающий распространение лесов, различных типов почв, застроенных территорий, сельскохозяйственных земель.

#### Классификация

Эта функция выполняет замену значений ячеек другими значениями, что может быть использовано для группировки значений ячеек, например для объединения всех видов леса в один класс; для переклассификации значений по общей шкале, например для анализа пригодности и т.д.

Растровый калькулятор – мощный инструмент для вычислений, поддерживающий многочисленные операторы и функции, запросы выборки, а также синтаксис алгебры карт. Входными данными могут быть растровые слои, шейп-файлы, таблицы, константы и числа. Математические операторы представлены арифметическими, булевыми операторами и операторами отношений (включая также поразрядные и комбинаторные); математические функции представлены арифметическими, тригонометрическими, логарифмическими и степенными функциями, а алгебра карт позволяет производить операции типа вычисления уклона или статистических характеристик ячеек для нескольких растровых слоев. Возможно использование калькулятора растров, например, для моделирования какого-либо процесса или для создания карты пригодности путем классификации входных данных по шкале пригодности от 1 до 10 и затем сложения полученных растров с соответствующими весовыми коэффициентами (рис. 1.6).

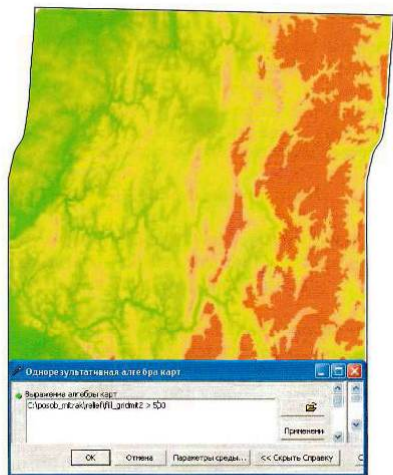


Рис. 1.6. Вычисления с помощью растрового калькулятора

### Конвертация

Если для анализа требуется растровый тип данных, вы можете при помощи Spatial Analyst конвертировать векторные данные в растр. Кроме того, возможно обратное преобразование.

Spatial Analyst поддерживает все векторные форматы, которые по умолчанию читаются ArcGIS Desktop — классы базы геоданных, шейп-файлы, покрытия ArcInfo, данные CAD, VPF, а также растровые форматы.

### Разработка приложений с использованием Spatial Analyst

Функции Spatial Analyst можно использовать для разработки приложений и собственных модулей, расширяющих функциональность ArcGIS Desktop. Библиотеки с интерфейсом доступа к инструментарию Spatial Analyst доступны для использования в Visual Basic (VB), .Net, C++, Java и Python. Будучи созданными, пользовательские инструменты и модели могут быть интегрированы в интерфейс ArcGIS Desktop и предоставлены другим пользователям.

Возможности разработки включают:

- пользовательские аналитические функции;
- пользовательские библиотеки DLL и исполняемые файлы \*.exe;
- поддержку новых форматов данных (ПО «ArcGIS Spatial Analyst», <http://dataplus.ru/products/spatialanalyst/detail/review/>).

## 2. Математико-картографическое моделирование поверхности водосборов

При решении гидрологических задач возникает необходимость вычисления гидрографических характеристик. Рассмотренные ниже инструменты гидрологического анализа могут применяться по отдельности или последовательно для построения речной сети, выделения линий водоразделов, моделирования движения воды по поверхности, расчета гидрографических характеристик на основе цифровой модели рельефа (рис. 2.1).

### Направление стока (Flow Direction)

С помощью инструмента Flow Direction возможно создание растра направления стока, где для каждой ячейки определяется направление к соседним ячейкам с максимальной разницей высот в сторону понижения (рис. 2.2).

#### Алгоритм вычисления Flow Direction

Направление стока определяется разностью высот ячеек растра при использовании фокальной статистики и вычисляется следующим образом: изменение в z-значении / расстояние \* 100.

Расстояние вычисляется между центрами ячеек. Следовательно, если размер ячейки принять за единицу, расстояние между двумя ортогональными ячейками будет равно 1, а расстояние между диагональными ячейками — 1,414.

Если снижение высоты до ближайших ячеек одинаково в нескольких направлениях, область соседства расширяется до тех пор, пока не будет найден самый крутой склон.

В случае если локальное понижение в одну ячейку расположено на краю растра или в его окрестностях и есть хотя бы одна ячейка со значением «NoData (Нет данных)», заполнения не происходит по причине недостаточной информации по соседним ячейкам. Таким образом, чтобы ячейка могла рассматриваться как локальное понижение, должна быть известна информация по всем соседним ячейкам.

Если сток из двух ячеек осуществляется друг в друга, они являются локальными понижениями с неопределенным направлением стока. Такой метод определения направления стока по цифровой модели рельефа рассмотрен в (Jenson and Domingue, 1988).

Выходными данными инструмента «Направление стока» является целочисленный растр, значения которого находятся в диапазоне от 1 до 255. Значения для каждого направления от центра следующие:

32	64	128
16		1
8	4	2

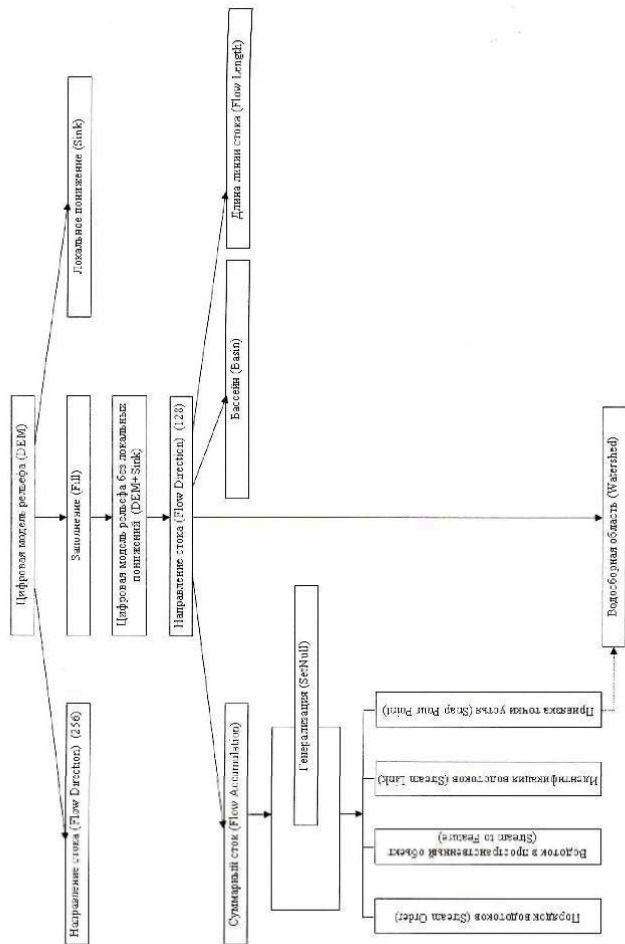
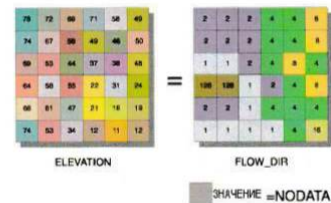


Рис. 2.1. Алгоритм определения гидрографических характеристик рек и их водосборов на основе ЦМР (DEM)



Выражение: FLOWDIRECTION(ELEVATION)

Рис. 2.2. Алгоритм вычисления раstra направления стока

- если ячейка, в сторону которой крутизна склона максимальна, расположена слева от текущей обрабатываемой ячейки, значение направления стока для нее будет определено равным 16;
- если ячейка расположена ниже, чем восемь соседних ячеек, этой ячейке присваивается значение самой нижней соседней ячейки и направление стока определяется как сток в эту ячейку;
- если несколько соседних ячеек имеют одинаковое самое низкое значение, ячейке присваивается это значение, но направление стока определяется с помощью одного из двух методов, поясняемых ниже. Эта процедура используется для фильтрации локальных понижений размером в одну ячейку, которые рассматриваются как помехи;
- если для ячейки характерно одно и то же изменение в значении высоты в нескольких направлениях и ячейка является частью локального понижения, направление стока считается неопределенным. В таких случаях значение для этой ячейки в выходном растре направления стока будет суммой этих направлений. Например, если изменение в значении высоты одинаково и в направлении вправо (направление стока = 1), и в направлении вниз (направление стока = 4), направление стока для этой ячейки будет равно  $1 + 4 = 5$ . Ячейки с неопределенным направлением стока могут быть помечены как локальные понижения с использованием функции «Локальное понижение»;
- если для ячейки характерно одно и то же изменение в z-значении в нескольких направлениях и она не является частью локального понижения, направление стока присваивается с использованием таблицы перекодировки, определяющей наиболее вероятное направление (Greenlee, 1987);
- выходной растр уклона вычисляется как разница в значениях высот, деленная на расстояние между центрами ячеек, выраженная в процентах. Для соседних ячеек эта величина аналогична уклону между ячейками, выраженному в процентах. Для плоских участков расстояние становится расстоянием до ближайшей ячейки с меньшей высотой. Результатом является карта процента подъема на пути наиболее крутого спуска из каждой ячейки. При вычислении выходного раstra уклона для плоских участков расстояние до ячеек,



примыкающих по диагонали (углом) ( $1.414 * \text{размер ячейки}$ ), приблизительно выражается полуторным размером ячейки для ускорения обработки за счет использования целочисленных вычислений.

#### Последовательность вычислений

Для вычисления растровой модели направления стока используется инструмент «**Направление стока (Flow Direction)**». При использовании инструмента необходимо загрузить файл исходного растра цифровой модели рельефа (GRID), указав путь к исходному файлу, либо выбрав из выпадающего списка имя исходного растрового слоя (рис. 2.3).

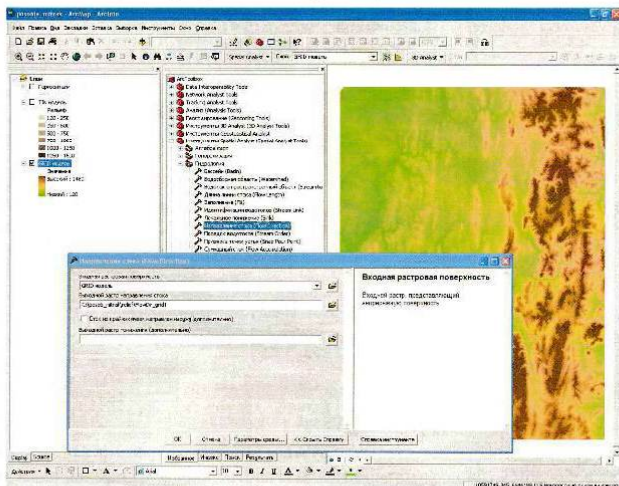


Рис. 2.3. Исходная цифровая модель рельефа (GRID)

Результатом расчета будет новый растровый слой (GRID), каждая ячейка которого содержит значение направления стока (0..255) по 16 румбам (рис. 2.4). Этот слой является необходимым условием получения информации о замкнутых локальных понижениях, из которых сток отсутствует.

#### Локальное понижение (Sink)

Благодаря функции Sink возможно создание растра, который содержит все локальные понижения или области внутреннего стока.

#### Алгоритм вычисления Sink

Локальное понижение – это ячейка или набор пространственно связанных ячеек, направлению стока из которых не может быть присвоено ни одного из

восьми корректных значений направлений в растре направления стока. Такое происходит в том случае, если все соседние ячейки выше, чем обрабатываемая ячейка, либо когда две ячейки перетекают друг в друга, образуя петлю из двух ячеек.

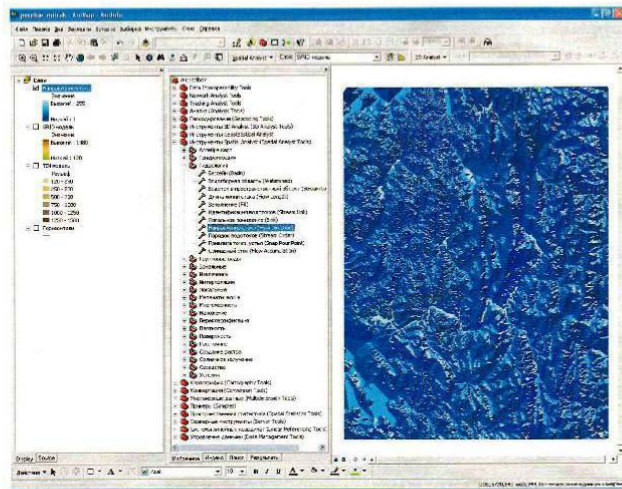


Рис. 2.4. Растровый слой направлений стока

Считается, что локальные понижения имеют неопределенные направления стока; им присваивается значение, являющееся суммой возможных направлений. Например, если максимальные значения уклона и, следовательно, направления стока одинаковы для правой (1) и левой (16) ячейки, в качестве значения направления стока этой ячейке будет присвоено значение 17 (рис. 2.5).



Рис. 2.5. Вычисление локальных понижений

Чтобы точно определить направление стока и, следовательно, суммарный сток, лучше пользоваться набором данных, в котором нет локальных понижений. Цифровая модель рельефа (ЦМР), которая обработана с целью удаления всех локальных понижений, носит название ЦМР без понижений.

Локальные понижения в данных по высотам, как правило, возникают вследствие ошибок в данных. Эти ошибки зачастую вызваны методами выбора опорных точек и округлением высот до целых чисел. Естественно, возникающие локальные понижения в данных по высотам с размером ячеек 10 м или более встречаются редко (Mark, 1988), за исключением ледников или карстовых областей, и, в целом, могут рассматриваться как ошибки. По мере того как увеличивается размер ячейки, количество локальных понижений в наборе данных зачастую тоже увеличивается.

Определение и удаление локальных понижений при создании ЦМР без понижений является итеративным процессом. Когда локальное понижение заполняется, границы заполняемой области могут создавать новые локальные понижения, которые необходимо заполнить.

Иногда полезно знать глубину локального понижения или группы локальных понижений. Эта информация может быть использована для определения подходящего ограничения по высоте для функции «Заполнение локальных понижений (Fill)» или для понимания типа ошибок, присутствующих в данных.

#### *Последовательность вычислений*

Для вычисления растровой модели локальных понижений используется инструмент «**Локальные понижения (Sink)**». При использовании инструмента необходимо загрузить растровый файл с направлением стока по 16 румбам, указав путь к исходному файлу, либо выбрать из выпадающего списка имя растрового слоя, например «**Направление стока**» (рис. 2.6).

Результатом расчета будет новый растровый слой, ячейки которого содержат значение суммы всех возможных направлений, либо «NoData» (рис. 2.7). Создание этого слоя является необходимым условием получения корректной информации о направлении стока всей рассматриваемой территории без учета локальных понижений.

#### **Заполнение (Fill)**

Инструмент Fill применяется при создании цифровой модели рельефа с заполнением локальных понижений для удаления ошибок и неточностей, присутствующих в исходных данных.

#### *Алгоритм вычисления Fill*

Локальные понижения (и пики) зачастую представляют собой небольшие ошибки, возникающие по причине разрешения данных или округления высот до ближайшего целого значения.

Локальные понижения должны быть заполнены для обеспечения более корректного выделения бассейнов и водотоков. Если локальные понижения не заполнены, выделенная речная сеть может иметь разрывы (рис. 2.8).

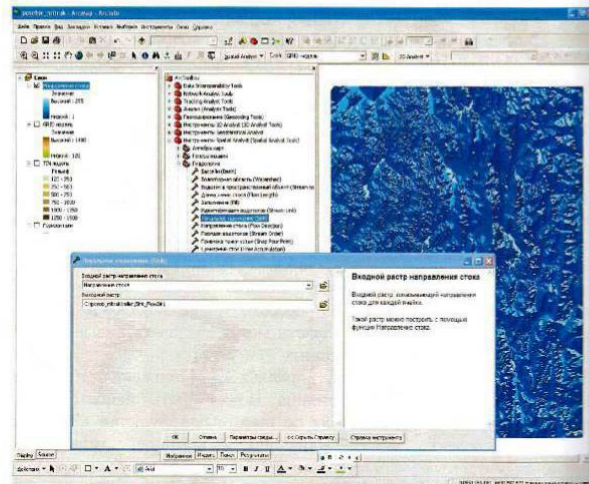


Рис. 2.6. Вводный растр направлений стока

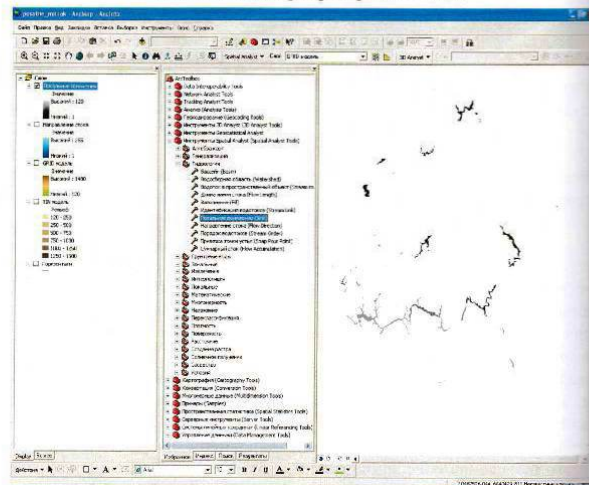


Рис. 2.7. Локальные понижения (Sink)

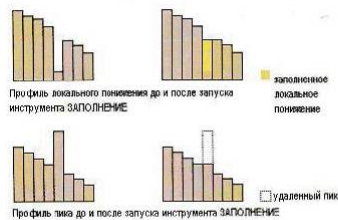


Рис. 2.8. Алгоритм заполнения и удаления локальных понижений и пиков

Инструмент «Заполнение (Fill)» использует эквиваленты нескольких функций, таких как «Направление стока (Flow Direction)», «Локальное понижение (Sink)», «Водораздел (Watershed)» и «Заполнение зон (Zonal Fill)», для обнаружения и заполнения локальных понижений. Выполнение инструмента – это итеративный процесс, который повторяется до тех пор, пока не будут заполнены все локальные понижения с учетом заданного ограничения по высоте. По мере того как локальные понижения заполняются, на границе заполняемых зон могут создаваться новые локальные понижения, которые будут удалены во время следующей итерации.

#### Последовательность вычислений

Для вычисления ЦМР без локальных понижений используется инструмент «Заполнение (Fill)». При использовании инструмента необходимо загрузить растровый файл с ЦМР (GRID), указав путь к исходному файлу, либо выбрать имя растрового слоя из выпадающего списка (рис. 2.9).

Результатом расчета будет новый растровый слой, ячейки которого содержат значения абсолютных высот без локальных понижений (рис. 2.10). На основе этого слоя вычисляется слой направлений стока по 8 румбам.

На основе полученной ЦМР без локальных понижений строится новый растровый слой направлений стока по 8 румбам, значения которого соответствуют сторонам света (1 – В, 4 – ЮВ, 8 – Ю, 16 – ЮЗ, 32 – З, 64 – СЗ, 128 – С). Для этого вновь используют инструмент «Направление стока (Flow Direction)». Результаты расчета представлены на рис. 2.11.

#### Суммарный сток (Flow Accumulation)

Функция Flow Accumulation предназначена для создания растра линий тальвегов с аккумуляцией стока (потенциальные реки) (растр).

#### Алгоритм вычисления Flow Accumulation

Примером использования инструмента «Суммарный сток (Flow Accumulation)» (с входным растром весов) может служить определение количества дождевых осадков, попадающих в заданный бассейн. В таком случае входной растр весов может быть непрерывным растром, представляющим среднее количество дождевых осадков за определенный период.

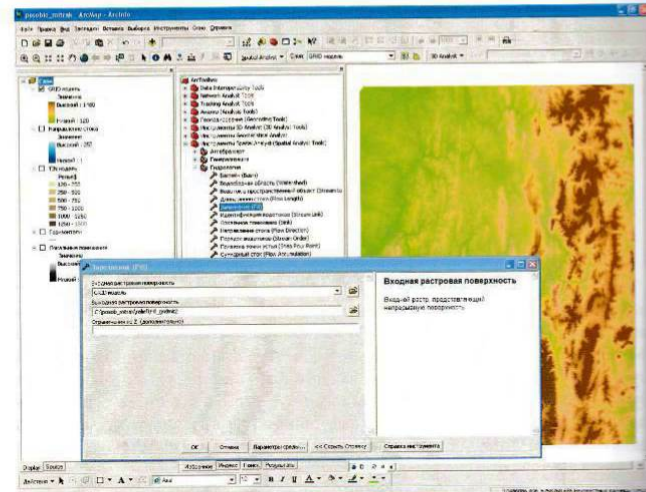


Рис. 2.9. Исходная цифровая модель рельефа

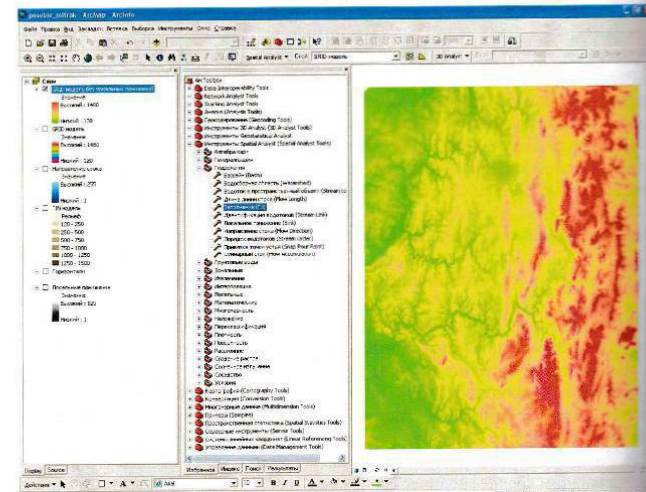


Рис. 2.10. Цифровая модель рельефа без локальных понижений

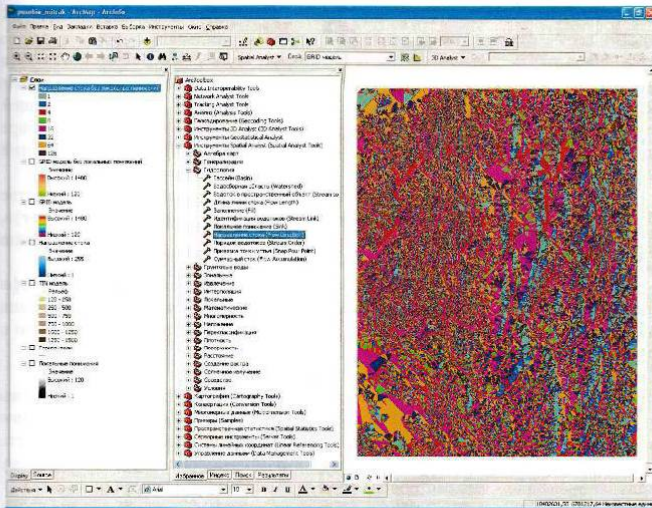


Рис. 2.11. Растровый слой направлений стока по 8 румбам

Выходные данные инструмента «Суммарный сток (Flow Accumulation)» будут представлять количество осадков, протекающих через каждую ячейку, при допущении, что весь выпавший дождь стекает по поверхности и не существует перехвата осадков, нет испарения и осадки не просачиваются в грунтовые воды. Этот процесс можно также рассматривать как количество дождевых осадков, которые выпадают на поверхность земли выше по склону относительно каждой ячейки.

Результаты выполненных расчетов «Суммарный сток (Flow Accumulation)» могут быть использованы для создания сети водотоков путем применения порогового значения для выбора ячеек с высоким суммарным стоком. Например, процедура создания растра, где значение, равное единице, представляет сеть водотоков, а все остальные ячейки имеют значение «NoData (Нет данных)», может быть выполнена одним из следующих способов:

- с использованием операции «Условие (Con)», где входной условный растр – это Flowacc (растр суммарного стока), входной истинный растр – постоянное значение, равное «1», а выражение определяется как «> 100».
- с использованием операции «Установить ноль (Set Null)», где входной условный растр – это Flowacc (растр суммарного стока), входной истинный

растр – постоянное значение, равное «1», а выражение определяется как «< 100».

В обоих примерах всем ячейкам, в которые осуществляется сток из более чем 100 ячеек, присваивается значение, равное единице; всем остальным ячейкам присваивается значение «NoData (Нет данных)». Для последующей обработки является существенным представление сети водотоков как набора растровых линейных объектов в виде числовых значений на фоне значений «NoData».

Результирующая сеть водотоков может быть использована в качестве входных данных для инструментов «Порядок водотоков (Stream Order)», «Линии водотоков (Stream Line)» и «Идентификация водотоков (Stream Link)».

Этот метод получения суммарного стока по цифровой модели рельефа рассмотрен в (Jenson, Domingue, 1988). Аналитический метод для определения подходящего порогового значения для выделения сети водотоков представлен в (Tarboton, Bras, Rodriguez-Iturbe, 1991).

#### Последовательность вычислений

Для вычисления растра линий тальветов с аккумуляцией стока (потенциальные реки) используется инструмент «Суммарный сток (Flow Accumulation)». При использовании инструмента необходимо загрузить растровый файл с направлением стока по 8 румбам, указав путь к исходному файлу, либо выбрать имя растрового слоя из выпадающего списка (рис. 2.12).

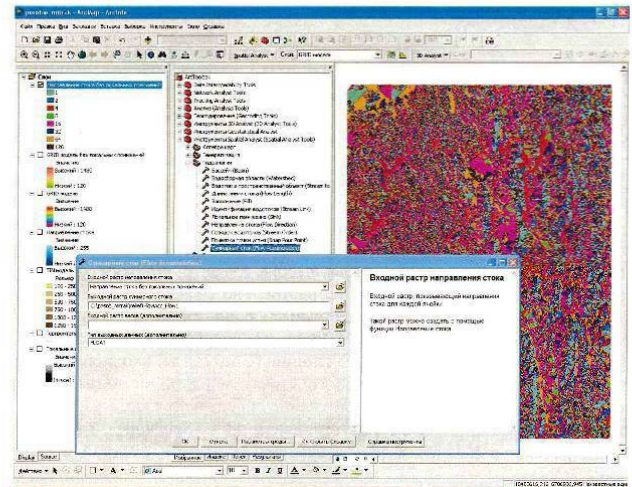


Рис. 2.12. Исходный растровый слой направлений стока по 8 румбам

Результатом расчета будет новый растровый слой, ячейки которого содержат сумму значений направлений стока, протекающего через каждую ячейку. Это дает возможность выделить линии тальвегов с аккумуляцией стока (потенциальные реки) (рис. 2.13).

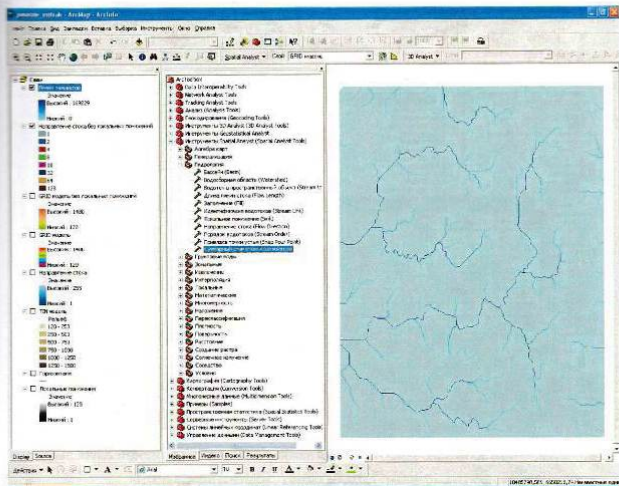


Рис. 2.13. Линии тальвегов с аккумуляцией стока (потенциальные реки)

Речную сеть можно выделить как с помощью цифровой модели рельефа (ЦМР), так и с помощью инструмента «Flow Accumulation». Накопление речного стока в своей простейшей форме – это число нарастания ячеек, которые «перетекают» из одной ячейки в другую.

С использованием инструмента «Map Algebra» или с помощью инструмента «Условие (Con)» (применяя пороговое значение) речная сеть может быть генерализована. Например, выражения для создания растра речной сети могут быть:  $\text{StreamNet} = \text{Con}(\text{flowacc} > 100, 1)$  или  $\text{StreamNet} = \text{SetNull}(\text{flowacc} < 100, 1)$ .

В обоих примерах областям с более чем 100 ячейками присваивается значение «1», а всем остальным – «NoData». Для получения речной сети, т.е. замены растровых данных линейными, необходимо, чтобы окружающие ячейки имели значение «NoData».

На рис. 2.14 представлен пример формирования запроса средствами «Однорезультативной алгебры карт». В открывшемся окне сформировано выражение, указывающее на количество ячеек, принадлежащих областям с более чем 5000 ячейками,  $\text{SetNull}(\text{c:\posob\_mitrak\relief\flowacc\_flow1} < 5000, 1)$ .

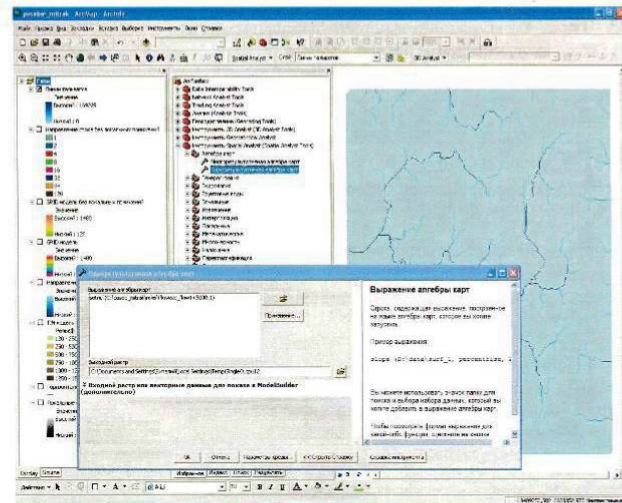


Рис. 2.14. Формирование запроса средствами «Однорезультативной алгебры карт»

Результатом этого запроса будет являться новый растровый слой со значениями «1» или «NoData» (рис. 2.15).

Таким образом, возможна генерализация речной сети для разных масштабов, в зависимости от исходных данных и количества рассматриваемых ячеек. Используя пороговое значение, можно также определить как постоянные, так и временные водотоки, связанные не только с площадью, но и другими физико-географическими условиями (климат, рельеф, почвенный покров). Более подробная информация представлена в (Tarboton, Bras, Rodriguez-Iturbe, 1991).

После создания речной сети (GRID) она может быть дополнительно проанализирована с помощью инструментов «Stream Order», «Stream Link» или «Stream to Feature» для определения порядка водотоков, присвоения им уникальных идентификаторов ID или создания векторных данных.

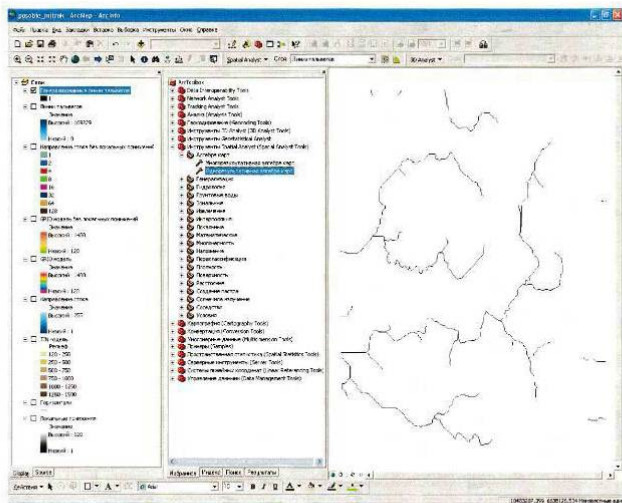


Рис. 2.15. Растровый слой модельных тальветов

### Идентификация водотоков (Stream Link)

Инструмент «Stream Link» используется для присвоения уникальных значений сегментам растровой линейной сети между сочленениями.

#### Алгоритм Stream Link

Идентифицируемые сегменты водотоков – это фрагменты дренажной сети между двумя последовательными соединениями: соединением и устьем или соединением и истоком (рис. 2.16).

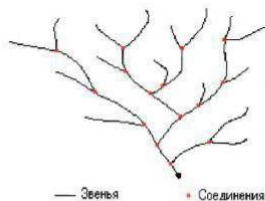


Рис. 2.16. Идентифицированные сегменты водотоков

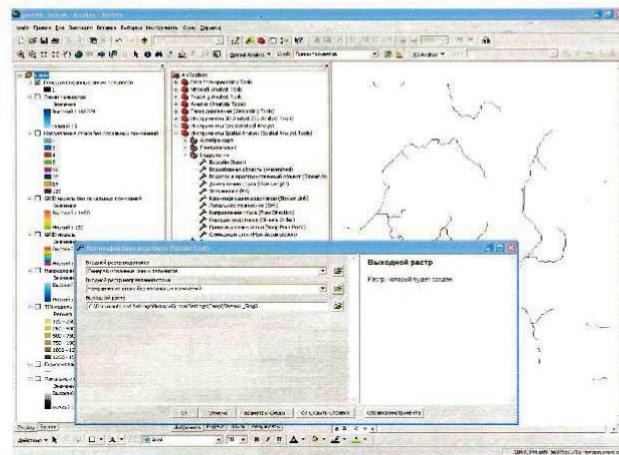


Рис. 2.17. Входной растровый слой модельных тальветов

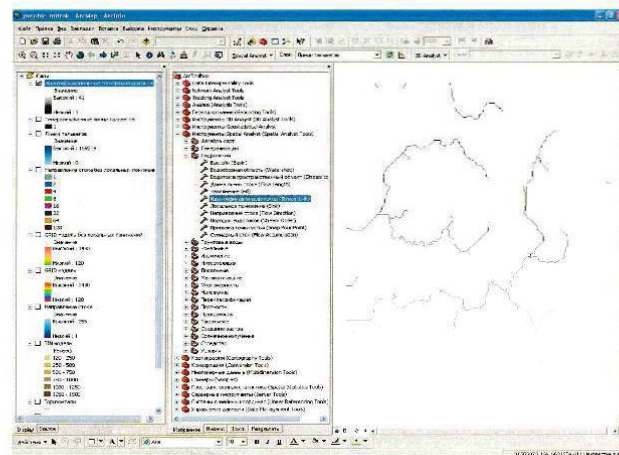


Рис. 2.18. Идентификация сегментов водотоков

### Последовательность вычислений

Для вычисления растра идентифицированных сегментов водотоков используется инструмент «Идентификация водотоков (Stream Link)». При использовании инструмента необходимо загрузить растровые файлы «Генерализованные линии тальвегов» и «Направление стока без локальных понижений», указав пути к ним, либо выбрать их имена из выпадающего списка (рис. 2.17).

Результатом расчета будет новый растровый слой, ячейки которого содержат уникальные значения всех сегментов водотоков или «NoData» (рис. 2.18). Полученный растровый слой в дальнейшем будет использован для построения линий водоразделов водосборных бассейнов.

### Порядок водотоков (Stream Order)

С помощью инструмента «Stream Order» сегментам растра присваивается число, определяющее порядок водотока.

#### Алгоритм Stream Order

• Входной растр, характеризующий сеть водотоков, должен быть представлен в виде значений, больше или равных единице, на фоне значений «NoData (Нет данных)».

Для создания растровой модели сети водотоков могут быть использованы результаты функции «Направление стока (Flow Accumulation)». К ним применяется пороговое значение, позволяющее выбрать ячейки с суммарным стоком, заданным пользователем. Например, для построения сети водотоков могут использоваться ячейки, в которые «поступает» сток из более чем 100 ячеек. Для создания растровой модели водотоков из ячеек с суммарным стоком, больше или равным 100, можно воспользоваться функциями «Условие (Con)» или «Задать ноль (Set Null)», которые позволяют присвоить таким ячейкам значение «1», а остальным ячейкам – «NoData (Нет данных)». Полученная модель водотоков может быть использована в инструментах «Идентификация водотоков (Stream Link)» и «Водоток в пространственный объект (Stream to Feature)». Аналитический метод для определения соответствующего порогового значения при выделении сети водотоков представлен в книге (Tarboton, Bras, Rodriguez-Iturbe, 1991).

• Выходные данные инструмента «Порядок водотока» будут иметь более высокое качество в том случае, если входной растр водотоков и входной растр направления стока получены по одной и той же ЦМР.

• Выходные данные инструмента «Порядок водотока» – целочисленный растр.

#### Методы определения порядка водотока

STRAHLER – метод определения порядка водотоков (предлагается по умолчанию), предложенный Страхлером в 1952 г. Порядок водотока увеличивается на единицу в случае слияния двух водотоков одного и того же порядка. Следовательно, после слияния водотоков первого и второго порядка следующий водоток будет по-прежнему водотоком второго порядка (Strahler, 1957).

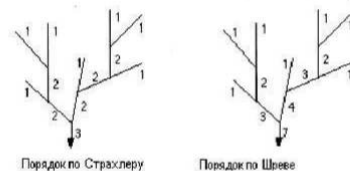


Рис. 2.19. Алгоритмы определения порядков рек

SHREVE – метод определения порядка водотоков, предложенный Шреве в 1966 г. Каждому элементарному (без притоков) водотоку присваивается значение порядка, равное единице. При слиянии двух водотоков их порядки складываются, а новое значение присваивается образуемому водотоку, расположенному ниже по течению (рис. 2.19) (Shreve, 1966).

### Последовательность вычислений

Для вычисления растра порядков водотоков используется инструмент «Порядок водотоков (Stream Order)». При использовании инструмента необходимо загрузить растровые файлы «Генерализованные линии тальвегов» и «Направление стока без локальных понижений», указав пути к ним, либо выбрать их имена из выпадающего списка (рис. 2.20). Кроме того, необходимо выбрать один из двух, предложенных по умолчанию, методов определения порядка водотоков (Strahler, Streve).

Результатом расчета будет новый растровый слой, ячейки которого содержат значения порядков водотоков или «NoData» (рис. 2.21). В рассмотренном примере выполнен расчет порядков по методу Strahler.

### Водоток в пространственный объект (Stream to Feature)

Инструмент Stream to Feature (Stream Line) предназначен для преобразования растра (модель сети водотоков), в линейные векторные объекты.

#### Алгоритм вычисления Stream to Feature (Stream Line)

Функция «Водоток в пространственный объект (Stream to Feature)» – это программа, разработанная специально для векторизации сетей водотоков либо любых других растровых моделей линейных сетей, для которых известна направленность потока.

• Входная растровая модель линейной сети должна быть представлена в виде значений, которые больше или равны единице либо равны единице на фоне значений «NoData».

• Для создания растровой модели сети водотоков могут использоваться результаты функции «Суммарный сток (Flow Accumulation)» с применением порогового значения (выбор ячеек с высоким значением суммарного стока).

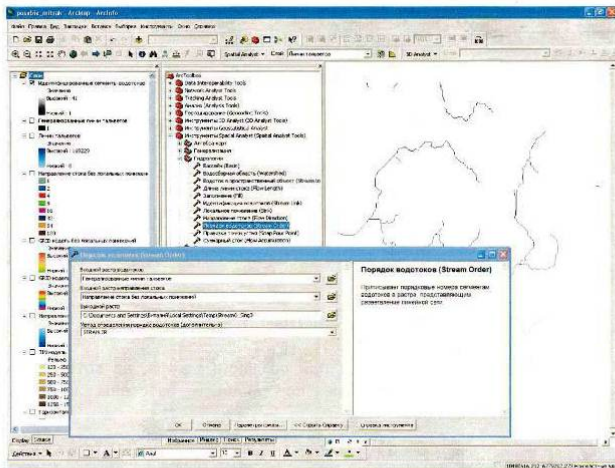


Рис. 2.20. Входной растровый слой линий водотоков

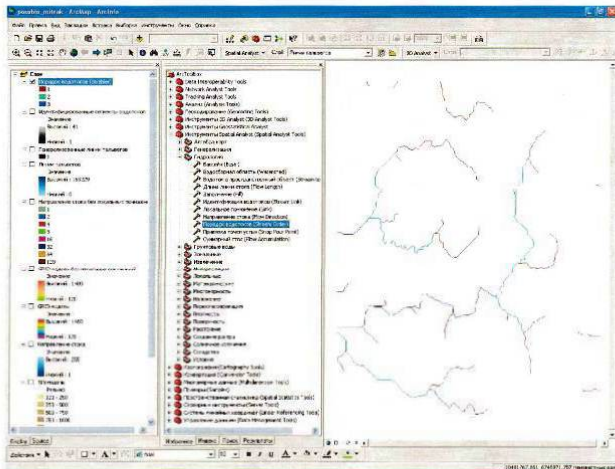


Рис. 2.21. Вычисленные порядки сегментов водотоков

• Инструмент **«Водоток в пространственный объект»** не должен применяться к растру, на котором есть несколько смежных ячеек с одинаковым значением.

• Сегменты выходного шейп-файла будут направлены вниз по течению.

### **Последовательность вычислений**

Для получения речной сети в векторном формате (полилинии) используется инструмент **«Водоток в пространственный объект (Stream to Feature)»**. При использовании инструмента необходимо загрузить растровые файлы «Генерализованные линии тальвегов» и «Направление стока без локальных понижений», указав пути к ним, либо выбрать их имена из выпадающего списка (рис. 2.22).

Результатом расчета будет новый векторный слой водотоков (полилинии), который содержит водотоки в виде отдельных сегментов (рис. 2.23).

### **Бассейн (Basin)**

Функция **«Basin»** применяется при создании растра, на котором будут выделены максимально возможные по площади бассейны в пределах рассматриваемой территории.

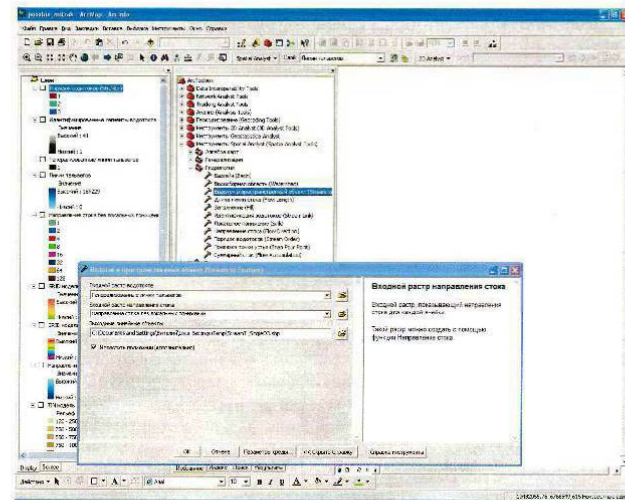


Рис. 2.22. Исходные растровые файлы для создания векторного слоя водотоков



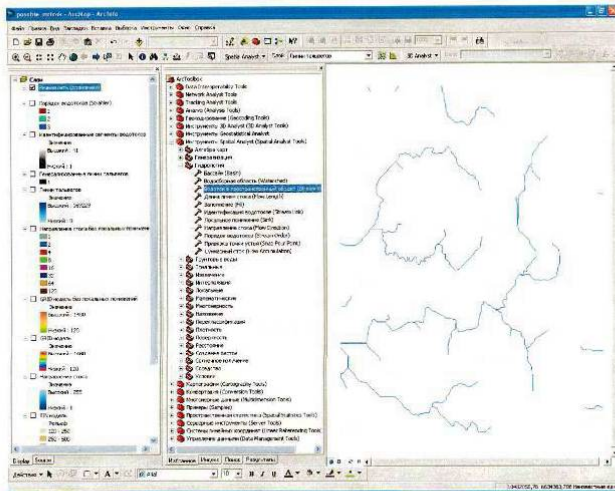


Рис. 2.23. Векторный слой водотоков

### Алгоритм вычисления Basin

Инструмент «Бассейн (Basin)» дает возможность выделить водосборные бассейны путем определения линий водоразделов между смежными бассейнами. Инструмент «Бассейн (Basin)» анализирует растр направления стока с целью поиска всех связанных ячеек, которые принадлежат к одной и той же водосборной области. Водосборные бассейны создаются путем нахождения точек устьев на краях исходной растровой модели. Затем устанавливается территория выше каждой устьевой точки (на краю растра), что приводит к созданию растра водосборных бассейнов.

- Лучшие результаты при применении функции «Бассейн (Basin)» будут получены в том случае, если при построении растра «Направления стока» будет использована опция «Force (Принудительное заполнение)».
- Все ячейки растра будут относиться к какому-либо бассейну, даже если он состоит из одной ячейки.
- Выходные данные инструмента «Бассейн (Basin)» – целочисленный растр.

### Последовательность вычислений

Для получения водосборных бассейнов в виде растровой модели используется инструмент «Бассейн (Basin)». При использовании инструмента необходимо загрузить растровый файл «Направление стока без локальных понижений», указав пути к нему, либо выбрать из выпадающего списка (рис. 2.24).

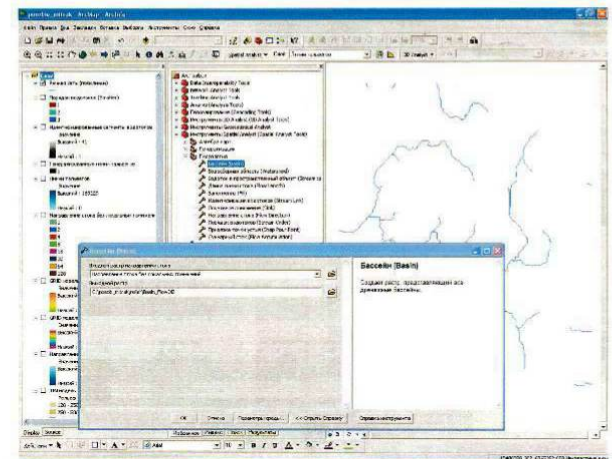


Рис. 2.24. Исходный растровый файл направлений стока без локальных понижений

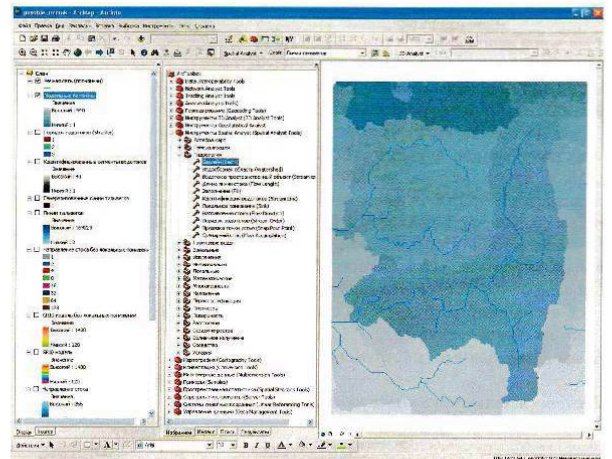


Рис. 2.25. Модельный растровый слой водосборных бассейнов

Результатом расчета будет новый растровый слой водосборных бассейнов, который содержит максимально возможные по площади бассейны, выделенные в пределах рассматриваемой территории (рис. 2.25).

### Длина линии стока (Flow Length)

Инструмент «Flow Length» предназначен для вычисления расстояния (взвешенного расстояния) вдоль линии стока.

#### Алгоритм вычисления Flow Length

Основное использование инструмента «Длина линии стока (Flow Length)» – вычисление длины самого длинного «маршрута» стока внутри заданного бассейна. Эта мера часто используется для вычисления времени заполнения бассейна. Эта операция может быть выполнена с использованием опции DOWNSTREAM/UPSTREAM:

- DOWNSTREAM — вычисляет расстояние вниз по склону вдоль линии стока, из каждой ячейки до локального понижения или выхода на краю растра.
- UPSTREAM — вычисляет самое длинное расстояние вверх по склону вдоль линии стока из каждой ячейки до линии водораздела водосборного бассейна.

Инструмент «Длина линии стока (Flow Length)» может быть также использован для создания графиков «расстояние-площадь» гипотетических осадков и поверхностного стока с применением растра весов как фактора, препятствующего движению вниз по склону.

#### Последовательность вычислений

Для получения длин линий стока в виде растровой модели используется инструмент «Длина линии стока (Flow Length)». При использовании инструмента необходимо загрузить растровый файл «Направление стока без локальных понижений», указав пути к нему, либо выбрать из выпадающего списка (рис. 2.26).

Результатом расчета будет новый растровый слой, который содержит длины линий стока в пределах рассматриваемой территории (заданного бассейна) (рис. 2.27).

### Привязка точки устья (Snap Pour Point)

С помощью функции «Snap Pour Point» находят ячейки с наибольшим суммарным стоком (потенциальные точки устьев) в пределах заданного расстояния.

#### Алгоритм вычисления Snap Pour Point

Инструмент «Привязка точки устья (Snap Pour Point)» используется для нахождения потенциальных точек устьев (т.е. с высоким суммарным стоком), которые могут быть использованы при выделении водосборных бассейнов инструментом «Водораздел (Watershed)».

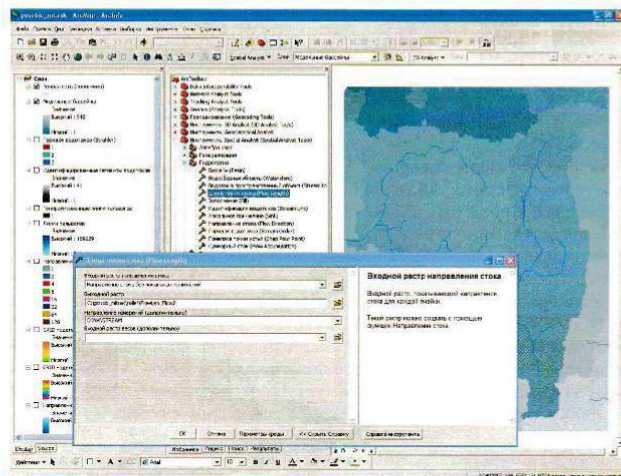


Рис. 2.26. Входной растровый слой направлений стока

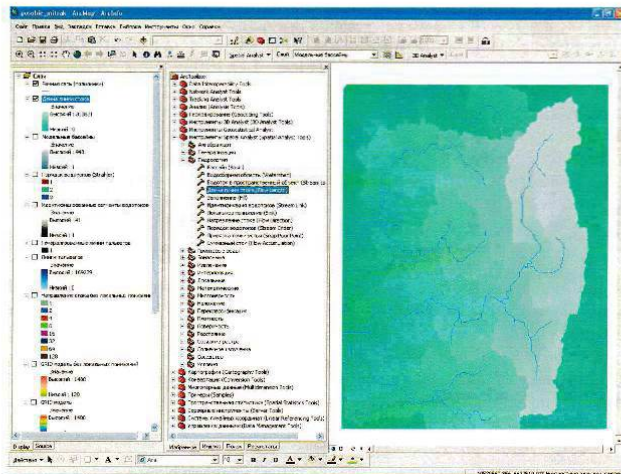


Рис. 2.27. Модальный растровый слой длин линий стока

Инструмент «Привязка точки устья (Snap Pour Point)» будет выполнять поиск ячейек с наивысшим суммарным стоком в пределах величины допуска (исходное местоположение устьев задается пользователем).

- Входными данными (точки устьев) могут быть либо растровое, либо векторное представление данных. В последнем случае точки будут внутренне конвертированы в растр для последующей обработки.

- Выходные данные – это целочисленный растр, на котором местоположение точек устьев будет привязано к ячейкам с высоким суммарным стоком.

#### Последовательность вычислений

Для получения модельных ячейек с наибольшим суммарным стоком необходимо заранее создать растровый или векторный слой, содержащий местоположение точек наблюдения (гидрологических постов) (рис. 2.28).

Далее используем инструмент «Привязка точки устья (Snap Pour Point)». При использовании инструмента необходимо загрузить векторный (растровый) слой, содержащий местоположение точки наблюдения (гидрологического поста) и растровый слой суммарного стока (линий тальвегов), указав пути к ним, либо выбрать их из выпадающего списка (рис. 2.29). Важным условием нахождения точки растра с максимальным значением суммарного стока является указания радиуса поиска, выраженного в единицах карты.

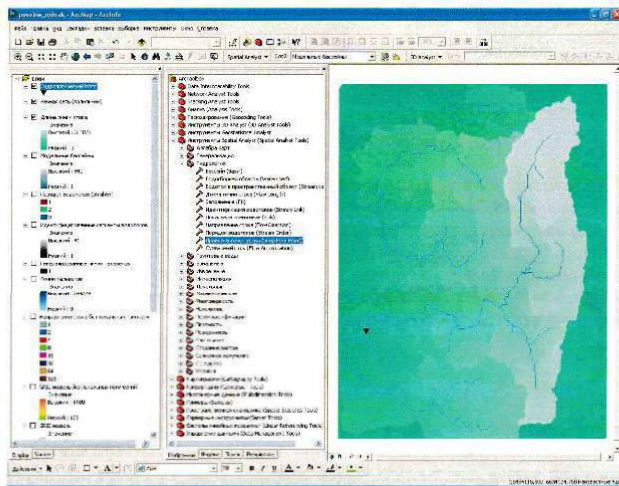


Рис. 2.28. Исходный слой замыкающих створов

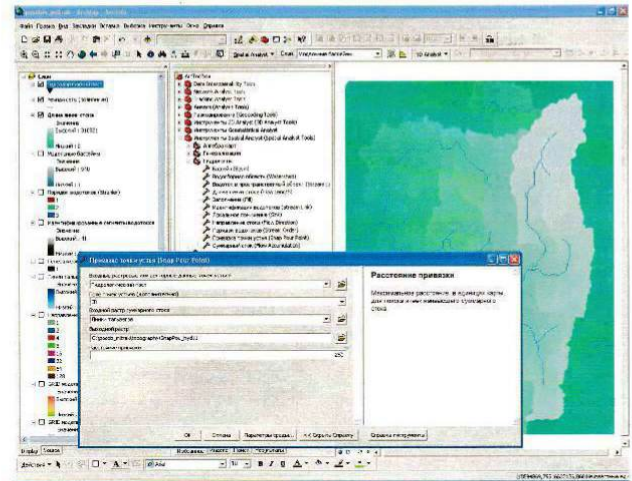


Рис. 2.29. Использование инструмента «Привязка точки устья (Snap Pour Point)»

Результатом расчета будет новый слой, который содержит ячейку растра с местоположением точки максимального суммарного стока. Относительно этой ячейки в дальнейшем будет строиться модель водосбора (рис. 2.30).

#### Водосборная область (Watershed)

Инструмент «Watershed» предназначен для определения водосборной области, расположенной выше набора «устьевых» ячейек растра.

#### Алгоритм вычисления Watershed

Водосбор представляет собой территорию, с которой осуществляется сток воды и других веществ в «точку устья» – замыкающий створ, заданный пользователем (устье реки, дамба, водомерный пост). Граница между двумя водосборами является линией водораздела (рис. 2.31).

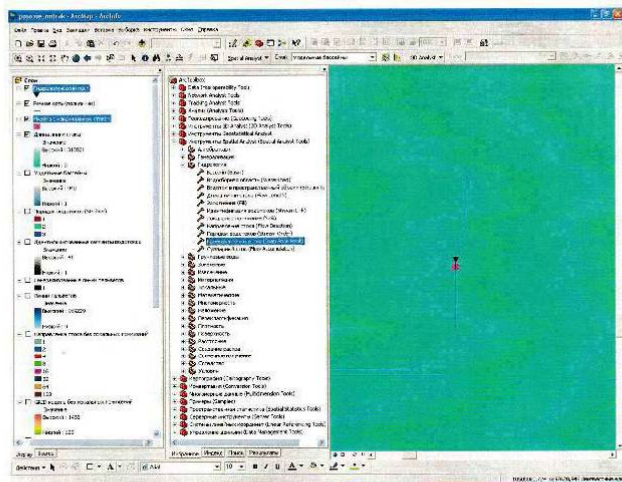


Рис. 2.30. Модельный растровый слой с местоположением точки замыкающего створа

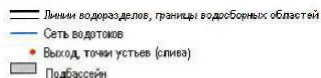
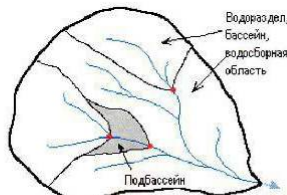


Рис. 2.31. Построение водосборной области относительно точек замыкающих створов

Каждому водосбору будет присвоено уникальное значение атрибута точки устья. Когда точки устьев представлены в виде набора растровых данных, будут использованы значения ячеек. Когда точки устьев даны в виде набора точечных данных, значения будут взяты из заданного пользователем поля.

Лучшие результаты будут получены в том случае, если сначала будет использован инструмент «Привязка точки устья (Snap Pour Point)», который позволит определить оптимальное местоположение точек устьев, привязав их к ячейкам с высоким суммарным стоком.

#### Последовательность вычислений

Для получения модельной поверхности водосбора используется инструмент «Водосборная область (Watershed)». При использовании инструмента необходимо загрузить растровые слои направлений стока и ячейки с максимальным значением суммарного стока, указав пути к ним, либо выбрать их из выпадающего списка (рис. 2.32).

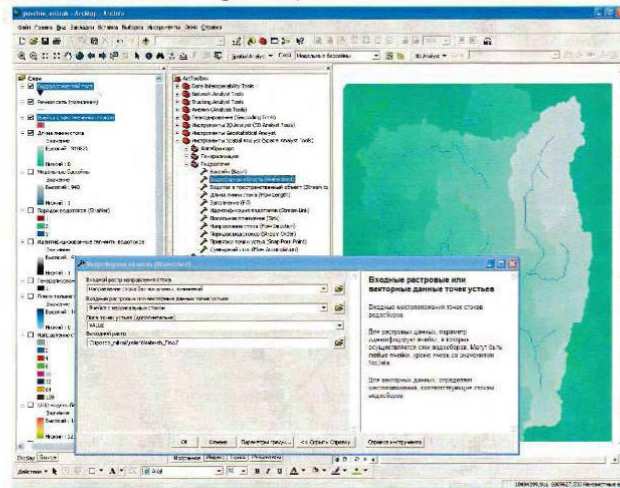


Рис. 2.32. Исходные растровые слои для построения водосборных областей

Для определения границ территории, в пределах которой будут выделены контуры водосборных бассейнов, необходимо воспользоваться опцией «Параметры среды...». Она позволяет описать параметры расчета растра, представленные на рис. 2.33.

Размеры ячеек выходного растра можно задать по желанию пользователя, например такими же, как у входного растра. Границы территорий выделения водосборов задаются через маску, в качестве которой может быть использован также входной растр «Направление стока без локальных понижений».

Результатом расчета будет новый растровый слой, который содержит ячейки, принадлежащие модели поверхности водосбора, полученной относительно точки (ячейки) с максимальным суммарным стоком (рис. 2.34).

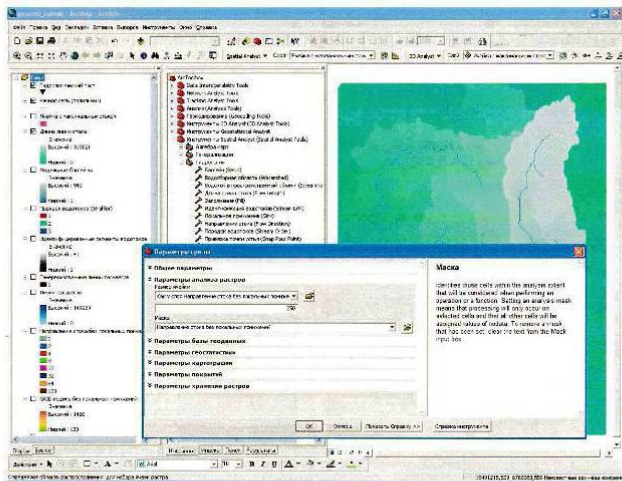


Рис. 2.33. Описание параметров расчета растра для определения границ водосбора

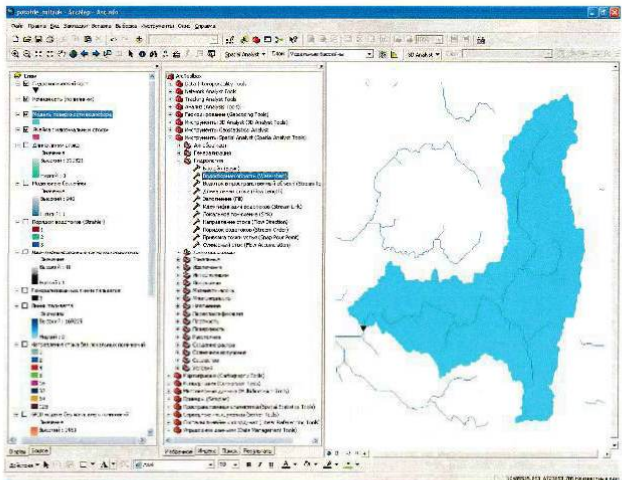


Рис. 2.34. Растровая модель полученного водосбора

### 3. Расчет средних высот и уклонов водосбора, вычисление изогипс с заданным и переменным шагом, построение продольных профилей водотоков

Исходными данными для расчета количественных параметров водосбора (площадь, средняя высота и уклон) являются его растровая модель и ЦМР (рис. 3.1).

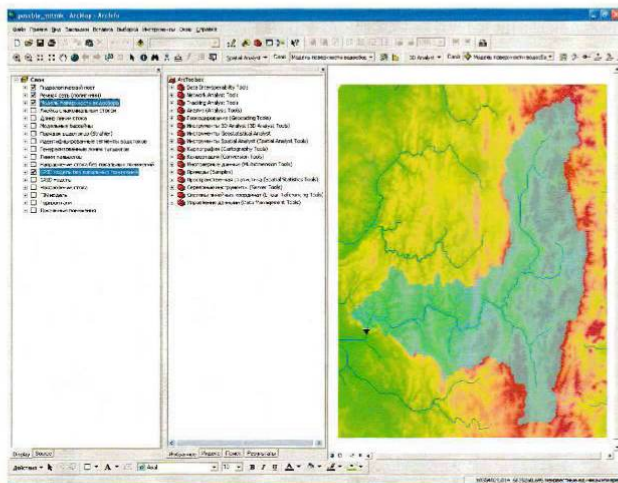


Рис. 3.1. Исходные растровые модели рельефа (ЦМР) и рассматриваемого водосбора

#### Вычисление площади водосбора

##### *На основе растрового представления данных*

Для вычисления площади в растровом представлении данных необходимо знать линейные размеры ячейки растра. Эта информация содержится в контекстном меню «Свойства слоя» в закладке «Источник» (рис. 3.2).

Далее необходимо правой кнопкой мыши открыть атрибуты слоя «Модель поверхности водосбора» и при помощи кнопки «Опции» создать новое поле, определив его формат (рис. 3.3). Так как вычисляемая площадь будет кратна целому числу (количество ячеек, умноженное на площадь одной ячейки), то формат определен как целый (рис. 3.4).

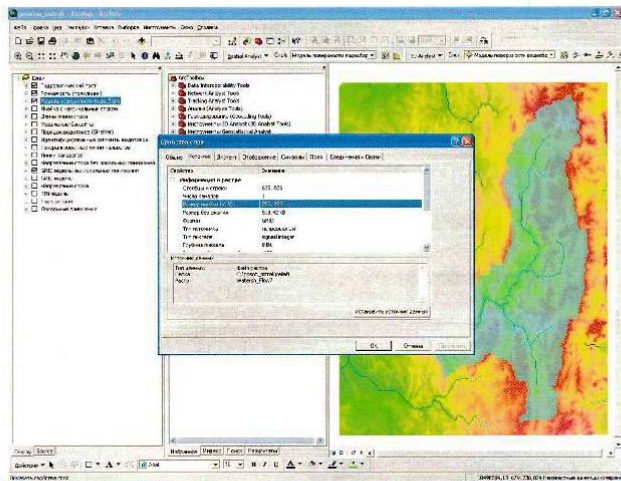


Рис. 3.2. Определение линейных размеров ячейки раstra

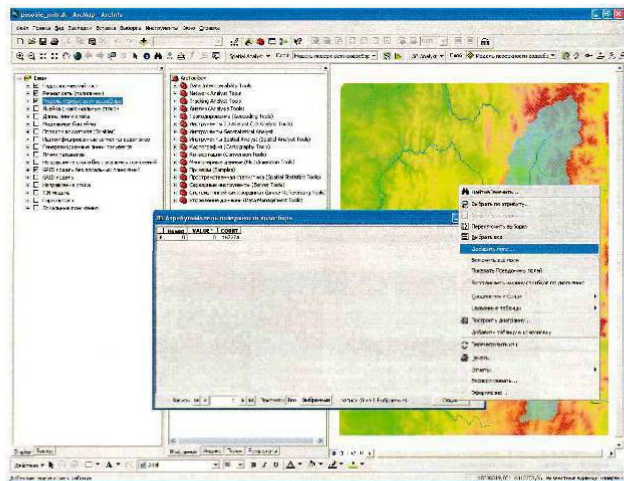


Рис. 3.3. Создание нового поля в атрибутивной базе данных (АБД)

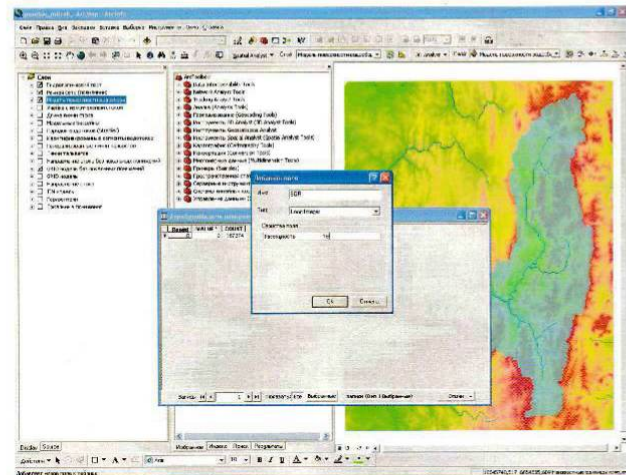


Рис. 3.4. Определение типа поля в АБД

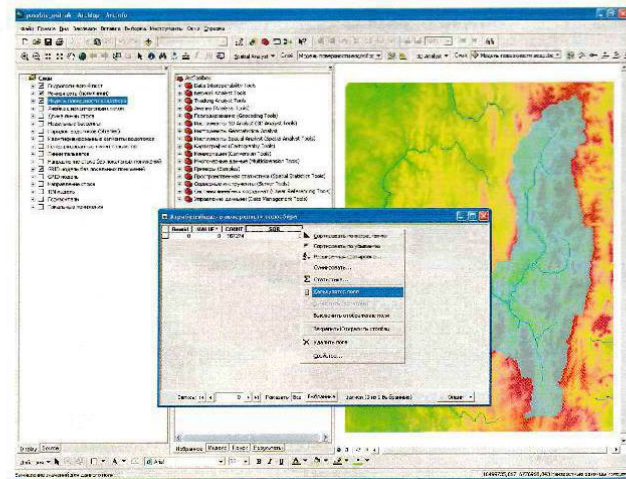


Рис. 3.5. Использование инструмента «Калькулятор поля»

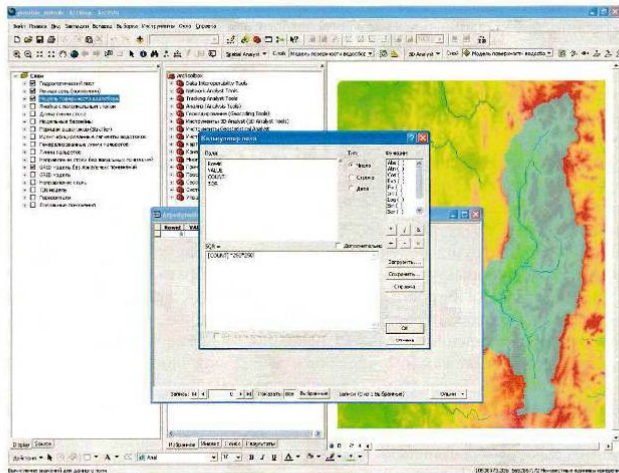


Рис. 3.6. Вычисление значений поля

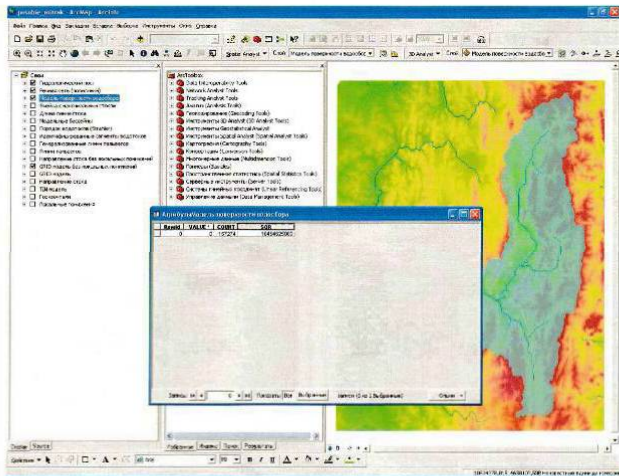


Рис. 3.7. Результат вычисления значений поля

Количество знаков зависит от размера исследуемой территории. Вычисление значений поля осуществляется с помощью инструмента «Калькулятор поля», вызываемого правой клавишей мыши (рис. 3.5). Формируем выражение для расчета площади водосбора: количество ячеек умножаем на линейные размеры одной ячейки (рис. 3.6). Результат вычисления площади водосбора будет помещен в созданное поле «SQRT» (рис. 3.7).

### На основе векторного представления данных

Для вычисления площади в векторном представлении данных необходимо провести преобразование растра в вектор. Используем инструмент «Конвертация (Conversion tools)» – «Растр в полигон» (рис. 3.8). При использовании инструмента необходимо загрузить растровый слой «Модель поверхности водосбора», указав путь к нему, либо выбрать его из выпадающего списка (рис. 3.9). Результатом расчета будет новый слой векторного представления водосбора (рис. 3.10). По аналогии с вычислением площади в растровом представлении данных необходимо создать поле «SQRT» и определить его формат как целочисленное или десятичное (количество знаков зависит от размера исследуемой территории). Вычисление значений поля осуществляется с помощью инструмента «Вычислить геометрию», вызываемого правой клавишей мыши (рис. 3.11), указав параметр «AREA». Результат вычисления площади водосбора будет помещен в созданное поле «SQRT» (рис. 3.12).

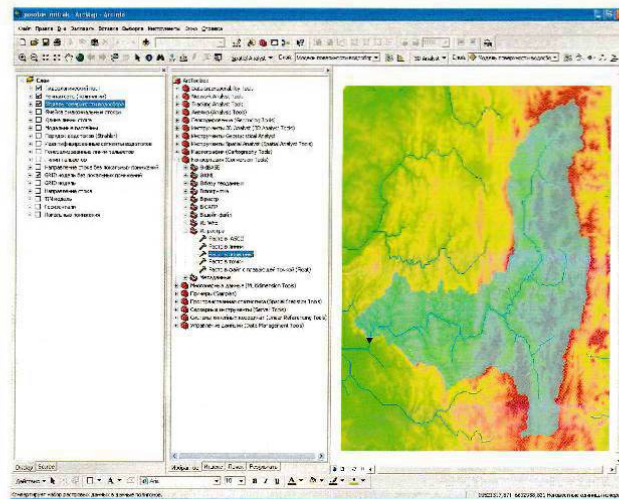


Рис. 3.8. Выбор инструмента конвертации «Растр в полигон»

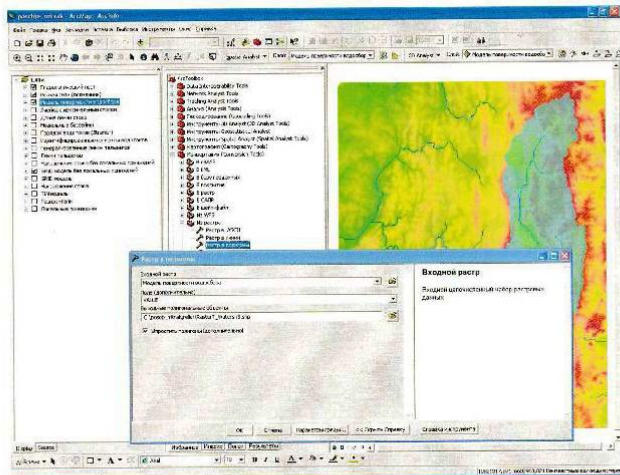


Рис. 3.9. Преобразование растрового представления данных в векторное

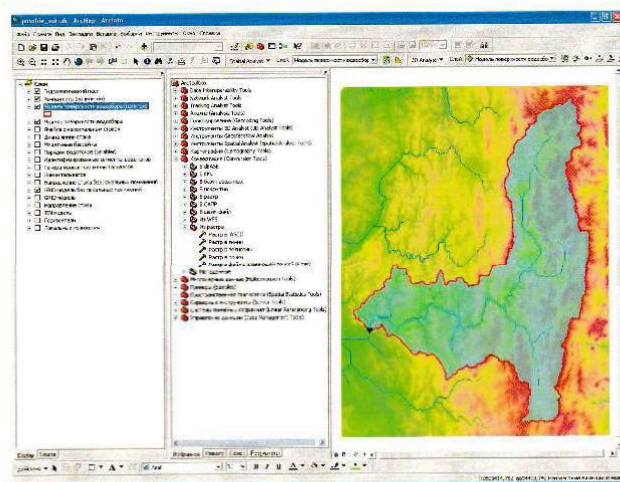


Рис. 3.10. Отображение результата преобразования

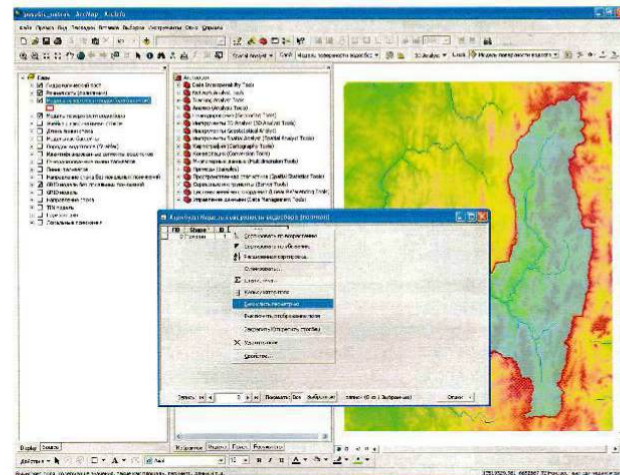


Рис. 3.11. Вычисление площади водосбора в векторном представлении

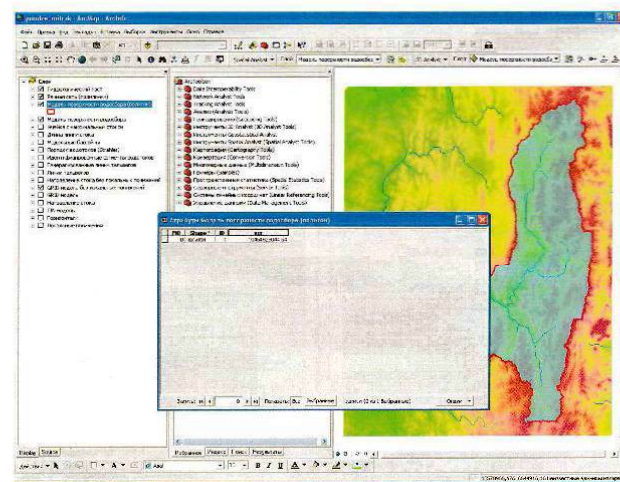


Рис. 3.12. Результат вычисления площади водосбора



## Выделение ЦМР рассматриваемого водосбора

Для выделения ЦМР рассматриваемого водосбора можно воспользоваться инструментом «Однорезультативная алгебра карт», указав в качестве входного файла исходную ЦМР всей территории, а в качестве маски – «Модель поверхности водосбора» (рис. 3.13, 3.14). Результатом расчета будет ЦМР рассматриваемого водосбора, которую можно использовать для вычисления описательной статистики высоты и уклона (рис. 3.15).

## Вычисление описательной статистики высоты рассматриваемого водосбора

Используя полученную ЦМР водосбора и сделав слой активным, необходимо вызвать правой клавишей мыши меню «Свойства» (рис. 3.16) и выбрать закладку «Источник», где в позиции «Статистика» будут находиться вычисленные значения высоты (рис. 3.17).

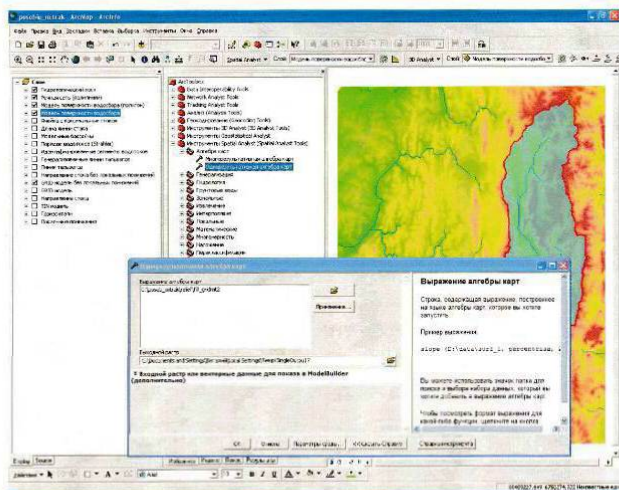


Рис. 3.13. Использование инструмента «Алгебра карт» для формирования запроса

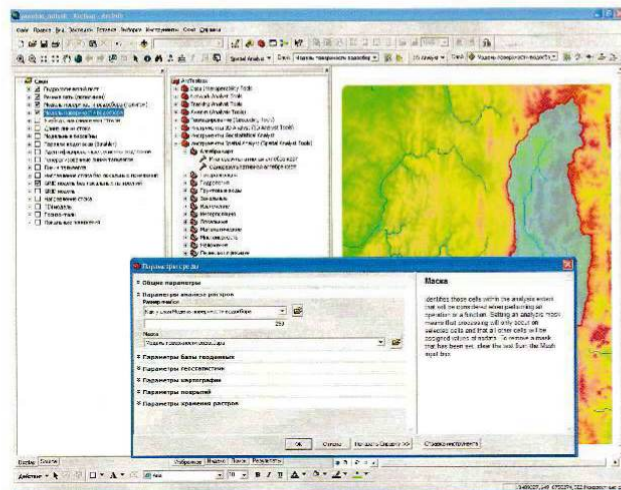


Рис. 3.14. Задание «маски» поверхности водосбора

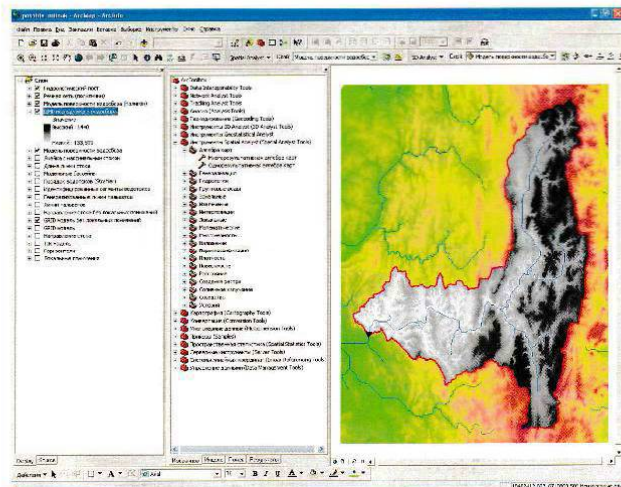


Рис. 3.15. Результат определения ЦМР водосбора

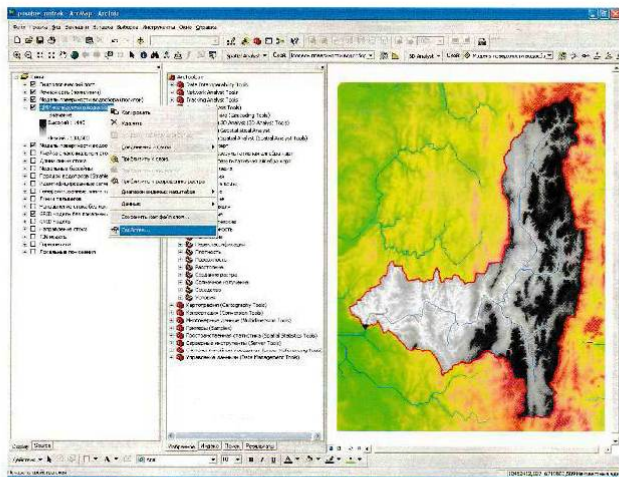


Рис. 3.16. Вычисление высотных характеристик рельефа по выбранной модели

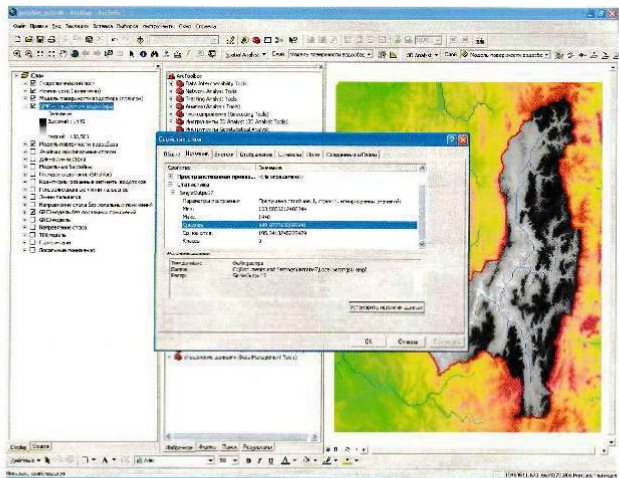


Рис. 3.17. Результат вычисления высотных характеристик рельефа

## Вычисление описательной статистики угла наклона рассматриваемого водосбора

Для вычисления описательной статистики угла наклона рассматриваемого водосбора можно воспользоваться инструментом «Однорезультативная алгебра карт», указав в качестве входного файла ЦМР рассматриваемого водосбора. В окне «Выражение алгебры карт» укажем функцию расчета угла наклона склона (Slope) и единицы измерения – градусы (Degree) (рис. 3.18). Результатом расчета будет слой, в ячейках которого содержатся значения угла наклона склона (рис. 3.19). Далее, аналогично вычислению описательной статистики высоты водосбора, получим вычисленные значения угла наклона склона (рис. 3.20, 3.21).

## Построение изолиний с постоянным и переменным шагом

При построении изолиний с постоянным и переменным шагом необходимо использовать инструмент «Поверхность» (для постоянного шага – «Изолинии», для переменного шага – «Изолинии со значениями (Contour list)») (рис. 3.22). Для построения изолиний с постоянным шагом указывается значение базовой высоты и интервал (высота сечения рельефа) (рис. 3.23), а для переменного – конкретные значения высот горизонталей (рис. 3.24, 3.25).

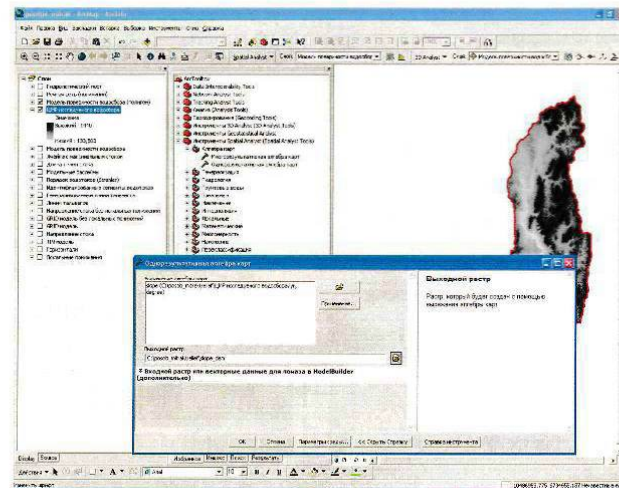


Рис. 3.18. Формирование выражения для вычисления углов наклона модели

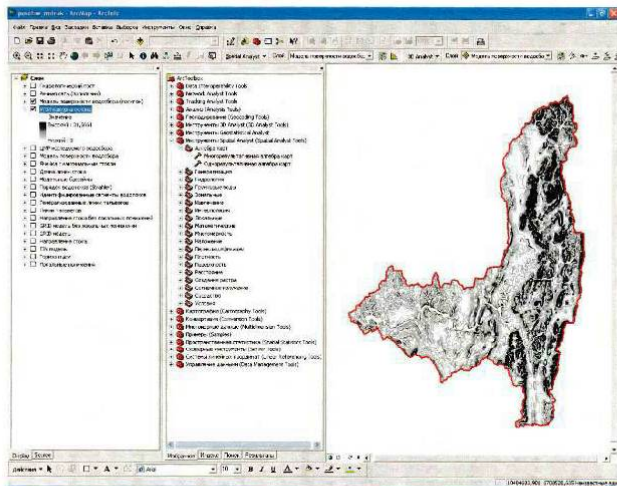


Рис. 3.19. Результат вычисления углов наклона модели

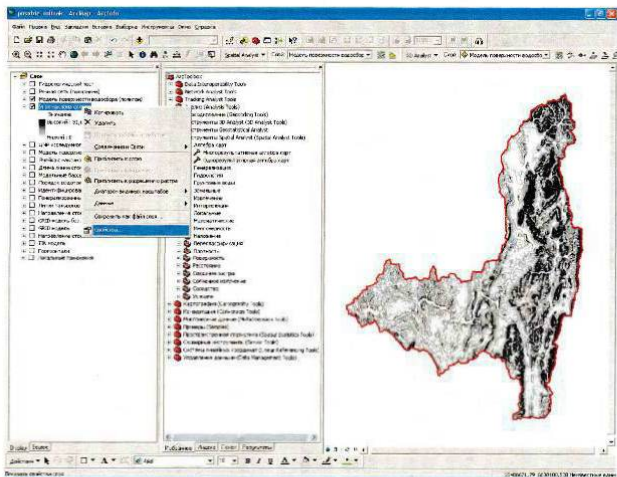


Рис. 3.20. Вычисление среднего значения угла наклона склонов

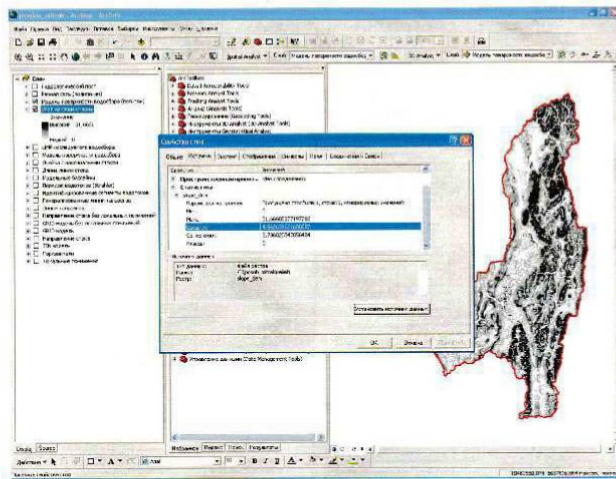


Рис. 3.21. Результат вычисления среднего значения угла наклона склонов

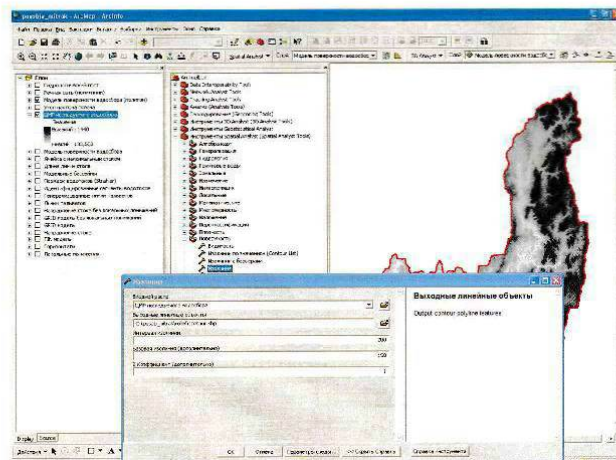


Рис. 3.22. Выбор инструмента «Поверхность» для построения изогипс

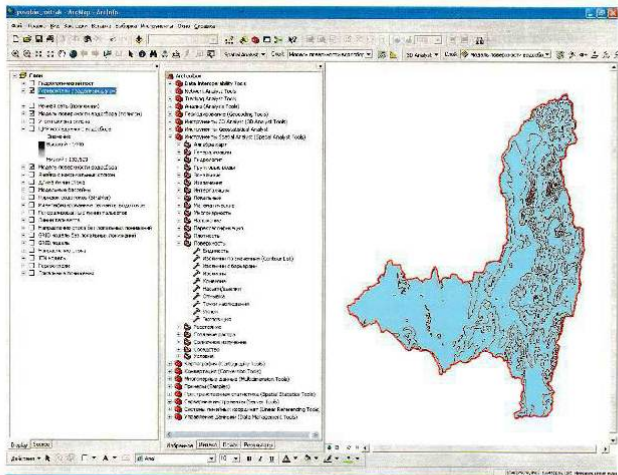


Рис. 3.23. Результат построения изогипс с постоянным шагом

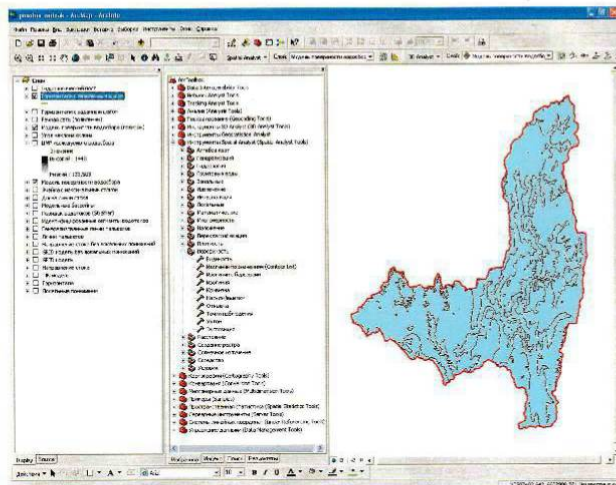


Рис. 3.25. Результат построения изогипс с заданными высотами

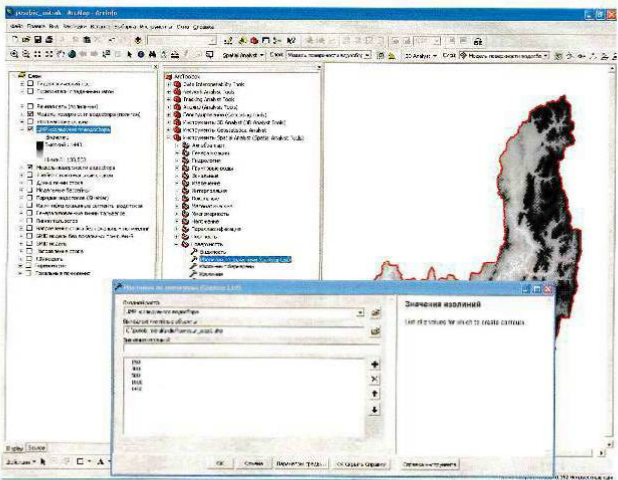


Рис. 3.24. Задание высот для построения изогипс

#### 4. Вычисление параметров водных объектов и их бассейнов по отношению к другим водным объектам и их бассейнам на основе оверлейных операций и MAP-алгебры

##### Длина и уклон водотока

Для вычисления общей длины водотока, представленного в виде набора полилиний, необходимо вычислить длину каждого его сегмента и найти сумму их длин. На примере р. Вишеры рассмотрим вычисление ее длины (рис. 4.1).

Правой кнопкой мыши открыть атрибуты слоя «р. Вишера» и при помощи кнопки «Опции» создать новое поле, определив его формат (рис. 4.2) и имя (обычно для наименования поля для вычисления длины полилинейного объекта используется имя «Length»). Количество знаков зависит от размера исследуемого водотока. Вычисление значений поля осуществляется с помощью инструмента «Вычислить геометрию», вызываемого правой клавишей мыши (рис. 4.3). Результатом этого будут вычисленные значения длины отдельных сегментов водотока (рис. 4.4). В случае если заранее не были заданы масштаб и единицы измерения, то вычисление будет производиться исходя из единиц измерения исходного векторного файла.

Поставив курсор на поле «Length» правой кнопкой мыши, открыть контекстное меню и выбрать пункт «Статистика». Результатом этого будет описательная статистика исследуемого поля (в нашем случае длин сегментов р. Вишеры). Сумма длин сегментов в данном случае будет представлять общую длину р. Вишеры (288 479 м) (рис. 4.5).

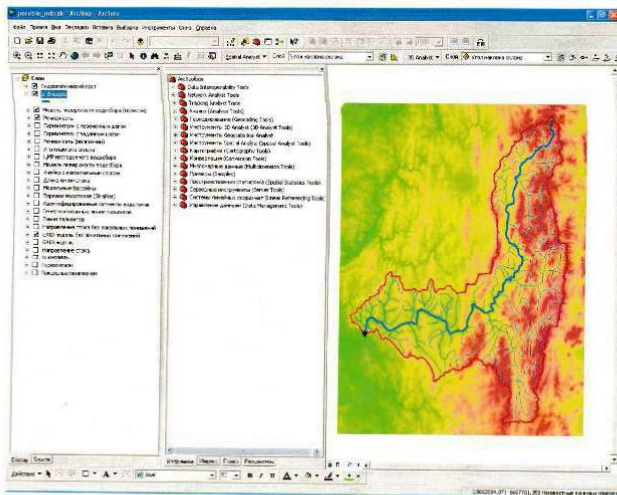


Рис. 4.1. Исходные векторные данные речной сети (главный водоток – р. Вишера)

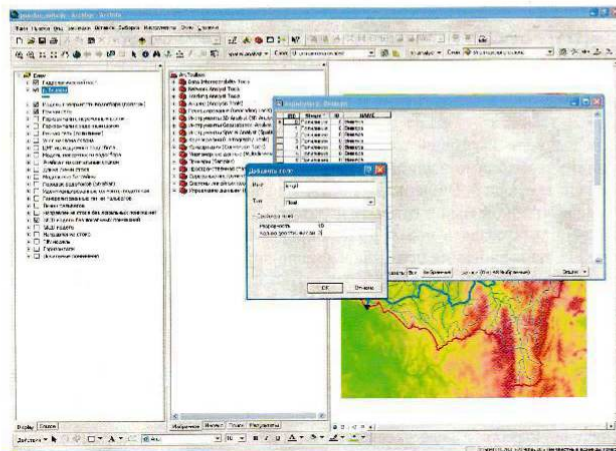


Рис. 4.2. Создание поля для вычисления длин сегментов главного водотока (р. Вишера)

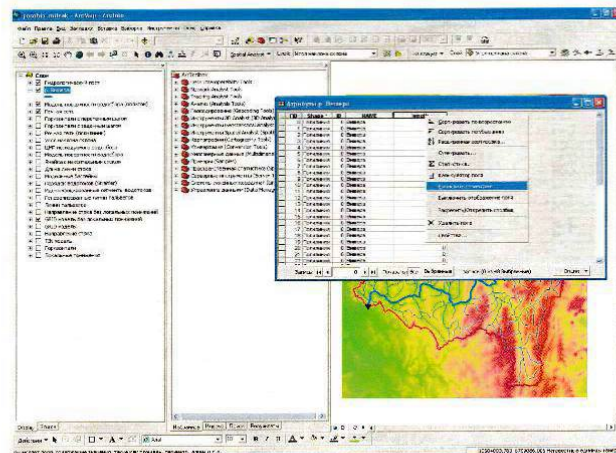


Рис. 4.3. Использование инструмента для вычисления длин сегментов р. Вишеры

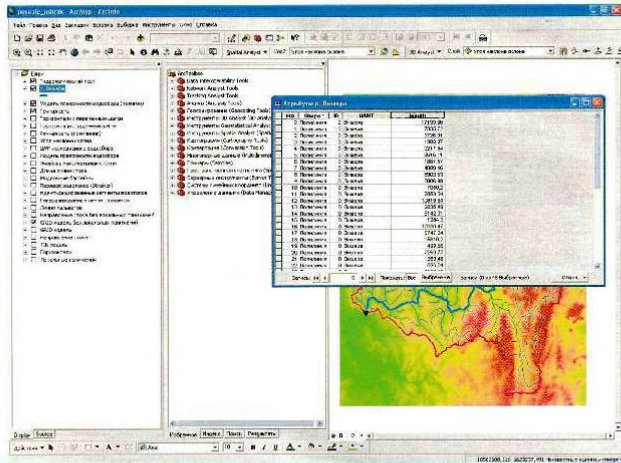


Рис. 4.4. Результат вычисления длин сегментов р. Вишеры

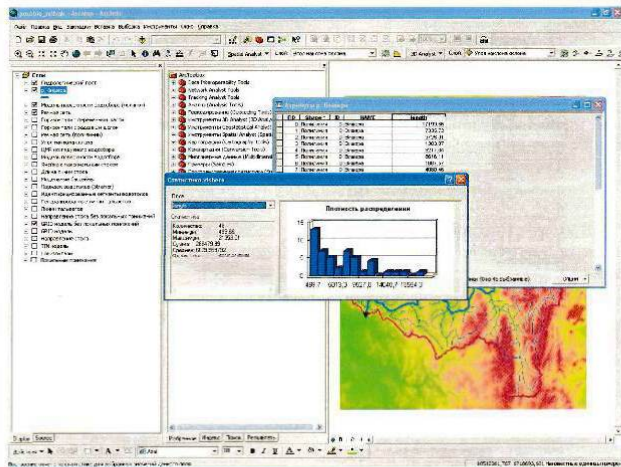


Рис. 4.5. Вычисление длины р. Вишеры

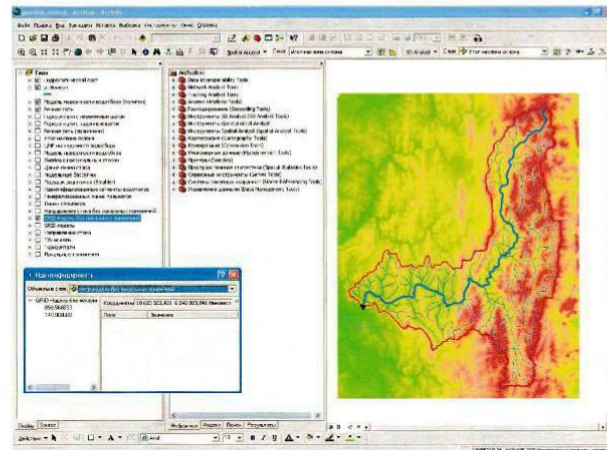


Рис. 4.6. Определение абсолютных высот истока и замыкающего створа реки

Для определения уклона водотока необходимо разницу высот точек истока и устья разделить на горизонтальное проложение (суммарная длина сегментов водотока) и умножить на 1000 для выражения результатов в промилле.

Сделать активным слой «ЦМР без локальных понижений» и выбрать кнопку «Идентифицировать». Далее, удерживая клавишу «Shift», последовательно нажать курсором мыши на точки истока и устья (рис. 4.6). В окне «Идентифицировать» появятся значения высот этих точек. В нашем случае значение уклона будет рассчитываться следующим образом  $(860 - 140)/288\,479 * 1000 = 2,5$ .

### Определение точки слияния водотоков

Для вычисления местоположения **точек слияния водотоков** необходимо вычислить координаты последних узлов полилиний, описывающих сегменты водотоков.

Правой кнопкой мыши открыть атрибуты слоя «Речная сеть» и при помощи кнопки «Опции» создать новые поля, определив их формат (рис. 4.7) и имя (обычно для наименования поля для вычисления координат используются имена «X», «Y»). Количество знаков до и после запятой задается в зависимости от используемой системы координат. Вычисление значений полей осуществляется с помощью инструмента «Вычислить геометрию», вызываемого правой клавишей мыши (рис. 4.8). Результатом этого будут вычисленные значения координат последних узлов полилиний, описывающих сегменты водотоков (рис. 4.9).

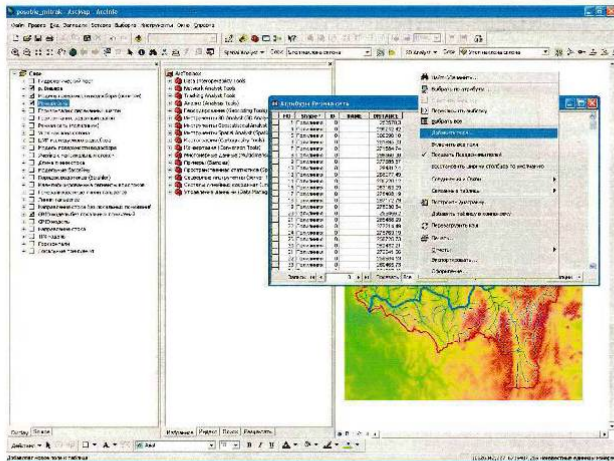


Рис. 4.7. Добавление полей «X» и «Y» для вычисления координат устьев водотоков

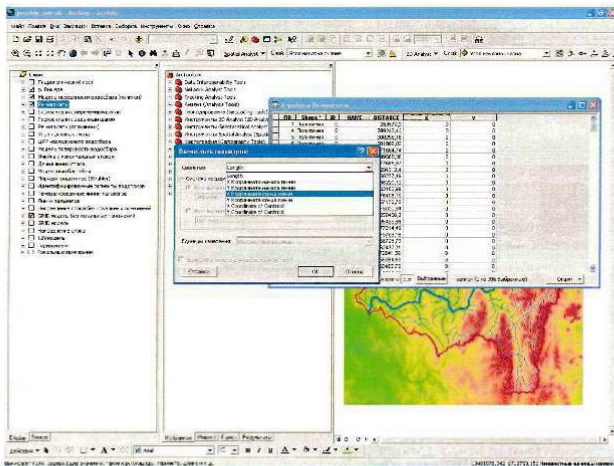


Рис. 4.8. Вычисление координат устьев водотоков

Для создания точечных объектов необходимо воспользоваться инструментом «Создать слой объектов XY» (рис. 4.10). В открывшемся окне выбрать слой «Речная сеть», который содержит координаты последних узлов полилиний, описывающих сегменты водотоков (рис. 4.11). Результатом вычислений будет новый слой, содержащий точки устьев частных водотоков (рис. 4.12).

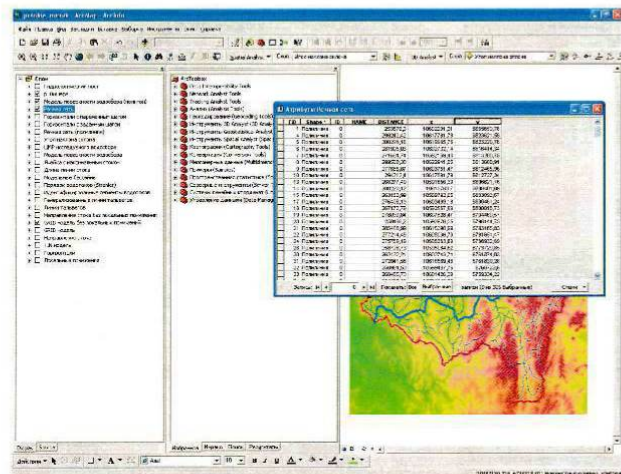


Рис. 4.9. Результат вычисления координат устьев водотоков

### Вычисление коэффициента густоты речной сети

Коэффициент густоты речной сети представляет собой отношение суммарной длины всех водотоков в пределах водосбора к его площади. Для вычисления суммарной длины водотоков, представленных в виде набора полилиний, необходимо вычислить длину каждого водотока и найти сумму их длин (рис. 4.13, 4.14).

Аналогично алгоритму вычисления длины отдельного водотока (рис. 4.2 – 4.4) правой кнопкой мыши открыть атрибуты слоя «Речная сеть» и при помощи кнопки «Опции» создать новое поле, определить его формат и имя (обычно для наименования поля для вычисления длины полилинейного объекта используется имя «Length»). Количество знаков зависит от размера исследуемого водотока. Вычисление значений поля осуществляется с помощью инструмента «Вычислить геометрию», вызываемого правой клавишей мыши.

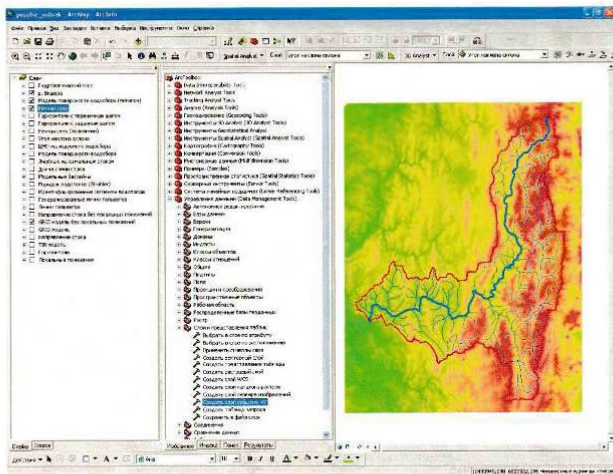


Рис. 4.10. Выбор инструмента для создания слоя устьев водотоков

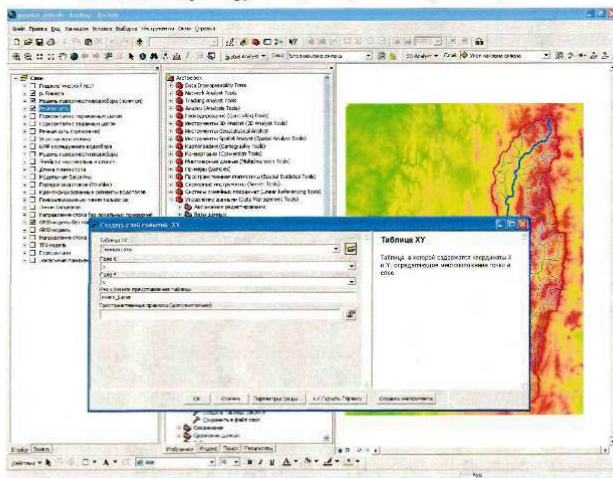


Рис. 4.11. Создание слоя устьев водотоков

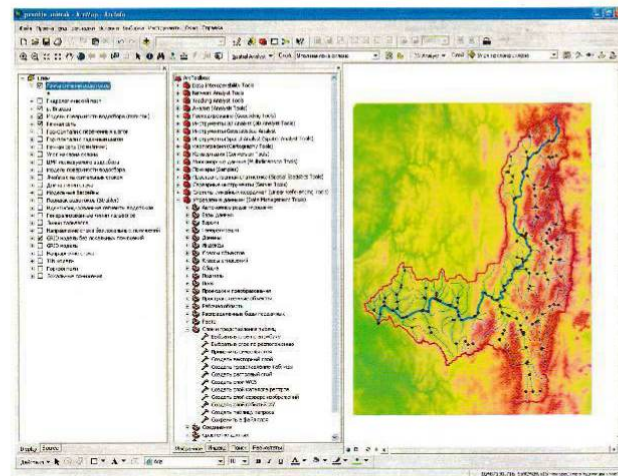


Рис. 4.12. Отображение слоя точек устьев водотоков

Результатом этого будут вычисленные значения длин отдельных сегментов водотоков. В случае если заранее не были заданы масштаб и единицы измерения, то вычисление будет производиться исходя из единиц измерения исходного векторного файла.

Поставив курсор на поле «Length» правой кнопкой мыши, открыть контекстное меню и выбрать пункт «Статистика» (рис. 4.15). Результатом этого будет описательная статистика исследуемого поля (в нашем случае длины сегментов всех водотоков). Сумма длин сегментов в данном случае будет представлять общую сумму длин всех водотоков (2 179 346 м) (рис. 4.16).

Вычисление площади водосбора было показано выше (см. п. 3). Отношение суммы длин водотоков к площади будет являться коэффициентом густоты речной сети исследуемого водосбора:  $2\,179\text{ км} / 10\,455\text{ км}^2 = 0,208\text{ км/км}^2$ .

### Вычисление коэффициента закарстованности

Коэффициент закарстованности представляет собой отношение суммарной площади всех закарстованных участков в пределах водосбора к площади данного водосбора. Для вычисления суммарной площади всех закарстованных участков в пределах водосбора, представленных в виде набора полигонов (рис. 4.17), необходимо вычислить площадь каждого и найти их сумму.



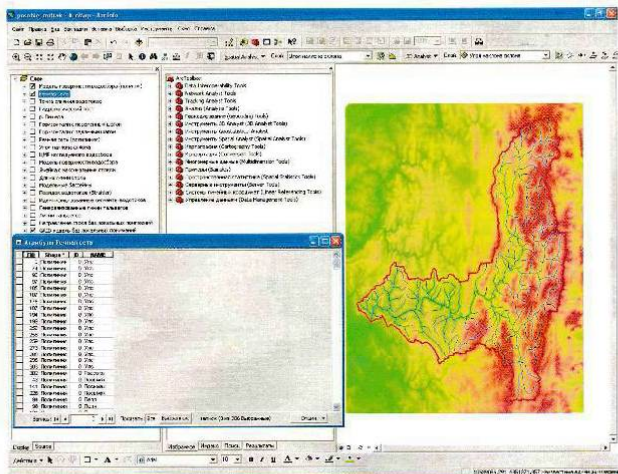


Рис. 4.13. Исходные векторные данные речной сети

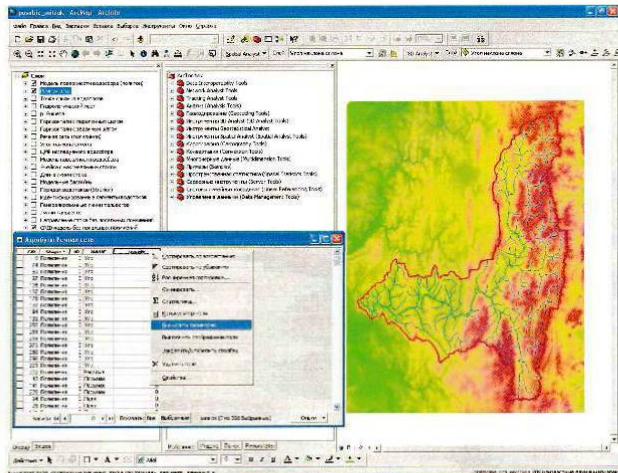


Рис. 4.14. Создание поля для вычисления длин сегментов всех водотоков в пределах всего водосбора

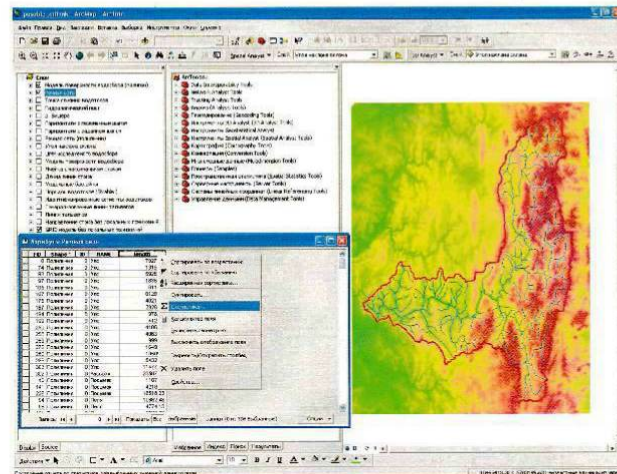


Рис. 4.15. Использование инструмента для вычисления длин сегментов водотоков

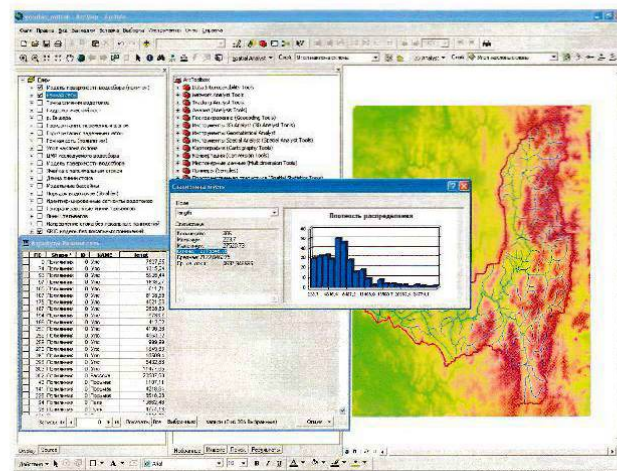


Рис. 4.16. Вычисление суммарной длины всех водотоков в пределах водосбора

Для нахождения закарстованных участков в пределах водосбора необходимо воспользоваться инструментом «Вырезание (Clip)» (рис. 4.18). В качестве входного объекта укажем векторный слой «Карст», в качестве вырезающего «Модель поверхности водосбора». Результатом работы будет новый слой «Карст в пределах водосбора» (рис. 4.19).

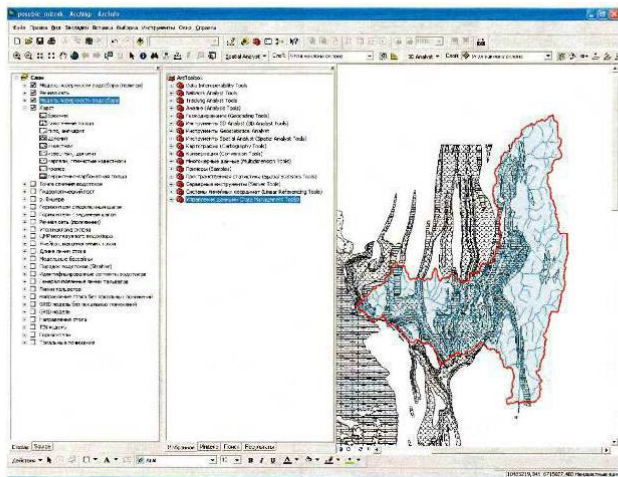


Рис. 4.17. Исходные данные для вычисления коэффициента закарстованности

Правой кнопкой мыши открыть атрибуты слоя «Карст в пределах водосбора» и при помощи кнопки «Опции» создать новое поле, определить его формат (рис. 4.20) и имя (обычно для наименования поля для вычисления площади полигонального объекта используется имя «Area»). Количество знаков зависит от размера исследуемого объекта. Вычисление значений поля осуществляется с помощью инструмента «Вычислить геометрию», вызываемого правой клавишей мыши. Результатом этого будут вычисленные значения площадей отдельных полигональных объектов. В случае если заранее не были заданы масштаб и единицы измерения, то вычисление будет производиться исходя из единиц измерения исходного векторного файла.

Поставив курсор на поле «Area», правой кнопкой мыши открыть контекстное меню и выбрать пункт «Статистика». Результатом этого будет описательная статистика исследуемого поля (в нашем случае площадь всех полигональных объектов – закарстованных участков водосбора). Сумма площадей этих объектов в данном случае будет представлять общую закарстованную площадь (4 251 943 209 м<sup>2</sup>) (рис. 4.21).

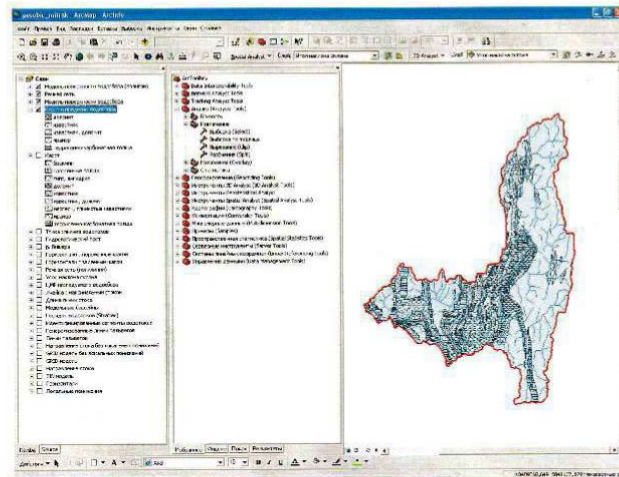


Рис. 4.19. Площадь карста в пределах водосбора

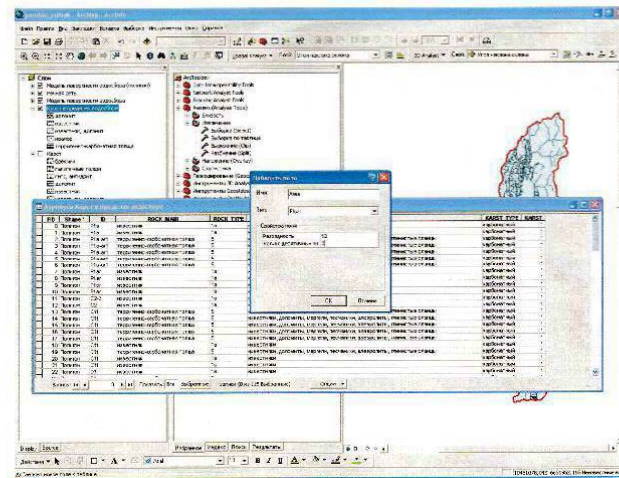


Рис. 4.20. Создание поля для вычисления площади закарстованной территории

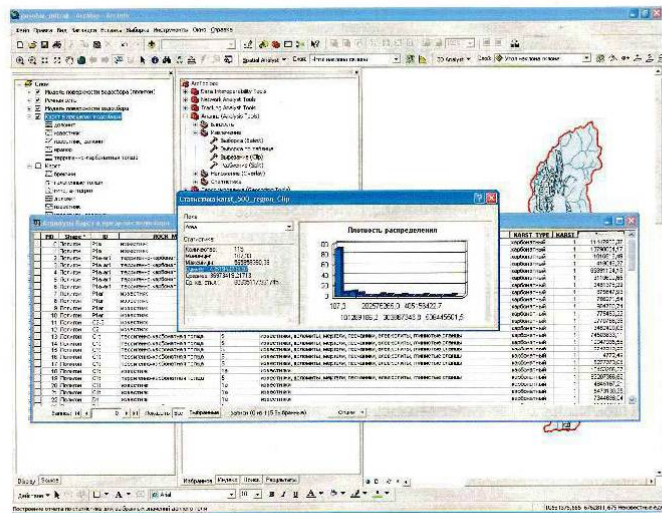


Рис. 4.21. Результат вычисления суммарной площади карста в пределах водосбора

Вычисление площади водосбора было показано выше (см. п. 3). Отношение суммарной площади закарстованных участков к площади водосбора будет являться коэффициентом закарстованности исследуемого водосбора:  $4\,252\text{ км}^2 / 10\,455\text{ км}^2 = 0,407$ .

Коэффициенты озерности, лесистости, заболоченности, распаханности и т.п. вычисляются аналогично указанному выше алгоритму (при наличии соответствующих векторных полигональных слоев).

## Литература

1. Бугаевский Л.М., Цветков В.Я. Геоинформационные системы: учеб. пособие для вузов. М.: ООО «Типография № 9», 2000. 222 с.
2. ПО «ArcGIS Spatial Analyst» [Электронный ресурс]. URL: <http://dataplus.ru/products/spatialanalyst/detail/review>.
3. Руководство по определению гидрографических характеристик картострическим способом. Л.: Гидрометеониздат, 1986. 92 с.
4. Greenlee D.D. Raster and Vector Processing for Scanned Linework // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1987. 53 (10). P. 1383–1387.
5. Jenson S.K., Domingue J.O. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1988. 54 (11). P. 1593–1600.
6. Mark D.M. Network Models in Geomorphology // Modelling in Geomorphological Systems. John Wiley, 1988.
7. Shreve R.L. Statistical Law of Stream Number // Journal of Geology. 1966. 74. P. 17–37.
8. Strahler A.N. Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology // Transactions of the American Geophysical Union. 1957. 8 (6). P. 913–920.
9. Tarboton D.G., Bras R.L., Rodriguez-Iturbe I. On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data // Hydrological Processes. 1991. 5. P. 81–100.

*Учебное издание*

***Калинин Виталий Германович  
Пьянков Сергей Васильевич***

**ГИДРОГРАФИЯ  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОГРАФИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
РЕК И ИХ ВОДОСБОРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВОГО  
КАРТОГРАФИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**ЧАСТЬ 2**

Редактор *С.Б. Русиешвили*

Корректор *Е.И. Григорьева*

Подписано в печать 30.11.2013. Формат 60\*84/8.

Усл. печ. л. 8,25. Тираж 100 экз. Заказ № 28209

Редакционно-издательский отдел Пермского государственного национального  
исследовательского университета  
614990, Пермь, ул. Букирева, 15

Изготовлено: цифровая типография «А Принт»  
614007, г. Пермь, ул. Горького, 76