

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования**

«АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Географический факультет
кафедра физической географии и геоинформационных систем

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ В ИЗУЧЕНИИ БАССЕЙНА РЕКИ

КАЛМАНКА

(выпускная квалификационная работа)

Выполнил студент
4 курса 971ФГ группы
Ольга Максимовна Ершова

(подпись)

Научный руководитель
канд. геогр. наук, доцент
Татьяна Викторовна
Байкалова

(подпись)

Допустить к защите
зав. кафедрой
канд. геогр. наук, доцент
Останин Олег Васильевич

(подпись)

Выпускная
квалификационная работа
защищена

«__»_____2021 г.

Оценка _____

д-р геогр. наук, доцент
Мария Геннадьевна

Сухова _____

(подпись)

Барнаул 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ БАССЕЙНА РЕК.....	5
1.1. Основные этапы развития и применения ГИС-технологий в гидрологии	5
1.2. Основные понятия и возможности использования ГИС-технологий в гидрологии	9
1.3. Методология расчетов основных гидрологических характеристик	13
ГЛАВА 2. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ	18
2.1. Приобское плато	18
2.2. Физико-географическая характеристика бассейна реки Калманка	21
2.2.1. Географическое положение и гидрография	21
2.2.2. Климат	23
2.3. Водный режим реки Калманка	25
ГЛАВА 3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ И РАСЧЕТНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ БАССЕЙНА РЕКИ КАЛМАНКА И ЕЁ ДОЛИНЫ	27
3.1. Изучение бассейна реки Калманка и её долины с помощью ГИС-технологий	27
3.2. Расчетные гидрологические характеристики бассейна реки Калманка	50
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	54
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ И ИСТОЧНИКОВ ..	56

ВВЕДЕНИЕ

В данное время отмечается тенденция применения современных методов исследований в области географии, что обусловлено использованием геоинформационных технологий, которым характерна возможность анализа и моделирования географических объектов и явлений по сравнению с традиционными способами.

Невозможно создать картографические и тематические базы данных, а также разработать и внедрить географические информационные системы различного иерархического уровня и территориального охвата без использования современных информационных технологий. Применение данных технологий позволяет вывести решение географических задач на высококачественный иной уровень.

Исследования в области гидрологии сложно представить без использования картографических материалов для комплексного изучения водных ресурсов и их пространственно-временного распределения. Для определения основных гидрографических характеристик рек и их бассейнов, а также визуальной оценки территории используются топографические и тематические карты разных масштабов.

Внедрение ГИС-технологий, применение цифровых картографических материалов и ЦМР (цифровая модель рельефа) значительно упрощает и повышает точность расчетов гидрографических характеристик, а также существенно расширяет возможности использования картографической информации.

Объектом исследования является бассейн реки Калманка в Калманском районе Алтайского края.

Предметом исследования являются основные характеристики бассейна реки Калманка и её долины, которые можно зафиксировать и изучить с помощью ГИС-технологий, а также гидрологических расчетов.

Цель работы: охарактеризовать параметры бассейна реки Калманка и её долины на основе ГИС-технологий и гидрологических расчетов.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи:

1. Провести обзор существующих направлений использования ГИС-технологий в изучении бассейна малых рек;

2. Проанализировать физико-географические условия формирования стока реки Калманка и её притоков;

3. Охарактеризовать параметры бассейна реки Калманка и её долины на основе ГИС-технологий и гидрологических расчетов.

Методы исследования: геоинформационное картографирование, математический, сравнительно-географический и аналитический.

Исходными фактическими данными по работе послужили фондовые материалы проектно-изыскательского института «Алтайводпроект», нормативные документы, а также литература по теме.

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ БАССЕЙНА РЕК

1.1. Основные этапы развития и применения ГИС-технологий в гидрологии

В первой половине 90-х годов прошлого века в нескольких зарубежных странах начался процесс активного внедрения геоинформационных систем в гидрологическую науку, а также её практическую часть. В данный период появляются новые компьютерные ГИС-программы, применяемые в гидрологии, некоторые из них являются вариациями предыдущих версий, но в этих используются совершенно новые методы. В усовершенствованных версиях ГИС-программ становится возможным создание модели стока и маршрутизации осадков, непрерывного потока, а также гидравлики наводнений и модели качества воды [38]. В то же время был издан целый ряд научных работ по данной тематике. В конце 90-х годов прошлого века был выпущен специальный номер журнала «Hydrological Processes», который полностью посвящен возможностям применения геоинформационных технологий в гидрологической науке. Авторы данного выпуска рассматривают технические проблемы, которые могут появляться при использовании гидрологических ГИС, в масштабах, варьирующихся от водосборной области до коротких участков рек [37]. В начале 2000-х годов стало эталоном использование ГИС с целью решения целого ряда гидрологических задач, также в ходе подготовки данных с целью прогнозирования и моделирования и кроме того в управлении водными ресурсами. Со временем способности использования ГИС-технологий, в общем, стали легкодоступны огромному числу пользователей, и несколько инструментов гидрологического моделирования стали распространены в ГИС-приложениях. Помимо этого на базе ГИС-технологий в современное

время функционируют инновационные системы моделирования паводков, а также наводнений, как на государственном, так и на областном уровнях.

В развитых государствах, прежде всего в Соединенных Штатах Америки, отсутствуют значительные ограничения согласно доступности пространственных данных. В открытом доступе и в стандартизированном виде представлена первичная посуточная и почасовая информация сетевого мониторинга по любой гидрологической, метеорологической станции или скважине мониторинга состояния подземных вод за любой год. Кроме того в раскрытом доступе располагаются подробные ЦМР, слои цифровых топографических карт, применяемых в моделях стока (в том числе свойства почвенно-растительного покрова, а также землепользования); гидрологические считанные единицы, на какие разделяется местность и сведения согласно характеристикам данных единиц. Из-за оптимальной изученности территории данные сведения обладают довольно значительным пространственным разрешением.

Приведенные характерные черты снимают ограничения согласно данным и также направляют иностранную технологию использования ГИС, в первую очередь на исследование алгоритмов и моделей, обрисовывающих гидрологические процессы и их абсолютную либо неполную реализацию в форме комплекса операций ГИС. Выше сказанное обозначает, что ГИС обладают возможностью применения подхода, ориентированного на модель, а не подход, направленный на данные (в иностранной терминологии, соответственно, *model-driven* и *data-driven approach*) [35].

Формирование универсальных систем, интеграция данных, а также формирование сетевых решений в сфере доступа к данным и их анализа характерно современной стадии формирования гидрологических ГИС за рубежом. Методика использования ГИС-технологий в развитых государствах базируется в комплексном применении возможностей типичных ГИС-пакетов (разработок фирмы ESRI) в качестве слоя с целью визуализации и управления данными, а также программных комплексов, основанных на языках высочайшего уровня [35].

Из-за отставания Российской Федерации в сфере компьютеризации, ГИС-технологии внедрялись в гидрологическую науку с огромным опозданием. Авторами первой научной работы в данной теме стали исследования Пьянкова С.В. в соавторстве с Шиховым А.Н., посвященные разным аспектам использования ГИС-технологий при моделировании гидрологических процессов и явлений. Далее на базе открытых пространственных данных, а именно цифровых моделей рельефа, ДДЗ и численных моделей мониторинга погоды рассмотрена методика геоинформационного обеспечения нынешних модификаций развития стока. Особенный интерес уделен процессу подготовки гидрологически правильных цифровых моделей рельефа. Показана методика и итоги моделирования формирования и таяния снежного покрова на базе геоинформационных технологий и моделей прогноза погоды [25].

Когда цифровые модели рельефа и данные дистанционного зондирования стали появляться в открытом доступе, то это произошло только в недавнее время, также стали доступны разные карты землепользования и оперативные сведения метеонаблюдений.

Небольшая обеспеченность цифровыми картами больших масштабов характерна для Российской Федерации, что обуславливает повышенный интерес к инновационным технологиям, использующим мелкомасштабные данные. Насыщенность сети гидрометеорологических наблюдений на территории Российской Федерации, кроме того, существенно ниже, нежели чем в странах Европейского союза и США, это обусловлено повышенным спросом у гидрологов к методикам расчета стока с малоизученных и неизученных территорий. Вышеизложенные методы обычно употребляют целый ряд характеристик, снимаемых либо вычисляемых по цифровым картам, особенно с внедрением цифровой модели рельефа.

Таким образом, в Российской Федерации решение гидрологических задач выполняется как правило в условиях неполноты, а также затрудненного доступа к исходным данным о гидрологическом состоянии местности.

В данных обстоятельствах максимальную практическую (техническую) важность имеет внедрение ГИС-технологий с целью оценки стока с изученной и малоизученной местностях, расчеты водохозяйственных характеристик, моделирования процессов русловой деформации, а также подтопления и затопления земель [35].

В конце XX века Мотовилов Ю.Г. создал информационно-моделирующий комплекс ЕСОМАГ, на базе которого находится сформированная и развитая физически аргументированная модель формирования стока, которая опирается на автоматизированные способы обрабатывания пространственных данных. Данный программный комплекс для гидрологического моделирования является первым на российском рынке, в числе которого основан источник подготовки пространственных данных на базе геоинформационных технологий (на основе ArcView 3.2a). Модель ЕСОМАГ успешно применяется в настоящее время [39].

На областном или же региональном уровне процесс введения ГИС-технологий в гидрологию начался в последующие годы. Тогда было основано несколько гидрологических ГИС, отличающихся согласно собственному назначению. В числе первых ГИС в области гидрологии стала модель бассейна Воткинского водохранилища на базе программного обеспечения ArcView 3.2a. Данная ГИС водосборной области Воткинского водохранилища была ориентирована на решение обширного класса вопросов [15]. Согласно степени трудности данные вопросы возможно разбить на четыре категории: формирование и ведение составляющих элементов гидрологической базы данных; установление и конкретизирование гидрографических, гидрологических данных рек и их водосборных областей; цифровое картографическое моделирование с целью расчета гидрографических, гидрологических и морфометрических характеристик; гидрологический анализ. В диссертации Яковченко С.Г. описана методика решения более важных практических гидрологических задач на региональном уровне орудиями ГИС [35]. Хотя в России наблюдается отставание в сфере ГИС-технологий от иностранных государств, но данные

инновации стали общепризнанным инструментом в гидрологических исследованиях. В целом это связано с проблемой доступности сведений равно как гидрометеорологических исследований, так и данных о подстилающей поверхности [17].

Изучению небольших и малых рек посвящено большое количество научных трудов. Данные работы зачастую обобщены в ряде монографий, делают акцент в исследовании разных аспектов формирования водных ресурсов и свойств воды малых равнинных рек.

Исследованию же малых рек на основе геоинформационных технологий (ГИС) посвящено относительно небольшое число трудов, одной из которых считается работа, в которой рассматривается система выделения водоохраной области небольшой реки на базе геоинформационного картографирования [6]. Основным инструментом вышесказанной методики считалась сложная комплексная ландшафтная геоинформационная система, включающая в себя большой объем данных о рельефе, гидрографии, но основное – детальные свойства всех ландшафтных систем (урочищ), расположенных в долине реки Ушайка [33].

В общем в Российской Федерации в современное время прослеживается конкретный рост в сфере использования геоинформационных технологий в гидрологии, что в значительной степени обуславливается появлением открытых данных и специальных программных товаров. Но значительное отставание от иностранных государств в этой отрасли сохраняется.

1.2. Основные понятия и возможности использования ГИС-технологий в гидрологии

В настоящее время в геоинформатике существует большое количество определений геоинформационных систем (ГИС) и технологий. Однако многие из них описывают только некоторые аспекты использования функциональных, технологических, технических и информационных

особенностей ГИС. Геоинформационные системы (ГИС) являются классом информационных систем, имеющие свои особенности. Они построены с учетом закономерностей геоинформатики и методов, применяемых в этой науке.

Геоинформационные системы равно как встроенные информативные системы предусмотрены с целью решения разных задач науки и практики на базе применения пространственно-локализованных сведений об объектах и явлениях природы и общества.

Технологии в сфере геоинформатики возможно установить равно как комплекс программно-научно-технических средств извлечения новейших разновидностей данных об окружающем мире [5].

Более устоявшимся считается определение геоинформационных систем, приведенное в терминологическом словаре: ГИС – «информационные системы, обеспечивающие сбор, хранение, обрабатывание, доступ, отображение, а также распространение пространственно-координированных пространственных данных. Геоинформационные системы включают в себя сведения о пространственных объектах в форме их цифровых представлений (растровые, векторные и другие), содержит подходящий задачам комплект функциональных возможностей ГИС, в которых реализуются процедуры геоинформационных технологий, поддерживается программным, информативным, нормативно-законным, профессиональным и организационным обеспечением».

Также геоинформационные технологии можно охарактеризовать как технологические основные принципы формирования географических информационных концепций, разрешающих осуществить многофункциональные способности ГИС [4].

Геоинформационные технологические процессы нашли обширное использование в гидрологической науке, так как главные гидрологические задачи носят ярко выраженный пространственный характер. Кроме того, в современное время существует огромное число сформированных ГИС и технологий, нацеленных на разрешение практических вопросов,

отличающихся согласно назначению, методу организации сведений и территориальному охвату.

Была разработана ГИС «Водные ресурсы» с целью управления природопользованием Алтайского края, куда включена водосборная область реки Оби, также её многофункциональные возможности содержат в себе:

1) ввод, хранение и поддержку в действующем состоянии гидрологических, а также гидрохимических сведений, характеризующих состояние и непосредственно качество поверхностных вод на базе данных стационарных пунктов службы наблюдения и контролирования Росгидромета, а также сведений по водоотведению на основе общегосударственной формы отчетности 2ТП-водхоз;

2) территориальную привязку сведений у предметам наблюдения, а именно гидрологическим постам, местам контролирования свойств воды, выпускам канализационных вод;

3) выполнение запросов на отбор и обработку данных, согласно объектам наблюдения за разный промежуток времени;

4) формирование сведений с целью выполнения точных моделей;

5) расчеты согласно построенных моделей;

6) табличное, графическое и картографическое представление данных [34].

Образцом формирования единой ГИС считается геоинформационная система гидрологического назначения в Самарской области. В этой геоинформационной системе существует возможность не только лишь сбора разобщенных данных, однако также и реализации мониторинга паводковой ситуации на базе фактических и прогнозных сведений и своевременного представления данных с целью работы паводковых комиссий [17].

Без применения нынешних информационных технологий нереально сформировать картографические и тематические базы данных, разработать иерархический уровень и территориальный охват. Их использование смогло представить решение географических задач на высококачественно ином уровне.

В сфере гидрологического прогнозирования и построения моделей анализ как правило начинается с отбора проб, а также замеров имеющихся гидрологических районов. В данном этапе изучения основными задачами считаются масштаб и достоверность замеров. Сведения имеют все шансы являться собранными на местах либо с помощью онлайн изучения [16].

Геологическая служба Соединенных Штатов Америки (USGS) считается доступной основой ДДЗ гидрологических данных. Кроме того легкодоступны посредством Интернета исторические сведения и данные о речном стоке, например в таких источниках, как National Weather Service и United States Environmental Protection Agency. Превосходство применения ПО геоинформационной системы с целью гидрологического моделирования состоит в том, что цифровые визуализации сведений имеют все шансы являться объединенными с данными в настоящем времени. Геоинформационная система совершила переворот в курировании, управлении, а также вводе трудно вычисляемых гидрологических моделей.

Для того, чтобы построить модель поверхностных вод в ЦМР и установить границы водосборных областей зачастую накладываются гидрографические сведения. Представление данных пределов считается обязательной составляющей осмысления того, куда станут стекать атмосферные осадки. К примеру, в случае таяния снежного покрова число выпавшего снега возможно внести в геоинформационную систему, для того чтобы прогнозировать количество воды, что сойдет вниз согласно течению. Вышеупомянутые данные используются как в документации местного самоуправления, так и в аграрном секторе и экологии, а также дополнительные ГИС способны дать оценку риска затоплений. Спрогнозировать какие области поймы станут затоплены в зависимости от числа осадков возможно применение цифровых моделей высот в комбинации со сведениями о предельном расходе воды.

В изучении водосборной области реки Иллинойс оказалось найдено то, что конкретная карта рисков затоплений может быть получена с применением только лишь цифровой модели рельефа, а также потоком

градуированных сведений. Исследование, базирующееся только на данных двух параметров, не предусматривающее антропогенных разработок, таких как плотины и дренажные системы, не может расцениваться всеобъемлющим итогом [38].

1.3. Методология расчетов основных гидрологических характеристик

Годовой сток принадлежит к группе основных гидрологических характеристик. Он считается накопленной чертой речного стока, также дает возможность рассуждать не только о водных ресурсах водосборных областей рек, но и степени их увлажненности, о водном балансе разных территорий. Данная характеристика считается основной при создании новейших способов гидрологических расчетов на базе применения математической статистики, а также теории вероятностей, анализа и иных методик [32].

На основе годового стока разрабатываются большая часть точных гидрологических моделей, изучаются проблемы цикличности стока рек, разрабатываются нормативы вычисленных обеспеченностей. Кроме того на годовом стоке основываются разнообразные схемы гидрологических систематизаций и районирования. В основе изучения гидрологических вопросов общетеоретического плана, исследовании связи речного стока с климатическими факторами лежат сведения о годовом стоке. Это связано с большой устойчивостью во времени годового стока и его интегральным характером.

За счет жидких и твердых осадков, а также подземных вод создается годовой сток. Подземные воды также формируются осадками, однако временной период способен быть разным. Это всё обуславливается, в первую очередь, глубиной области дренирования и быстротой стекания находящейся под землей воды [2].

Больше всего в гидрологической науке и практике требуется рассчитывать годовой сток для малоизученных и неизученных рек.

При нехватке сведений о промеренных расходах воды установление нормы годового стока выполняется одним из последующих методов:

- 1) путем прямолинейной интерполяции с применением опорных пунктов;
- 2) по картам изолиний годового стока;
- 3) согласно районных зависимостей годового стока с использованием опорных пунктов;
- 4) по уравнению водного баланса.

При гидрологических расчетах применяются соответствующие главные свойства стока:

1) расход воды (Q , в $\text{м}^3/\text{с}$), вычисляемый равно как среднее значение за определенный промежуток времени t в долголетнем разрезе; обуславливается согласно сведениям о промеренных расходах воды. Зачастую используются обычные дневные, ежемесячные и годовые расходы воды, и кроме того экстремальные;

2) модуль стока (M , в $\text{л}/\text{с} \cdot \text{км}^2$) определяется количеством воды, стекающей в единицу времени с площади водосборной области; рассчитывается равно как среднее за выше отмеченные этапы;

3) слой стока (h , мм) – усредненное количество воды, стекающей с водосборной области за определенный период, кроме того стоит отметить, что равномерно распределяется по площади;

4) объем стока (W , в км^3 или м^3) за определенный период времени t .

Отмеченные свойства зачастую соединяются определением сток воды [2].

Базовыми способами расчета стока при присутствии представленных рядов наблюдений считаются кривые обеспеченности. Повышение условных частот демонстрирует эмпирическая кривая обеспеченности, также она рассматривает расходы воды выше установленного значения. С концепции о вероятностях и математической статистики установлено то, что они имеют все шансы характеризоваться несколькими параметрами: средним арифметическим значением ряда (Q_0), коэффициентом асимметрии (C_s)

и коэффициентом вариации или же изменчивости (C_v). Данные характеристики кривой обеспеченности (распределения) считаются как правило абсолютно необходимыми при решении гидрологических вопросов. Не без их поддержки можно определить возможность превышения либо не превышения определенного (установленного) значения стока [29].

Сток за период половодья устанавливает не только лишь водный режим водотоков в весенне-летнее время года, однако также и за год в целом, так как часть стока за половодье как правило преобладает в годовом стоке (за исключением муссонных и субтропических областей), а в сухостепных и полупустынных территориях сток в водотоках зачастую прослеживается только в следствии снеготаяния.

Вычисление основных характеристик половодья, а именно максимальные расходы воды, объем стока, его длительность и характер гидрографа за половодье, при нехватке гидрологических сведений выполняется, равно как и у других данных речного стока, в основе анализа обстоятельств его развития и дальнейших обобщений в форме карт и расчетных формул.

При расчетах наибольших затрат воды применяются вычисленные схемы и в случае недостатка наблюдений, основываются на конкретных теоретических понятиях о процессах развития поверхностного стока во время половодья и паводков. Трудность действий формирования максимального стока, взаимозависимость их от большинства физико-географических, а также антропогенных факторов создают задачу разработки довольно жесткой концепции развития максимального стока крайне сложной. Но продолжительные и достаточно множественные изучения процессов развития максимального стока, в особенности дождевых паводков, дали возможность сформировать генетическую концепцию его развития и представить из неё надлежащую формулу, которая является основой при исследовании фактических вычисленных методик [30].

Множественная часть формул, созданных с целью расчетов максимального стока половодий и паводков, базируются на генетической

концепции развития поверхностного стока и соответственной формуле стока, также это приводится в нормативной документации. Генетическая концепция отображает причинно-следственные взаимосвязи, образующиеся при развитии поверхностного стока в бассейнах рек. Данная теория дает возможность учитывать процесс водоотдачи с водосборных областей в следствии снеготаяния или выпадения осадков, и кроме того характерные черты речных бассейнов, в результате чего можно обрести схематизированный гидрограф половодья и паводка [32].

Наибольшие расходы воды, которые наблюдаются в следствии прохождения паводков, формирующиеся при выпадении осадков, обладают максимальной значимостью на территории горных областей и в районах с муссонным климатом. К ним принадлежат регионы Западного Закавказья, Саян, Забайкалья, горной Якутии, бассейна р. Амура и Приморье. В отмеченных выше территориях дождевые максимумы как правило превосходят снеговые максимумы.

Так как своеобразной характерной чертой активных дождей считается их сравнительно незначительное продвижение согласно площади, то в таком случае дождевые максимумы имеют наибольшее значения при вычислении максимального стока небольших рек. По этой причине в фактическом взаимоотношении вычисление паводков значимо в первую очередь при проектировании и конструировании авто- и железных дорог, какие пересекают множество небольших водотоков, логов и балок. Находящиеся и развивающиеся на них паводки ведут к значительным разрушениям. Дождевые паводки имеют все шансы образовываться стремительно, формировать крупнейшие подъемы уровней и существенные размывающие скорости направления воды, приводя к катастрофическим ситуациям [32].

Наибольшие расходы воды паводков принадлежат к группе более трудных и сложных для изучения и обобщений гидрологических характеристик. Это связано с тем, то что паводки протекают не систематически и скоротечно. Они случаются внезапными и разносятся по местности весьма отдельно и разбросано, захватывая зачастую только

лишь незначительные участки. Всё без исключения усложняет наблюдения за паводками. Вершины дождевых паводков зачастую не фиксируются, также по этой причине выступающие в своих пределах паводки часто приходится рассчитывать согласно сохраненным ими отметкам и отпечаткам разрушений. Но установление максимальных расходов воды расчетной обеспеченности при нехватке или полном отсутствии сведений гидрологических наблюдений выполняется с применением разного вида формул и карт.

В годичном цикле перемены водности водотоков четко акцентируются полноводные и маловодные сезоны. На реках России прослеживаются два маловодных сезона: летне-осенний и зимний в районах с весенним половодьем или осенний и зимний в районах с весенне-летним половодьем и паводками. В единичные года на реках с весенним половодьем и крупнейшими осенними паводками имеют все шансы прослеживаться только летний и зимний маловодные сезоны. Отмеченные маловодные сезоны больше всего считаются соседними и в полном формируют маловодный период времени.

В меженном периоде существует определенный этап, когда сток считается минимальным. Промежуток времени с наименьшим стоком длительностью до месяца именуется периодом минимального стока. В данный момент времени водотоки питаются отчасти лишь подземными водами. Несмотря на то, что в меженный период в питании рек частично имеет место быть участие поверхностных вод [30].

ГЛАВА 2. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Приобское плато

Среди Кулундинской равнины и поймой с террасами реки Обь находится большое Приобское плато. С северо-восточного на юго-западное направление параллельно тянется уступ, которые имеет высоту от 50 до 75 метров относительно Кулундинской низменности, плато расчленено обширными и глубокими ложбинами древнего стока. Глубина ложбин древнего стока в среднем колеблется в пределах 35-85 метров, а иногда достигает 105 метров, ширина же варьируется от 4 до 26 км. По составу грунтов данные ложбины характеризуются песками, поверхность которых под влиянием воздушных переносов обрела холмисто-грядовый вид. Так и были заложены современные речные долины [8].

Приобское плато можно распределить на четыре части: северо-западную, юго-западную, юго-восточную и конечно же центральную [19].

Первая часть, а именно северо-западная находится среди Бурлинской и Нижне-Кулундинской ложбинами древнего стока. Более высокая часть плато огибается террасовыми поверхностями, довольно сильно пересечена долинами, балками и лощинами, особенно мощно эрозионное разделение поверхностей, обладающих уклоном к пойме реки Обь. Эрозионная линия тут показана балками с широкими днищами. Углубленность вреза согласно отношению к водоразделам достигает от 35 до 55 метров [18].

Во второй части (юго-западной) Барнаульско-Кучукского и Алейско-Барнаульского междуречья безусловные уровни и отметины прослеживаются в пределах от 190 до 330 метров. Среди Касмалинской, а также Кулундинской ложбинами растянулся более высокий пригорок, высоты которого в отдельных местах доходят до 335 метров [20]. Данный ограниченный по краям пригорок плотно и основательно разбит эрозионной

сетью балок и оврагов. Водоразделы Приобского плато обладают плоской, а также слабоволнистую плоскостью [7].

Третья часть (юго-восточная) Приобского плато расчленяется крупнейшими притоками реки Оби (Чарыш, Алей, Барнаулка, Касмала); с северной и восточной стороны отрезана долиной реки Оби. Приобское плато тут доходит до отметки в 300 метров. Преобладание ключевых водоразделов достигает вплоть до 110 метров, а возле реки Оби в некоторых случаях больше [3]. Это плато в данной части расчленено плотной и глубоковрезанной долинно-балочной и ложбинной сетью. Долины, а также балки врезаны согласно взаимоотношению к местным на ту территорию водоразделам в среднем на глубину от 45 до 65 метров и более [31].

И заключительная часть Приобского плато или же центральная наиболее понижена, разбита на куски ложбинами древнего стока и современной долинно-балочной сетью водосборными областями рек оз. Кулундинское. В данном бассейне центральной Кулунды меж ложбинные зоны плато размыты, что приводит к слиянию 3 ложбин стока и формированию обширной заниженной равнины. Тут большое количество озер, высохших озерных котловин, а также западин [8].

Водосборные области водотоков Приобского плато, исключая конечно протекающую р. Алей, крайне схожи в гидрографическом и ландшафтном отношениях. А именно по зональным условиям, по режимам природопользования, нынешние долины рек пролегают по днищам ложбин древнего стока, ориентированным в юго-западном направлении [1]. Главное различие водотоков Приобского плато в том, то что некоторые (Бурла, Кулунда) приобретают схожее течение с древними потоками, а прочие (Касмала, Барнаулка) обладают обратной северо-восточной ориентированностью, впадая в реку Обь [23].

В границах древнейших ложбин проходят незначительные речки, какие обладают стоком в сторону Кулундинской низменности (это Бурла и Кулунда) либо к Оби (Касмала, Барнаулка, Алей). В юго-западных

составляющих множества ложбин постоянной цепью протягиваются озерные котловины. Проточные озера на данной территории пресные, а бессточные соответственно горько-соленые и непосредственно соленые. Склоны нынешних речных долин террасированы и также обладают пойменной и двумя надпойменными террасами. В результате ветровой эрозии плоскость ложбин древнего стока и некоторые новые речные террасы обретают непростой дюнно-бугристо-грядовый рельеф. Песчаные дюны и гряды зафиксированы лесными массивами, в которых преобладают сосновые боры [26].

Лессовые почвы распространены в границах увалов плато, также они обладают просадочными качествами. Подобная мощность такой толщи колеблется в пределах 10-15 метров, а сама величина просадки достигает 60 см. Существенное преобладание высоты плато над базисом эрозии, а также простая размываемость, выпадение различных осадков и к тому же активное снеготаяние вызывают ярое формирование овражной системы. Откосы Приобского плато, а также увалы изрезаны плотной овражной сетью, промоинами и даже суффозионными воронками.

В откосах плато, которые размываются рекой Обь и её притоками, зачастую прослеживаются обвалы и оползни. Более обширно сформировано оседание откосов Приобского плато на левом берегу Оби [9].

На данной территории весьма обширно сформированы эоловые процессы, на всю площадь свойственна ветровая и водная эрозии, суффозия, обвалы, осыпи, оползни, пыльные и песчаные бури, развитие эоловых конфигураций рельефа. В особенности подвергаются эоловым движениям ложбины древнего стока, где под действием стабильных западных и юго-западных ветров передвигаются пески касмалинской свиты на существенные дистанции, возникают песочные холмы, гряды и котловины выдувания.

В границах приозерных котловин, в которых распространены нынешние насыщенные водой отложения с глиной, усиленно выражается морозное пучение грунтов.

Весьма усиленно в границах Приобского плато формируется оврагообразование как было указано выше. Данное проявление денудации земной плоскости имеет ярко выраженную форму, которая обусловлена стоком воды в стабильно постоянные водоемы. Углубленность оврагов доходит до 70 метров. Бесспорно, один из факторов увеличения оврагов – это несоблюдение поверхностного стока в ходе постройки, иной причиной считаются неотектонические возвышения. Процесс увеличения овражной сети крайне трудный, и в его формировании принимает участие не единичный фактор, а их совокупность. Значимость процессов оврагообразования в создании нынешнего рельефа Приобского плато велика [9].

2.2. Физико-географическая характеристика бассейна реки Калманка

2.2.1. Географическое положение и гидрография

Территория бассейна реки Калманки относится к Приобскому плато с древними ложбинами стока, представляющую собой плоскую, а в повышенных частях местами волнистую равнину. Абсолютные отметки здесь составляют 250-300 м. Почвы преобладают черноземные, луговые, лугово-болотные, серые лесные. Естественная растительность представлена следующими травами: разнотравно-злаковыми, злаково-полевицевыми, мятликово-пырейными, камышово-тростниковыми. Из древесных пород наибольшее распространение получили береза, осина, тополь, ветла, из кустарников черемуха, желтая акация, шиповник, калина, облепиха [27].

Исток реки Большая Калманка (верховье р. Калманки) начинается в заболоченной ложине у с. Кировское Алейского района, впадает в левобережную протоку р. Оби на 3456-м км от устья. Длина реки 76 км, площадь водосбора 1700 км². Общее падение реки 86 м, средний уклон 1,1 ‰.

Основные притоки: р. Савиха (л.б., 51-й км, дл. 19 км), р. Топчиха (л.б., 47-1 км, дл. 14 км), р. Крутиха (п.б., 38-й км, дл. 22 км), р. Малая Калманка (л.б., 9-й км, дл. 49 км), р. Марушка (л.б., 4-й км, дл. 32 км).

Общая длина гидрографической сети на водосборе 160 км, её густота 0,10 км/км².

Водосбор расположен на Приобском плато между реками Алей и Барнаулкой и имеет несимметричное строение: левобережная часть его ниже устья р. Крутихи шириной до 25 км, правобережье – всего 1,5-2 км. Поверхность водосбора – слабохолмистая равнина. Грунты суглинистые и супесчаные, почвы – черноземные, в долинах рек – луговые солонцы. Обильные грунтовые воды залегают на глубине 2-3 м (в колодцах) и часто выклиниваются по берегам рек и глубоких логов [28].

Распаханность водосбора составляет 70%, облесенность 4%, заболоченность до 1,5%.

Долина до впадения р. Крутихи извилистая, с крутыми, слабо расчлененными склонами высотой 15-20 м. Ширина ее изменяется от 0,5 до 1,8 км. Ниже устья р. Крутихи долина почти прямая; преобладающая ширина её 0,8-1,0 км, в местах озеровидных расширений – до 1,5-2,0 км. Склоны крутые, расчленены сухими балками, сложены суглинистыми грунтами, в нижнем течении – супесчаными, обычно они задернованы, на отдельных участках облесены. В среднем и нижнем течении на склонах прослеживается надпойменная терраса высотой 4-6 м над меженным уровнем; поверхность её часто заболочена, местами кочковатая.

Пойма двухсторонняя, до впадения р. Крутихи её ширина 0,2-0,6 км, высота 1,0-1,5 м над меженным уровнем. Ниже устья р. Крутихи ширина поймы 0,4-0,6 км, в местах расширенной долины – до 1,5 км, высота над меженным уровнем 2-3 м. Поверхность поймы открытая, сухая, пересечена ложбинами и невысокими валами; в понижениях она заболочена, на повышенных местах грунты солончаковые [28].

В верховьях (на протяжении первых 6 км) река течет в хорошо выраженном русле с высокими (до 4,5 м) суглинистыми берегами. Ниже (на протяжении 16 км) русло не выражено, река протекает здесь по заболоченному, заросшему камышом и тростником дну долины, местами разветвляется на небольшие рукава. На среднем участке, где в реку впадают основные притоки, русло хорошо выраженное, шириной от 10 до 60 м, умеренно извилистое с суглинистыми или супесчаными пологими берегами, высотой от 1 до 5 м. Дно илистое.

Глубины на перекатах 0,2-0,3 м, в плесах – до 3-3,5 м; плесы сильно зарастают водной растительностью, на перекатах имеется слабое течение воды.

Начиная с 18-го км от устья, русло постепенно расширяется, а глубина увеличивается и на 15-м км достигает 5,4 м. Река на этом участке находится в подпоре от р. Оби. Берега реки и пойма на последних 8 км от устья в период обследования были затоплены [27].

2.2.2. Климат

Рассматриваемая территория находится в центральной части Алтайского края, что определенным образом сказывается на климатических условиях водосборной области р. Калманка.

Благодаря континентальному положению и особенностям циркуляции атмосферы, климат рассматриваемого района характеризуется суровой зимой с сильными ветрами и метелями, весенними и осенними заморозками, жарким летом [22].

Годовая средняя температура воздуха составляет +1,3°C. Наиболее холодным месяцем на данной территории является январь со средней суточной температурой воздуха -17,5°C и ее абсолютным минимумом в отдельные годы -52°C.

Сумма среднесуточных температур воздуха изменяется от 2380°C (выше 0°C) до 2310°C (выше 5°C) и 2040°C (выше 10°C). Самая высокая

средняя месячная и абсолютная максимальная температура воздуха наблюдаются в июле: $+19,8^{\circ}\text{C}$ и $+38^{\circ}\text{C}$. Несмотря на жаркое лето, отдельные, наиболее поздние, заморозки в воздухе наблюдаются даже во второй половине июня 19.06. (в среднем 20 мая), а самые ранние в конце августа 23.08. (в среднем 16 сентября). Безморозный период длится 118 дней. Амплитуда колебания среднемесячных температур воздуха за год достигает $36,6^{\circ}\text{C}$, а абсолютных 88°C .

Средняя годовая температура поверхности почвы составляет 3°C , абсолютные ее значения наблюдаются в июле ($+60^{\circ}\text{C}$) и в январе (-48°C).

Абсолютная влажность воздуха находится в прямой связи с его температурой (чем выше температура воздуха, тем большее количество водяного пара в нем может находиться). Абсолютная влажность имеет ярко выраженный годовой ход. Наибольших значений она достигает в жаркие летние месяцы (июль $15,5$ гПа, август $13,4$ гПа), минимум приходится на январь ($1,6$ гПа) и февраль ($1,7$ гПа). Многолетняя амплитуда колебания среднемесячных значений абсолютной влажности воздуха достигает $6,7$ гПа [22].

Относительная влажность характеризует степень насыщения воздуха водяным паром. Среднегодовая относительная влажность воздуха за многолетний период в районе Калманки составляет 71%. Внутри года ее средние месячные значения колеблются от 56% (май) до 80 % (ноябрь). В холодный период года относительная влажность менее подвержена колебаниям, чем в тёплый.

Режим атмосферных осадков, выпадающих на поверхность с. Калманка определяется общей циркуляцией атмосферы над Западной Сибирью и увлажнённостью воздушных масс, приходящих к рассматриваемой территории. По количеству выпадающих за год осадков с. Калманка относится к зоне умеренного увлажнения.

Распределение осадков внутри года и особенно в многолетнем разрезе неравномерное. Общее количество выпадающих за год осадков равняется в среднем 544 мм (с поправками к показаниям осадкомера). Из них 364 мм

или 60% выпадает в тёплое время года и 180 мм – в холодный период. Главный максимум числа дней с осадками приходится на начало зимы, а вторичный связан с летним максимумом осадков. Летние осадки могут достигать интенсивности 1,5-2,0 мм/мин.

Изменчивость годовых и месячных сумм осадков из года в год довольно велика, особенно в тёплый период. В отдельные годы, в зависимости от условий атмосферной циркуляции, месячные количества осадков значительно отклоняются от среднего многолетнего значения [22].

2.3. Водный режим реки Калманка

В формировании водного режима реки Калманка принимают участие талые снеговые воды, дождевые осадки и грунтовый сток. Сочетание этих источников питания реки определяет изменение её водности в течение года.

Для режима реки характерно высокое весеннее половодье, в течение которого проходит 85-95% годового стока и низкие дождевые паводки в теплое время года.

Весенний подъем уровней и расходов на р. Бол. Калманке начинается подо льдом в конце первой декады апреля, в зависимости от метеорологических условий весны и заканчивается в первой-второй декадах мая. В начале подъем уровней идет постепенно, затем наступает стремительный скачок и уровень за несколько дней достигает максимума. Максимальный расход весеннего половодья является обычно наивысшим годовым. Даты прохождения максимумов приходятся чаще всего на вторую декаду апреля, отклоняясь в отдельные годы на 15-20 дней. Амплитуда колебаний уровня в верхнем течении около 1,5 м, в среднем – до 2,0-2,6 м, на устьевом участке – 4,0-4,5 м, достигая в отдельные годы 5,0 м.

В середине второй декады апреля в устье начинает сказываться подпор от р. Оби. Продолжительность стояния высоких уровней, вызванных подпором, зависит от времени и продолжительности стояния высоких горизонтов воды на р. Оби [28].

Во второй-третьей декаде мая (на приустьевом участке конец августа – начало сентября) на реке устанавливается летне-осенняя межень, прерываемая иногда дождевыми паводками. Минимальные уровни летне-осенней межени бывают обычно в августе-сентябре, они же являются самыми низкими уровнями года. Высота подъема за счет дождей невелика и составляет 10-20 см.

Постепенно без заметных изменений в режиме стока летне-осенняя межень переходит в зимнюю. В зимний период с наступлением ледостава в реке повышаются за счет стеснения русла льдом, расходы же достигают своего минимального значения, т.к. река полностью переходит на грунтовое питание.

Водный режим притоков р. Калманки мало изучен. Весеннее половодье, как правило, проходит в заснеженном русле, сопровождается заторными явлениями. Подъем уровня составляет 1,5-3,0 м.

В верхнем и среднем течении притоки летом обычно пересыхают, в нижнем течении за счет выклинивания грунтовых вод некоторые из них имеют постоянный сток. При наличии дождей уровень воды повышается на 20-30 см [27].

ГЛАВА 3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ И РАСЧЕТНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ БАСЕЙНА РЕКИ КАЛМАНКА И ЕЁ ДОЛИНЫ

3.1. Изучение бассейна реки Калманка и её долины с помощью ГИС-технологий

За основу построения карт в данной выпускной квалификационной работе была взята глобальная цифровая модель рельефа (Global Digital Elevation Model) ASTER (Усовершенствованный спутниковый радиометр теплового излучения и отражения). ASTER GDEM охватывает поверхность суши между 83° с.ш. и 83° ю.ш. и насчитывает 22.600 фрагментов размером 1°x1°. Статистически ASTER GDEM соответствует предварительной оценке точности в 20 метров по всему миру [36].

Входящий в состав профессиональной корпоративной платформы линейки ESRI-ArcGIS дополнительный модуль Spatial Analyst предоставляет многочисленным пользователям этой платформы богатый выбор различных инструментов, которые позволяют обеспечить проведение пространственного анализа как для растровых, так и для векторных данных.

Реализующие возможности дополнительного модуля Spatial Analyst различные инструменты разделены на несколько категорий или групп в зависимости от своей функциональности.

Изучение водотоков в профессиональной корпоративной платформы линейки ESRI-ArcGIS осуществляется при помощи обширной группы различных инструментов под названием Гидрология (Hydrology) (табл. 3.1.1). Данные инструменты могут использоваться по отдельности или в совокупности для построения сети водотоков, выделения площадей различных водораздельных бассейнов, самих водоразделов,

а также для моделирования потока воды в реке по какой-либо земной поверхности [24].

Таблица 3.1.1. – Описание инструментов из группы Гидрология (Hydrology) дополнительного модуля Spatial Analyst ArcGIS [24]

Инструмент из группы Гидрология (Hydrology)	Описание инструмента из группы Гидрология (Hydrology)
Бассейн (Basin)	Данный инструмент создает растровый слой, содержащий контуры всего дренажного бассейна, представляющего собой территорию, с которой осуществляется сток воды в устье реки
Заполнение (Fill)	Данный инструмент заполняет локальные понижения в растре поверхности для удаления всех небольших ошибок и неточностей, присущих данным.
Суммарный сток (FlowAccumulation)	Данный инструмент создает растр потока накопления в каждую ячейку. Можно дополнительно применить фактор веса.
Направление стока (FlowDirection)	Данный инструмент создает растр направления стока из каждой ячейки по ближайшей соседней ячейки вниз по склону наибольшей крутизны.
Длина линии стока (FlowLength)	Данный инструмент вычисляет расстояние вверх или вниз по течению, или взвешенное расстояние, вдоль потока для каждой ячейки.

Локальное понижение (Sink)	Данный инструмент создает растр, определяющий локальные понижения или районы внутреннего дренажа.
Инструмент Привязка точки устья (SnapPourPoint)	Данный инструмент привязывает точки устьев к ячейке с наибольшим суммарным стоком в пределах заданного расстояния.
Идентификация водотоков (StreamLink)	Данный инструмент присваивает уникальные значения секциям растровой линейной сети, расположенным между сочленениями линий.
Порядок водотока (StreamOrder)	Данный инструмент присваивает число, определяющее порядок, сегментам растра, представляющим сегменты линейной сети.
Водоток в пространственный объект	Данный инструмент преобразует растр, представляющий линейную сеть в векторные объекты, представляющие сеть линий.
Водораздел (Watershed)	Данный инструмент определяет водосборную область, расположенную выше набора ячеек растра.

Водосборные бассейны рек в ArcGIS выделяются в рамках окна анализа путем определения водоразделов между различными водными бассейнами. Входной растр направления стока анализируется для поиска всех смежных ячеек, которые относятся к одной и той же водосборной

области реки. Водосборные бассейны рек создаются путем размещения точек устьев на крайних областях окна анализа. Далее определяются локальные понижения. Затем устанавливается область выше каждой точки устья, из которой осуществляется сток в эту точку, что приводит к созданию раstra водосборных бассейнов. Также создание растровых слоев водосборных бассейнов рек будет успешным, если во время осуществления данного процесса была активирована опция Сток из крайних ячеек направлен наружу (Force all edge cells to flow out ward). Все ячейки раstra будут относиться к какому-либо бассейну, даже если он состоит из одной ячейки.

Инструмент Заполнение (Fill) заполняет локальные понижения в растре поверхности для удаления всех небольших ошибок и неточностей, присущих данным (рис. 3.1) [12].

Локальное понижение представляет собой ячейку с неопределенным направлением стока, вокруг нее не существует ячеек с более меньшей высотой, чем у самой этой ячейки. Точка устья – это пограничная ячейка, которая обладает наименьшей высотой для водосборной области локального понижения. Если бы локальные понижения были заполнены водой, то в этих точках вода «утекала бы» с поверхности раstra.

Ограничение z задает максимальное допустимое различие между глубиной понижения и точкой устья и определяет, какие понижения заполнятся, а какие нет. Ограничение по z не является значением максимальной глубины, до которой будет заполнено локальное понижение.

Все локальные понижения, которые по глубине меньше, чем ограничение по z , ниже, чем самая низкая из прилегающих соседних ячеек, и будут заполнены до высоты своих точек устьев [12].

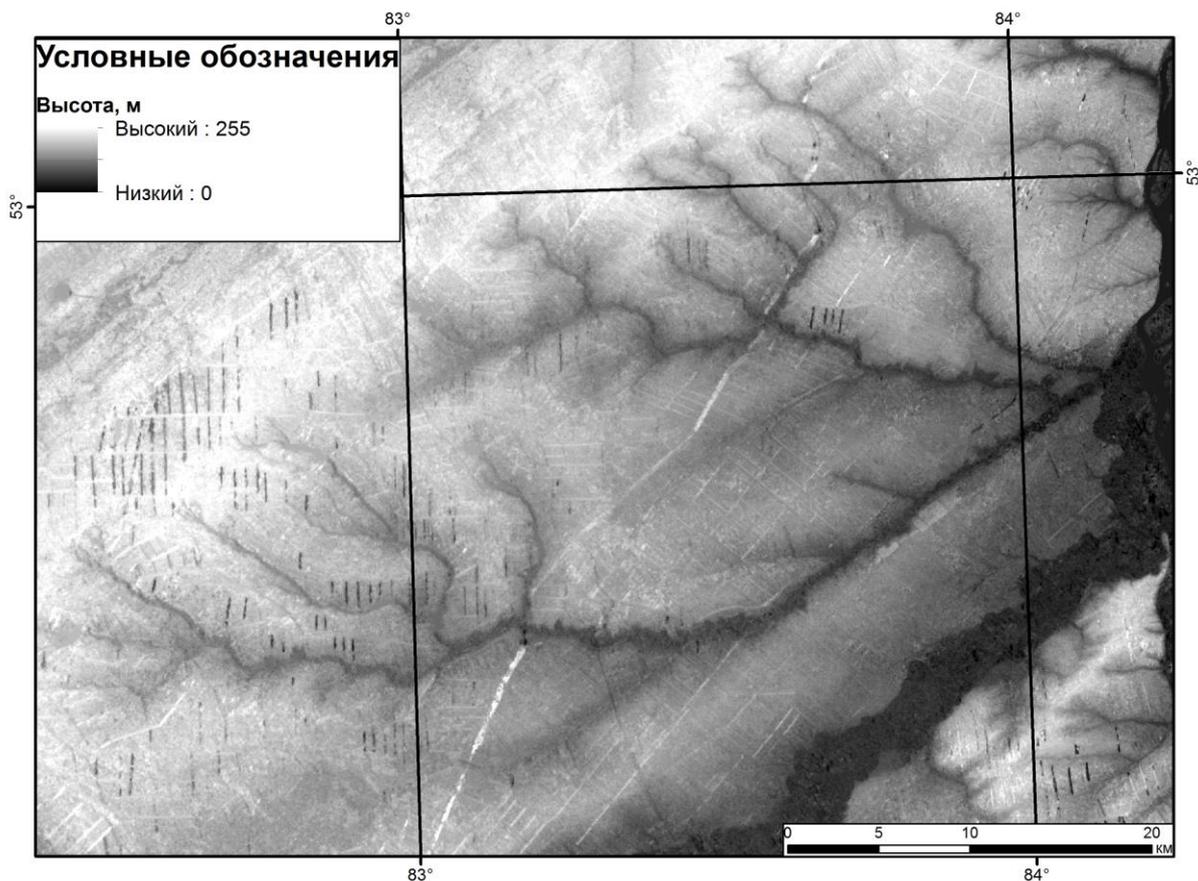


Рисунок 3.1. – Применение инструмента Заполнение (Fill) на исследуемой территории. Масштаб оригинала 1:500000 (составлена автором)

Инструмент Локальное понижение (Sink) можно использовать вместо инструмента Заполнение (Fill) – для нахождения числа понижений и определения их глубин. Знание глубины локальных понижений может помочь в определении подходящего значения ограничения по z . При запуске инструмента Заполнение (Fill) выполняет свою функцию до тех пор, пока не будут полностью заполнены все локальные понижения с учетом заданного ограничения по высоте. Профиль локального понижения до и после запуска инструмента Заполнение (Fill) (рис. 3.2) [12].

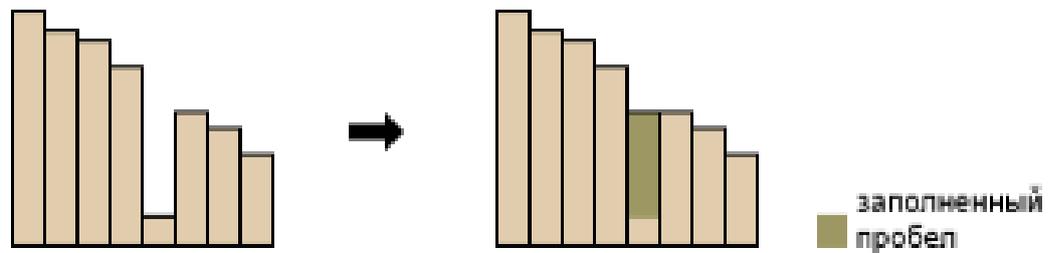


Рисунок 3.2. – Профиль локального понижения до и после запуска инструмента Заполнение (Fill) [12]

Результирующие данные инструмента Суммарный сток (Flow Accumulation) – это растр суммарного стока в каждую ячейку, определяемого как сумма весов для всех ячеек, которые стекают в каждую ячейку, расположенную вниз по склону. Ячейки с неопределенным направлением стока будут только накапливать поток; они не будут вносить вклад в сток в направлении вниз по склону. Считается, что ячейка имеет неопределенное направление стока в том случае, если ее значение в растре направления стока не равно 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 или 128 [14].

Основная площадь исследуемой территории имеет суммарный сток равный от 0 до 351.500 м³, больший объем стока же наблюдается в месте, где реки впадают в Обь (от 7.000.000 до 21.442.000 м³) (рис. 3.3).

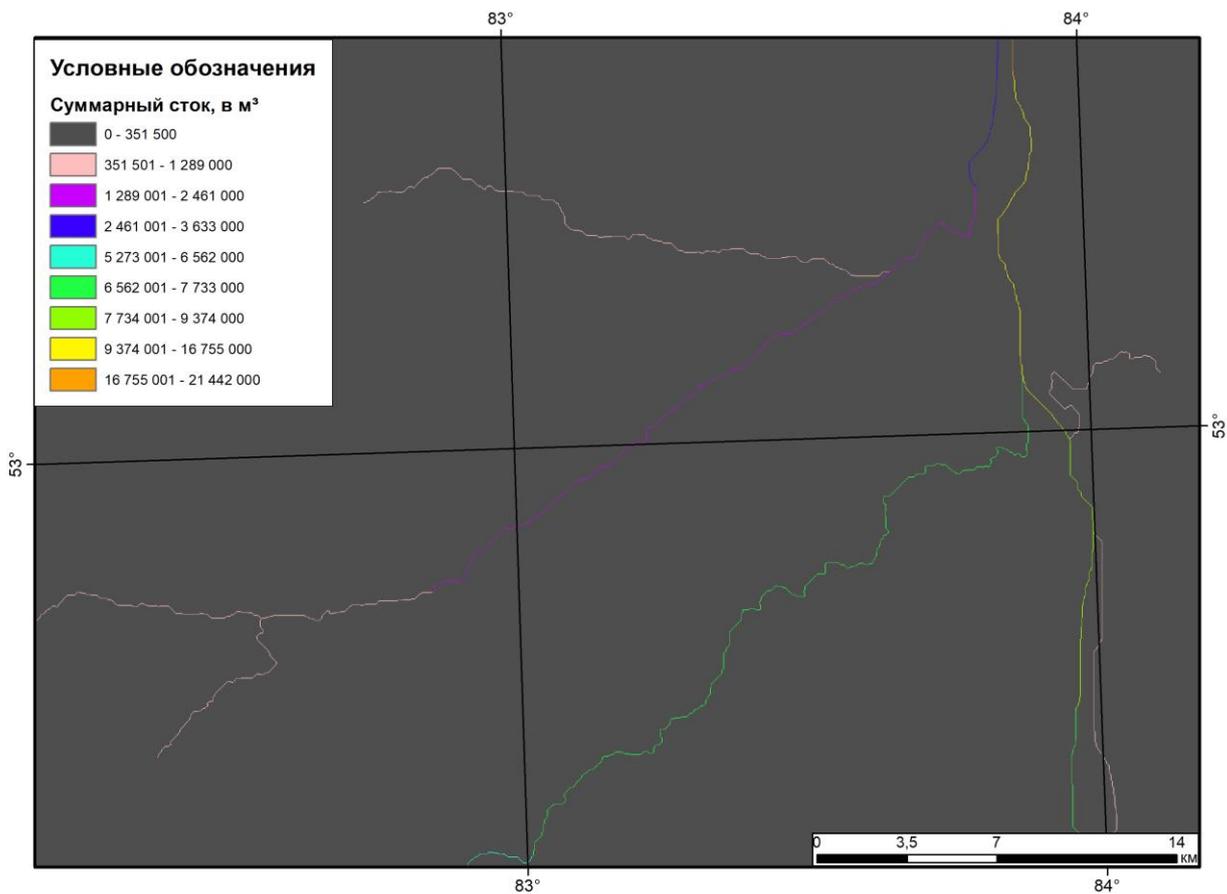


Рисунок 3.3. – Карта суммарного стока на исследуемой территории.
 Масштаб оригинала 1:350000 (составлена автором)

Суммарный сток основывается на количестве ячеек, из которых осуществляется сток в каждую конкретную ячейку в выходном растре (рис. 3.4). Та ячейка, которая обрабатывается в текущий момент времени, не учитывается в сумме. Выходные ячейки с высоким суммарным стоком – это участки концентрированного стока; они могут быть использованы для определения русел водотоков. Выходные ячейки с суммарным стоком, равным нулю, – это локальные топографические пики; они могут быть использованы для выделения хребтов или линий водораздела [14].

Если входной растр направления стока создан не с помощью инструмента Flow Direction (Направление стока), существует вероятность, что определяемый сток будет образовывать петли. Если направление стока образует петли, инструмент Суммарный сток (Flow Accumulation) будет выполняться бесконечно (произойдет заикливание).

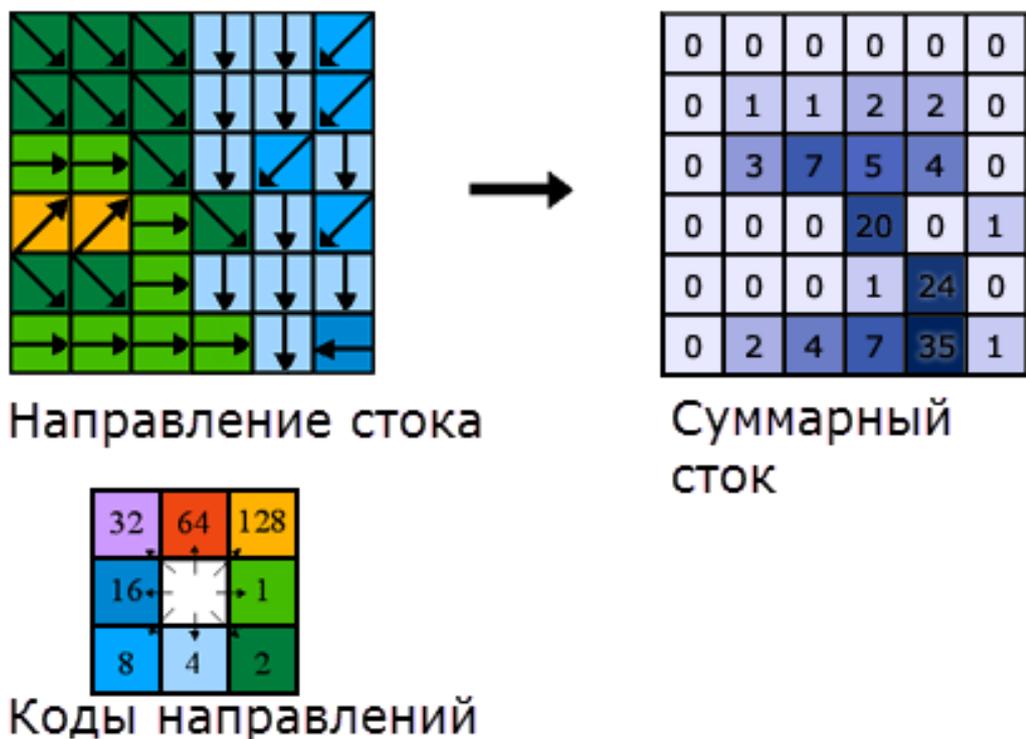


Рисунок 3.4. – Определение суммарного стока [14]

Для получения гидрологических характеристик поверхности является возможность определить направление стока из каждой ячейки растра. Это делается с помощью инструмента Направление стока (Flow Direction).

При использовании Направление стока (Flow Direction) создается целочисленный растровый слой, значения которого находятся в диапазоне от 1 до 255. Есть 8 корректных выходных направлений относительно 8 смежных ячеек, в которые может перейти сток. Этот подход обычно называется моделью восьминаправленного стока. Значения для каждого направления от центра целочисленного растра, создаваемого при использовании инструмента Направление стока (Flow Direction), представлены как 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 или 128 (рис. 3.5) [21].

32	64	128
16		1
8	4	2

Рисунок 3.5. – Значения для каждого направления от центра целочисленного растра, создаваемого при использовании инструмента

Направление стока (FlowDirection) [21]

Этот инструмент использует поверхность в качестве входных данных и выдает растр, показывающий направление стока каждой ячейки. Если выбрана опция Выходной растр понижения (Out put drop raster), создается выходной растр, показывающий отношение максимального изменения по высоте из каждой ячейки вдоль направления стока к расстоянию между центрами ячеек, выраженное в процентах. Если выбрана опция Сток из крайних ячеек направлен наружу (Force all edge cells to flow out ward), сток из всех ячеек на ребре растра поверхности будет осуществляться наружу, за края растра.

Направление стока определяется направлением наиболее крутого спуска, или максимального понижения, из каждой ячейки [21].

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 максимальное понижение высоты до ближайших ячеек одинаково в нескольких направлениях, область соседства расширяется до тех пор, пока не будет найден самый крутой спуск.

Если найдено направление самого крутого понижения, выходной ячейке дается значение, представляющее это направление.

Если все соседние ячейки выше, чем обрабатываемая ячейка, такая ячейка будет рассматриваться как ошибка в данных; она должна быть

заполнена до минимального значения высоты соседних ячеек. Сток будет осуществляться в эту ячейку. Однако в том случае, если локальное понижение размером в одну ячейку расположено на физическом краю растра, или в ее окрестностях есть хотя бы одна ячейка со значением No Data (нет данных), заполнения не происходит из-за недостаточной информации по соседним ячейкам. Чтобы ячейка могла рассматриваться как истинное локальное понижение размером в одну ячейку, для нее должна быть информация по всем соседним ячейкам.

Если сток из двух ячеек осуществляется друг в друга, они являются локальными понижениями с неопределенным направлением стока [21].

На исследуемой территории, а именно бассейне реки Калманка преобладает западное направление стока (рис. 3.6).

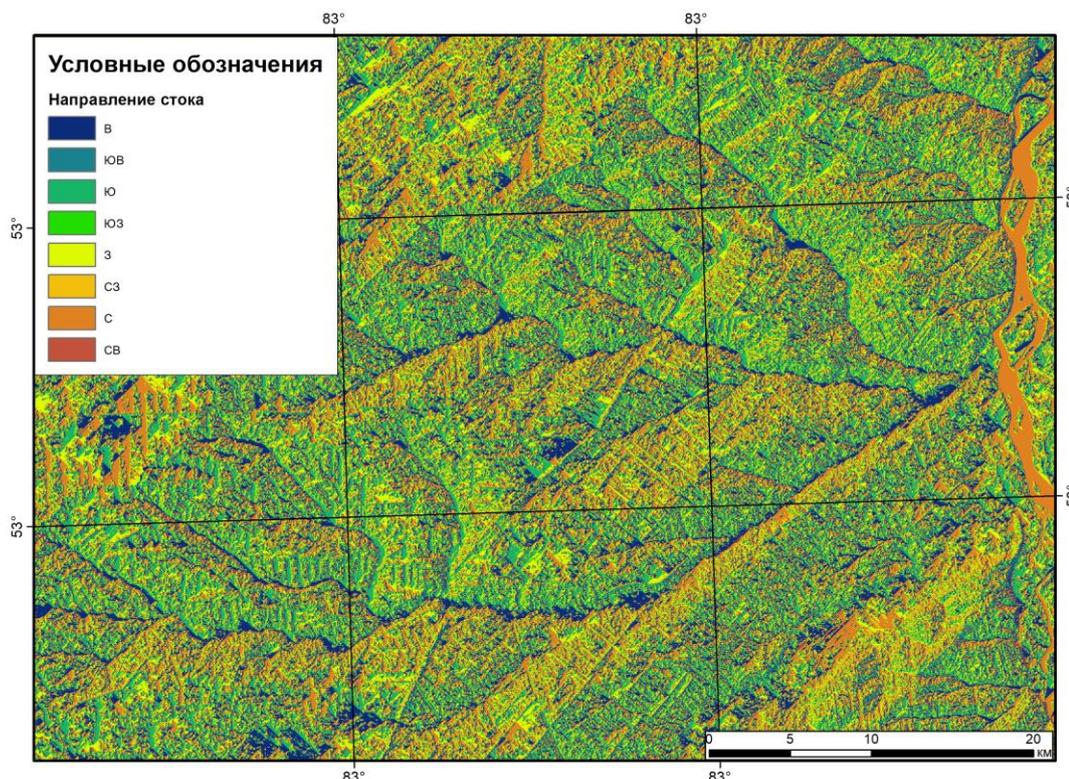


Рисунок 3.6. – Карта направления стока на исследуемой территории.

Масштаб оригинала 1:500000 (составлена автором)

Инструмент Длина линии стока (Flow Length) главным образом применяется для вычисления длины самого длинного маршрута стока внутри заданного бассейна (рис. 3.7). Это измерение часто используется

для вычисления времени заполнения бассейна. Инструмент может быть также использован для создания графиков «расстояние-площадь» при моделировании осадков и поверхностного стока с применением раstra весов как фактора сопротивления движению вниз по склону.

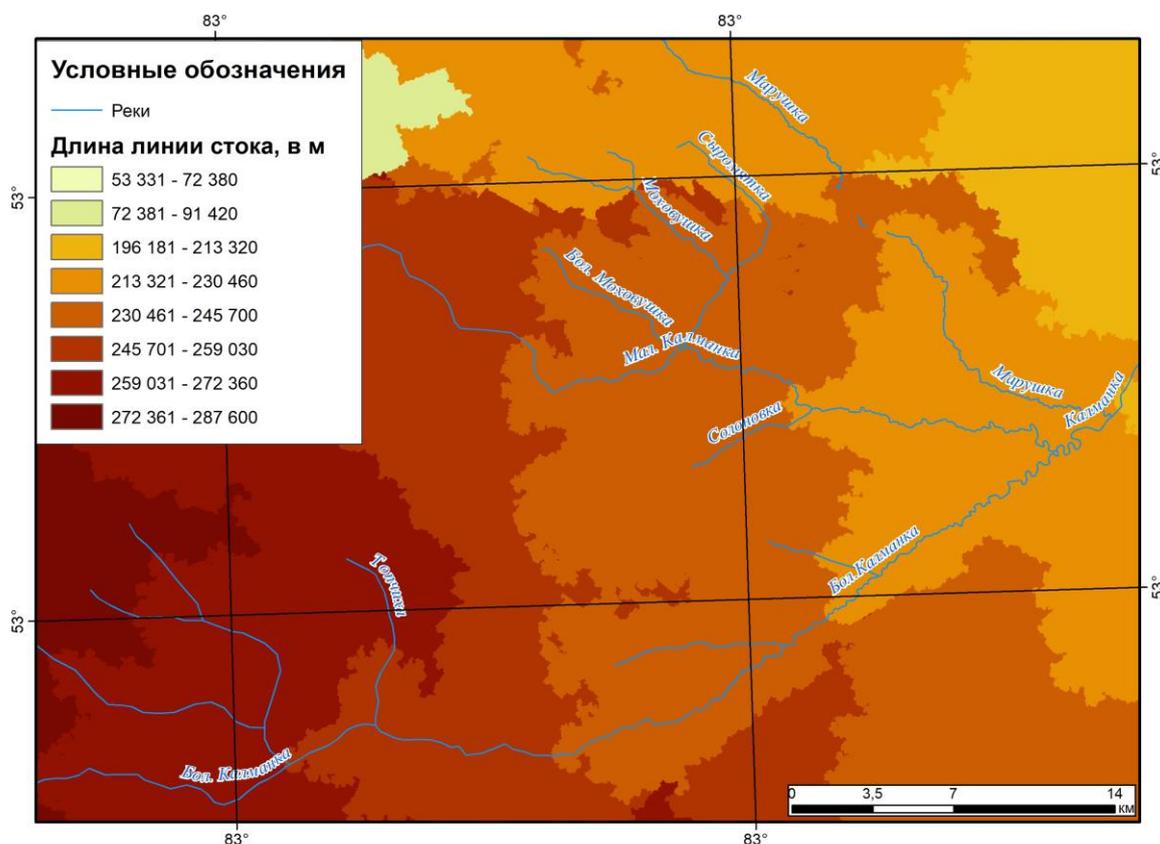


Рисунок 3.7. – Карта длины линии стока на исследуемой территории.

Масштаб оригинала 1:350000 (составлена автором)

Локальное понижение представляет собой ячейку или набор пространственно-смежных 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 [12].

Считается, что локальные понижения имеют неопределенные направления стока; им присваивается значение, являющееся суммой из возможных направлений.

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.

Выходные данные инструмента Локальное понижение (Sink) – это целочисленный растр, в котором каждому локальному понижению присваивается уникальное значение. Локальные понижения нумеруются от единицы до числа, равного количеству локальных понижений [12].

Инструмент Привязка точки устья (Snap Pour Point) используется для обеспечения выборки точек с высоким суммарным стоком при выделении водосборных бассейнов с использованием инструмента Водораздел (Watershed). Инструмент Привязка точки устья (Snap Pour Point) будет выполнять поиск ячеек с наивысшим суммарным стоком в пределах величины допуска вокруг заданных точек устьев и сдвигать точку устья в это положение.

Если входные данные точки устьев представлены в виде класса точечных объектов, они будут внутренне конвертированы в растр для последующей обработки.

Выходные данные – это целочисленный растр, на котором исходные положения точек устьев привязаны к местоположениям с высоким суммарным стоком.

Идентифицируемые сегменты водотоков – это фрагменты дренажной сети между двумя последовательными соединениями, между соединением и устьем или между соединением и истоком (рис. 3.8) [10].

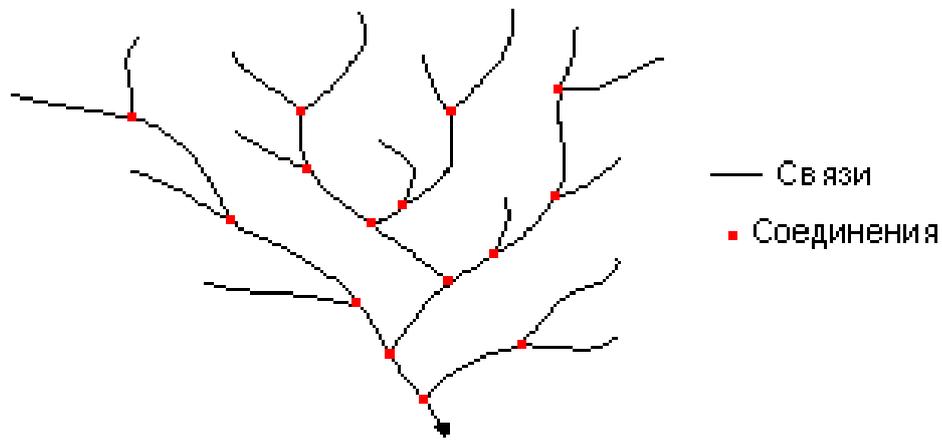


Рисунок 3.8. – Иллюстрация связей канала водотоков [10]

Входной растр водотоков может быть создан путем определения порогового значения для выходных данных, полученных в результате выполнения инструмента Суммарный сток (Flow Accumulation). Растровая линейная сеть водотоков должна быть представлена в виде значений, которые больше или равны единице на фоне значений No Data (рис. 3.9) [10].

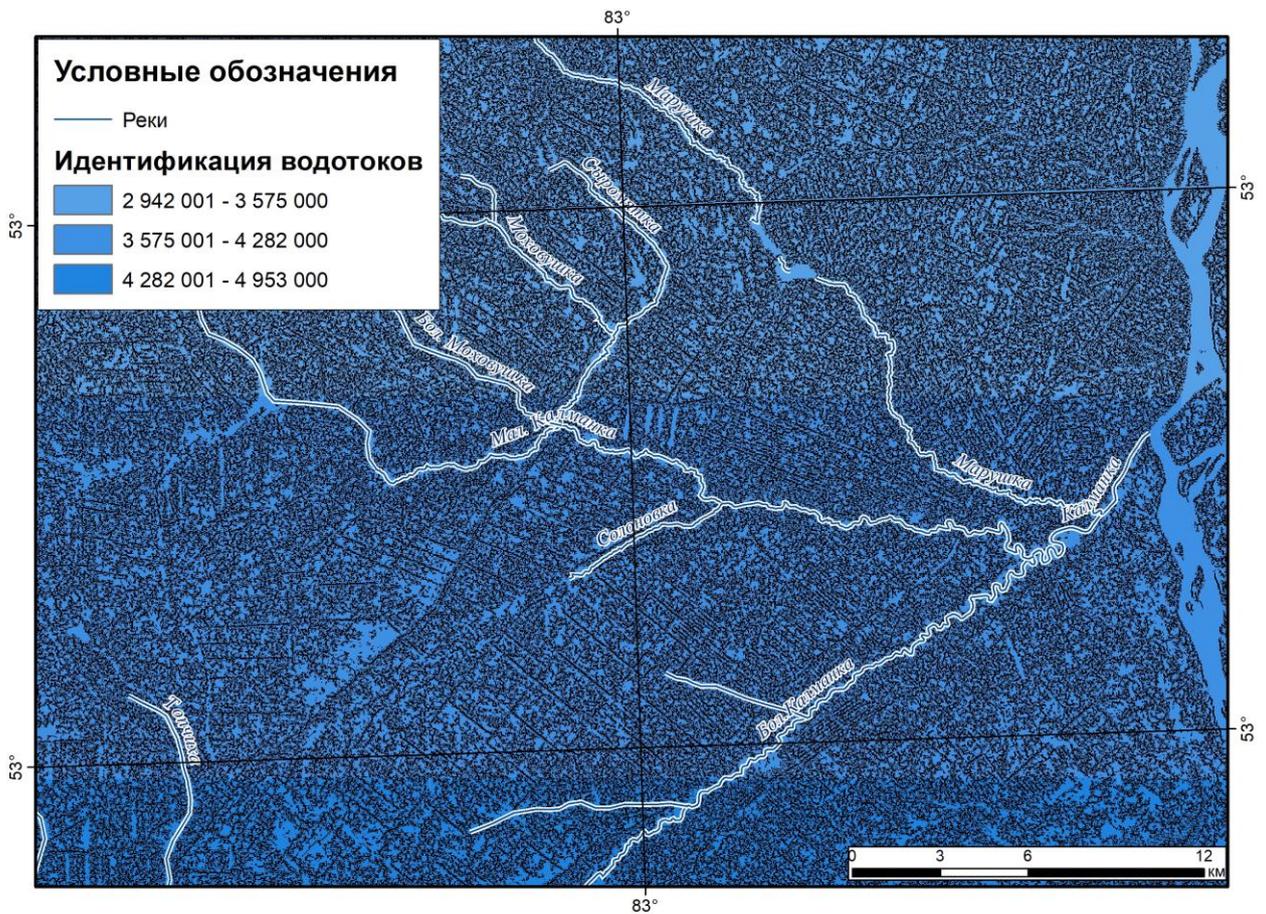


Рисунок 3.9. – Идентификация водотоков на исследуемой территории.

Масштаб оригинала 1:300000 (составлена автором)

Порядок водотоков – это метод присвоения числового порядка связям в сети водотоков, являющегося способом определения типов классификации различных водотоков на основе количества имеющихся у них притоков [13].

Выходные данные инструмента Порядок водотока (Stream Order) будут иметь более высокое качество в том случае, если входной растр водотоков и входной растр направления стока получены по одной и той же поверхности. Если растр водотоков получен по растеризированным водотокам, выходные данные могут быть непригодны для использования, поскольку на уровне каждой ячейки направление не будет соответствовать положению ячеек водотоков.

Для создания растровой сети водотоков могут быть использованы результаты инструмента Направление стока (Flow Accumulation), к которому применяется пороговое значение, позволяющее выбрать ячейки с высоким суммарным стоком. Например, для определения сети водотоков будут использоваться ячейки, в которые выполняется сток из более чем 100 ячеек. Результирующая сеть водотоков может быть использована в инструментах Идентификация водотоков (Stream Link) и Водоток в пространственный объект (Stream to Feature) [13].

На исследуемой территории в бассейне реки Калманка было выделено 12 порядков водотоков (рис. 3.10).

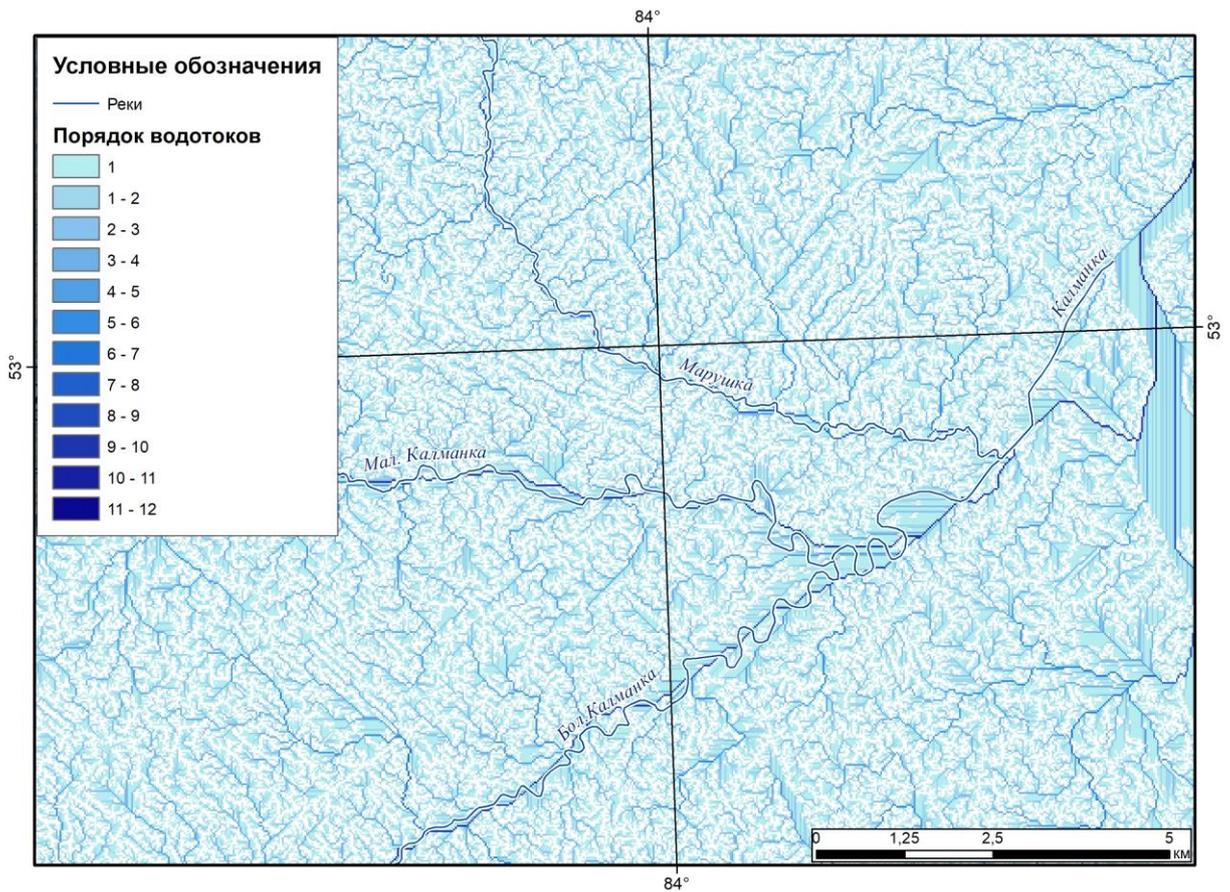


Рисунок 3.10. – Карта порядка водотоков на исследуемой территории.
 Масштаб оригинала 1:125000 (составлена автором)

Инструмент Порядок водотоков (Stream Order) имеет два метода для присвоения порядка. Это методы, предложенные Страхлером (1957) и Шреве (1966) (Рисунок 3.11) [13].

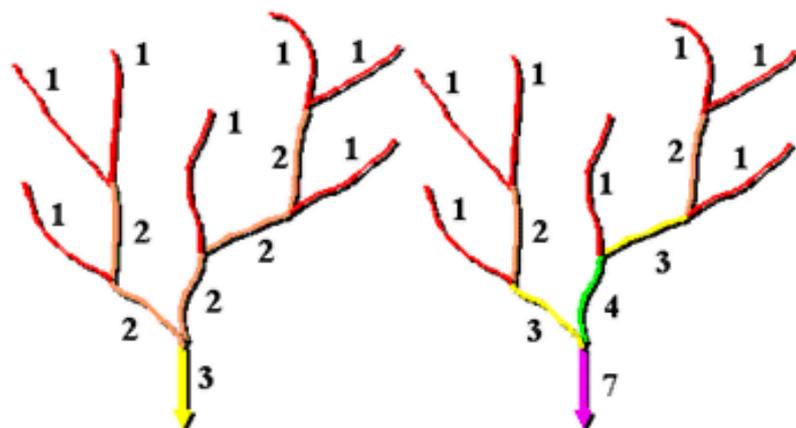


Рисунок 3.11. – Метод присвоения числового порядка связям в сети водотоков Страхлера (слева) и Шреве (справа) [13]

При определении порядка по методу Страхлера, всем сегментам водотоков, не имеющим притоков, присваивается единица, и они рассматриваются как водотоки первого порядка.

Порядок водотоков возрастает, если водотоки с одинаковым порядком пересекаются. Следовательно, после слияния сегментов первого и второго порядка, результирующий водоток будет по-прежнему водотоком второго порядка, а не третьего порядка. Пересечение двух связей разных порядков не приведёт к возрастанию порядка. Например, пересечение связи первого и второго порядка не создадут связь третьего порядка, но сохранит порядок связи большего порядка [13].

Метод Страхлера - наиболее часто используемый метод порядка водотоков. Однако, т.к. этот способ только увеличивает порядок в пересечениях одинаковых порядков, он не принимает во внимание все связи и может быть чувствительным к добавлению или удалению связей.

Метод Шреве отвечает за все связи в сети. Как и в методе Страхлера, всем внешним связям присваивается порядок 1. Однако, для всех внутренних связей в методе Шреве порядки являются аддитивными. Например, при пересечении двух связей первого порядка создается связь второго порядка, при пересечении связи первого и связи второго порядка будет создана связь третьего порядка, а при пересечении связи второго и связи третьего порядка создается связь четвертого порядка.

Так как порядки являются аддитивными, числа из метода Шреве иногда называются величинами, а не порядками. Величина связи метода Шреве – это количество связей вверх по течению [13].

Инструмент Водоток в пространственный объект преобразует растр, представляющий линейную сеть в векторные объекты, представляющие сеть линий.

Для создания растровой сети водотоков могут быть использованы результаты инструмента Направление стока (Flow Accumulation), к которым применяется пороговое значение, позволяющее выбрать ячейки с высоким

суммарным стоком. Например, для определения сети водотоков будут использоваться ячейки, в которые выполняется сток из более чем 100 ячеек. Результирующая сеть водотоков может быть использована в инструментах Идентификация водотоков (Stream Link) и Водоток в пространственный объект (Stream to Feature).

Должны существовать непрерывные объекты с одним и тем же значением, например, результаты инструментов Порядок водотоков (Stream Order) или Связь водотоков (Stream Link). Инструмент Водоток в пространственный объект не должен применяться к растру, на котором есть несколько смежных ячеек с одинаковым значением. Выходные объекты будут направлены вниз по течению.

Алгоритм, используемый инструментом Водоток в пространственный объект (Stream to Feature) - это программа векторизации, разработанная специально для векторизации сетей водотоков либо любых других линейных растровых сетей, для которых известна направленность потока.

Инструмент оптимизирован таким образом, чтобы можно было использовать растр направления для помощи в векторизации пересекающихся и прилегающих ячеек. Можно выполнить векторизацию двух соседних линейных объектов, имеющих одинаковое значение, в виде двух параллельных линий. Он отличается от инструмента Растр в данные полилиний (Raster To Polyline), который, как правило, более агрессивный при сворачивании линий.

Водораздел – это область вверх по склону, которая распределяет сток – особенно воду – в общую «точку слива» в качестве концентрированного дренажа. Он может быть частью большего водораздела, а также может содержать меньшие водоразделы, называемые подбассейны. Границы между водоразделами называются линиями разграничения стока. «Точка слива», или точка устья - это точка, в которой вода вытекает из водосборной области. Это самая низкая точка вдоль границы водораздела [11].

Водоразделы могут быть выделены из ЦМР путем вычисления направления потока и использование его в инструменте Водораздел

(Watershed) (рис. 3.12). Значение для каждой водосборной области будет определено, исходя из источника во входном растре или векторных данных по точкам устьев. 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.

Чтобы определить область водосборов, сначала нужно создать растр, представляющий направление стока, с помощью инструмента Направление стока (Flow Direction) [11].

Затем нужно обеспечить местоположения, для которых хотим определить область водосборов. Исходные ячейки могут быть пространственными объектами, например, дамбами или водомерными постами, для которых хотим определить характеристики водосбора. Затем можно использовать пороговое значение суммарного стока. Если для определения водораздела используется пороговое значение, точками устьев для водораздела будут соединения сети водотоков, полученные из суммарного стока. Таким образом, должен быть задан растр суммарного стока, а также минимальное количество ячеек, которые составляют поток (пороговое значение). Выходными данными является растр водоразделов.

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

При указании входных положений точек устьев в качестве данных объектов полем по умолчанию будет первое доступное и допустимое поле. Если допустимых полей нет, по умолчанию используется поле ObjectID (например, OID или FID) [11].

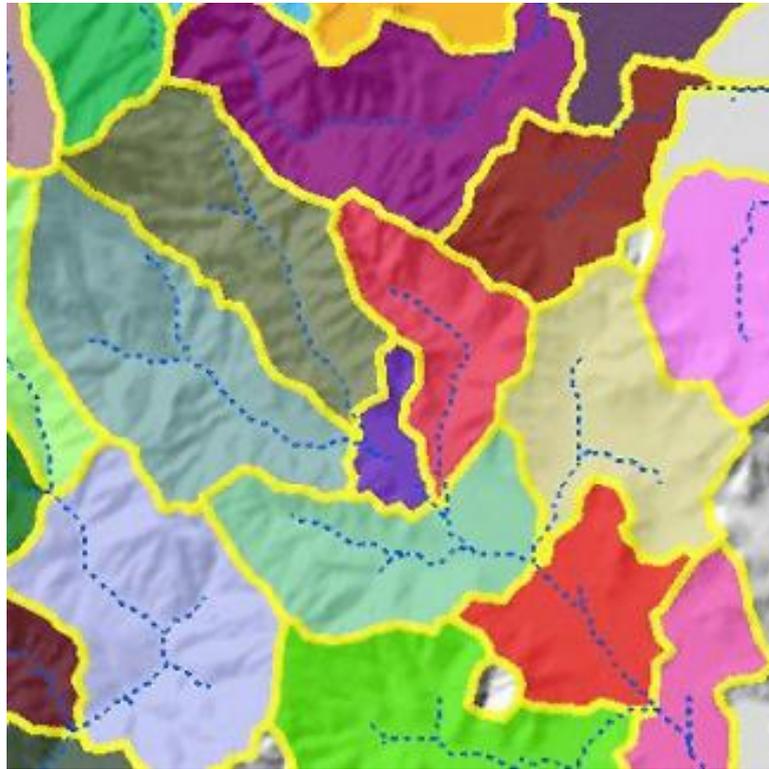


Рисунок 3.12. – Пример сети водотоков, которые получены на основе ЦМР [11]

За основу берется цифровая модель рельефа (рис. 3.13). Модуль «Гидрология» геоинформационной системы ArcGIS Desktop содержит два инструмента, позволяющих определить водосборные области, – «Basin» и «Watershed». Как известно, границы бассейнов рек проходят по водоразделам, распределяющим сток по склонам. Операция построения водосборных бассейнов «Basin» определяет границы водоразделов в рамках окна анализа [11]. Анализируется растровый слой с направлением потока на предмет нахождения связанных ячеек, принадлежащих к одной и той же водосборной области. Водосборные бассейны создаются путем размещения точек устьев по краям окна анализа и локальных понижений. Далее определяется область выше каждой точки устья, из которой осуществляется сток в эту точку. В результате создается растровый слой водосборных бассейнов (рис. 3.14).

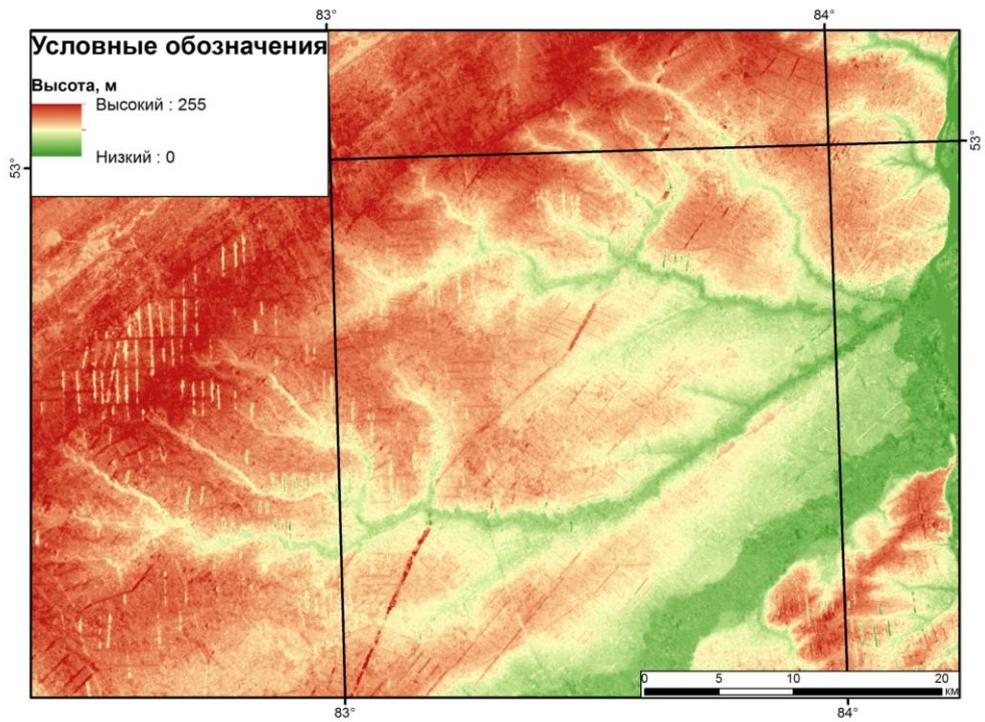


Рисунок 3.13. – Цифровая модель рельефа исследуемой территории.
 Масштаб оригинала 1:500000 (составлена автором)

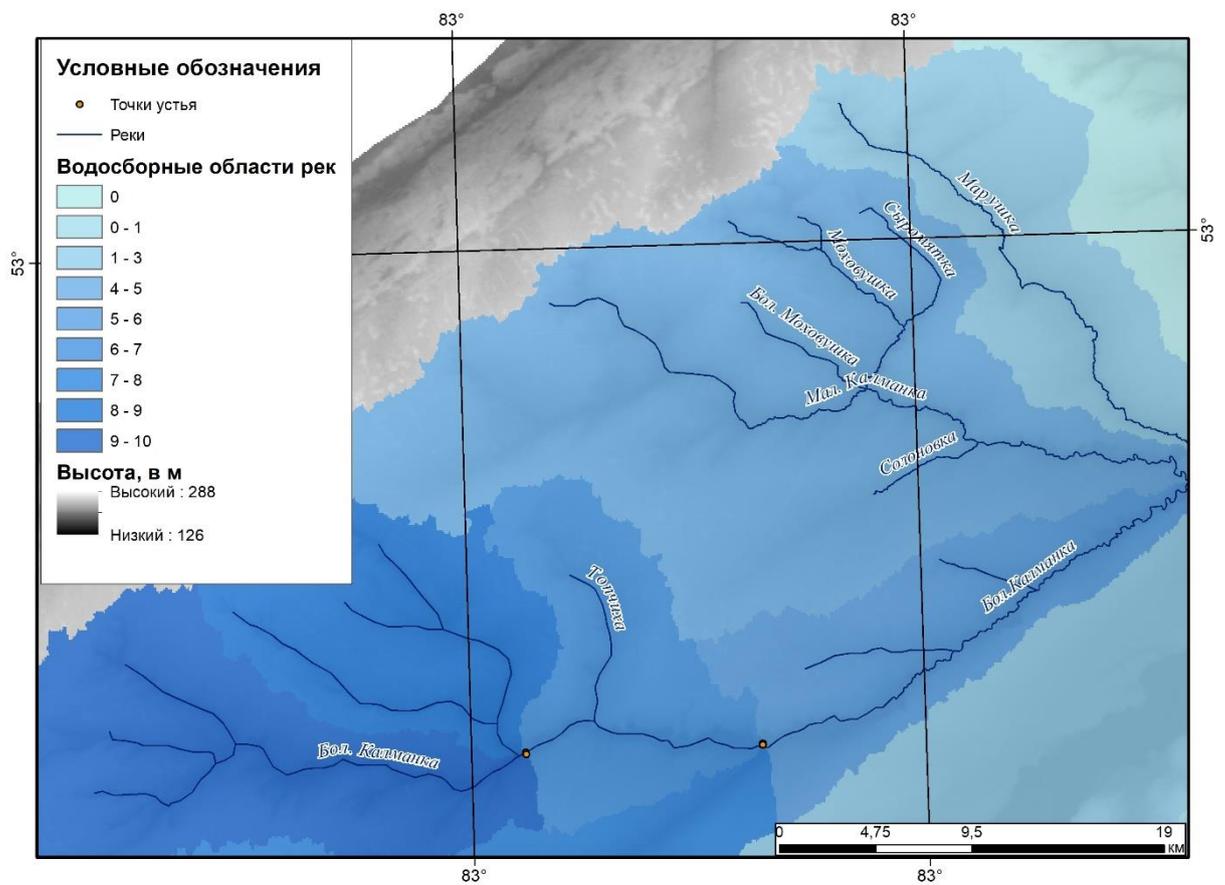


Рисунок 3.14. – Карта водосборных областей рек на исследуемой территории.
 Масштаб оригинала 1:475000 (составлена автором)

Инструмент Уклон из набора инструментов Поверхность определяет уклон (градиент, или скорость максимального изменения значения z) для каждой ячейки поверхности растра [21].

Уклон – это степень максимального изменения в z -значении, определяемого из каждой ячейки. В тех случаях, когда z -значения поверхности выражены в единицах измерения, отличающихся от наземных единиц измерения x , y , для корректировки вычислений уклона существенным представляется использование коэффициента по z .

Нормаль поверхности каждого треугольника, заданная векторным произведением двух ребер треугольника, используется для определения уклона в процентах или градусах. Процентный уклон описывает отношение изменения высоты к горизонтальному расстоянию нормали поверхности, когда уклон в градусах является углом отклонения нормали от горизонтальной плоскости.

Для каждой ячейки инструмент Уклон (Slope) вычисляет максимальную степень изменения в значении z между конкретной ячейкой и соседними с ней ячейками. По сути, максимальная степень изменения в значениях высоты на единицу расстояния между ячейкой и восемью соседними с ней ячейками определяет самый крутой спуск вниз по склону из ячейки.

Концептуально, инструмент подбирает плоскость для z -значений из окрестности размером 3×3 ячейки вокруг обрабатываемой или центральной ячейки. Значение уклона этой плоскости вычисляется с использованием методики усредненного максимума. Направление плоских граней является экспозицией обрабатываемой ячейки. Чем ниже значение уклона, тем более плоской является земная поверхность; чем выше значение уклона, тем более крутые склоны расположены на поверхности [21].

Каждый выходной полигон представляет диапазон значений уклона, с учетом разбиения на классы, используемом при запуске инструмента.

По умолчанию классификация делит измерения уклона на девять групп (табл. 3.1.2).

Таблица 3.1.2. – Классификация уклонов поверхности [21]

Код наклона	Процент, %	Степень диапазона в градусах
1	0.00-1.00	0.00-0.57
2	1.00- 2.15	0.57-1.43
3	2.15- 4.64	1.43-2.66
4	4.64-10.0	2.66-5.71
5	10.00-21.50	5.71-12.13
6	21.50-46.40	12.13-24.89
7	46.40-100.0	24.89-45.00
8	100.0-1000.0	45.00-84.29
9	1000.0 <	84.29-90.0

Выходной растр уклонов может быть вычислен в двух различных единицах измерения, в градусах или в процентах (процент подъема). Инструмент Уклон (Slope) чаще всего работает с набором данных высот, как показано на следующей диаграмме. Более крутые уклоны заштрихованы красным на выходном растре уклона, также они могут указывать на неточности в цифровой модели рельефа (рис. 3.15) [21].

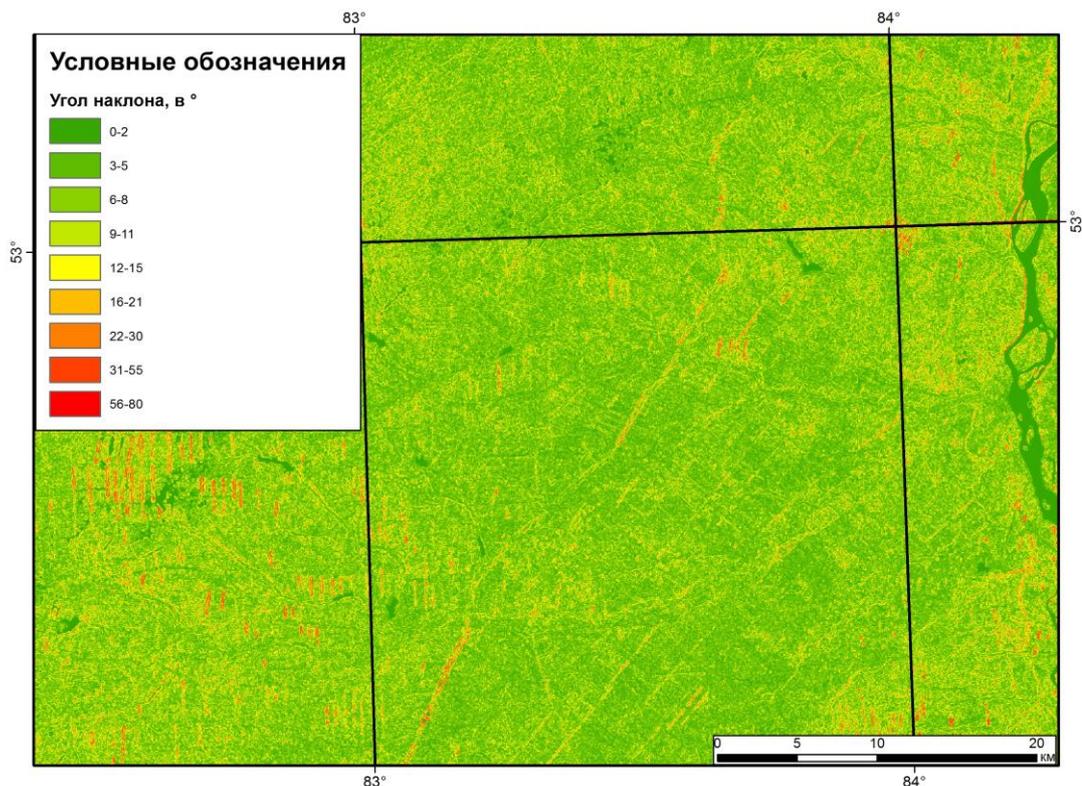


Рисунок 3.15. – Карта угла наклона поверхности на исследуемой территории. Масштаб оригинала 1:500000 (составлена автором)

Река Калманка имеет 5 наиболее крупных притоков (табл. 3.1.3). Самым крупным притоком является река Малая Калманка длиной 49 км и площадью водосбора 112 км². В среднем угол наклона в русле притоков составляет от 3 до 17 градусов.

Таблица 3.1.3. – Характеристика притоков реки Калманка

Название притока	Порядок притока	Длина, в км	Площадь водосбора, км ²	Угол наклона, в градусах	Общее падение, в м
р. Солоновка	9	6	37	3-10	19
р. Топчиха	8	14	46	7-16	31
р. Крутиха	9	22	86	5-13	39
р. Малая Калманка	10	49	112	3-15	88
р. Марушка	8	32	73	5-17	97

3.2. Расчетные гидрологические характеристики бассейна реки Калманка

Под ресурсами поверхностных вод водотоков подразумевается годовой сток воды водотока и его изменчивость, как внутри года, так и в многолетнем разрезе. Годовой сток р. Калманка у с. Калманка отражает ресурсы поверхностных вод выше расположенного водосборного бассейна реки за многолетний период и характеризуется нормой годового стока. Выражается норма годового стока через модуль стока M_0 , измеряемый в л/с км², расход воды Q_0 (м³/с), объём стока W_0 (млн. м³) и слой стока h_0 (мм). Изменчивость величины годового стока в многолетнем разрезе отражают коэффициенты вариации и асимметрии кривой распределения данной характеристики за какой-то определенный временной срок [32].

По условиям формирования поверхностного стока под воздействием зональных особенностей и а зональных факторов бассейн реки Калманка отнесён к IIIа гидрологическому району, в котором определяющим фактором изменения модуля годового стока является площадь водосбора [28]. Для определения нормы годового стока использована зависимость:

$$Q_0 = \frac{M_0 \cdot F}{1000} \quad \text{м}^3/\text{с} \quad (1)$$

$$W_0 = 31.56 \cdot Q_0, \quad \text{млн. м}^3 \quad (2)$$

$$h_0 = 31.56 \cdot M_0, \quad \text{мм} \quad (3)$$

$$M_0 = \frac{7,0}{(F+1)^{0,21}}, \quad \text{л/сек км}^2 \quad (\text{для рек с } F \leq 2000 \text{ км}^2) \quad (4)$$

где F – площадь водосбора до расчетного створа, км²;

M_0 – модуль стока, л/с км²;

Q_0 – расход воды, м³/с;

W_0 – объём стока, млн. м³;

h_0 – слой стока, мм.

Основанием применения этой зависимости является наличие стока весной, большая расчлененность водосбора (табл. 3.2.1).

Таблица 3.2.1. – Норма годового стока для р. Калманка

Река	F, км ²	(F+1) ⁿ	Mo, л/с км ²	Qo, м ³ /с	Wo, млн. м ³	ho мм
р. Калманка	1490	4,63	1,51	2,25	71,01	47,65

Годовой сток имеет весьма значительную изменчивость (табл. 3.2.2). Величину коэффициента вариации (C_v) для водотоков с постоянным стоком в течение года рекомендуется принимать равным 0,43.

Коэффициент асимметрии принят по соотношению $C_s = 2C_v$ (для рек с постоянным стоком).

Таблица 3.2.2. – Обеспеченные величины годового стока (по C_v)

Створ	Характеристика	P%					
		1	5	10	50	75	95
р. Калманка	K	2,86	1,79	1,57	0,94	0,68	0,42
	H, мм	136	85,3	74,8	44,8	32,4	20,01
	Qo, м ³ /с	4,89	3,76	3,23	1,77	1,21	0,63
	Wo, млн. м ³	154	118	102	55,7	38,1	19,9

Весеннее половодье формируется в основном за счет таяния снега. Максимальный расход воды наблюдается во второй декаде апреля и проходит в период половодья (табл. 3.2.3).

В основу расчета максимальных расходов воды весеннего половодья положена зависимость максимального модуля стока от слоя весеннего стока и площади водосбора [32].

$$q_p = \frac{K_0 \cdot h_p}{(F+1)^n} \quad \text{м}^3/\text{с с } 1 \text{ км}^2 \quad (5)$$

где q_p – модуль максимального стока расчетной обеспеченности, м³/с с 1 км²;

F – площадь водосбора в км²;

n – коэффициент редукации;

h_p – слой весеннего стока расчетной обеспеченности.

Коэффициент редукции (n) модуля максимального стока по площади водосбора рек левобережья Оби составляет $n = 0,40$.

Таблица 3.2.3. – Максимальные расходы воды весеннего половодья расчетной обеспеченности

Створы	Характеристики	F, км ²	P%			
			1	5	10	50
р. Калманка	h _p , мм	1490	136	85,3	74,8	44,8
	Q, м ³ /с		174	109	95,6	57,3

По р. Калманка максимальные дождевые расходы воды по величине значительно ниже весенних (табл. 3.2.4). Расчет дождевых расходов выполнен по формуле:

$$Q_{\text{макс}} = B \cdot \sqrt{F} \quad (6)$$

где $Q_{\text{макс}}$ – максимальный расход дождевого стока в м³/сек.;

B – суммарный коэффициент, зависящий от интенсивности и слоя дождевого стока;

F – площадь водосбора в км².

Таблица 3.2.4. – Максимальные расходы воды дождевых паводков

Расчетный створ	F, км ²	Характеристики	P%			
			1%	5%	10%	50%
Площадка перехода (р. Калманка)	1490	Q, м ³ /с	11,6	6,6	4,6	1,5
		B	0,3	0,17	0,12	0,04

Река Калманка имеет постоянный сток в период летне-осенней межени за счет хорошего грунтового питания. Зимой река перемерзает.

Модуль минимального среднемесячного летне-осеннего стока р. Калманка для расчета расходов воды принят по зависимости нормы минимального среднего месячного летне-осеннего стока для рек древних ложбин стока (Приобское плато) (табл. 3.2.5).

Коэффициент вариации минимального летне-осеннего стока определен по соотношению:

$$C_{v \text{ л-о}} = 0,67; C_s = 2 C_v. \text{ Для зимы } C_{v \text{ з}} = 0,90.$$

Таблица 3.2.5. – Минимальный сток р. Калманка

Створы	Период стока	Минимальные расходы воды, м ³ /с	Расчетная обеспеченность, Р%		
			50	75	95
р. Калманка	летне-осенняя межень	Коэф.	0,858	0,509	0,204
		среднемесячные	0,100	0,061	0,025
		среднесуточные	0,086	0,031	0,005
	зимняя межень (перемерзает)	Коэф.	0,748	0,352	0,082
		среднемесячные	0,064	0,048	0,017
		среднесуточные	0,048	0,017	0,001

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные и практические результаты данной работы заключаются в получении значений основных параметров и характеристик бассейна и долины реки Калманка на основе ГИС-технологий, а также гидрологических расчетов.

Для получения и анализа значений основных параметров и характеристик бассейна и долины реки Калманка на основе ГИС-технологий, а также гидрологических расчетов были:

1. На основе цифровой модели рельефа ASTER GDEM оцифрованы река Калманка и её притоки, которые располагаются в пределах Приобского плато;

2. На базе ГИС-технологий и программы ESRI ArcGIS Spatial Analyst дополнительного модуля «Гидрология» были построены тематические карты на исследуемую территорию:

- При помощи инструмента «Суммарный сток» было выявлено, что основная площадь исследуемой территории имеет суммарный сток равный от 0 до 351.500 м³;
- Основным направлением стока является западное;
- Длина линии стока в устьевой части реки Калманка колеблется в пределах от 213.000 до 230.500 метров, а в истоках реки от 272.000 до 287.600 метров;
- Всего в бассейне реки Калманка выделено 12 порядков притоков;
- Построена карта с 10 более крупными водосборными областями рек на исследуемой территории;
- Определен уклон поверхности.

На основе полученных карт составлена таблица с характеристиками основных притоков реки Калманка, по следующим показателям: порядок притока, длина, площадь водосбора, угол наклона, общее падение.

3. Проведены гидрологические расчеты для реки Калманка, включая её притоки:

- Посчитана норма годового стока (где модуль стока равен $1,51 \text{ л/с км}^2$; расход воды $2,25 \text{ м}^3/\text{с}$; объём стока $71,01 \text{ млн. м}^3$; слой стока $47,65 \text{ мм}$);
- Определены обеспеченные величины годового стока (на основе коэффициентов вариации и асимметрии);
- Максимальный 1% расход воды весеннего половодья расчетной обеспеченности составляет $174 \text{ м}^3/\text{с}$; максимальный 1% расход воды дождевых паводков ниже весенних и составляет $11,6 \text{ м}^3/\text{с}$;
- Также рассчитан минимальный сток и он не превышает в летне-осеннюю межень $0,1 \text{ м}^3/\text{с}$.

Полученные научные и практические результаты данной выпускной квалификационной работы могут быть использованы для изучения динамики значений основных параметров и характеристик бассейнов и долин малых рек, моделирования гидрологических процессов и явлений, а также решения ряда прикладных задач на основе ГИС-технологий и гидрологических расчетов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ И ИСТОЧНИКОВ

1. Адаменко, О.М. Мезозой и кайнозой Степного Алтая / О.М. Адаменко; отв. ред. Н.А. Флоренсов. – Новосибирск : Наука. Сибирское отделение, 1974. – 166 с.
2. Андреев, В.Г. Внутригодовое распределение речного стока / В.Г. Андреев. – Л. : Гидрометеиздат, 1960. – 327 с.
3. Бакланова, С.Л. Экологическое образование в курсе «География Алтайского края» / С.Л. Бакланова. – Бийск : НИЦ БПГУ им. В.М. Шукшина, 2007. – 296 с.
4. Геоинформатика. Толковый словарь основных терминов / Ю.Б. Баранов [и др.]. – М. : ГИС-Ассоциация, 1999. – 204 с.
5. Бескид, П.П. Геоинформационные системы и технологии / П.П. Бескид, Н.И. Куракина, Н.В. Орлова. – СПб. : РГГМУ, 2010. – 173 с.
6. Бобко, А.И. Использование ГИС-технологий в изучении долин малых рек Красноярской Котловины : магистерская диссертация : 05.04.06 / А.И. Бобко ; Сибирский фед. ун-т. – Красноярск, 2017. – 83 с.
7. Занин, Г.В. Геоморфология Алтайского края / Г.В. Занин // Природное районирование Алтайского края. – 1958. – № 1. – С. 62-98.
8. Золотов, Д.В. Соотношение флористического и ландшафтного разнообразия в южной лесостепи Приобского плато (Алтайский край) / Д.В. Золотов, Д.В. Черных // Проблемы ботаники южной Сибири и Монголии: сб. науч. ст. по материалам IX Международной научно-практической конференции. – Барнаул, 2010. – С. 94–97.
9. Зудин, А.Н. Стратиграфия плиоцен-четвертичных толщ Приобского плато / А.Н. Зудин [и др.]. – Новосибирск : Наука, 1977. – 101 с.
10. Идентификация водотоков [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/stream-link.htm>. – Загл. с экрана. – (Дата обращения: 30.05.2021).

11. Как работает инструмент Водораздел (Watershed) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-watershed-works.htm>. – Загл. с экрана. – (Дата обращения: 30.05.2021).
12. Как работает инструмент Заполнение (Fill) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-fill-works.htm>. – Загл. с экрана. – (Дата обращения: 30.05.2021).
13. Как работает инструмент Порядок водотоков (Stream Order) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-stream-order-works.htm>. – Загл. с экрана. – (Дата обращения: 30.05.2021).
14. Как работает инструмент Суммарный сток (Flow Accumulation) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-flow-accumulation-works.htm>. – Загл. с экрана. – (Дата обращения: 30.05.2021).
15. Калинин, В.Г. Гидрологическая геоинформационная система «Бассейн Воткинского водохранилища» / В.Г. Калинин, С.В. Пьянков // Метеорология и гидрология. – 2002. – № 11. – С. 71-78.
16. Калинин, В.Г. Применение геоинформационных технологий в гидрологических исследованиях / В.Г. Калинин, С.В. Пьянков. – Пермь : Алекс-Пресс, 2010. – 217 с.
17. Лукьянчикова, О.Г. Геоинформационная система гидрологического назначения в Самарской области / О.Г. Лукьянчикова, Ф.О. Васильчиков, Л.К. Ульянкина // ArcReview. – 2006. – № 1 (36). – С. 10-11.
18. Лютцау, С.В. О неотектонической преопределенности и полигенетическом происхождении боровых ложбин Приобского плато / С.В. Лютцау // Геоморфология. – 1984. – № 4. – С. 73-81.
19. Малолетко, А.М. Некоторые спорные вопросы четвертичной геологии Степного Приобья / А.М. Малолетко // Вопросы географии Сибири. – 1973. – № 7. – С. 118-127.

20. Малолетко, А.М. Лощинно-увалистый рельеф Степного Приобья и Кулунды и его происхождение / А.М. Малолетко // Вопросы географии Сибири. – 1976. – № 9. – С. 124-141.
21. Направление стока [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/flow-direction.htm>. – Загл. с экрана. – (Дата обращения: 30.05.2021).
22. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1-6. Выпуск 20. Томская, Новосибирская, Кемеровская области, Алтайский край / Гос. ком. СССР по гидрометеорологии. – Санкт-Петербург : Гидрометеоиздат, 1993. – 723 с.
23. Николаев, В.А. Ландшафтная структура и физико-географическое районирование Алтайского края // Природное районирование и проблемы охраны природы. – Уфа: Башкирский университет, 1986. – С. 3-22.
24. Обзор группы инструментов Гидрология (Hydrology) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/an-overview-of-the-hydrology-tools.htm>. – Загл. с экрана. – (Дата обращения: 30.05.2021).
25. Пьянков, С.В. Геоинформационное обеспечение моделирования гидрологических процессов и явлений: монография / С.В. Пьянков, А.Н. Шихов; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2017. – 148 с.
26. Рассыпнов, В.А. Природа Алтая / В.А. Рассыпнов. – Барнаул : АлтГПА, 2009. – 161 с.
27. Ресурсы поверхностных вод районов освоения целинных и залежных земель. Выпуск VI. Равнинные районы Алтайского края и южная часть Новосибирской области / под общ. ред. В.А. Урываева. – Л.: Гидрометеоиздат, 1962. – 979 с.
28. Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики (за 1963–1970 гг. и весь период наблюдений). – Т. 15: Алтай, Западная Сибирь и Северный Казахстан, Вып. 1. Верхняя и Средняя Обь / под ред. Е.П. Шурупа [и др.]. – Л., 1975. – 542 с.

29. Рождественский, А.В. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при недостаточности данных гидрометрических наблюдений / А.В. Рождественский, А.Г. Лобанова. – Л.: Гидрометеиздат, 2004. – 67 с.
30. Рождественский, А.В. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик / А.В. Рождественский, А.Г. Лобанова. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 448 с.
31. Скрипко, В. В. Оценка эколого-геоморфологического состояния Приобского плато на основе бассейнового анализа: монография / В.В. Скрипко ; АлтГУ. - Барнаул : Изд-во АлтГУ, 2015. - 142 с.
32. СП 33-101-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик // Государственный гидрологический институт. – М, 2004. – 75 с.
33. Хромых, В.В. Ландшафтный подход к выделению водоохраной зоны реки Ушайки на основе геоинформационного картографирования / В.В. Хромых, О.В. Хромых, А.А. Ерофеев // Вестник Томского государственного университета. – 2013. – № 370. – С. 175-178.
34. Широкова, С.Л. Основы построения ГИС управления природопользованием / С.Л. Широкова. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2003. – 188 с.
35. Яковченко, С.Г. Создание геоинформационных систем в инженерной гидрологии: дис. ... д-ра техн. наук : 25.00.35 / С.Г. Яковченко. – Барнаул, 2007. – 406 с.
36. GIS-Lab: Общее описание ASTER GDEM [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://gis-lab.info/qa/aster-gdem.html>. – Загл. с экрана. – (Дата обращения: 30.05.2021).
37. Gurnell, A., Montgomery, D. Preface: hydrological applications of GIS // Hydrological Processes. – 1998. Vol. 12(6). P. 821-822.
38. Maidment, D.R. GIS and hydrologic modeling, Environmental Modeling with GIS. – Oxford. Oxford University Press, 1993. – P. 147-167.

39. Motovilov, Yu. G., Gottschalk, L., Engeland, K., Belokurov, A.
ECOMAG: regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX
region // Institute Report Series No: 105 ISBN 82-91885-04-4 May 1999.