

На правах рукописи

УДК 556.043

ОРЛОВА ЕЛЕНА ВИКТОРОВНА

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ**

Специальность:

25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2008

Работа выполнена в Государственном гидрологическом институте.

Научный руководитель:

доктор географических наук,
профессор

И.А. Шикломанов

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор

А.В. Рождественский

кандидат технических наук,
доцент

Н.В. Викторова

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный университет

Защита диссертации состоится 20 ноября 2008 года в 15-30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.197.02 при Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета.

Автореферат разослан «___» октября 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат географических наук

В.Н. Воробьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Для решения прикладных задач в области проектирования и строительства различных гидротехнических сооружений, для оценки и рационального использования водных ресурсов в целях устойчивого развития страны и отдельных административных районов, для мониторинга экологического состояния речных бассейнов необходимо иметь достаточно полные сведения о гидрологических характеристиках и режиме водных объектов. В связи с этим перед гидрологами ставятся задачи выявления временных и пространственных связей между факторами, определяющими формирование гидрологического режима, и возможного их изменения под влиянием природных и антропогенных условий.

Для определения одной из главных расчетных гидрологических характеристик - стока рек разработано и применяется множество методов. Но ни один из них не может функционировать без использования физико-географических и гидрографических характеристик исследуемого района. До недавнего времени они определялись традиционными трудоемкими ручными измерениями на топографических картах. Интенсивное развитие компьютерной техники и информационных технологий в последнее время позволяет получать нужные характеристики с помощью технологий географических информационных систем (ГИС) полнее и быстрее по сравнению с традиционными измерениями.

Применение ГИС-технологии вызвало коренное преобразование методов картографических работ. Создаются новые правила, инструкции и ГОСТы по составлению и использованию цифровых карт. К сожалению, методических указаний по применению ГИС-технологии в гидрологических расчетах до сих пор не существует. Определение методических подходов к решению этой проблемы является необходимым этапом и поэтому актуальной и своевременной задачей.

Цель работы. Разработка методических подходов к использованию ГИС-технологии для определения физико-географических и гидрологических характеристик водных объектов и апробирование их при решении конкретных гидрологических проблем.

Для достижения этой цели решены следующие **задачи**:

1. Составлены базы цифровых географических и тематических данных на

территорию Европы и Северной Азии, необходимые для определения физико-географических и гидрографических характеристик.

2. Выполнен анализ цифровых топографических и тематических карт ряда природных и административных районов Российской Федерации в целях установления возможности их использования для автоматизированного определения физико-географических и гидрографических характеристик водных объектов.

3. Осуществлен всесторонний анализ потенциалов разнообразного программного обеспечения ГИС-технологий для использования в целях гидрологии.

4. Выполнен анализ опыта работ российских и зарубежных специалистов по применению ГИС-технологии в гидрологии.

5. Опробованы на практике методические подходы к выполнению картометрических работ в среде ГИС в целях существенного сокращения затрат времени и повышения точности результатов измерений.

6. Проведен геостатистический анализ материалов измерений на гидрологических и метеорологических станциях ряда природных и административных районов для оценки возможности их использования при составлении цифровых тематических карт.

7. В качестве примера на основе цифровых моделей выполнена оценка водных ресурсов бассейна Печоры и Республики Коми.

Методы исследований. В целях решения поставленных в работе задач были созданы цифровые карты местности для ряда природных и административных районов. На их основе получены необходимые для гидрологических расчетов гидрографические и физико-географические характеристики.

Выборки исходных гидрометеорологических данных исследовались методами геостатистического анализа, после чего к ним применялись различные способы интерполяции для подготовки карт пространственного распределения гидрологических характеристик.

Научная новизна:

1. Впервые систематизирован опыт применения ГИС в гидрологии и выполнен полный цикл исследований с помощью ГИС-технологии в гидрологических целях, начиная от составления баз цифровых данных и

определения морфометрических характеристик речного бассейна до оценки водных ресурсов (на примере реки Печора и Республики Коми).

2. Впервые применен геостатистический анализ исходных тематических данных в целях их использования для построения цифровых карт пространственного распределения гидрометеорологических характеристик.

3. Подготовлены цифровые карты девяти отдельных речных бассейнов России, предназначенные для оперативного анализа материалов с помощью ГИС-технологии, по которым уточнены их водоразделы и выполнены картометрические работы в целях определения их гидрографических и физико-географических характеристик.

4. Разработана палитра из 96 условных знаков гидрологических станций и постов, позволяющая отразить на картах все их многообразие по состоянию, ведомственной принадлежности и программам выполняемых измерений.

5. С использованием ГИС-технологии построена схема зон возможного затопления при паводках различной обеспеченности для реки Се-Яха (Ямал).

Практическая ценность:

1. Сформированы базы цифровых географических и тематических данных на Европу и Северную Азию, необходимые для работы гидрологических ГИС.

2. Определены методические подходы к замене традиционной технологии картометрических работ в гидрологии автоматизированной, с использованием ГИС-технологии. В результате, в десятки раз сокращено время выполнения картометрических работ.

3. Увеличена точность расчетов, исключены случайные ошибки измерений морфологических характеристик, выполняемых ранее вручную или с применением простейших измерительных приспособлений.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на годовом собрании Академии проблем водохозяйственных наук в декабре 2002 г., на Международном научно-промышленном форуме «Великие реки» в мае 2004 г., на VI Всероссийском гидрологическом съезде в сентябре 2004 г., на итоговых сессиях ученого совета ГГИ в 2005 и 2007 годах. Часть работы была выполнена в рамках проекта по исследованию гидрологических условий в районе Бованенковского газоконденсатного месторождения на Ямале.

Большая часть измерений и расчетов, приведенных в данной

диссертационной работе, была осуществлена в составе НИР Росгидромета «Разработка концепции и методологии оценки динамики возобновляемых водных ресурсов для территорий, не обеспеченных гидрологическими данными, на основе использования математического моделирования и ГИС – технологий». Полученные результаты вычислений сверялись с опубликованными ранее данными, и причины расхождений анализировались. Некоторые измеренные с помощью ГИС параметры применялись в дальнейших гидрологических расчетах при подготовке материалов, необходимых для выработки решений и рекомендаций.

Личный вклад автора. Автор данной работы лично выполнила обоснование возможности применения ГИС-технологии в практике картометрических работ и гидрологических расчетов; осуществила подготовку и адаптацию необходимых баз цифровых географических и тематических данных; произвела геостатистический анализ и интерполяцию исходных гидрометеорологических характеристик; подготовила множество цифровых карт отдельных речных бассейнов и административных районов; с помощью ГИС-технологии уточнила границы бассейнов 27 крупных и средних рек России, определила физико-географические и гидрографические характеристики исследуемых водных объектов и произвела их сравнение со справочными данными (если они были определены ранее традиционными способами); обосновала точность измерений в зависимости от масштаба исходных картографических материалов и применяемых картографических проекций. Автор также подготовила и опубликовала по теме диссертации 11 научных работ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методы расчетов гидрологических характеристик природных или административных районов (на примере годового стока) с использованием ГИС-технологии и баз цифровых данных.
2. Методы определения физико-географических и гидрографических характеристик природных объектов с использованием ГИС-технологии.
3. Геостатистический анализ гидрометеорологических характеристик и их интерполяция с использованием ГИС-технологии.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем работы – страниц,

включая 27 таблиц и 41 рисунок. Приложение состоит из 3 частей на 38 страницах. Список литературы содержит 127 наименований, в том числе 79 иностранных.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показаны актуальность темы и научная новизна работы, сформулированы цели и задачи исследования.

В первой главе «Географические информационные системы и возможности их использования в гидрологии» аргументирована необходимость перехода от традиционных методов картометрических работ в гидрологии к ГИС-технологии, обоснованы преимущества ее применения, описаны использованные автором базы цифровых географических и тематических данных, необходимые для полноценного функционирования гидрологической ГИС, дан анализ возможностей наиболее известных ГИС-программ.

С развитием вычислительной техники, цифровых информационных баз географических данных и программного обеспечения картосоставительские и картометрические работы все более отходят от традиционной технологии "пера и бумаги". В связи с этим назрела необходимость составления новых методических указаний, регламентирующих не только правила измерений с использованием программного обеспечения ГИС-технологий, но и методы выполнения анализа и пространственного представления результатов обработки. Новые методы позволяют производить измерения и расчеты с гораздо большей точностью и скоростью, чем традиционные.

Геоинформационная технология (ГИС–технология) – это совокупность приемов, способов и методов применения средств вычислительной техники, позволяющая реализовать функциональные возможности ГИС для анализа исходных данных, выполнения расчетов и представления в картографической форме полученных результатов. Эта технология объединяет преимущества визуализации и географического анализа изучаемых объектов реального мира, которые предоставляет карта, с возможностью работы с базами цифровых данных. Кроме того, она позволяет представить результаты анализа в печатном виде. Большие возможности дает использование ГИС для анализа гидрологической информации, предсказания наводнений, управления водными ресурсами и других работ, где необходимо точно знать временное и пространственное распределение различных гидрологических характеристик на

речном водосборе и иметь возможность как оценки их состояния, так и прогноза возможных изменений.

Базы цифровых данных, компьютерное оборудование и программное обеспечение являются обязательными составными частями ГИС.

Во время подготовки диссертации автор скомпоновала, адаптировала и использовала следующие базы географических и тематических данных:

База цифровых географических данных в векторном формате была подготовлена на основе Цифровой карты Мира (ЦКМ), часть 2 - Европа и Северная Азия, в масштабе 1:1 000 000. В базе имеются следующие основные покрытия: береговая линия, государственные границы, гидрография, дороги, населенные пункты, рельеф суши и др.

В качестве **базы цифровых данных высот** в сеточном формате использовалась глобальная база данных **ГТОРО30**. Размер стороны ячейки сетки – 30 секунд. Горизонтальная система координат - десятичные градусы. Вертикальные координаты представляют высоту в метрах над уровнем моря.

Цифровая база данных почвенного покрова

В качестве базы цифровых данных почвенного покрова была использована цифровая векторная Карта почв России в масштабе 1:2 500 000.

Глобальная база цифровых данных растительного покрова Земли

Набор данных растительного покрова в сеточном формате с разрешением в 1км охватывает 12-месячный период (с марта 1992 по апрель 1993).

Цифровая база климатических данных ФАО (FAOCLIM) также имеет глобальное покрытие. В базе указаны номера метеостанций, их координаты и высоты над уровнем моря, названия стран местоположения. База содержит среднемесячные климатические данные по 15 параметрам (средняя температура, осадки, относительная влажность, суммарная радиация и др.).

База гидрологических данных ГГИ включает сведения обо всех гидрологических постах на водотоках России и результаты измерений на них. База содержит названия и коды постов, ведомственную принадлежность, географические координаты, расстояния от истока и устья, площади водосборных бассейнов, виды производимых наблюдений и другие необходимые характеристики. Архив средних месячных расходов воды содержит информацию о наблюдаемых расходах воды на каждом посту за конкретный месяц и год.

Во второй главе «Состояние вопроса по применению ГИС в гидрологии» дан аналитический обзор литературных источников, освещающий состояние вопроса о применении ГИС-технологии в гидрологии.

Почти ежегодно проводятся международные научные конференции, посвященные этой проблеме. Соответствующие публикации содержат обобщенную информацию о последних достижениях в данной области. Например, на Международной конференции «ГИС и дистанционное зондирование в гидрологии», состоявшейся в 2003 году в Китае, было представлено более 400 докладов, описывающих использование ГИС и дистанционного зондирования в гидрологических расчетах, в оценке водных ресурсов и прогнозировании опасных гидрологических явлений. Многие из этих работ представляют существенный научный интерес. К сожалению, только две работы были представлены российскими учеными, что свидетельствует о недостаточном внимании, уделяемом в нашей стране применению информационных технологий в гидрологии.

При выполнении любых гидрологических расчетов крайне важно знать оценку точности конечного продукта. Некоторые авторы посвятили свои работы сравнительному анализу точности результатов различных способов интерполяции. Большинство из них склоняется к мысли, что сложные методы интерполяции, такие, как кригинг, обеспечивают оценку интерполируемой величины намного лучше, чем любой из более простых методов.

ГИС-технологии используются практически для решения всех задач гидрологии. Приведены примеры успешного применения ГИС для прогнозирования и моделирования сценариев паводков и наводнений. Создаваемые при этом цифровые карты отображают потенциальные площади затоплений и служат основой для проектирования и строительства защитных сооружений.

Некоторые работы посвящены использованию цифровых моделей высот для изучения морфологии водосборных бассейнов и оценки оползневой опасности.

Особый интерес представляет фундаментальная работа ФАО – «Atlas of Water Resources and Irrigation in Africa, 2001» для расчета водных ресурсов. Для данного проекта была создана в среде ГИС-программы модель, которая вычисляет водные ресурсы по бассейнам и странам Африки за месяц, квартал или год с учетом ирригации или без, а также водный баланс почвы.

С помощью ГИС-технологии были построены карта высоты слоя снежного покрова и карта риска лавин для отдельного речного бассейна на юго-западе Тянь-Шаня. Эти цифровые карты используются для подготовки прогноза лавин и необходимы для проведения защитных мероприятий.

ГИС-технология успешно применялась для изучения загрязнения реки Нояль (Индия) и грунтовых вод промышленными отходами текстильной фабрики. С помощью данной технологии оценили распространение загрязнения тяжелыми металлами, ядовитыми и токсичными веществами по территории бассейна.

В последние годы все чаще стали встречаться работы по применению ГИС-технологии в гидрологических исследованиях и в отечественной периодической печати. В первую очередь нужно отметить серию статей преподавателей Пермского государственного университета Калинина В.Г. и Пьянкова С.В. В одной из них авторы произвели сравнение гидрографических характеристик водных объектов бассейна Камских водохранилищ, измеренных с помощью ГИС-технологии, с характеристиками, полученными традиционным способом. Хорошая сходимость результатов измерений позволила сделать вывод о высокой точности выполнения картометрических работ с помощью ГИС-технологии.

Интересна работа Магомедова А.В. и Курбанова З.А. по использованию ГИС-технологий для исследования русловых переформирований устьевого участка реки Терек на основе специально созданной базы данных, включающей векторную электронную карту и продольные и поперечные профили русла за 1965-1994 годы по 70 створам.

На VI Всероссийском гидрологическом съезде был представлен информативный доклад Яковченко С.Г. и Жорова В.А. об опыте практического использования ГИС-технологий в гидрологических и водохозяйственных расчетах. В нем описаны запатентованные технологии, реализованные в рамках программы ArcView в виде отдельных модулей для расчета различных гидрологических характеристик.

В статье Мирошниченко С.А., посвященной управлению водными ресурсами бассейна реки Кама, рассмотрен опыт успешного применения ГИС-технологии для решения задач охраны и рационального использования водных ресурсов в масштабах крупного речного бассейна.

Проанализированные публикации в абсолютном большинстве дают описания практического применения ГИС-технологии для решения отдельных задач гидрологии. Акцент в этих работах делается на концептуальные проблемы, на полученные результаты и выводы. При этом методы реализации задач, как правило, вообще не рассматриваются. В отличие от большинства публикаций автором настоящей работы на основе анализа и обобщения всей необходимой исходной информации по ГИС рассматриваются в основном методические подходы, что представляется важным для широкого применения ГИС-технологий при выполнении гидрографических и гидрологических оценок и расчетов.

В третьей главе «Использование ГИС для определения гидрографических и физико-географических характеристик» описаны методы и даны некоторые рекомендации по использованию ГИС для нахождения гидрографических и физико-географических характеристик водных объектов.

Автоматизированное определение границ водосбора является важнейшим этапом. От правильности проведения границ зависит точность многих последующих измерений и расчетов. Как правило, на большую часть рек России границы водосборов уже определены и нанесены на схемы в соответствующих справочных изданиях. Особенно это важно для равнинных территорий, где границы водоразделов определены с низкой точностью. В любом случае перед началом картометрических работ необходимо проверить точность нанесения водоразделов. ГИС-технология позволяет сделать это с большой точностью и в короткое время. Если векторная граница региона или водосбора уже имеется, она берется за основу, если нет, то определяется по цифровой карте.

От выбора *картографической проекции* зависит точность выполняемых измерений. Наименьшие ошибки в измерении площадей получаются при использовании равновеликих проекций, а в измерении длин – равнопромежуточных. Для карт средних широт лучше использовать конические или азимутальные проекции, для экваториальных – цилиндрические, а для полярных – азимутальные или стереографические проекции.

Гидрологические станции и посты изображаются на электронной карте в виде соответствующих внемасштабных условных знаков (символов). Несмотря на наличие в программном обеспечении множества условных знаков для

изображения различных объектов на электронной карте, привычных символов для традиционного изображения гидрологических постов не существует. Поэтому был подготовлен проект палитры новых условных знаков, которыми, сохраняя традиционные начертания, можно отобразить все разнообразие гидрологических постов в зависимости от их ведомственной принадлежности, предназначения и широкого спектра выполняемых на них наблюдений.

Определение длин линий (гидрологической сети, дорог и др.) выполняется с помощью набора команд, заложенных в программном обеспечении ГИС. Длина полилинии определяется как сумма длин всех входящих в нее отрезков. В частности, можно получить длину всей речной сети водосбора, каждого притока в отдельности или любого участка реки.

Измерение площадей (водосборов, озер, водохранилищ, ледников, болот, населенных пунктов и других объектов местности) также выполняется с помощью специальных команд ГИС-программ. Одновременно определяются периметры этих объектов и их центры тяжести.

По данным длин и площадей рассчитываются густота речной или дорожной сети, средний уклон реки и ее отдельных участков, залесенность, заболоченность, озерность и другие характеристики водосборов.

Многие ГИС-программы имеют функции, позволяющие работать в трехмерном пространстве. С их помощью строятся цифровые модели рельефа местности. По ним определяются средняя высота водосбора, его уклон, площадь с учетом рельефа, продольные и поперечные разрезы, объемы водных объектов.

В табл. 1 представлены результаты измерений на примере водосбора реки Кубань. Анализ результатов измерений показал хорошую согласованность величин характеристик, полученных с использованием ГИС-технологии, с величинами, полученными в результате традиционной ручной обработки.

В этой же главе описаны приемы создания и применение цифровой модели высот (ЦМВ). Матрицы высот, направлений потоков и аккумуляции потока, получаемые из ЦМВ, являются необходимыми для автоматического извлечения гидрографических свойств водосбора.

Матрица высот состоит из регулярной сетки высот, представляющей выборку реальной топографии.

Таблица 1. Морфометрические и гидрографические характеристики водосбора Кубани, измеренные и рассчитанные с помощью ГИС-технологии

Характеристики	Величины
Площадь водосбора, км ²	55 285.8
Площадь водосбора (с учетом рельефа), км ²	59 136.7
Периметр водосбора, км	1 722.3
Длина реки Кубань, км	827.6
Суммарная длина водотоков (протяженностью более 10 км), км	7 472.7
в том числе:	
постоянных,	6 242.3
сезонно меняющихся	938.5
каналов	291.8
Густота речной сети, км/км ²	0.14
Средний уклон реки, ‰	3.7
Суммарная площадь озер и водохранилищ (более 1 км ²), км ²	614.3
Длина береговой линии озер и водохранилищ, км	792.6
Озерность, %	1.1
Ледники, км ²	383.3
Ледники, %	0.7
Средняя высота водосбора, м	532.6
Длина водосбора, км	490.1
Наибольшая ширина водосбора, км	199.7
Средняя ширина водосбора, км	112.8
Средний уклон водосбора, ‰	109.3
Коэффициент вытянутости водосбора	4.3
Коэффициент формы водосбора	0.2
Коэффициент асимметрии водосбора	1.2
Площадь болот, км ²	1 439.6
Заболоченность, %	2.6
Площадь городов, км ²	1 473.0
Количество населенных пунктов (крупных и средних)	225
Застроенная площадь, %	2.7
Суммарная длина железных дорог, км	1 182.8
в том числе:	
многоколейных:	782.8
одногоколейных:	243.3
соединительных:	156.7
Густота железнодорожной сети, км/км ²	0.02
Суммарная длина автодорог, км	6 977.9
в том числе:	
однополосных шоссе или дорог	6 259.8
соединительных дорог	718.1
Густота автодорожной сети, км/км ²	0.13

Матрица направлений потоков, разделяющая водораздел на ячейки, показывает направления стока воды из каждой ячейки. Из восьми возможных направлений стока отбирается одно, имеющее максимальный уклон, которое и фиксируется в матрице направлений потоков.

Матрица аккумуляции потока. В матрице каждая ячейка представляет сумму весов всех ячеек, дающих к ней сток.

Матрицы направления и накопления потока часто используются для разработки моделей речных водосборов с распределенными параметрами.

На основе вышеуказанных матриц может быть выполнено **автоматическое очерчивание водоразделов**, вычерчена **синтетическая сеть водотоков** и **автоматически определены порядки водотоков**.

Одной из наиболее интересных в научном и практическом плане является задача расчета зон затопления при наводнениях и паводках. Необходимо не только рассчитать, но и отобразить на карте зоны затопления в зависимости от уровней воды в контрольных створах.

Основной способ определения районов затопления в период паводка заключается в построении наклонных поверхностей, наиболее близко описывающих зеркало поднявшейся воды, и в дальнейшем определении линий пересечения этих поверхностей с цифровой моделью местности.

На рис. 1 представлена схема зон возможного затопления поймы реки Се-Яха в пределах Бованенковского месторождения для паводков обеспеченностью 1, 10 и 50%. В качестве географической основы была использована цифровая векторная топографическая карта масштаба 1:100 000 в проекции Гаусса-Крюгера. На реке было определено 8 створов. С помощью гидравлической модели сотрудники отдела гидрологической сети ГГИ в каждом створе рассчитали уровни поднятия воды для паводков различной обеспеченности. Средствами программы ArcGis по этим уровням были построены 3 наклонные поверхности для паводков обеспеченностью 1, 10 и 50%. Цифровая основа была дополнена высотными отметками, горизонталями и высотами урезом водных объектов с более крупных карт. Полученная векторная карта была преобразована в цифровую модель местности (ЦММ). Пересечение ЦММ и наклонных поверхностей, моделирующих уровни

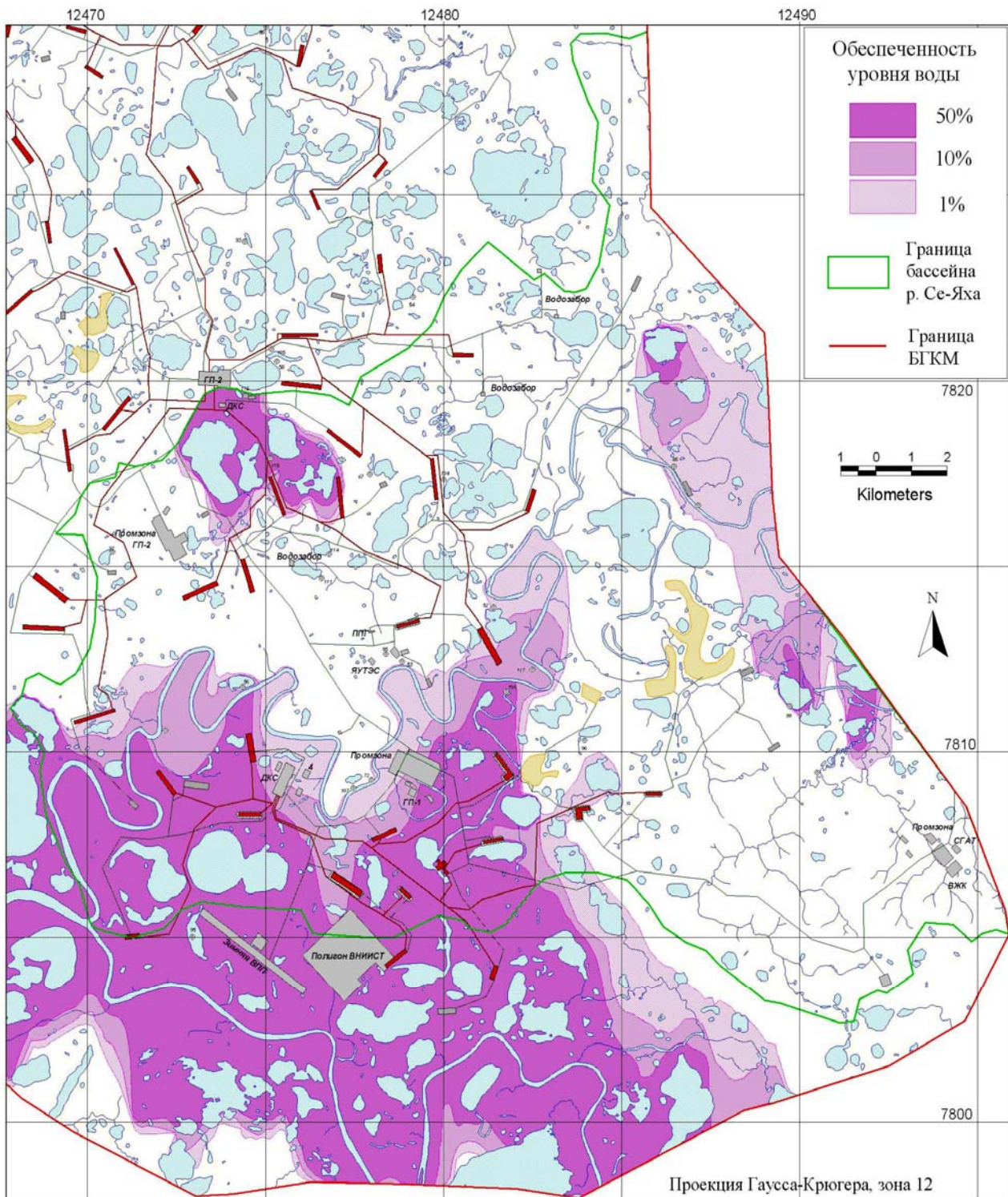


Рис. 1. Схема зон возможного затопления поймы р. Се-Яха в пределах Бованенковского месторождения

поднятия воды для паводков различной обеспеченности, определило зоны возможного затопления поймы реки Се-Яха.

Из полученной схемы видно, что область междуречья рек Се-Яха и Морды-Яха, расположенная ближе к устью, будет затоплена почти полностью в период паводка. В то же время противоположный берег реки Се-Яха останется в значительной степени свободным от воды, и, вероятно, там безопасней строить дороги и сооружения.

Четвертая глава «Применение ГИС для пространственной интерполяции гидрометеорологических характеристик» посвящена геостатистическому анализу исходных гидрометеорологических данных и их пространственной интерполяции.

Геостатистический анализ исходной информации производится для нахождения ряда параметров, определяющих построение интерполирующей поверхности. В целях их лучшего подбора используются следующие инструменты геостатистического анализа:

- **Гистограмма** применяется для исследования плотности распределения данных. Это графическое представление распределения случайной величины, где по оси X – интервалы значений, а по оси Y – количество значений, попадающих в каждый интервал. Методы интерполяции, используемые для построения поверхности, дают лучшие результаты при нормальном распределении данных. Если данные не отражают нормального распределения на гистограмме, перед использованием интерполяции может возникнуть необходимость преобразования данных для приведения их к нормальному распределению.

- **Карта Вороного** (или многоугольники Тиссена) представляет собой серию полигонов, стороны которых находятся на равных расстояниях от опорных точек, и применяется для анализа стационарности и пространственной изменчивости данных. Часто применяется для картирования атмосферных осадков.

- **Анализ пространственного тренда** выполняется для определения пространственных тенденций в выборке данных. Если в данных существует тренд, он представляет собой неслучайную составляющую поверхности. Можно вычесть этот тренд и продолжить анализ, моделируя значения в

опорных точках после его вычитания.

В данной главе исследовались значения тренда годовых осадков на Европейской территории СССР по данным наблюдений на метеостанциях за 30 лет (1969-1999). На рис. 2, а метеостанции представлены в виде красных точек, расположенных в трехмерном пространстве. Каждая точка имеет координаты (X, Y, Z) , где X и Y определяют местоположение на земной поверхности, а Z соответствует значению тренда годовых осадков. Согласно рисунку (см. рис. 2, а) наблюдаются небольшое линейное уменьшение тренда с запада на восток и обратное U-образное снижение с севера на юг.

- **Вариограмма** (или структурная пространственная функция) представляет собой график функции, связывающей дисперсию анализируемой величины в опорных точках и расстояния, на которые они отстоят друг от друга. Она отражает пространственную связанность (корреляцию) опорных точек и их соседей. Основной целью построения вариограммы является выбор параметров кривой, проходящей с наименьшим отклонением от точек. По мере того как расстояние между парами точек увеличивается, значения вариограммы тоже должны увеличиваться. На определенном расстоянии рассеивание точек выравнивается, что указывает на то, что за пределами этого расстояния корреляция незначительна.

На рис. 2, б представлена вариограмма тренда годовых осадков на ЕТС. С помощью вариограммы были подобраны параметры для построения интерполирующей поверхности. Кроме того, на вариограмме определены пары соседних точек с низкой корреляцией исследуемой величины. На рис. 2, б для примера были выделены 3 такие точки и на схеме расположения метеостанций прослежены пары соответствующих им связей. Резкое расхождение значений в соседних точках может объясняться влиянием антропогенных факторов или ошибками измерений.

Определив в результате анализа, что в выборке данных нет ошибочных значений и распределение является близким к нормальному, можно переходить к интерполяции поверхности.

Интерполяция - процесс оценки или предсказания значений переменной для мест, где не было сделано измерений. Чаще всего интерполяция измеренных или вычисленных в точках величин производится для построения карт,

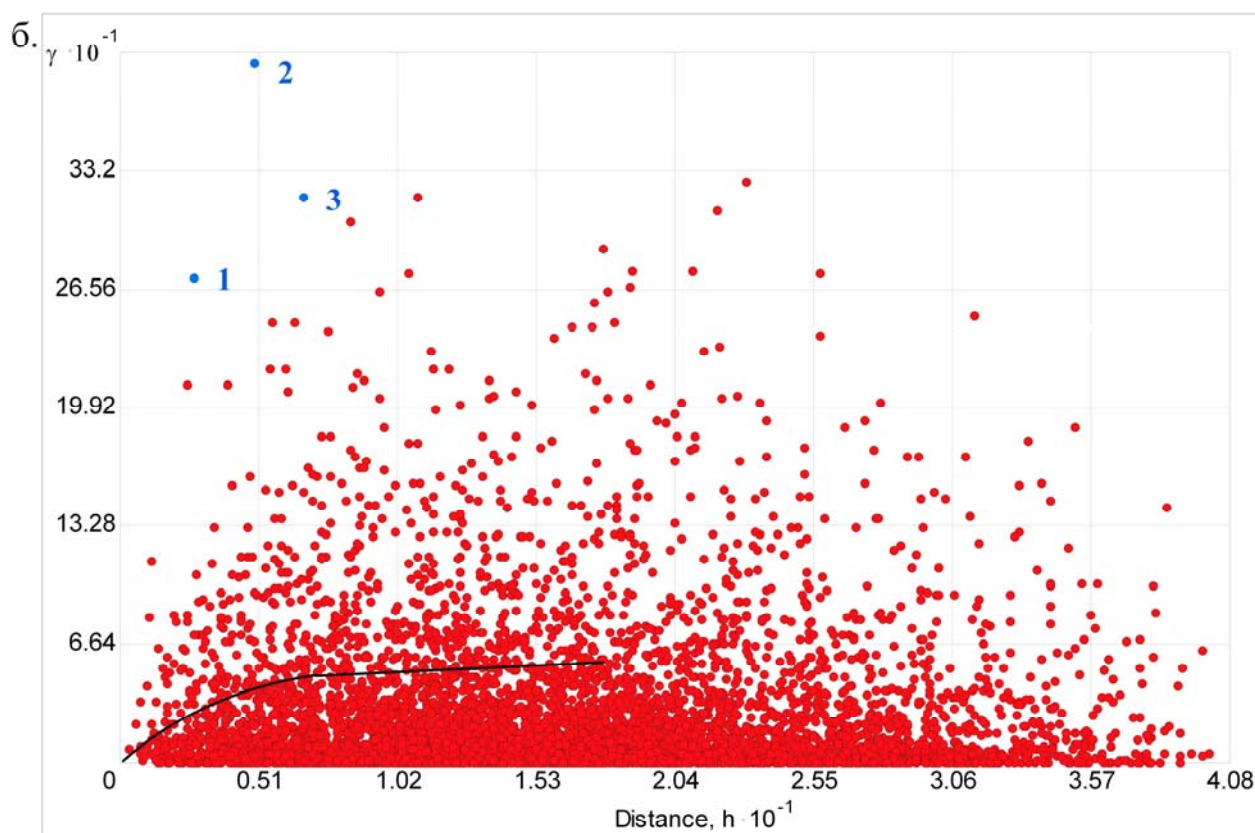
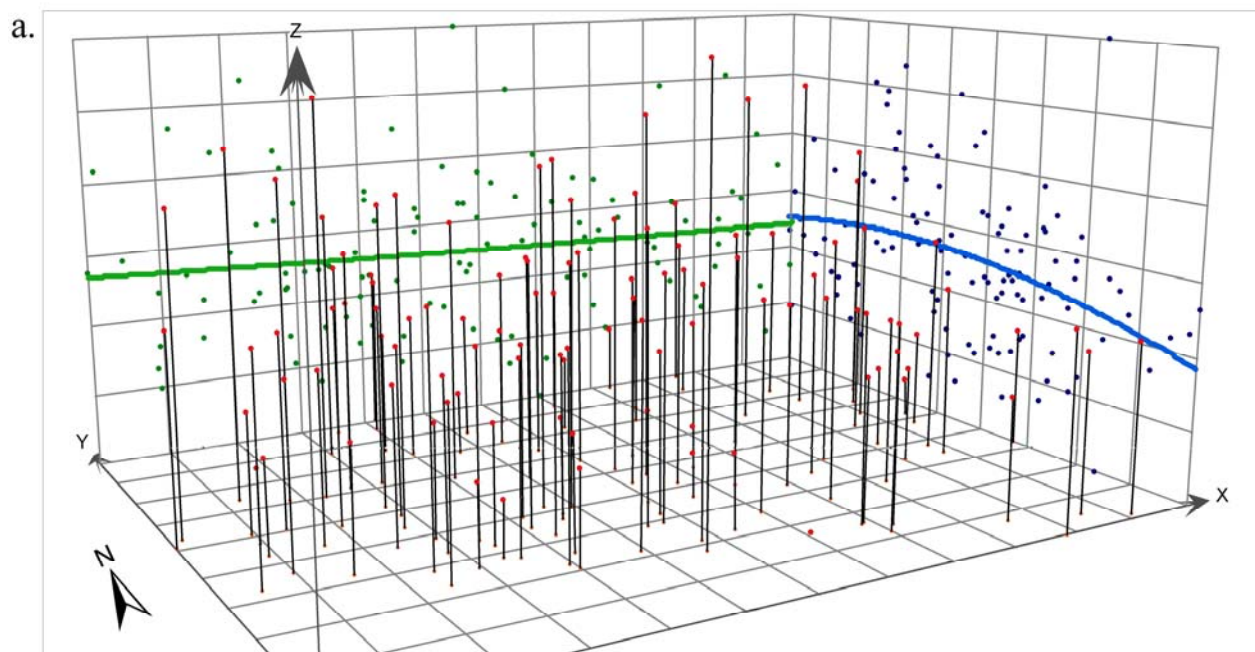


Рис. 2. Геоestatистический анализ тренда годовых осадков на ЕТС:
а – пространственный тренд; б - вариограмма

показывающих пространственную изменчивость гидрометеорологических характеристик с помощью изолиний: их распределения, интенсивности, продолжительности. К гидрометеорологическим характеристикам, которые наиболее часто картографируются с применением интерполяции, можно отнести средние значения, отклонения от среднего, коэффициенты вариации и асимметрии, суммарные показатели для определенного периода, экстремальные значения и их изменчивость.

Детерминированные методы интерполяции основаны на подборе математических функций поверхностей в целях их подгонки через точки с измеренными значениями.

В ГИС-программах используются следующие детерминированные методы:

- **Метод обратных взвешенных расстояний** использует опорные точки, находящиеся в окрестностях искомой. Чем ближе опорная точка расположена к искомой, тем выше ее вес. Такая интерполяция является точной, так как построенная поверхность будет проходить через все опорные точки.

- **Метод глобального полинома (1, 2, 3... порядка)** строит поверхность по опорным точкам с помощью полинома. Он используется для плавно меняющихся поверхностей (например, анализ тренда). Недостаток метода - опорные точки, расположенные по краям рабочей зоны, могут оказывать слишком большое влияние.

- **Метод локального полинома** более гибкий и быстрый, требует меньшего количества характеристик, чем метод глобального полинома. Используется только в пределах определенных "окон", а не всей территории.

- **Метод радиальных базисных функций** используется для построения сглаженных поверхностей для большого количества опорных точек (дает хороший результат для рельефа).

Геостатистические методы интерполяции основаны на статистических моделях, учитывающих автокорреляцию. С их помощью можно не только построить поверхность, но и получить оценку точности интерполяции. В отличие от детерминированных методов геостатистические методы учитывают также вероятность. При использовании этих методов могут быть учтены факторы подстилающей поверхности, оказывающие влияние на интерполируемую величину (например, рельеф, залесенность, озерность и др.).

- *Кригинг* – метод интерполяции, учитывающий не только удаленность точек, но и их взаимное расположение. Он используется для создания карт интерполированных значений, вероятности и стандартных ошибок. Кригинг – один из наиболее гибких методов и может также экстраполировать значения вне диапазона данных.

Использование этого метода можно рекомендовать для создания гидрологических карт потому, что он производит хорошую интерполяцию для большинства наборов данных, в том числе и для малых выборок.

- *Кокригинг* (совместный кригинг) - при интерполяции использует измерения вспомогательной переменной, которая имеет корреляцию с интерполируемой величиной. Например, можно использовать данные о рельефе местности как направляющую линию к интерполяции распределения атмосферных осадков или слоя стока.

На рис. 3 показано распределение слоя годового стока в бассейне Печоры за 1986 год. Расходы воды, полученные на гидрологических постах, были пересчитаны в слой стока и отнесены к центрам водосборных бассейнов этих постов. Интерполяция слоя стока по водосбору была произведена методом кокригинга, а в качестве второй переменной использована высота местности. На картах прослеживается хорошая зависимость величины слоя стока от рельефа – слой стока выше в горных районах, чем на равнине.

В результате исследований, проведенных в данной главе, автором предложена классификация методов интерполяции по возможности их использования в гидрологическом картировании.

В пятой главе «Определение гидрологических характеристик бассейна Печоры и Республики Коми с использованием ГИС-технологии» показаны возможности практического применения ГИС-технологии для определения гидрологических характеристик на примере конкретного бассейна и региона.

Одним из главных методов изучения гидрологического режима и оценки водных ресурсов в условиях ограниченного числа наблюдений на гидрологических станциях или постах является метод картографического изображения изучаемых водных объектов. В основе метода лежит гипотеза, что характеристики стока, как и другие географические параметры, плавно изменяются в пространстве и зависят от географической зональности, поэтому

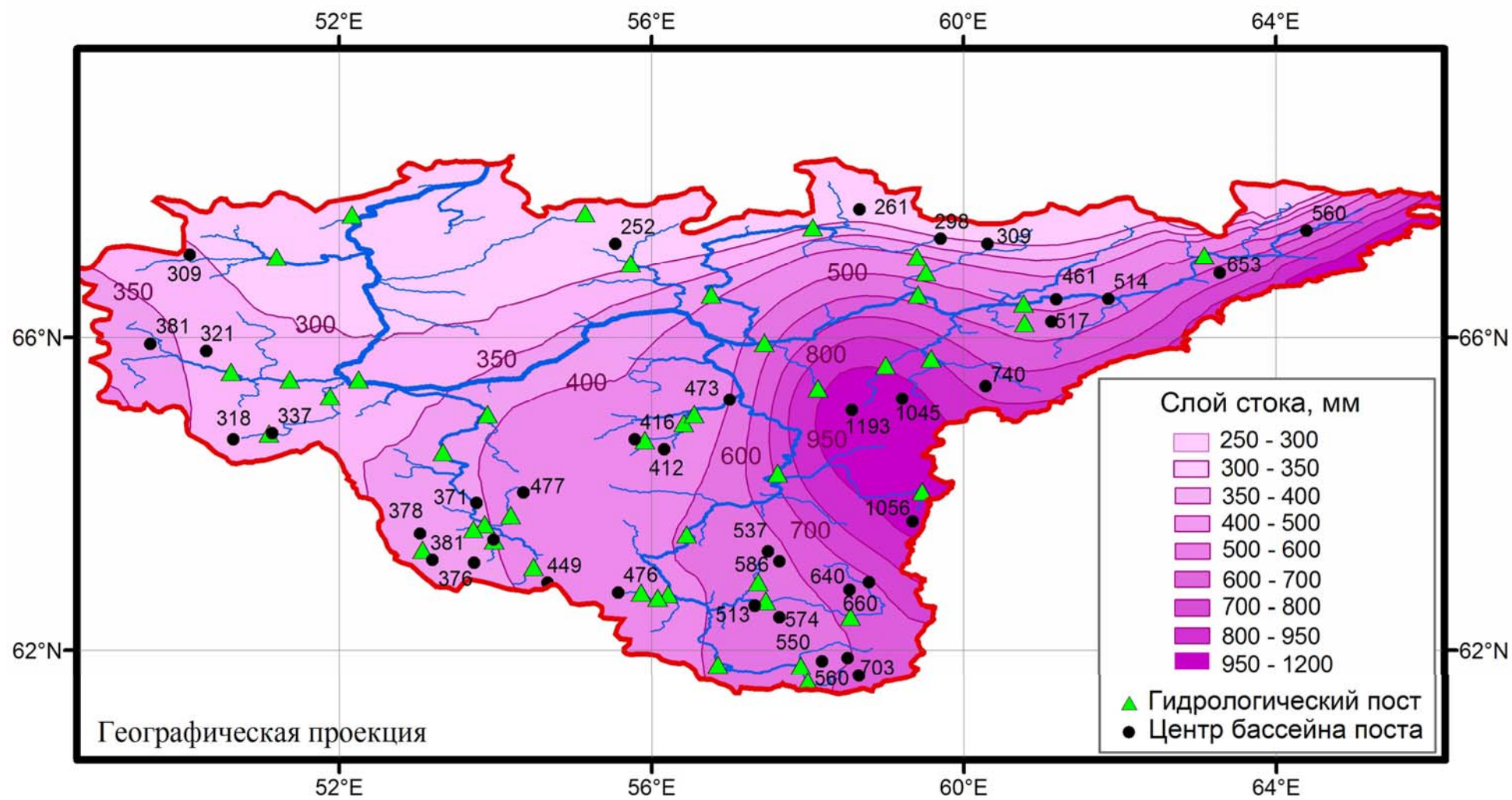


Рис. 3. Карта слоя годового стока в бассейне Печоры за 1986 год.

они могут быть определены для любой точки гидрологической карты. Метод основан на применении методов интерполяции к данным измерений в пунктах наблюдений для создания гидрологических карт, отражающих пространственное распределение характеристик речного стока.

Метод картографического изображения был избран с целью демонстрации возможности применения ГИС для определения гидрологических характеристик как наиболее ярко показывающий ее преимущества по сравнению с традиционными методами по затратам ресурсов при выполнении расчетов и по качеству созданных отчетных материалов.

Для бассейна Печоры были исследованы данные по стоку из базы данных ГГИ, осредненные за многолетний период (1960 – 1990) по данным наблюдений на 51 посту, а также данные за многоводный 1986 год по данным наблюдений на 54 постах (обеспеченность – 20%) и маловодный 1980 год по данным наблюдений на 53 постах (обеспеченность – 95%).

С помощью ГИС-технологии были построены цифровые карты распределения слоя годового стока в бассейне Печоры за 1980 год, за 1986 год (см. рис. 3), среднемноголетнего слоя стока, а также карты распределения осадков. По полученным цифровым картам бассейна средствами ГИС-программы были автоматически определены объем и средний слой осадков и стока (табл.2). В данной главе было также исследовано воздействие на сток некоторых физико-географических характеристик бассейна. Фактором, оказывающим существенное влияние на сток, оказалась высота местности. Именно поэтому оправданным оказалось применение метода кокригинга для создания карт пространственного распределения слоя стока.

Из таблицы видно, что определенная с помощью ГИС-технологии величина среднемноголетнего годового стока Печоры очень близко соответствует таковой, рассчитанной в ГГИ традиционными методами, отклоняясь от нее на 1.5%. Значение годового стока за многоводный 1986 год отклоняется всего на 0.7% от величины, рассчитанной традиционными методами. В то же время расхождение за маловодный 1980 год оказалось больше и составило 6.1%.

Таблица 2. Гидрометеорологические характеристики бассейна Печоры

Год	Определенные с помощью ГИС					[Shiklomanov, 2000; ГВК, 1987, 2003]	Расхождение объема стока, %
	средний слой осадков, мм	объем осадков, км ³	средний слой стока, мм	объем стока, км ³	средний коэффициент стока	объем стока за год, км ³	
Средне-многолетний	629	199	430	137	0.68	135	1.5
1986 (многоводный)	651	206	471	149	0.72	150	0.7
1980 (маловодный)	562	178	326	103	0.58	98	6.1

Для Республики Коми были исследованы данные 80 гидрологических постов и с помощью интерполяции методом кокригинга построены цифровые карты распределения среднемноголетнего слоя стока (см. рис. 4), слоя годового стока за 1986 и 1980 годы. По полученным цифровым картам также были автоматически определены объем и средний слой стока (табл. 3).

Из табл. 3 видно, что определенная с помощью ГИС–технологии величина среднемноголетнего годового стока Республики Коми очень близко соответствует величине, рассчитанной в ГГИ традиционными методами, отклоняясь от нее всего на 1.9%. Объемы годового стока за 1980 и 1986 годы также неплохо совпадают с величинами, рассчитанными традиционными методами, отклоняясь от них на 4.4 и 5.8% соответственно.

Таблица 3. Водные ресурсы Республики Коми

Год	Определенные с помощью ГИС		[ГВК, 2003]	Расхождение объема стока, %
	средний слой стока, мм	объем годового стока, км ³	объем годового стока, км ³	
Средне-многолетний	404	168.0	164.8	1.9
1986 (многоводный)	457	190.1	179.6	5.8
1980 (маловодный)	311	129.5	124.1	4.4

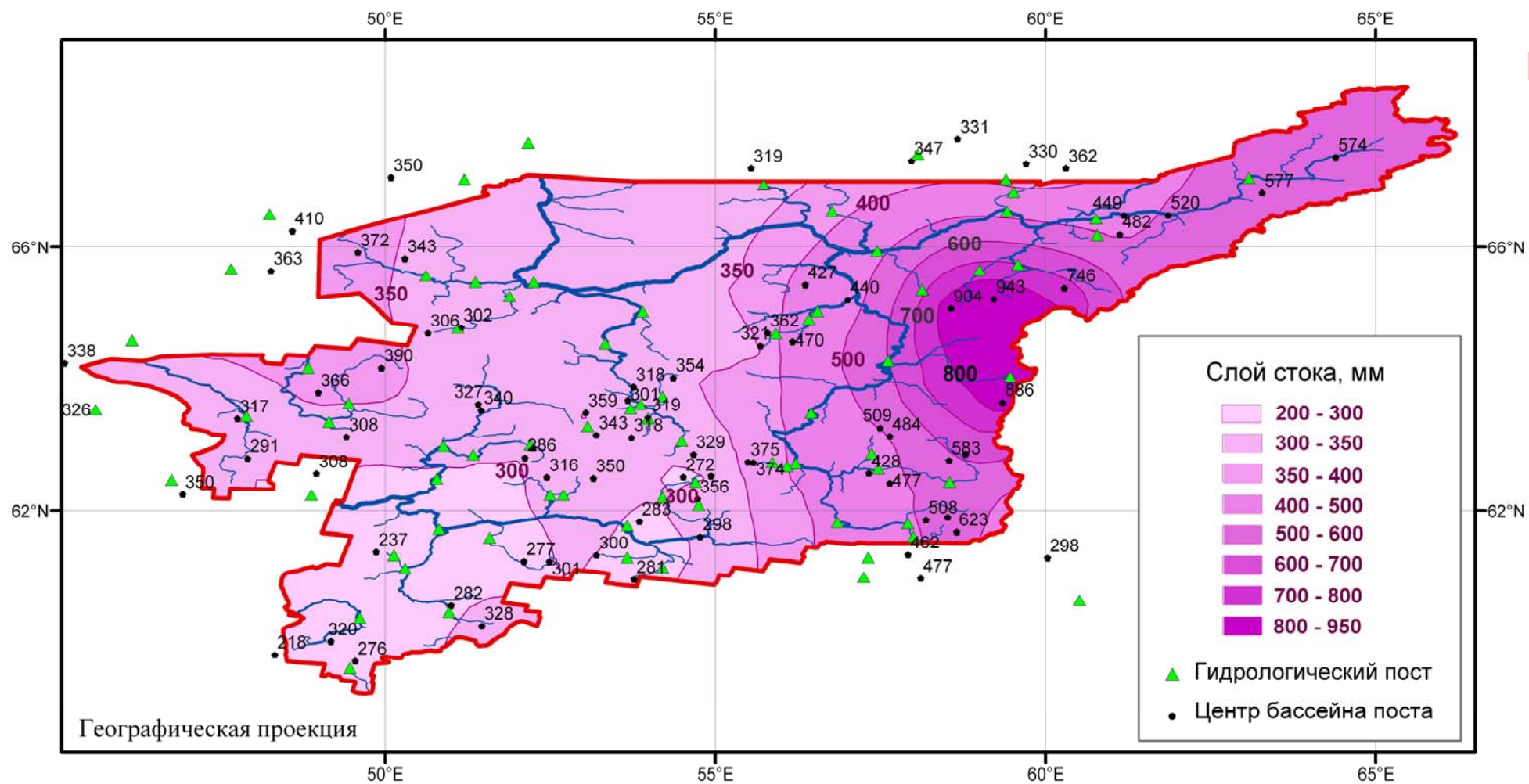


Рис. 4. Карта среднегогодового слоя стока Республики Коми

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Географические информационные системы находят все более широкое применение в гидрологии как для выполнения оперативных расчетов и оценки водных ресурсов, так и для изучения гидрологического режима водных объектов. Многие проблемы сбора, обработки и интерпретации данных, проектирования гидрологических сетей и подготовки предложений для принятия решений при широком использовании ГИС-технологии и персональных компьютеров могут разрешаться легче и эффективнее, чем это было до сих пор в гидрологической практике. Возможность ГИС-технологии оперативно представлять на цифровых или бумажных картах водные объекты совместно с их гидрографическими характеристиками, гидрологическими постами и данными измерений позволяет оперативно проводить автоматизированный комплексный анализ и интерпретацию материалов наблюдений для получения подробной картины происходящих процессов.

В условиях регулярного сокращения числа гидрологических станций и постов как в России, так и во многих регионах мира информация о детальных наблюдениях на сети либо отсутствует, либо недоступна. В то же время существуют базы надежных цифровых географических и тематических данных. Используя эти базы, можно получить необходимые данные для расчета гидрологических характеристик.

В диссертационной работе была собрана, проанализирована, систематизирована и обобщена имеющаяся информация из литературных источников и изложен многолетний опыт автора по применению ГИС-технологий для решения гидрологических задач, который позволил определить методические основы этого направления.

В процессе работы было подготовлено, проанализировано и использовано несколько баз географических и тематических данных в различных цифровых форматах, построено множество цифровых карт и на их основе выполнены измерения и анализ гидрологических и физико-географических характеристик водных объектов.

В нашей стране пока еще не разработана нормативная база по применению ГИС-технологий в гидрологии, поэтому разработка методических указаний по

их использованию в картометрических работах и гидрологических расчетах была бы весьма своевременной и полезной. Данная работа является необходимой основой для решения этой задачи. Полученные в ходе подготовки диссертации цифровые карты и методические разработки, могут быть использованы при подготовке территориальных СНиПов, оценке водных ресурсов, создании региональных гидрологических ГИС для экологического мониторинга водных объектов, для предсказания зон возможного затопления и оценке риска наводнений и т.д.

Основные работы, опубликованные по теме диссертации

1. О применении ГИС-технологий для расчета гидрографических характеристик // Тез. докл. на научной конференции по результатам исследований в области гидрометеорологии и мониторинга загрязнения природной среды. Секция 2. 23-26 апреля 2002 г. - СПб.: Гидрометеиздат, 2002. – С. 150-151.

2. Принципы и методические подходы к подготовке карт гидрологической изученности речных бассейнов с помощью ГИС-технологии // Проблемы русловедения: Тр. Академии проблем водохозяйственных наук. – М.: Геогр. ф-т МГУ, 2003. – Вып. 9. – С. 44-54.

3. Development of information support for monitoring of water bodies on the basis of the GIS-technology // GIS & RS in Hydrology. Water Resources and Environment. Three Georges, China. September 16-19, 2003 / Yongbo Chen (ed.) [Electronic resource] – China, 2003.

4. Автоматизированная технология анализа гидрологической сети с целью ее оптимизации – HydroNet-2004 // Докл. VI Всероссийского гидрологического съезда. Секция 1. Состояние и перспективы развития систем гидрологических наблюдений и информационное обеспечение потребителей. – М.: Метеоагентство Росгидромета, 2006. - С. 9-18.

5. Электронная карта гидрологической сети европейской части России (методика построения и содержание) // Докл. VI Всероссийского гидрологического съезда. Секция 1. Состояние и перспективы развития систем гидрологических наблюдений и информационное обеспечение потребителей. – М.: Метеоагентство Росгидромета, 2006. – С. 19-25.

6. Измерение параметров гидрографической сети реки Кубань на основе ГИС-технологии // Докл. VI Всероссийского гидрологического съезда. Секция 1. Состояние и перспективы развития систем гидрологических наблюдений и информационное обеспечение потребителей. – М.: Метеоагентство Росгидромета, 2006. – С. 57-64.

7. Методические основы применения ГИС в гидрологических расчетах // Докл. VI Всероссийского гидрологического съезда. Секция 5. Гидрофизические явления и процессы. Формирование и изменчивость речного стока, гидрологические и водохозяйственные расчеты. – М.: Метеоагентство Росгидромета, 2006. - С. 197-204.

8. Гидрологическое картирование в среде ГИС // Геоэкология и рациональное природопользование: Материалы научной конференции, посвященной 15-летию кафедры картографии и геоэкологии, 28-29 мая 2005 г. – Тверь: ТГУ, 2005. – С. 111-114.

9. Применение ГИС для оценки водных ресурсов республики Коми // Геоинформатика. - 2007. - №4. - С. 21-25.

10. Определение географических и гидрологических характеристик бассейна Печоры с использованием ГИС-технологии // Метеорология и гидрология. - 2008. - №4. - С. 81-88.


11. Применение ГИС-технологии для получения гидрологических характеристик водосбора Вилюйского водохранилища // География и природные ресурсы. - 2008. - №3. - С. 134-138.

Работы 9, 10 и 11 опубликованы в журналах из списка ВАК

Соавторами работ являются:

Бобровицкая Н.Н. (2, 3, 4, 5); Воскресенский О.Б. (2, 4); Кокорев А.В. (4); Кучеренко О.Г. (5); Седов В.Г. (1, 2, 3, 4, 5).

Соискатель

 Орлова Е.В.