

На правах рукописи

Семенова Ольга Михайловна

**АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА
В МАЛОИЗУЧЕННЫХ БАССЕЙНАХ
(НА ПРИМЕРЕ БАССЕЙНА Р. ЛЕНЫ)**

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 технических наук, профессор
Виноградов Юрий Борисович (ГУ ГГИ)

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Болгов Михаил Васильевич (ИВП РАН)

кандидат технических наук
Гайдукова Екатерина Владимировна
(РГГМУ)

Ведущая организация: ГУ «Арктический и антарктический научно-
исследовательский институт» (ГУ ААНИИ)

Защита состоится 25 декабря 2008 г. в «___» часов

на заседании диссертационного совета Д212.197.02 в Российском
государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195196,
Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., д. 98

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского
государственного гидрометеорологического университета.

Автореферат разослан «___» ноября 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета кандидат географических наук



Воробьев В.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы Физически обоснованное распределенное моделирование является своего рода квинтэссенцией современной гидрологической науки. Очевидно, что оно лежит в основе дальнейшего развития методов описания гидрологических явлений, расчетов и прогнозов стока.

Международной ассоциацией гидрологических наук в качестве одного из приоритетных направлений развития гидрологии в текущем десятилетии (2003–2013 гг.) назван проект PUB (*Predictions in Ungauged Basins*) – гидрологические расчеты в неизученных бассейнах.

Главной целью этого международного проекта является создание и развитие новых гидрологических моделей, основанных на понимании процессов и явлений, а не калибровке данных измерений.

Среди основных задач проекта PUB указывается совершенствование знаний и понимания влияния климатических факторов и особенностей подстилающей поверхности на гидрологические процессы всех масштабов в целях уменьшения неопределенностей в гидрологических расчетах и прогнозах.

В связи с этим создание универсальной детерминированной распределенной моделирующей системы для описания состояния речного бассейна и его пространственно-временной динамики, а также накопление в базах данных информации о водосборах и ее систематизация приобретают особую актуальность.

Моделирующая система, пригодная для характеристики процессов формирования стока в любом бассейне Земли, в совокупности с параметрическим информационным обеспечением кроме значимости для фундаментальной науки должна иметь вполне конкретные технические приложения. Среди них – долгосрочные и краткосрочные прогнозы стока, исследования влияния изменений климата, ландшафтов или экологической ситуации на состояние бассейнов.

Проблемы моделирования и прогноза стока речных бассейнов (прежде всего для региона Восточной Сибири) имеют также важное прикладное значение для решения ряда задач, связанных с обеспечением безопасности, оптимального функционирования гидротехнических сооружений, установлением сроков навигации, а также с устойчивым энергообеспечением населения и объектов экономики.

Оценки **современного состояния** и направлений развития распределенного детерминированного моделирования в гидрологии, даваемые разными гидрологическими школами, неоднозначны, а порой и противоречивы.

Для качественного описания и численного моделирования гидрологических систем к настоящему времени разработан широкий спектр

подходов и соответствующих математических моделей. Следует признать, тем не менее, что указанные подходы не имеют универсального характера и ориентированы на моделирование конкретных речных бассейнов или отдельных процессов, формирующих сток. Главным недостатком здесь нам представляется преобладание технологий калибровки, что принципиальным образом ограничивает возможности их априорного использования на слабо изученных бассейнах.

В общетеоретическом плане следует иметь в виду, что ориентация на разработку изолированных моделей, пригодных для описания формирования стока только в одном данном водосборе или даже в группе водосборов со сходными условиями, противоречит принципиальному положению, согласно которому физика процессов формирования стока едина для всей поверхности суши.

Таким образом, степень универсальности алгоритмов модели следует признать важнейшим критерием научной значимости методологии, в большой мере отражающим ее адекватность описываемым природным явлениям и предполагаемым применениям.

Целью диссертационной работы является развитие методов анализа, информационного обеспечения и моделирования процессов формирования стока в условиях слабой изученности речных бассейнов разных масштабов и сложной структуры рельефа и ландшафтов (на примере бассейна р. Лены).

В соответствии с целью работы в диссертации решены следующие **задачи**:

- Анализ методологических принципов, применяемых в задаче моделирования стока, в сравнении с альтернативными теоретическими положениями моделирующей системы «Гидрограф».
- Систематизация и оценка параметров математической модели процессов формирования стока.
- Разработка и реализация методики расчета скорости и времени добегания.
- Решение задачи пространственной интерполяции суточных сумм осадков в горных условиях.
- Апробация методики моделирования в бассейнах с искусственным регулированием на примере Вилуйского водохранилища.
- Моделирование стока для водосборов в пределах бассейна р. Лены.
- Оценка эффективности использования универсальной гидрологической моделирующей системы на основе анализа результатов моделирования.

Объектом исследования являются водосборы в пределах бассейна р. Лены, существенно отличающиеся своими размерами (площадь от 40 до более, чем $2 \cdot 10^6$ км²) и находящиеся в различных ландшафтных зонах.

Предмет исследования составляют закономерности процессов формирования стока в бассейне р. Лены, разнообразие условий которых

позволяют оценить универсальность предлагаемой модели формирования стока и сопутствующего программно-математического обеспечения.

Методологической основой диссертационной работы является универсальная детерминированная распределенная модель формирования стока «Гидрограф» (разработанная д.т.н., проф. Ю.Б. Виноградовым в Государственном Гидрологическом институте), которая описывает процессы формирования стока в бассейнах с различными физико-географическими характеристиками.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в том, что на основе разработанных принципов построения единого информационного, программно-алгоритмического и параметрического обеспечения впервые в практике гидрологических расчетов проведено моделирование процессов формирования стока с суточным расчетным интервалом для бассейнов существенно различных размеров.

В рамках решения частных задач впервые:

- обоснована методика априорной оценки значений параметров универсальной гидрологической модели применительно к условиям большого слабоизученного бассейна;
- обоснована методика интерполяции метеорологической составляющей входа модели применительно к условиям сложного горного рельефа;
- предложена методика расчета элементов водного баланса крупных водохранилищ и их участия в общем регулируемом стоке данной реки.

Практическая значимость диссертационного исследования обусловлена:

- разработанными принципами и фактическим построением единой информационной базы для реализации моделирующего алгоритма в задаче расчетов стока в малоизученных районах;
- разработанной методикой расчета стока и составляющих водного баланса в бассейнах с искусственным регулированием;
- подтвержденной эффективностью использования единого программно-алгоритмического комплекса распределенной гидрологической модели для расчетов величин стока в бассейнах, имеющих различный размер и физико-географические характеристики.

Полученные результаты могут быть использованы в разработке методов прогнозирования и расчетов характеристик стока для малоизученных бассейнов, в решении задач обеспечения безопасного функционирования гидротехнических сооружений, а также при исследовании влияния изменений климата и ландшафтов на гидрологический режим Восточной Сибири.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Принципы построения информационной базы и методов оценки и назначения параметров в концепции гидрологической модели «Гидрограф» применительно к малоизученным бассейнам.
- Методика определения скоростей добегания на основе интерполяции наблюдаемых данных.
- Выявление закономерностей распределения годовых норм осадков в зависимости от рельефа для различных орографических районов. Создание методики пространственной интерполяции метеорологических величин в горных условиях (на примере бассейна р. Лены).
- Методика моделирования речных бассейнов с искусственным регулированием стока (на примере Вилюйского водохранилища).
- Результаты распределенного детерминированного моделирования процессов формирования стока для водосборов разного масштаба с суточным расчетным интервалом, основанные на использовании единого параметрического обеспечения модели, и их интерпретация в рамках дальнейшего развития и совершенствования методов расчетов стока применительно к малоизученным бассейнам.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов диссертации подтверждается удовлетворительной согласованностью результатов модельных расчетов с фактическими данными.

Апробация работы Основные положения и выводы диссертации докладывались автором на следующих конференциях: 6-й Всероссийский гидрологический съезд (Санкт-Петербург, 2004); международная конференция «Безопасность речных судоходных гидротехнических сооружений» (Санкт-Петербург, Университет Водных Коммуникаций, 2007); научная конференция «Водные ресурсы, экология и гидрологическая безопасность» (Москва, Институт водных проблем РАН, 2007); научная сессия кафедры гидрологии суши СПбГУ «Географические и экологические аспекты гидрологии» (Санкт-Петербург, Государственный Университет, 2008); конференция Росгидромета, посвященная 70-летию дрейфа СП-1 (Москва, Институт прикладной геофизики, 2008); международная конференция «Polar Research – Arctic and Antarctic Perspectives in the International Polar Year» (Санкт-Петербург, 2008); международный форум «Современные проблемы и будущее геокриологии» (Якутск, Институт мерзлотоведения СО РАН, 2008); международная конференция «Predictions for Hydrology, Ecology and Water Resources Management» (Прага, 2008); международная конференция «Hydrological Extremes in Small Basins» (Краков, 2008); международный симпозиум по арктическим исследованиям «Drastic Change Under the Global Warming» (Токио, 2008); международный симпозиум IAHS-PUB «Hydrological Modelling and

Integrated Water Resources Management in Ungauged Mountainous Watershed» (Ченду, 2008).

Основные положения диссертации изложены в тезисах и абстрактах 11 конференций, в том числе 5 зарубежных, а также в 2 статьях, опубликованных в рецензируемых изданиях списка ВАК.

Структура и объем диссертации Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, объемом 216 страниц, включая 18 рисунков, 13 таблиц, списка литературы из 106 наименований и 8 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована ее практическая значимость, описана структура исследования и приведено краткое содержание ее разделов.

Первая глава диссертационной работы посвящена изложению современного состояния вопроса распределенного детерминированного моделирования процессов формирования стока. Дан обзор отечественных работ в этой области Ю.Б. Виноградова, А.Н. Гельфана, Е.М. Гусева, В.Н. Демидова, Ю.М. Денисова, В.В. Коваленко, С.А. Кондратьева, В.И. Корня, Л.С. Кучмента, Ю.Г. Мотовилова и других исследователей.

Рассмотрены ставшие традиционными для современных моделей методы описания формирования поверхностного и подземного стока, его дорусловой и русловой трансформации. Кратко изложены концепции, положенные в основу модели «Гидрограф» для решения вышеуказанных задач гидрологического моделирования, их отличия от повсеместно принятых методов и преимущества использования при решении исследовательских и прикладных задач.

Мощности современных вычислительных средств позволяют осуществлять численную реализацию моделей, основанных на сеточных методах решения уравнений математической физики, поэтому ограниченность указанных подходов с современной точки зрения носит, прежде всего, концептуальный характер. Использование в моделях формирования стока формальных методов расчетов с хорошо разработанными схемами решений в концепции уравнения Навье-Стокса подменяет и искажает сущность природных процессов формирования стока.

Распределенная детерминированная гидрологическая модель процессов формирования стока «Гидрограф» разработана д.т.н. проф. Ю.Б. Виноградовым в Государственном Гидрологическом институте.

Модель описывает всю совокупность процессов, формирующих наземный гидрологический цикл: выпадение осадков и их перехват растительным покровом; формирование и разрушение снежного покрова; испарение; поверхностное задержание стока и инфильтрация; динамика тепла и влаги в

почве; подземное питание; образование поверхностного, почвенного и подземного стока; русловая трансформация и формирование стока в замыкающем створе.

При этом в рамках модели остаются актуальными задачи ее информационного обеспечения, прежде всего в условиях малоизученных бассейнов, а также задачи программной реализации.

Принцип универсальности является основополагающим при построении и оценке модели «Гидрограф». Под ним подразумевается возможность в рамках единой системы и унифицированного информационного подхода моделировать процессы формирования стока в самых различных типах бассейнов вне зависимости от их размера, типа подстилающей поверхности и климатических условий. В диссертации в целях верификации модели на соответствие данному принципу проведено моделирование разнородных гидрологических объектов и подтверждена приемлемая точность и практическая значимость результатов.

В табл. 1 представлена сводная характеристика особенностей модели «Гидрограф» по сравнению с «физико-математическими» моделями стока.

Таблица 1. Сравнение общепринятых подходов и модели «Гидрограф»

	Стандартные	Модель «Гидрограф»
Схематизация бассейна	Набор конечных элементов	Гексагональная сетка репрезентативных точек
Динамика влаги в ненасыщенной зоне	Уравнение влагопроводности	Воднобалансовое соотношение
Динамика тепла в почве	Уравнения в частных производных	Обыкновенные дифференциальные уравнения
Склоновая и русловая трансформация стока	Уравнения Сен-Венана и кинематической волны	Концепция стоковых элементов
Подземный сток	Уравнение Буссинеска	
Назначение параметров	Калибровка	Априори
Проблема масштаба	Да	Нет
Универсальность	Нет	Да

Вторая глава посвящена развитию подходов к информационному обеспечению процедуры моделирования стока в условиях значительной неопределенности входной и параметрической информации.

Дано описание выбранных в качестве объектов моделирования водосборов в бассейне р. Лены размером от 40 до более, чем $2 \cdot 10^6$ км² (рис. 1). Критерием для выбора совокупности бассейнов в качестве объектов моделирования является их «каскадность», означающая, что определенные для малых водосборов параметры модели могут быть последовательно использованы для более крупных бассейнов.

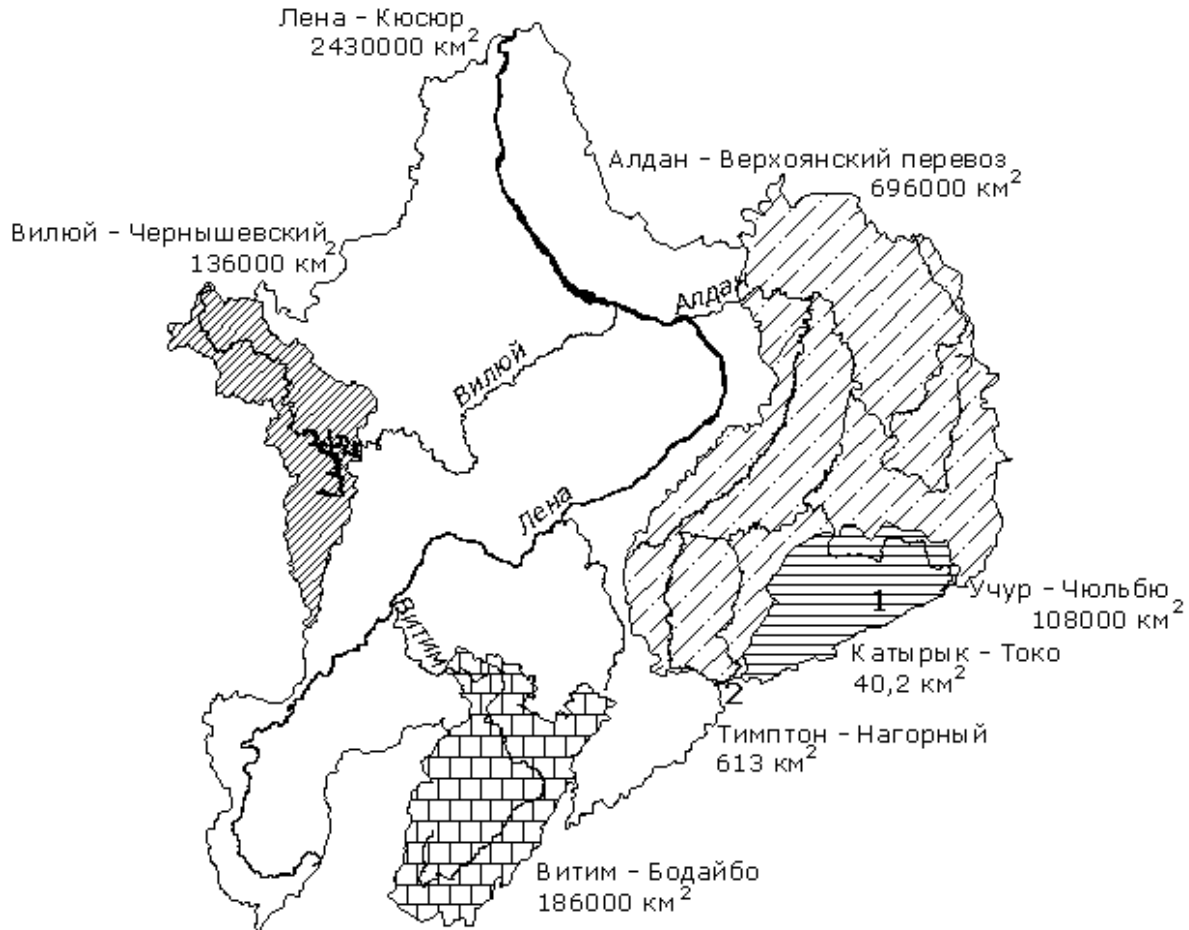


Рисунок 1. Схема объектов моделирования

Схематизация бассейна и выделение стокоформирующих комплексов

Следуя подходу Ю.Б. Виноградова, постулирующего тот факт, что «некоторая упорядоченная система точек, расположенных в пределах водораздельного контура бассейна, объективно способна представлять этот бассейн», произведена пространственно-вычислительная схематизация водосборов. В модели «Гидрограф» речной бассейн представляется набором регулярных репрезентативных точек (РТ), расположенных в пределах водораздельного контура и упорядоченных в виде гексагональной сетки. Каждой РТ приписывается тяготеющая к ней площадь, в пределах которой характеристики, отражающие свойства рельефа, принимаются неизменными.

Для расчетных бассейнов определены следующие характеристики склонов: ориентация, высота, угол наклона, орографическая затененность. Так, в бассейне р. Лены с замыкающим створом Кюсюр (площадь 2400000 км²) было назначено 128 РТ и использованы данные суточного разрешения более чем двухсот метеостанций.

Для исследуемых бассейнов р. Лены составлены карты стокоформирующих комплексов (СФК) – областей, однородных по типу

формирования стока, почвенных, растительных и ландшафтных характеристик (рис. 2).

В качестве отдельных СФК выделены все типы подстилающей поверхности, общая площадь которых, во-первых, соизмерима с площадью, подкомандных РТ, а во-вторых, обеспеченных информацией о гидрологически значимых свойствах ландшафтов.

Для СФК-районирования использованы литературные источники, справочные и кадастровые материалы, топографические карты, карты почвенно-растительного покрова, ландшафтные карты.

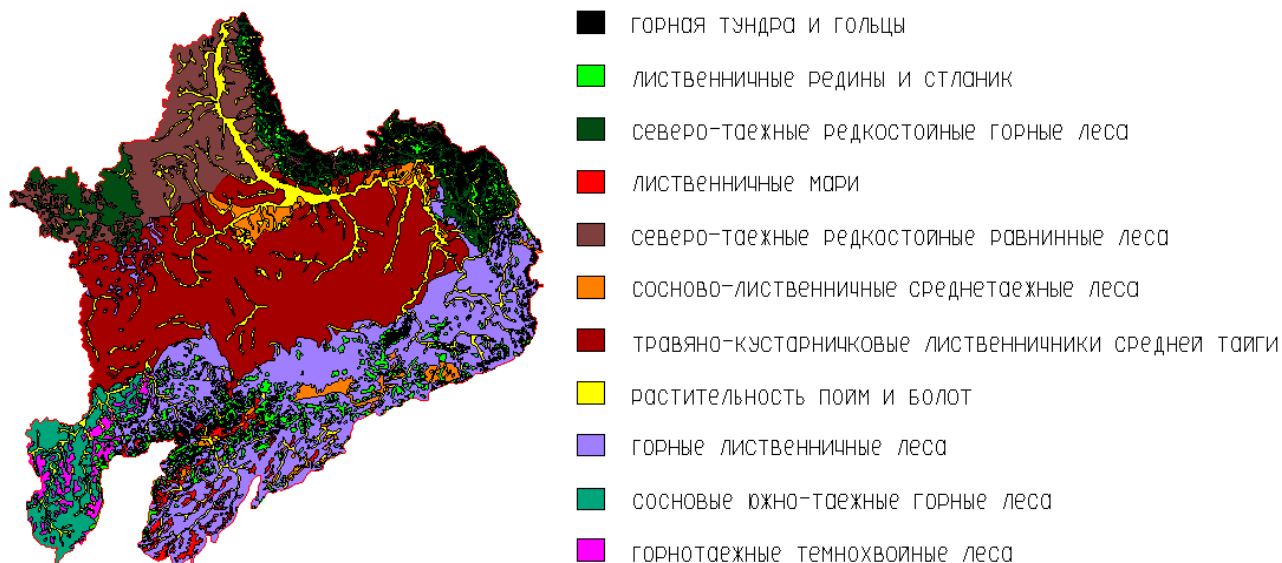


Рисунок 2. Схема стокоформирующих комплексов в бассейне р. Лены

Система параметров модели формирования стока «Гидрограф»

Алгоритм модели «Гидрограф» оперирует следующими величинами: физические и условные константы; определяемые по картографическим материалам характеристики бассейна; параметры и переменные состояния. Значения параметров принимаются постоянными для каждого объекта, но изменяются от бассейна к бассейну в зависимости от их физико-географических особенностей.

В ходе работы описаны, систематизированы по выделенным СФК и назначены параметры модели «Гидрограф». Среди них параметры:

- почвенной колонки (плотность почвенного вещества и горной породы, пористость, максимальная водоудерживающая способность, коэффициент фильтрации, удельная массовая теплоемкость, удельная массовая теплопроводность, показатель влияния льдистости на фильтрацию, доля вклада расчетного слоя почвы в общее испарение);
- растительного покрова (максимальная и минимальная ёмкость перехвата осадков элементами растительного покрова, максимальная и минимальная затененность кронами, параметр подвода тепловой энергии, альbedo почвы и

ёмкости перехвата, параметр максимальной испаряемости, параметр испаряемости из ёмкости перехвата, фенологические даты);

– поверхности склонов (максимальный и минимальный коэффициент снегонакопления в оврагах, коэффициент вариации толщины снежного покрова, максимальная лужистость, коэффициент кольматации, максимальный слой поверхностного задержания, гидравлический параметр поверхностного и почвенного притока);

– подземных вод (гидравлические параметры подземного притока для ярусов подземных вод; доля ярусов подземных вод в питании реки – принимается на основании результатов расчетов согласно концепции о стоковых элементах);

– климата (параметры двухгармоничной синусоиды [среднее, две амплитуды и две фазы], описывающей годовой ход температуры воздуха, облачности, вероятности появления дня с осадками, количества осадков, дефицита влажности воздуха или относительной влажности воздуха, температуры почвы на глубине 1,6 м; коэффициент продолжительности жидких осадков в зависимости от их слоя; интерполяционные коэффициенты отдельно для осадков и температуры и дефицита влажности воздуха).

Далее в диссертации разработана **методика определения скорости и времени добегаания**.

Структура детерминированной гидрологической модели, а также способ схематизации бассейна определяется подходом, принятым для описания склоновой и русловой трансформации стока из места его формирования в замыкающий створ.

Представляется, что существующее информационное гидрометеорологическое обеспечение недостаточно для адекватного применения уравнений математической физики, требующих задания полей шероховатости, микро- и мезорельефа, данных о морфометрии русел и других величин. Параметры таких моделей, откалиброванные по фактическим гидрографам в замыкающем створе и аккумулирующие значительную часть неопределенности граничных условий, не могут быть систематизированы и перенесены на другие объекты.

В качестве альтернативы в диссертации для преобразования притока к русловой сети в гидрограф в замыкающем створе предложено использовать постоянные величины скорости и времени добегаания, назначенные для каждой РТ. Такой подход основан на следующих допущениях:

1. Большую часть расстояния добегаания от РТ до замыкающего створа вода проделывает по русловой сети, поэтому скорость добегаания принята равной скорости течения в речной сети.

2. Скорость и время добегаания принимаются постоянными и независимыми от объема стока.

Для определения скоростей течения использованы опубликованные в Гидрологических ежегодниках (до 1974 года) данные об измеренных расходах воды и соответствующих им наблюдаемых средних скоростях течения в поперечном сечении потока по 228 гидрометрическим створам бассейна р. Лены. Для каждого гидрологического поста ранжирован ряд значений измеренных средних скоростей, а затем выбраны и осреднены верхние 10 % диапазона их изменения, соответствующие максимальным величинам.

Статистический анализ данных о скоростях добегания подтвердил их высокую устойчивость, достаточную для обоснованной оценки времени добегания от расчетных точек до замыкающего створа (табл. 2).

Таблица 2. Характеристики максимальных скоростей течения, измеренных на гидрометрических постах в бассейне р. Лены

Объект		Среднее значение (из 10 % максимальных)[м ³ /с]	Среднее абсолютное отклонение [м ³ /с]	Коэффициент вариации [б/р]
Бассейн р. Лены		1.40	0.42	0.30
Площадь бассейна, км ²	< 1000	1.21	0.47	0.39
	1000 – 10000	1.10	0.46	0.44
	10000 – 100000	1.55	0.32	0.20
	> 100000	1.72	0.33	0.19
Крупные притоки р. Лены	верхняя Лена	1.42	0.31	0.21
	р. Алдан	1.51	0.53	0.35
	р. Витим	1.50	0.50	0.34
	р. Вилюй	1.12	0.28	0.25
	р. Олекма	1.42	0.31	0.22

Для оценки времени добегания от РТ до замыкающего створа предложено использовать определенные для гидрологических постов средние максимальные скорости течения. С учетом рельефа для каждой РТ определен набор характерных отрезков руслового пути добегания. Скорости добегания оцениваются на основе интерполяции данных по фактически измеренным скоростям (на гидрологических постах или их аналогах, через который проходит путь добегания).

Индивидуальное время добегания τ для отдельной РТ предлагается рассчитывать по формуле $\tau = \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{(v_i + v_{i+1})/2}$, где S_i – расстояние между постами, v_i – определенная максимальная скорость на посту.

Предложенная методика оценки времени добегания обеспечивает его соответствие средней максимальной скорости течения или максимальным

расходам воды. Это позволяет обоснованно рассчитывать сроки подъема и спада максимальных значений рассчитываемых гидрографов, а некоторое занижение реального времени добега минимальных расходов, обусловленное ориентацией на максимальные скорости, оказывает незначительное влияние на окончательную форму расчетного гидрографа.

Далее в диссертации предложена **методика интерполяции осадков в бассейнах со сложным рельефом**.

В условиях равнинного рельефа и наличия достаточного количества метеорологических станций интерполяция суточных величин метеорологической информации из метеостанций в РТ выполняется на основе триангуляции.

В горных районах со значительной неопределенностью в оценках климатических норм метеорологических элементов, основанных на данных сетевых наблюдений, приходится рассматривать не только интерполяцию, но в большей степени экстраполяцию метеорологических элементов. Это связано с редким и неравномерным распределением станций и постов наблюдательной сети. В среднем на территории бассейна р. Лены одна метеорологическая станция приходится на 11–13 тысяч км², при том что более 50 % территории водосбора занимают горные массивы.

По данным различных источников, увеличение количества осадков на горных хребтах в бассейне р. Лены может достигать 30–40 % по сравнению с наблюдаемыми значениями в межгорных понижениях.

Для решения проблемы интерполяции осадков в горных условиях предлагается использовать нормирование суточных сумм осадков по их годовой среднемноголетней величине. Связанная с этим задача домодельного назначения годовых норм осадков по всем РТ решается на основе выявленных локальных зависимостей осадков от высоты места.

Для анализа распределения среднего годового количества осадков в бассейне р. Лены использованы суточные данные за период 1966-1984 гг. по 210 метеорологическим станциям Якутии, Забайкалья, Иркутской области и Красноярского края.

Проведено орографическое районирование бассейна р. Лены с учетом местных особенностей рельефа и климатической циркуляции. В бассейне выделены шесть горных районов: западный склон Верхоянского хребта; хребты Сетте-Дабан, Сунтар-Хаята и Улахан-Бом; Алданское нагорье; Забайкальская горная система; бассейн верхней Лены; восточная окраина Среднесибирского плато.

Для этих районов и отдельных моделируемых бассейнов построены соответствующие кривые зависимостей в координатах *высота местности – норма осадков*. При построении таких зависимостей использовалось подтвержденное эмпирически предположение о том, что в верхней зоне

хребтов, годовые суммы осадков имеют тенденцию выходить приблизительно на один и тот же уровень. Экстраполяция кривых на высотах более 1500 м выполнена на основании данных наблюдений метеорологической станции Сунтар-Хаята (2067 м), действующей в период 1957–1964 гг. В качестве примера на рис. 3 представлено интерполяционное поле для назначения норм осадков в РТ бассейна р. Учур.

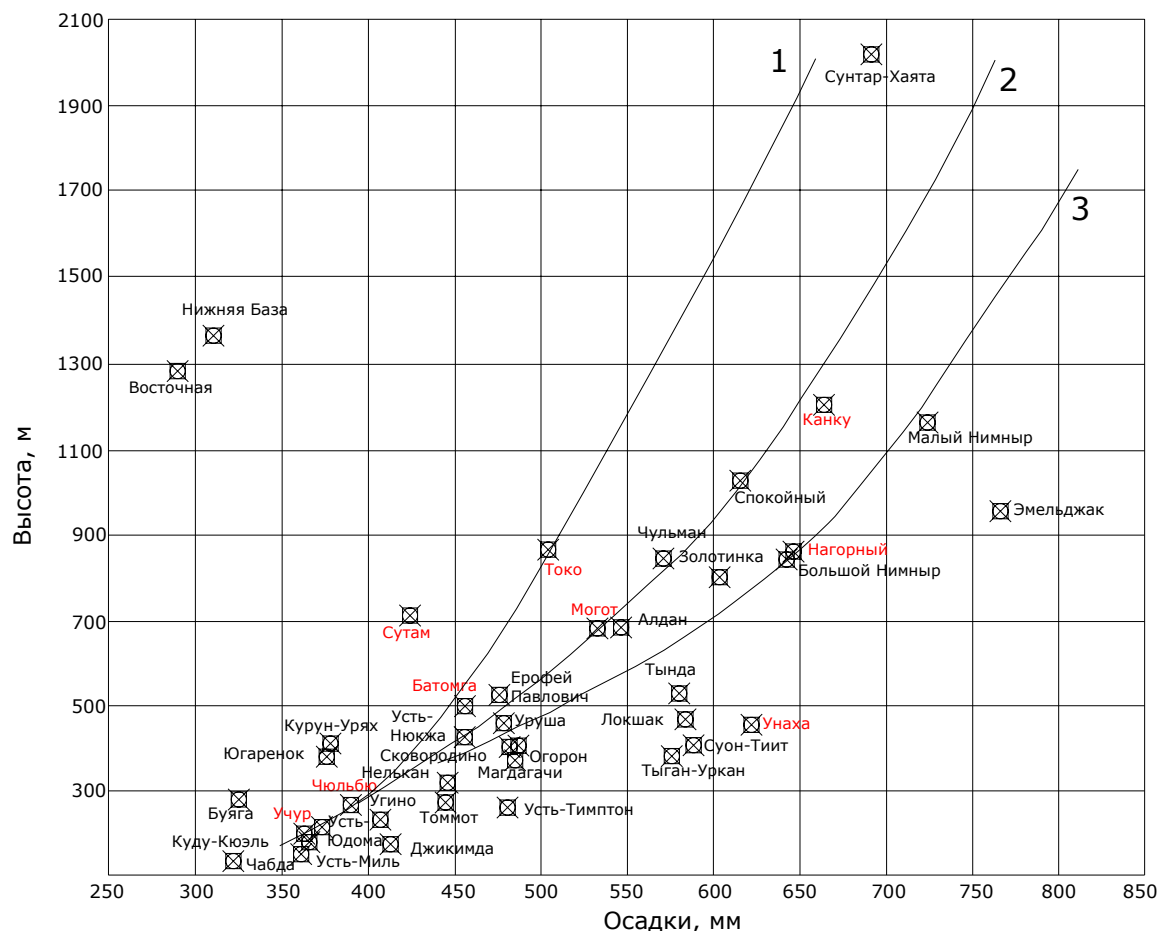


Рисунок 3. Кривые распределения годовых норм осадков по высоте для бассейна р. Учур: 1. Главная долина р. Учур (Чагда – Чюльбю – Токо) и восточная часть его бассейна; 2. Долина Гыныма, южный склон восточной части Алдано-Учурского хребта, бассейн р. Алгама; 3. Долина Гонама.

Далее производилась следующая процедура:

1. По абсолютной высоте РТ с соответствующей кривой снимается норма осадков $\bar{H}_{РТ}$.

2. Отношение этой суммы к осадкам станции $\bar{H}_{СТ}$, используемой при интерполяции для данной РТ, дает коэффициент $K_{РТ} = \bar{H}_{РТ} / \bar{H}_{СТ}$ для интерполяции и экстраполяции измеренных осадков.

3. Суточная сумма осадков в РТ вычисляется умножением коэффициента $K_{РТ}$ на суточное значение осадков соответствующей станции $H_{РТ} = K_{РТ} \times H_{СТ}$.

Предложенные схемы интерполяции осадков в различных горных районах бассейна р. Лены проверены при моделировании гидрографов стока на разных водосборах и показали удовлетворительные результаты.

Третья глава посвящена решению задачи учета влияния крупного водохранилища на процессы формирования стока. На примере Вилюйского водохранилища разработана методика моделирования речных бассейнов с искусственным регулированием стока.

Основной особенностью территории бассейна р. Вилюй в плане гидрологических прогнозов и расчетов является исключительно недостаточное информационное обеспечение. Условия решения задачи расчетов стока в бассейне Вилюйской ГЭС можно отнести к категории, принятой в СНиП 2.01.14-83 и современном СП 33-101-2003 как «отсутствие данных наблюдений». В этих условиях применение стандартных методов расчета стока, таких как методы водного баланса, регрессионных моделей, аналогии оказывается неприемлемым.

Речной бассейн с крупными водохранилищами является комплексной системой. Составляющие его отдельные элементы в свою очередь могут и должны рассматриваться как самостоятельные объекты моделирования.

Предложено решать задачу моделирования стока для составного бассейна в виде следующих этапов:

1. Моделирование процессов формирования стока в отдельных водосборах, рассматриваемых как подсистемы большого бассейна. При расчете гидрографов притока в водохранилище замыкающим створом принимается вся береговая линия водохранилища.

2. Учет вклада крупных водных объектов (озера, водохранилища) в трансформацию и перераспределение стока внутри бассейна, в частности моделирование динамики уровня водохранилища и истечения из него.

В соответствии с перечисленными задачами в рамках диссертационной работы разработано программно-алгоритмическое обеспечение, структурированное в два блока: 1) детерминированная модель формирования стока «Гидрограф», 2) модуль «Водохранилище», предназначенный для моделирования аккумуляции стока, поступающего в водохранилище, а также для учета потерь воды на испарение.

Алгоритмическая структура моделирующего блока «Водохранилище» опирается на уравнение водного баланса для искомого динамически меняющегося объема воды в водохранилище W [м³]:

$$\frac{dW}{dt} = Q^+ - Q^-(W) - Q_E(W) + Q_H(W).$$

Здесь Q^+ – приток в водохранилище [$\text{м}^3/\text{с}$]; Q^- – сброс воды из водохранилища [$\text{м}^3/\text{с}$]; Q_E – испарение с водной поверхности озера [$\text{м}^3/\text{с}$]; Q_H – осадки над поверхностью водохранилища [$\text{м}^3/\text{с}$] за промежуток времени Δt .

Испарение из озера рассчитывается по формуле $Q_E(W) = eS(W)$, где $S(W)$ – площадь водного зеркала водохранилища (зависит от объема – уровня воды в водохранилище) [м^2]; e – интенсивность испарения [$\text{м}/\text{с}$]. Допускается, что испарение зависит только от эффективного дефицита влажности воздуха D_i [мб] $e = K \times D_i$. Коэффициент испарения с поверхности водохранилища K , [$\text{м}/(\text{мб} \cdot \text{с})$] подбирается с учетом фактических величин испарения с водной поверхности в данной географической зоне (для бассейна р. Вилюй он принят равным $3,1 \cdot 10^{-9}$).

Выпавшие на зеркало водохранилища осадки вычисляются по формуле $Q_H = HS(W)$, где H – слой осадков [м].

Для описания зависимостей объема воды и площади зеркала водохранилища методом последовательного приближения Ньютона-Рафсона рассчитаны следующие аппроксимации:

$$W = 0.01193 \exp([0.65027(H - 175)]^{0.546}),$$

$$S = 5.829 \exp([0.2325(H - 175)]^{0.640}).$$

Здесь W – объем [км^3], S – площадь зеркала [км^2], H – уровень [м]. Отметка 175 м БС является уровнем нуля графика при публикации ежедневных измеренных уровней воды на постах Вилюйского водохранилища.

Для расчета суточных объемов сброса воды из водохранилища $Q^- = 86400q$ использовались опубликованные в Гидрологических ежегодниках ежедневные расходы воды q в створе плотины Вилюйской ГЭС – в пункте Чернышевский.

Моделирование притока воды в Вилюйское водохранилище выполнено для бассейна Вилюйской ГЭС (площадь бассейна 136000 км^2) с суточным расчетным интервалом для периода 1979–1984 гг. В целях дискретной схематизации на площадь бассейна наложена гексагональная сетка из 29 репрезентативных точек. При моделировании гидрографов притока использована метеорологическая информация 18 метеорологических станций Якутии, Красноярского края и Иркутской области. В результате расчетов получены гидрографы притока воды в водохранилище и уровня (рис. 4), а также значения элементов водного баланса в бассейне р. Вилюй.

В табл. 3 представлены статистические характеристики сопоставления рассчитанных и измеренных суточных значений уровня Вилюйского водохранилища.

Анализ результатов свидетельствует об эффективности предлагаемого метода расчетов в бассейнах с крупными водохранилищами.

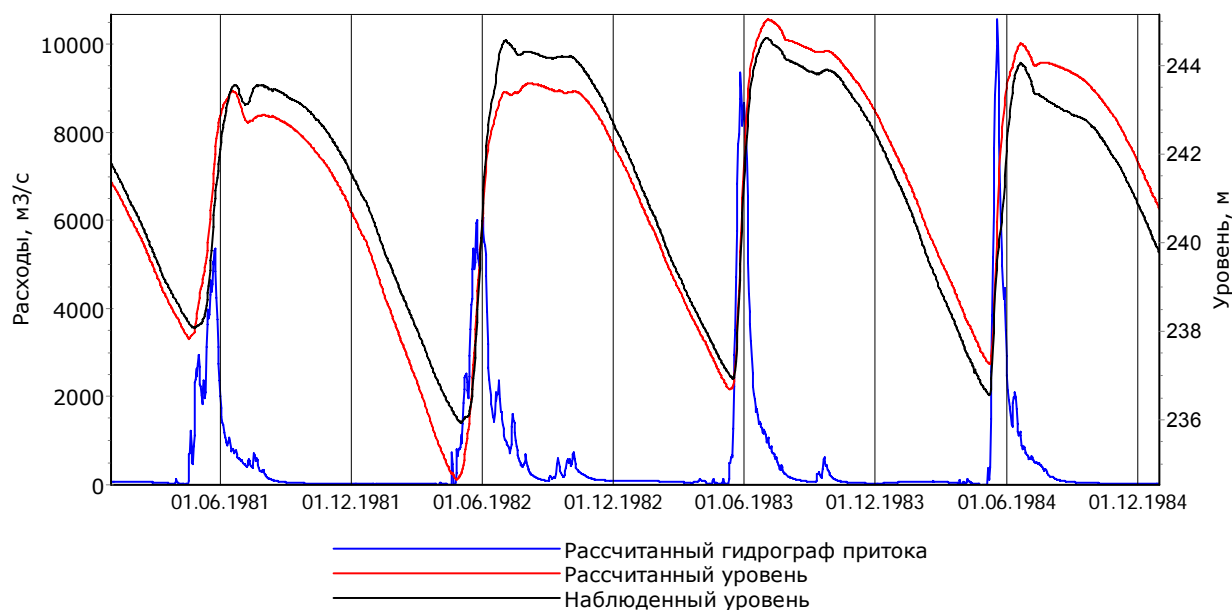


Рисунок 4. Ход уровня и рассчитанные гидрографы притока воды в Вилюйском водохранилище, 1981–1984 гг.

Таблица 3. Статистические характеристики сопоставления рассчитанных и измеренных суточных значений уровня Вилюйского водохранилища.

Год	Средний измеренный уровень [м]	Средний рассчитанный уровень [м]	Абсолютное отклонение [м]	Эффективность моделирования (Nash & Sutcliffe, 1970)	Коэффициент корреляции [б/р]
1979	242.06	241.68	0.38	0.96	0.99
1980	241.70	241.41	0.29	0.97	0.99
1981	241.46	241.08	0.38	0.88	0.96
1982	241.23	240.41	0.81	0.91	0.99
1983	241.64	241.79	-0.15	0.97	0.99
1984	240.94	241.74	-0.80	0.85	0.99
Весь период	241.50	241.35	0.15	0.93	0.98

Четвертая глава посвящена анализу результатов расчетов стока в бассейне р. Лены и его частных водосборов и оценке предложенной в диссертации информационной базы моделирующего алгоритма.

С этой целью моделирование процессов формирования стока было проведено с суточным интервалом как для бассейна р. Лены в целом, так и для ряда объектов внутри него. Результатами расчетов стали суточные гидрографы стока в створах: р. Лена – створ Кюсюр ($F = 2430000 \text{ км}^2$), р. Алдан – створ Верхоянский Перевоз ($F = 696000 \text{ км}^2$), р. Витим – створ Бодайбо ($F = 186000 \text{ км}^2$), р. Учур – створ Чюльбю ($F = 108000 \text{ км}^2$), р. Тимптон – створ Нагорный ($F = 613 \text{ км}^2$), р. Катырык – створ Токо ($F = 40.2 \text{ км}^2$), характеристики стока и водного баланса по бассейнам, а также статистические оценки эффективности

расчетов. Период расчета составил для разных объектов от 7 до 19 лет (1966–1984 гг.) в зависимости от наличия метеорологической информации.

Критерии оценки результатов моделирования стока

Для гидрологической науки весьма актуальна задача оценки степени адекватности гидрологических моделей природным процессам, в том числе точности значений оцененных параметров и достоверности полученных результатов моделирования. С ней связана проблема «эквивифинальности» (*equifinality*), то есть «неединственности», сформулированная К. Вевер (2001), когда некое множество моделей дает приблизительно одинаковые результаты для одного и того же объекта, и оценка их правдоподобности становится затруднительной. Это происходит, когда параметры моделей калибруются на основе данных наблюдений. Возможным решением данной проблемы, реализованным в диссертационной работе, может стать многократное применение одной и той же модели для различных по своим ландшафтным и климатическим характеристикам бассейнов с последующей оценкой результатов.

Для оценки результатов моделирования (кроме визуального сравнения рассчитанных и наблюдаемых гидрографов – рис. 5–7) использована следующая совокупность критериев:

1. $\overline{H_{набл}}$ – среднее за период расчета значение наблюдаемого слоя стока;

2. $\overline{H_{рассч}}$ – среднее значение рассчитанного слоя стока;

3. Δ – среднее систематическое отклонение рассчитанных величин от измеренных, рассчитываемое по формуле $\Delta = \overline{H_{рассч}} - \overline{H_{набл}}$.

4. $\Delta_{абс}$ – среднее абсолютное систематическое отклонение рассчитанных

величин от измеренных, рассчитанное по формуле $\Delta_{абс} = \frac{\sum_{i=1}^n |H_{рассч}^i - H_{набл}^i|}{n}$, где

$H_{рассч}^i$ и $H_{набл}^i$ – рассчитанные и наблюдаемые суточные (или годовые) значения слоев стока, n – количество дней в году (или количество лет).

5. $RMSE$ – среднеквадратичное отклонение, оценивалось по формуле

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_{рассч}^i - H_{набл}^i)^2}{n}}.$$

6. Ef – критерий эффективности Нэша-Сатклиффа, определяемый как

$$Ef = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (H_{рассч}^i - H_{набл}^i)^2}{\sum_{i=1}^n (H_{набл}^i - \overline{H_{набл}})^2} \quad (\text{Nash \& Sutcliffe, 1970}).$$

7. r – коэффициент парной корреляции наблюдаемых и рассчитанных значений.

8. *КК* – относительный критерий качества для каждого календарного года

рассчитывается по формуле
$$КК(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|H_{расч}^i - H_{набл}^i|}{H_{набл}^i}}{n} * 100.$$
 В табл. 4

представлены: среднее за все годы (*Mean*), минимальное (*Min*) и максимальное (*Max*) значение *КК*.

Анализ результатов моделирования стока

Условия формирования стока исследуемых объектов различаются в зависимости от их физико-географического положения и природных условий внутри бассейна, но существуют и общие сходства. Все объекты можно считать горными водосборами, они расположены в зоне континентального климата и повсеместного распространения многолетней мерзлоты.

Осадки за расчетный период составили 465 мм для всего бассейна р. Лены, 538 мм – р. Алдан, 550 мм – р. Витим, 600 мм – р. Учур, 700 мм – р. Тимптон и 675 мм – для р. Катырык с учетом введенных корректирующих коэффициентов к твердым и жидким осадкам. Испарение с поверхности бассейна колеблется в пределах 150–180 мм в северной части бассейна, превышая значение 250 мм в юго-восточных горных районах, что составляет 30-50 % от количества выпадающих осадков.

Бассейн р. Лены – самый крупный по площади объект моделирования. Водный режим р. Лены относя к восточно-сибирскому типу с ярко выраженным периодом весеннего половодья, характеризующимся максимальным объемом стока, дождевыми паводками в летне-осенний период и исключительно низким стоком в зимний период (рис. 5, А).

Эффективность расчета по критерию Нэша-Сатклиффа составляет 0.84 для суточных и 0.96 для годовых величин за весь расчетный период. При этом относительный критерий качества для суточных значений в среднем составляет 34 % с амплитудой 23 – 48 %, для годовых величин – 7 % с амплитудой 6 – 8 %.

Результаты расчетов демонстрируют устойчиво высокую точность моделирования годовой динамики стока; именно, при Δ_{abc} , равной 15 мм, *RMSE* составляет всего 20 мм. По нашему мнению, наиболее высокая точность модельных расчетов именно для бассейна р. Лены связано с существенно большими его размерами по сравнению с другими водосборами, так что имеет место взаимная компенсация влияний статистических выбросов различных факторов.

Рассчитанные и наблюдаемые гидрографы имеют как фазовые несовпадения, так и некоторое несоответствие по объему стока. Расхождения в величине годового слоя стока достигают 2–20 мм (что составляет 1–4 % от годовой суммы осадков), и, как видно из табл. 4, на протяжении всего

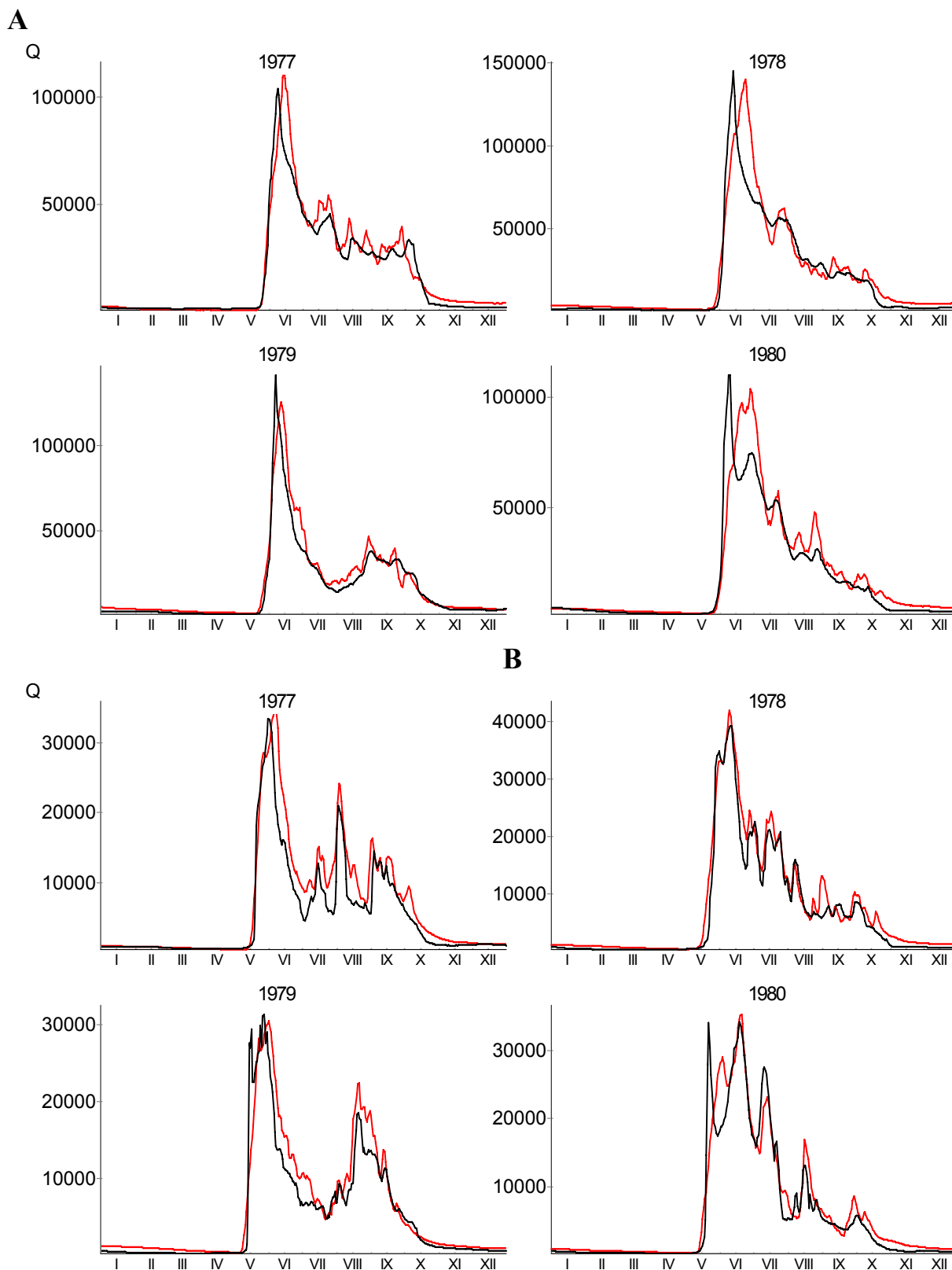


Рисунок 5. Рассчитанные — и наблюдаемые гидрографы стока Q [m^3/c], 1977–1980 гг.
A – р. Лена, Кюсюр (2430000 км^2),
B – р. Алдан, Верхоянский перевоз (696000 км^2).

расчетного периода, за исключением 1977 г., наблюдается завышение стока, хотя и незначительное.

Наибольшие ошибки расчета связаны для бассейна р. Лены с периодом половодья, которое практически полностью формируется за счет процессов снеготаяния. Рассчитанные гидрографы имеют более «размазанную» форму пиков по сравнению с наблюдаемыми, и хотя во все расчетные годы начало подъема кривой половодья опережает наблюдаемые периоды, их максимальные значения сдвинуты на более поздний срок по сравнению с измеренными.

Аналогичное качественное расхождение рассчитанных и наблюдаемых гидрографов стока в период половодья характерно и для бассейна р. Алдан.

Таким образом, представляется обоснованным вывод о существовании для крупных бассейнов пока не идентифицированного и неучтенного моделью стока фактора, который влияет на формирование формы гидрографа в период половодья и не сказывается в летне-осенний период.

Дальнейшее исследование этого вопроса, выходящее за рамки диссертации, должно опираться, по нашему мнению, на последовательное моделирование отдельных частей бассейна, особенно равнинных (река Вилюй на западе). Пошаговое увеличение площади анализируемых водосборов позволит проследить трансформацию гидрографа половодья по мере впадения новых притоков и оценить их вклад в его формирование.

На остальных бассейнах с меньшими размерами в период половодья расхождения наблюдаются не в форме и сроках подъема и спада ветвей половодья, а в максимальных значениях пиков. Основной причиной этих несоответствий является недостаточное обеспечение горных бассейнов гидрометеорологическими данными.

Бассейн *р. Алдан*, второй по площади после р. Лены, также относится к восточно-сибирскому типу рек. Результаты моделирования по данному объекту, как на основе визуального сравнения (рис. 5, В), так и по статистическим оценкам оказались точнее, чем по бассейну р. Лены. Так, относительный критерий качества для суточных значений в среднем составил 26 %, для годовых – 7 %. Эффективность расчета для суточных значений составляет 0.91, для годовых – 0.94, что является максимальным значением из всех исследуемых объектов. Годовой сток в среднем занижен на 4 мм, а в абсолютных значениях – на 12 мм.

На точности расчетов для р. Алдан положительно отразилось последовательное уточнение параметров и моделирование стока на малых и средних водосборах, расположенных в бассейне – рр. Катырык, Тимптон и Учур.

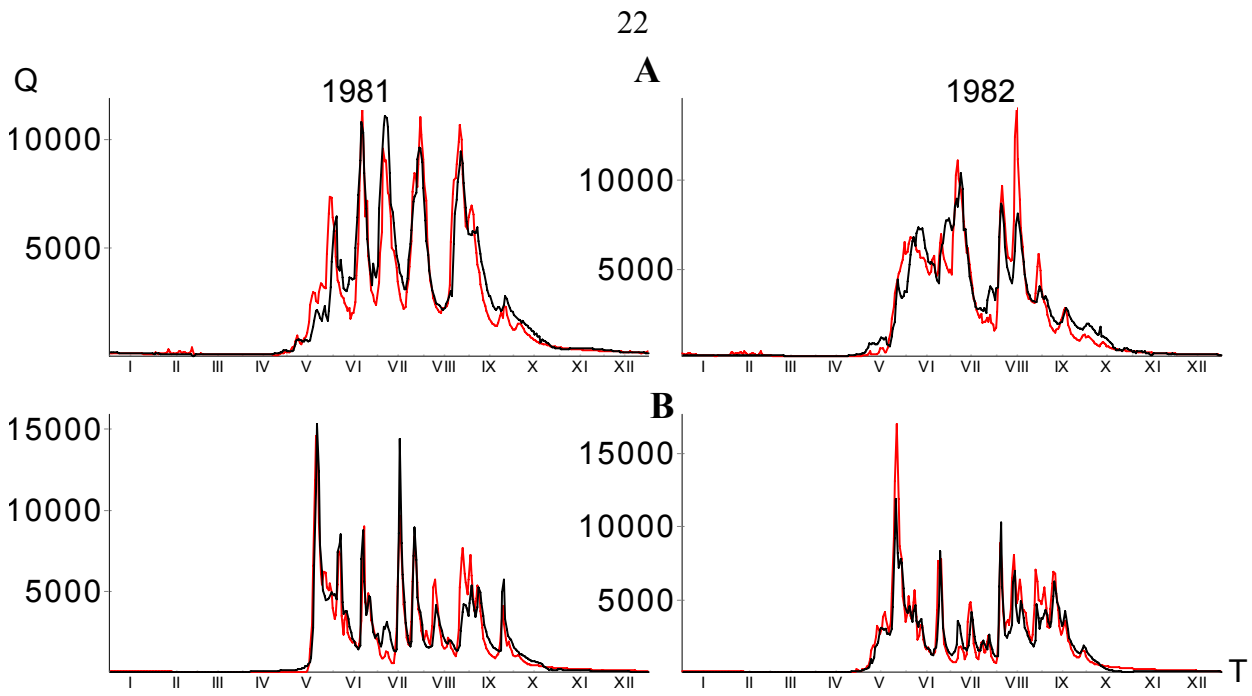


Рисунок 6. Рассчитанные — и наблюдаемые — гидрографы стока Q [$\text{м}^3/\text{с}$], 1981–1982 гг.
А – р. Витим, Бодайбо (186000 км^2),
В – р. Учур, Чюльбю (108000 км^2).

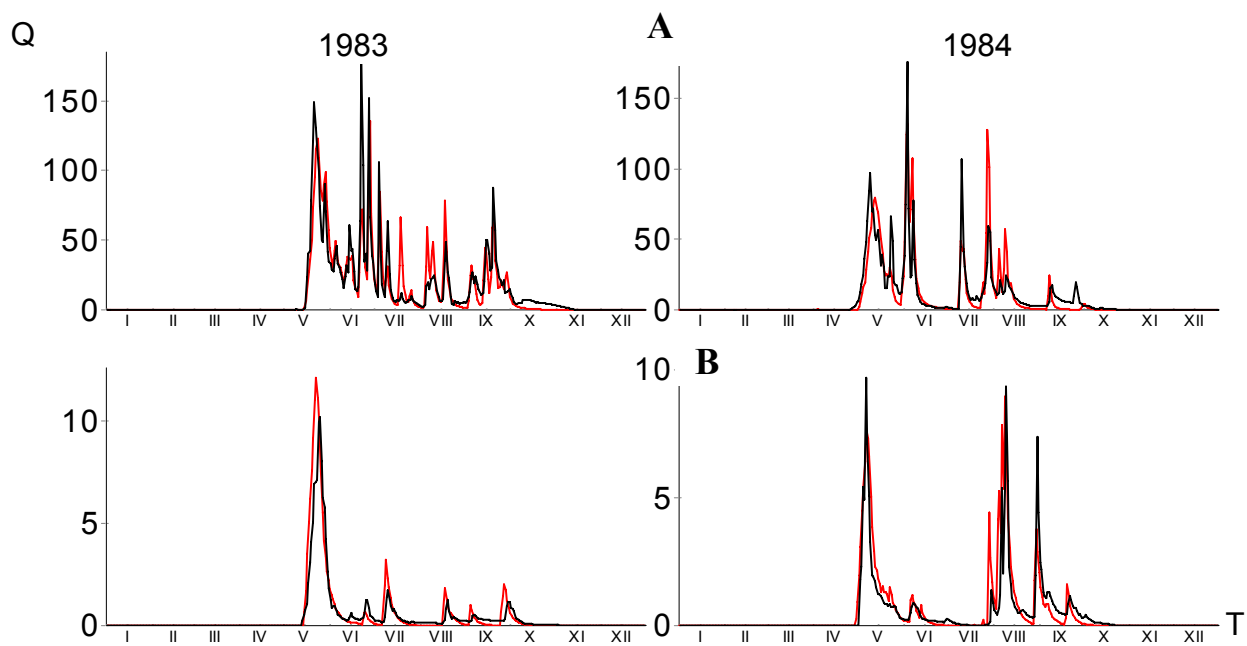


Рисунок 7. Рассчитанные — и наблюдаемые — гидрографы стока Q [$\text{м}^3/\text{с}$], 1983–1984 гг.
А – р. Тимптон, Нагорный (613 км^2),
В – р. Катырык, Токо (40.2 км^2).

Горы занимают почти всю территорию бассейна *р. Витим*, а его средняя высота составляет 1150 м, а максимальные высоты достигают почти 3000 м (Кодарский хребет). Гидрологический режим *р. Витим* (а также *рр. Учур*, *Тимптон* и *Катырык*) относится к дальневосточному типу, для него характерны высокие гребенчатые паводки дождевого происхождения, которые сливаются с весенним половодьем, а зачастую и превышают его по максимальным значениям расходов. Летняя межень не выражена, а для зимнего периода характерен очень низкий сток.

Бассейн *р. Витим* был выбран в качестве контрольного объекта моделирования в связи с относительно высокой обеспеченностью метеорологическими станциями – всего использовались данные 43 станций, 28 из которых находятся в пределах территории водосбора. При этом большое число станций (по сравнению с другими бассейнами) находится на высотах 1000 и более метров, что позволило провести подробный анализ распределения количества осадков по высоте и назначить годовые нормы осадков для РТ в бассейне.

По данному объекту при моделировании процессов формирования стока получены весьма точные и устойчивые результаты (рис. 6, А). Так суточная эффективность расчета составила 0.84, годовая – 0.93; относительный критерий качества – 31 и 9 % соответственно. Не смотря на некоторые несовпадения фактических и рассчитанных гидрографов стока, среднее за моделируемый период расхождение в значениях наблюдаемого и рассчитанного слоев стока составило 2 мм, а в абсолютных отклонениях – 16 мм. Для годового моделирования стока характерны более высокое значение показателя *RMSE* (69 мм), чем для *рр. Лены* и *Алдана* (20 мм и 29 мм соответственно).

Анализ результатов показывает, что в основном расхождения приходится не на сроки достижения экстремальных значений стока (половодья и паводков), а на их абсолютные величины. Погрешность расчета, особенно при моделировании горных водосборов, связана, как нам представляется с недостатком сведений об изменениях количества осадков с высотой.

Р. Учур является правым притоком *р. Алдан*. Точность полученных для бассейна *р. Учур* результатов расчета стока достаточно высокая: *Ef* составляет 0.81 и 0.95 для суточных и годовых величин; относительный критерий качества для суточных значений достигает в среднем 36%, для годовых – 8%. Наибольшие расхождения наблюдаемого и рассчитанного стока относятся к периоду спада паводков (сентябрь – октябрь), а также несколько завышается сток в зимнюю межень. Абсолютная невязка расчетов за весь рассматриваемый период не превысила 30 мм слоя стока. Завышение расходов отмечается, в основном, для периода половодья (рис. 6, В), что связано с невозможностью полного учета распределения снежного покрова в горных условиях при существующей системе гидрометеорологических наблюдений.

Таблица 4. Статистические характеристики сопоставления рассчитанных и измеренных суточных (числитель) и годовых (знаменатель) значений слоев стока с различных водосборов бассейна р. Лены

Река – створ	Период расчета, гг.	$\overline{H}_{набл}$	$\overline{H}_{рссч}$	Δ	$\Delta_{абс}$	$RMSE$	Ef	r	$KK, \%$		
		1	2	3	4	5	6	7	<i>Mean</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
Лена – Кюсюр	1977 – 1984	0.67	0.71	0.04	0.16	0.32	0.84	0.94	34	23	48
		246	260	14	15	20	0.96	1.00	7	6	8
Алдан – Верхоянский перевоз	1970 – 1984	0.71	0.66	-0.05	0.26	0.33	0.90	0.95	26	16	43
		256	260	4	12	29	0.93	0.97	5	1	15
Витим – Бодайбо	1968 – 1984	0.77	0.77	0.00	0.20	0.35	0.84	0.93	31	23	41
		282	280	-2	16	69	1.00	0.98	9	6	15
Учур – Чюльбю	1977 – 1984	1.04	1.05	0.01	0.32	0.64	0.81	0.93	36	27	53
		379	381	2	30	49	0.95	0.98	8	2	14
Тимптон – Нагорный	1966 – 1984	1.38	1.42	0.04	0.74	1.76	0.66	0.85	49	31	80
		503	516	13	36	101	0.85	0.94	9	1	26
Катырык – гмст. Токо	1974 – 1984	1.15	1.05	-0.10	0.54	1.24	0.64	0.85	38	26	50
		422	388	-36	38	79	0.88	0.97	10	1	24

Бассейны рек *Тимптон* и *Катырык*, с площадью водосбора 613 км² и 40.2 км² соответственно полностью горные, а поскольку площади их водосборов сравнительно малы, то их гидрологические системы значимо реагируют на любые интенсивные осадки.

Результаты расчетов для столь малых водосборов оказались удовлетворительными, несмотря на то, что значение средней абсолютной невязки слоя стока для рр. Тимптон и Катырык (36 мм и 38 мм соответственно) существенно больше, чем для более крупных бассейнов. Для рассчитанных гидрографов стока характерно, в основном, расхождение в максимальных значениях стока в период паводков и половодья, а также на спаде кривых паводков (рис. 7).

Эффективность расчетов E_f для этих водосборов малой площади составила 0.66 и 0.64 для суточных и 0.85 и 0.88 для годовых значений. При этом средний суточный критерий качества KK вырос до 49 % и 38 %, при максимальных его значениях 80 % для р. Тимптон в 1981 г. и 50 % для р. Катырык в 1979 г. Максимальные значения KK наблюдаются во время спада паводковых пиков, которые имеют на наблюдаемых гидрографах очень крутую форму кривых и подъема и спада; в то же время для рассчитанных гидрографов характерно более плавное снижение стока. Это приводит к росту величин KK (до 200 %) при малых значениях расходов (менее 5–10 м³/с для р. Тимптон и менее 0.5 м³/с для р. Катырык).

Некоторое несовпадение рассчитанных данных с наблюдаемыми величинами отмечается в зимнюю межень. В реальных условиях сток рр. Тимптона и Катырык зимой прекращается, реки промерзают до дна. Однако сроки прекращения стока в зимний период на рассчитанных гидрографах запаздывают в среднем на месяц по сравнению с наблюдаемыми расходами. Это обусловлено, в первую очередь, не погрешностью метода расчета, а низкой точностью гидрометрических измерений в условиях почти полного промерзания русла.

Важным фактором, обуславливающим погрешность, следует признать недостаточно полную оценку доли участия подземных горизонтов в питании рек. Представляется правильной привязка большей части стока к верхним ярусам подземных вод, которые характеризуются более быстрой водоотдачей.

Малые бассейны требуют выделения и учета большего количества стокоформирующих комплексов и более высокой степени подробности при оценке параметров моделирующего алгоритма. Так, ландшафтные неоднородности, которые можно усреднять в более крупных бассейнах в связи с взаимной компенсацией большого количества разнонаправленных факторов, приобретают здесь решающую роль. В бассейнах рр. Тимптон и Катырык из-за их сложного рельефа и сравнительно небольшой площади на процесс

Таблица 5. Наблюденные и рассчитанные характеристики стока и водного баланса в бассейне р. Лены – Кюсюр, F = 2430000 км²

		1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	Среднее
Рассчитанный сток, мм		230	284	242	251	266	274	286	252	260
Наблюденный сток, мм		232	268	224	233	251	260	266	233	246
Осадки, мм		507	468	445	444	485	491	474	427	468
Общее испарение, мм		192	192	194	196	198	194	190	187	193
Невязка наблюдаемого и рассчитанного стока	мм	-2	16	18	17	16	14	20	18	15
	% от суммы осадков	1	3	4	4	3	3	4	4	13

Таблица 6. Наблюденные и рассчитанные характеристики стока и водного баланса в бассейне р. Катырык – Токо, F = 40.2 км²

		1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	Среднее
Рассчитанный сток, мм		433	411	386	585	546	304	406	503	334	337	399	422
Наблюденный сток, мм		403	376	389	525	439	318	410	448	309	304	346	388
Осадки, мм		637	720	702	833	726	578	617	733	681	533	669	675
Общее испарение, мм		262	287	250	253	247	268	242	253	250	249	267	257
Невязка наблюдаемого и рассчитанного стока	мм	30	35	-3	60	107	-15	-4	55	25	33	54	34
	% от суммы осадков	5	5	0	7	15	3	1	8	4	6	8	6

формирования стока существенно влияют экспозиция, высота и уклон склонов, а также соответствующее им распределение почвенно-растительного покрова.

Учет этих различий и их особенностей выходит за рамки настоящей работы и осложнен отсутствием как крупномасштабного картографического материала, так и подробной информации о свойствах почв и растительности. Вклад в решение этой проблемы должны внести современные геоинформационные системы.

В табл. 5–6 представлены рассчитанные и фактические характеристики стока и элементов водного баланса для самого большого (Лена – Кюсюр, 2.43 млн. км²) и самого маленького (Катырык – Токо, 40.2 км²) по площади бассейнов за весь расчетный период.

Сравнение результатов моделирования стока с фактически наблюдаемыми гидрографами и значениями элементов водного баланса показывает их приемлемую точность и возможность использования используемой методологии для прогнозных расчетов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В диссертационной работе на основе средств математического моделирования, предложенных методов анализа и экстраполяции данных экспериментальных и долгосрочных гидрометеорологических и специальных наблюдений, разработанного комплекса программного обеспечения алгоритмов гидрологической модели получены следующие научные результаты:

1. Проведено сравнение используемых методологических принципов моделирования стока с теоретическими основами и принципами построения моделирующей системы «Гидрограф». В связи с установленной возможностью априорного назначения параметров модели «Гидрограф» по предложенным методикам обоснован вывод о перспективности ее использования при решении задач моделирования и расчета процессов формирования стока в слабоизученных речных бассейнах.
2. Проведена систематизация и оценка параметров гидрологической модели по 11 выделенным стокоформирующим комплексам.
3. Предложена и подтверждена возможность использования методики расчета скоростей и времени добегания.
4. Решена задача пространственной интерполяции суточных сумм осадков в горных условиях.
5. Разработана методика моделирования стока в бассейнах с искусственным регулированием (на примере Вилюйского водохранилища).
6. Проведено моделирование стока для водосборов в пределах бассейна р. Лены.

7. Подтверждена эффективность использования универсальной гидрологической моделирующей системы «Гидрограф» для бассейнов разных размеров в решении задач оценки стока в условиях значительной неопределенности исходной информационной базы.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

1. Моделирование стока в речных бассейнах с озерами и водохранилищами (на примере объектов в бассейне р. Невы). Доклады 6-й Всероссийского гидрологического съезда. Секция 5. Часть 2. Метеоагентство Росгидромета. – М., 2006, с. 33–36
2. Моделирование процессов формирования стока для различных ландшафтов таежной зоны на примере малых бассейнов р. Лены и р. Невы. Доклады 6-й Всероссийского гидрологического съезда. Секция 5. Часть 2. Метеоагентство Росгидромета. – М., 2006, с. 37–42 (в соавторстве с Орловой Ю.К. и Бобровой Т.В.)
3. Моделирование процессов формирования стока в задаче обеспечения безопасного функционирования напорных сооружений (на примере Вилюйского водохранилища). Материалы международной научно-практической конференции «Безопасность речных судоходных гидротехнических сооружений», 22-23 ноября 2007, Санкт-Петербург. Книга II, с. 110–115
4. Призрачность проблемы масштаба на примере распределенного моделирования формирования стока на малых, средних и больших реках бассейна р. Лены. Тезисы докладов научной конференции «Водные ресурсы, экология и гидрологическая безопасность», 5 – 7 декабря 2007, Москва, с. 90–93
5. Моделирование процессов формирования стока в бассейне р. Лены. Тезисы докладов научной сессии кафедры гидрологии суши СПбГУ «Географические и экологические аспекты гидрологии», 26–27 марта 2008, Санкт-Петербург, с. 23
6. Оценка стока рек арктического бассейна на основе распределенного детерминированного моделирования. Тезисы докладов конференции ученых Росгидромета, посвященная 70-летию дрейфа СП-1, 10–11 апреля 2008, Москва.
7. Modelling of runoff formation processes for arctic rivers. Abstracts of SCAR/IASC IPY Open Science Conference, July 8-July 11, 2008, at St. Petersburg, Russia, p. 201.
8. Моделирование процессов формирования стока в бассейне р. Лены. Тезисы докладов на международном научном форуме «Современные проблемы и будущее геофизиологии», 5-8 августа 2008, Якутск, с. 23

9. Use of complex deterministic model of runoff formation processes at basins of any scale. Extended abstracts of international conference «Predictions for hydrology, ecology and water resources management», 15–19 Sept., 2008, Prague, Czech Republic. pp. 15-18 (в соавторстве с Т.А. Виноградовой).
10. Deterministic-stochastic modelling of hydrological extremes in small basins. Extended abstracts of international conference «Hydrological extremes in small basins», 18–21 Sept. 2008, Krakow, Poland. pp. 323-326
11. Modelling of runoff formation processes for Lena river basin. Extended abstracts of international symposium on the Arctic Research «Drastic change under the global warming», 4–6 Nov. 2008, Tokyo, Japan, pp. 104–107.
12. Implementation of “Hydrograph” model for runoff formation processes simulations in poorly gauged mountain basins of different scale. Proceedings of international symposium IAHS-PUB «Hydrological Modeling and Integrated Water Resources Management in Ungauged Mountainous Watershed», 7–9 Nov. 2008, Chengdu, China, in review.

в том числе в рецензируемых изданиях:

13. Информационные и математические аспекты задачи моделирования процессов формирования стока речных бассейнов. Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского Государственного Политехнического Университета, № 3, 2007, с. 125-129.
14. Исследование процессов формирования стока на малоизученных водосборах (на примере бассейна р. Лены). Вестник Санкт-Петербургского Государственного Университета, Серия 7, № 3, 2008, с.89–97.