

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Aij – *На правах рукописи*

Айзель Георгий Владимирович

РАСЧЕТЫ РЕЧНОГО СТОКА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ SWAP ДЛЯ
ВОДОСБОРОВ С НЕДОСТАТОЧНЫМ ИНФОРМАЦИОННЫМ
ОБЕСПЕЧЕНИЕМ

Специальность 25.00.27 – Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте водных проблем Российской академии наук (ИВП РАН)

Научный руководитель: **Гусев Евгений Михайлович**
доктор биологических наук
(специальность – Агрочвоведение и агрофизика)

Официальные оппоненты: **Лобанов Владимир Алексеевич**
доктор технических наук, профессор
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Российский
государственный гидрометеорологический
университет», метеорологический факультет,
кафедра метеорологии, климатологии и охраны
атмосферы

Фролова Наталья Леонидовна
доктор географических наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Московский
государственный университет имени М.В.
Ломоносова», географический факультет, кафедра
гидрологии суши

Ведущая организация:
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт географии
Российской академии наук

Защита состоится «23» октября 2014 года в 14 часов на заседании
Диссертационного совета Д.002.040.01 при ИВП РАН по адресу: 119333, Москва,
ул. Губкина, д. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИВП РАН.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью) просим
направлять по адресу: 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3. Институт водных
проблем РАН, ученому секретарю диссертационного совета Д.002.040.01.

Автореферат разослан «4» августа 2014 года.

Ученый секретарь
Диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук,
профессор



Р.Г. Джамалов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Расчеты речного стока для водосборов, недостаточно обеспеченных натурными наблюдениями как за метеорологическими, так и гидрологическими характеристиками, являются предметом постоянного интереса среди специалистов в области гидрологии суши, управления водными ресурсами и водного хозяйства. Получение суточного гидрографа речного стока вне зависимости от степени изученности территории всегда относилось к актуальным гидрологическим проблемам из-за непосредственной связи его с решением важнейших задач по водохозяйственному планированию водообеспечения, практикой проектирования гидротехнических сооружений.

Повышенный интерес к данной теме российских ученых вызван, прежде всего, бедственным состоянием сети метеорологических наблюдений и сети гидрологических наблюдений за основными характеристиками речного стока. Деградация сети гидрометеорологических наблюдений, выражающаяся как в многократном уменьшении количества станций, так и в падении качества инструментальных измерений на них, либо не позволяет получить какие-либо сведения о речном стоке с труднодоступных речных бассейнов в принципе, либо вычисления, основанные на полученных с сети данных, могут привести к большой потере точности, а следовательно, и к росту недостоверности получаемых оценок и прогнозов.

Необходимым условием для экономического развития страны является возможность получения достоверных и научно обоснованных оценок как современного состояния водных ресурсов, так и их прогнозных значений вне зависимости от географического положения и доступности на территории всей страны. Это также диктуется необходимостью строительства новых объектов инфраструктуры и поддержанием в работоспособном состоянии старых, что невозможно сделать без учета пространственно-временной вариативности речного стока бассейна, на водосборной площади которого располагается объект.

Актуальность темы также обусловлена нарастающей необходимостью в заблаговременных прогнозах паводочного стока, а также стока весеннего половодья, оценки которого необходимы как для минимизации и предотвращения материального ущерба на подверженных данным природным бедствиям территориях, так и для водного хозяйства в силу необходимости получения стоковых характеристик с неизученных в гидрометрическом отношении районов. Практическое использование методов исследования речного стока с неизученных территорий обнаруживает свои применения в агрономии, практике ландшафтного планирования и управления землепользованием, прогнозах и расчетах речного стока в различные календарные периоды года.

Целью работы является расчет гидрографов слоя суточного стока с помощью модели тепло- и влагообмена SWAP для водосборов с недостаточным информационным обеспечением.

В соответствии с целью исследования в работе решались следующие **задачи**:

1. Адаптация модели SWAP к глобальным базам данных характеристик почвенного и растительного покровов, а также базам данных метеорологических характеристик.
2. Получение оптимальных параметров модели SWAP с помощью применения алгоритма автоматической калибровки.
3. Проверка эффективности воспроизведения речного стока моделью SWAP с использованием оптимальных модельных параметров на различных масштабах ее локализации.
4. Разработка метода получения параметров гидрологической модели SWAP на основе использования аппарата искусственных нейронных сетей (ИНС) и глобальных баз данных ландшафтно-географических дескрипторов поверхности суши.
5. Алгоритмическая реализация средствами программных комплексов и применение на исследуемом материале основных методов районирования

модельных параметров, нашедших широкое распространение в научной литературе.

6. Оценка эффективности воспроизведения модельных параметров используемыми группами методов районирования. Сравнение эффективности воспроизведения речного стока моделью SWAP на основе модельных параметров, полученных различными методами.

7. Разработка и проверка устойчивости методики принятия решений по априорному выбору стратегии поиска модельных параметров в зависимости от географической локализации исследуемого речного водосбора.

Положения, выносимые на защиту:

1. Оптимальные параметры физико-математической модели тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой SWAP, полученные для 323-х экспериментальных MOPEX-водосборов США с использованием метода автоматической калибровки по наблюдаемому стоку.

2. Многолетние гидрографы слоя суточного стока для 323-х MOPEX-водосборов, полученные на основе применения модели SWAP с использованием оптимальных параметров.

3. Методика получения необходимого ряда параметров физико-математической модели SWAP для расчетов речного стока с водосборов, не обеспеченных информацией, на основе аппарата искусственных нейронных сетей.

4. Многолетние гидрографы слоя суточного стока для группы водосборов с недостаточным информационным обеспечением, полученные на основе применения модели SWAP с использованием параметров, найденных различными группами методов районирования.

5. Методика принятия решений по априорному выбору стратегии расчетов суточного слоя речного стока для водосборов с недостаточным информационным обеспечением.

Научная новизна определяется, во-первых, созданием в рамках диссертационного исследования эффективной методики принятия решений по выбору стратегии расчетов речного стока для водосборов, недостаточно

обеспеченных данными натурных измерений, основанной на применении как классических и широко распространенных методов районирования модельных параметров, так и на созданной при участии автора методике, основанной на аппарате искусственных нейронных сетей, а во-вторых, на использовании большой выборки водосборов, ранее не вовлеченных в тематику подобного рода исследований.

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в разработке и апробации методики районирования модельных параметров на основе современного аппарата нейронных сетей. Данная методика как расширяет доступный для гидрологов-исследователей стандартный функционал регрессионных моделей, так и позволяет судить об эффективности использования современных методов нелинейного моделирования связей параметров гидрологического цикла речных водосборов. Также разработана методика принятия решений по выбору стратегии поиска ряда модельных параметров, применение которой позволяет с удовлетворительной точностью рассчитывать параметры речного стока для водосборов, недостаточно обеспеченных гидрометеорологической информацией.

Практическая значимость заключается в возможности использования разработанной методики нахождения модельных параметров, а также общего решающего правила принятия решений по расчетам стока, в задачах практической направленности, например, для оценки располагаемых водных ресурсов, гидротехническом проектировании. В силу универсальности и подтвержденной на материале исследования робастности разработанных методик можно предположить их использование в других географических зонах или на водосборах больших рек, с частично или полностью зарегулированным стоком, на которых нахождение модельных параметров путем калибровки по наблюдаемому стоку не представляется возможным.

Методы исследования. В основе диссертационного исследования лежит применение модели тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой SWAP, разработанной для расчетов суточного слоя речного стока. Обоснованность

применения данной модели, выступающей в настоящем исследовании фактически в роли физико-математической гидрологической модели формирования речного стока, подтверждается ее эффективным применением в различных физико-географических условиях, а также к бассейнам разного масштаба. Методологический аппарат поиска модельных параметров для исследуемых водосборов был представлен тремя основными группами методов, нашедшими огромное распространение в научной литературе: (1) регрессионным (реализован разработанным алгоритмом на основе ИНС), (2) пространственной интерполяции и геостатистики (12 реализаций), (3) физико-географической (гидрологической) близости (19 реализаций). Обоснованность применения данного методологического аппарата подтверждается как опытом его всестороннего применения в задачах расчетов речного стока, так и промежуточными исследованиями, проведенными в рамках настоящей работы.

Научная обоснованность и достоверность положений и выводов подтверждается промежуточной статистической оценкой результатов, надежностью используемого информационного обеспечения, критической оценкой конечных результатов с указанием степени неопределенности полученных расчетов речного стока. Все расчеты и оценки проводились с использованием методик, нашедших широкое распространение в научной литературе. Разработанные в рамках данного исследования методики подвергались проверке с использованием контрольных выборок, либо процедур кросс-проверки.

Личный вклад автора. Все результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором самостоятельно, либо при его непосредственном участии в коллективе соавторов. В опубликованных в соавторстве работах, автору принадлежит участие в постановке и реализации задачи, обработке и анализе результатов моделирования.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были доложены на российских и зарубежных научных школах и конференциях: 1) Научном семинаре Института гидрологии Академии наук Словакии (Словакия, г.

Братислава, 2012); 2) Научной школе в рамках Российского-Немецкого образовательного проекта для молодых ученых «Основные принципы и особенности гидрологического моделирования в различных географических условиях» (Германия, г. Кобленц, 2012); 3) Международной конференции и школе-семинаре для молодых ученых и аспирантов «Первые виноградские чтения. Будущее гидрологии» (Санкт-Петербург, 2013); 4) 7-ом Всероссийском гидрологическом съезде на секции «Моделирование гидрологического цикла» (Санкт-Петербург, 2013); 5) Общероссийской конференции изыскательских организаций «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (Москва, 2013); 6) 7-ой и 8-ой международной конференции молодых ученых и талантливых студентов «Водные ресурсы, экология и гидрологическая безопасность» (Москва, 2013, 2014); 7) 11-ой международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2014» (Москва, 2014).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 9 печатных работ, из них 4 в научных изданиях, рекомендованных ВАК.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 5-ти глав, заключения. Объем работы составляет 155 страниц. Текст исследования иллюстрирован 43 рисунками, 18 таблицами. Библиографический список включает в себя 152 наименования. В диссертационной работе имеются 3 приложения.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель и задачи исследования, излагаются научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационной работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первом разделе **Главы 1** приводится обзор современного состояния проблемы получения достоверных характеристик речного стока с водосборов, на которых гидрометрические посты либо полностью отсутствуют, либо

располагаемая на них информация недостаточна или недостоверна. На основе обширного литературного обзора и анализа публикаций по теме диссертационного исследования показана нарастающая актуальность проблемы получения достоверных характеристик речного стока для водосборов, недостаточно обеспеченных информацией, в особенности для территории России, что объясняется возрастающими требованиями народного хозяйства на фоне деградации сети гидрометрических наблюдений и общего снижения научной и исследовательской активности.

Во втором разделе выделены основные факторы, формирующие неопределенность расчетов речного стока. Соответственно этому отмечается главная цель и направление диссертационной работы, заключающиеся в подробном исследовании неопределенностей задания модельных параметров в случае отсутствия данных об измеренном речном стоке и определении соответствующего отклика гидрологической системы на различные варианты задания параметров с помощью применения физико-математической модели формирования речного стока.

В третьем разделе приводится обзор современных методов районирования модельных параметров, сравнительный анализ эффективности их применения в задачах моделирования гидрографа слоя суточного стока в разных географических условиях и при разном информационном обеспечении. Неопределенный характер эффективности применения различных групп методов районирования модельных параметров определяет актуальность задач разработки новых методов их определения для необеспеченных гидрометеорологической информацией водосборов, а также апробации уже разработанных методов на других объектах.

В **Главе 2** дается физико-географическое описание объекта исследований – 323-х экспериментальных водосборов, располагающихся на территории США. Исследуемые водосборы входят в базу данных проекта MOPEX (Model Parameter Estimation Experiment), притом распределение их по территории США неравномерно, а площади варьируют от 70 до 10300 км². Также в главе

приводятся сведения о степени гидрометеорологической изученности исследуемой территории и получении основных компонентов информационного обеспечения базы данных МОРЕХ-водосборов.

В **Главе 3** диссертации приводятся основные сведения о структуре модели SWAP и эффективности ее применения для расчетов речного стока в различных географических условиях. Модель SWAP представляет собой физико-математическую модель тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. Отличительная особенность модели SWAP — сочетание ее достаточной физической обоснованности и рациональности с точки зрения используемых модельных средств. При этом рациональность обусловлена применением преимущественно аналитических методов решения систем уравнений (в то время как в большинстве существующих моделей используются численные методы) и стремлением к сокращению числа параметров модели.

Основное внимание в **Главе 3** уделено особенностям реализации моделирования речного стока с помощью модели SWAP. Детально описываются особенности трансформации воды в пределах расчетных ячеек, а также в русловой сети, процессы подготовки необходимого информационного обеспечения, этапы и методы оптимизации ряда модельных параметров с помощью алгоритмов автоматической калибровки модели по наблюдаемому стоку. Отдельный акцент делается на проверке качества воспроизведения речного стока моделью SWAP для водосборов, находящихся в разных климатических условиях и имеющих разный пространственный масштаб. После адаптации числа калибруемых параметров к качеству исходной информации и разработки робастного алгоритма калибровки выбранных модельных параметров точность воспроизведения гидрографа речного стока моделью SWAP достигла точности лучших физико-математических гидрологических моделей.

В заключительном разделе **Главы 3** приводятся результаты расчетов гидрографа суточного слоя речного стока для каждого из 323-х исследуемых МОРЕХ-водосборов (Рисунок 1) на основе модельных параметров, полученных путем автоматической калибровки с использованием алгоритма SCE-UA (Shuffled

Complex Evolution Method), а также информационного обеспечения, представленного глобальными базами данных параметров земной поверхности и метеорологических характеристик. Качество выполненных на основе модели SWAP расчетов речного стока оценивалось соответственно статистическим критериям: 1) эффективности расчетов гидрографа речного стока (по Нэш-Сатклиффу) Eff :

$$Eff = 1 - \frac{\sum_{\Omega} (x_{sim} - x_{obs})^2}{\sum_{\Omega} (x_{obs} - \overline{x_{obs}})^2}, \quad (1)$$

2) систематической ошибке расчетов стока $Bias$:

$$Bias = \frac{\sum_{\Omega} (x_{sim} - x_{obs})}{\sum_{\Omega} x_{obs}} 100\%, \quad (2)$$

где x_{sim} и x_{obs} — смоделированное и измеренное значения переменной x (данном случае суточного стока), а Ω — дискретное множество значений переменной x .

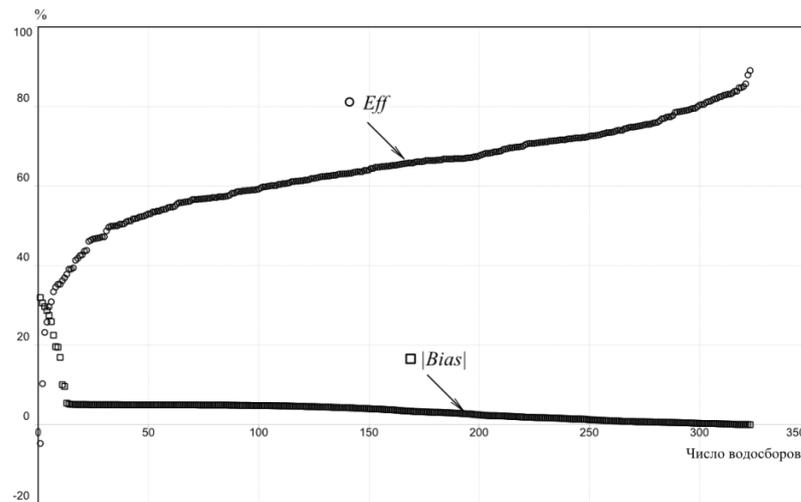


Рисунок 1. Эффективности Eff (\circ) и систематические ошибки $|Bias|$ (\square) расчета суточных значений стока по модели SWAP для каждого из 323 водосборов. Статистики Eff упорядочены в порядке возрастания их значений, статистики $|Bias|$ — в порядке убывания.

Полученные результаты показывают, что лишь для одного водосбора Eff отрицательна, максимальные же значения Eff достигают 89% (0.89). Что касается систематической ошибки расчета, то она выходит за пределы $\pm 5\%$ лишь в 7

случаях из 323 (что составляет всего лишь 2%). Медиана значений эффективности составляет 65.2% (0.652), медиана абсолютных значений систематической ошибки равна 3.7%. Для 90% водосборов $Eff \geq 50\%$ (0.5), для 68% - $Eff \geq 60\%$ (0.6), для 32% - $Eff \geq 70\%$ (0.7). Полученные результаты можно считать хорошими, а также в очередной раз доказывающими робастность модели SWAP, заключающейся в эффективном моделировании процессов тепло- и влагообмена для любых экосистем.

В Главе 4 сделана попытка разработки современной методики оценки модельных параметров физико-математической модели формирования стока SWAP для водосборов, недостаточно освещенных гидрометеорологической информацией, на основе применения аппарата искусственных нейронных сетей (ИНС). В первом разделе описывается математический аппарат ИНС, его методологические особенности и вычислительные тонкости применительно к решению задач по нахождению регрессионных зависимостей. Модели ИНС, а также их программные реализации, построены по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей — сетей нервных клеток живого организма, и представляют собой систему соединённых и взаимодействующих между собой простых процессоров (искусственных нейронов) (Рисунок 2).

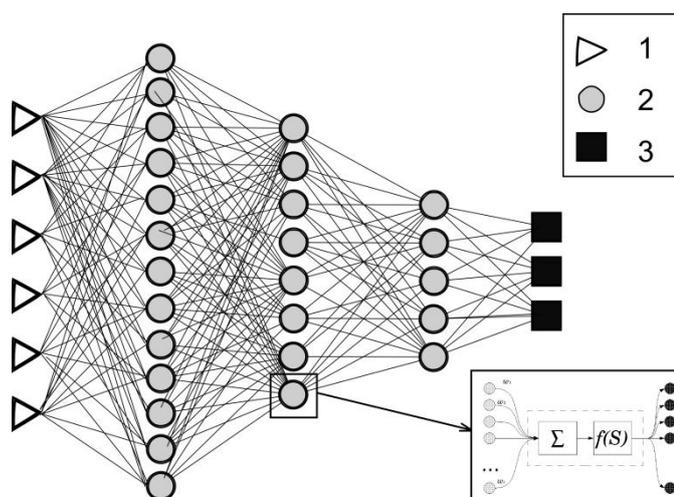


Рисунок 2. Пример структуры полной нейронной сети. 1 – нейроны входного слоя, 2 – нейроны скрытого (промежуточного слоя), 3 – нейроны выходного слоя.

В первом разделе рассматриваются особенности, преимущества и недостатки наиболее распространенных архитектур ИНС — многослойного персептрона (МП) и радиальной базисной функции (РБФ). Наибольшее внимание при обзоре функционала ИНС в Главе 4 уделяется оптимизации структуры нейронной сети. ИНС не программируются в привычном смысле этого слова, они обучаются. Технически обучение заключается в нахождении коэффициентов связей между нейронами. В процессе обучения нейронная сеть способна выявлять сложные зависимости между входными и выходными данными, а также выполнять обобщение. Это значит, что в случае успешного обучения, сеть сможет воспроизвести верный результат на основании данных, которые отсутствовали в обучающей выборке, а также неполных или частично искаженных данных, что характеризует свойство адаптивности нейронных сетей к изменениям окружающей среды. При построении сети следует иметь в виду, что ее качество определяется компромиссом между ее же производительностью и сложностью. При построении каждой ИНС большое значение имеет анализ чувствительности сети к её входным компонентам. Из достаточно большого количества входных переменных сети важно оставить ключевые и удалить переменные с плохой чувствительностью, тем самым понизить размерность входного слоя сети и, соответственно, повысить робастность модели ИНС. В общем виде процесс понижения размерности состоит из последовательного исключения входных переменных из структуры сети и в диссертационной работе был реализован на основе алгоритма Хебба параллельно с процессом обучения.

Во втором разделе описываются особенности информационного обеспечения аппарата ИНС для задачи поиска устойчивых регрессионных зависимостей между дескрипторами природных условий водосборов и модельными параметрами SWAP для них. При разработке методики на основе ИНС учитывалась необходимость получения универсальной методики, доступной для применения на неизученном водосборе в любой точке земного шара. Соответственно предъявляемым требованиям в качестве источника информационного обеспечения были выбраны глобальные базы данных

параметров подстилающей поверхности и метеорологических характеристик, разработанных под эгидой проектов MOPEX и GSWP-2.

В третьем разделе описываются результаты применения методики на основе аппарата ИНС к поиску модельных параметров для водосборов, не обеспеченных необходимой гидрометрической информацией. В представленной диссертационной работе был использован метод работы с большими выборками, основанный на разбиении всей выборки исследуемых водосборов на две группы: первую, по которой будут находиться необходимые зависимости, и вторую, на которой они будут проверяться. Обучение нейронных сетей для каждого из выбранных модельных параметров происходило на группе в 210 водосборов (что составляет 65% от всей выборки), включающих как подгруппу непосредственного обучения, так и подгруппу кросс-проверки. В контексте решения поставленной задачи данная работа является одной из первых, и соответствующего инструментального фундамента для ее решения в научной среде пока не выработано. В связи с этим было принято решение не ограничиваться одной архитектурной реализацией, а использовать четыре реализации на базе МП и три на базе РБФ (Таблица 1). Это позволило более широко освоить описанный инструментарий решения поставленной задачи, а также наметить пути установления и обоснования схемы выбора наиболее устойчивого решения.

Таблица 1. Заданные параметры архитектур используемых ИНС

	Число скрытых слоев	Число нейронов на				Относительное время обучения ИНС
		первом скрытом слое		втором скрытом слое		
		мин	макс	мин	макс	
МП-1	2	1	27	1	17	400-500
МП-2	2	1	17	1	7	250-300
МП-3	1	1	17			100-150
МП-4	1	1	7			40-80
РБФ-1	1	1	800			4
РБФ-2	1	1	400			2
РБФ-3	1	1	200			1

Таким образом, после процесса обучения мы получили семь ИНС, основанных на базовых архитектурах, для каждого из 11 параметров модели SWAP. Созданные ИНС статичны, в них исключены постпроцессинговые изменения, т.е. их можно условно считать моделями типа «черный ящик». Для нахождения модельных параметров проверочной группы 113 водосборов, отнесенных к группе «не обеспеченных информацией», необходимо в качестве входного слоя найденных ИНС задать предикторы этих водосборов из глобальных баз данных, которые, трансформируясь соответственно оптимизированной архитектурной схеме ИНС, дадут на выходе искомые значения параметров модели SWAP. В качестве численного эксперимента было принято решение использовать в расчетах не только группы выходов базовых архитектур ИНС, но и сделать некое ансамблевое осреднение путем расчета медианы выходных параметров ИНС и группировки полученных значений в новую расчетную группу модельных параметров (обозначенную далее как группа «Медиан»).

В четвертом (заключительном) разделе Главы 4 были выполнены расчеты гидрографов речного стока с использованием модели SWAP с полученными параметрами для группы 113-ти водосборов, не обеспеченных информацией. Для всей группы из 113 исследуемых водосборов были последовательно рассчитаны суточные гидрографы стока, затем вычислены для данной выборки статистики качества расчетов Eff и $|Bias|$ (Таблица 2).

Таблица 2. Значения медиан рассчитанных статистик Eff и $|Bias|$ для проверочных водосборов в результате применения для оценки модельных параметров различных архитектур ИНС

Медианное значение	ИНС							Медиана
	МП-1	МП-2	МП-3	МП-4	РБФ-1	РБФ-2	РБФ-3	
Eff	0.30	0.35	0.33	0.31	0.35	0.35	0.30	0.34
$ Bias $	44.2	31.1	31.4	31.0	23.1	22.5	30.5	30.1

Из полученных результатов видно, что лучшее качество расчетов стока для всей выборки «не обеспеченных информацией» бассейнов доступно при применении архитектуры РБФ-2 ко всем модельным параметрам — эффективность расчета 0.348 (34.8%) стремится к нижней границе допустимого «удовлетворительного» интервала, в то время как среднеквадратическая ошибка в 22.5% стремится к своей верхней планке. Географический охват и разнообразие стокоформирующих комплексов экспериментальных бассейнов настолько велико, что применение единой архитектуры ИНС для расчета стока для всех бассейнов дает большие ошибки в итоговых расчетах.

Следуя концепции «исключительности» каждого водосбора, заключающейся в том, что каждому водосбору соответствует своя базовая архитектура ИНС, единственно использование которой дает лучший и приемлемый результат, для всех водосборов в отдельности были выделены архитектуры ИНС, дающие лучший результат в терминах Eff и $|Bias|$ (Рисунок 3). Рассчитанные медианы Eff и $|Bias|$ равны 0.484 (48.4%) и 13.7% соответственно, что характеризует качество расчетов как удовлетворительное.

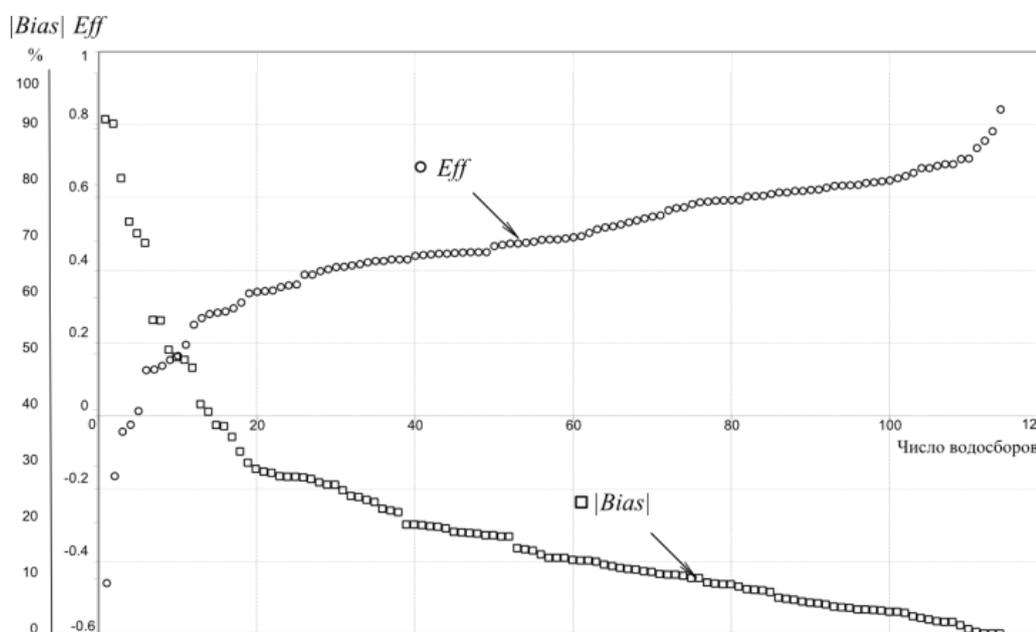


Рисунок 3. Эффективности Eff (○) и модули систематической ошибки $Bias$ (□) расчета суточных значений стока по модели SWAP для каждого из 113 водосборов. Статистики Eff упорядочены в порядке возрастания их значений, статистики $|Bias|$ - в порядке убывания

Полученные результаты показывают, что базовая архитектура, построенная на использовании РБФ в трех предложенных нами реализациях, является лучшим выбором более чем для половины всех исследуемых бассейнов. Базовая архитектура МП показывает хорошие результаты на этапе обучения, но проигрывает непосредственно по результатам расчета стока. Это объясняется предрасположенностью МП к переобучению на небольших выборках и способностью МП экстраполировать значения прогнозируемых элементов, что для некоторых бассейнов могло быть выполнено некорректно.

Разработанная методика расчетов речного стока с использованием аппарата ИНС для водосборов, не обеспеченных гидрологическими наблюдениями, показывает удовлетворительные результаты, но имеет ряд недостатков. Во-первых, машинное обучение нейронных сетей занимает длительное время. Во-вторых, не разработано универсальных подходов в определении внутренней структуры сетей под конкретные задачи. В-третьих, нейронные сети требуют использования больших выборок данных. Также стоит отметить, что из-за сложного, нелинейного характера как самой природы, так и методов ее изучения, географических закономерностей в предоставляемых решениях может не наблюдаться.

В **Главе 5** целью исследований являлось решение задач: 1) расчета речного стока на основе параметров, полученных методами пространственной геостатистики и физико-географического подобия, 2) разработки методики принятия решений, позволяющей на основе априорной информации о водосборе определять стратегию получения для него необходимых модельных параметров.

В первом разделе рассматривалась проблема получения модельных параметров методами физико-географического подобия. Всего в рамках данного диссертационного исследования было применено 19 реализаций данного метода, отличающихся между собой набором используемых параметров (или их групп), организующими фазово-однородное пространство для поиска ближайшего водосбора-донора для каждого не обеспеченного информацией водосбора. В

качестве критерия близости использовался стандартный критерий эвклидова расстояния.

Во втором разделе рассматривалось получение модельных параметров SWAP методами пространственной интерполяции и геостатистики. Стоит отметить, что отсутствие необходимости подключения дополнительной информации из глобальных баз данных, а также простая реализация алгоритмов интерполяции в программных комплексах вычислительных систем, делает данный метод самым доступным и простым в освоении. Для каждого «неизученного» бассейна в рамках данного подраздела был получен свой набор модельных параметров с помощью каждой из 12-ти реализаций метода пространственной геостатистики. Реализации метода различались между собой наборами интерполяционных и экстраполяционных алгоритмов, были использованы как простые алгоритмы ближайшего соседа и естественной окрестности, так и сложные геостатистические алгоритмы типа «кригинг».

Результативность и эффективность применения методик нахождения параметров, использующих поиск минимума в фазово-однородном пространстве дескрипторов водосбора (реализации метода физико-географического подобия), и алгоритмы пространственной интерполяции и геостатистики также оценивались по сравнительному анализу параметров качества воспроизведения гидрографов стока, которые являются кумулятивными показателями робастности используемых подходов.

В третьем разделе были произведены расчеты речного стока с помощью модели SWAP на основе параметров, полученных путем районирования с использованием групп методов физико-географического подобия и пространственной геостатистики. Была проведена постериорная оценка эффективности расчетов речного стока в рамках концепции «исключительности» (Рисунок 4).

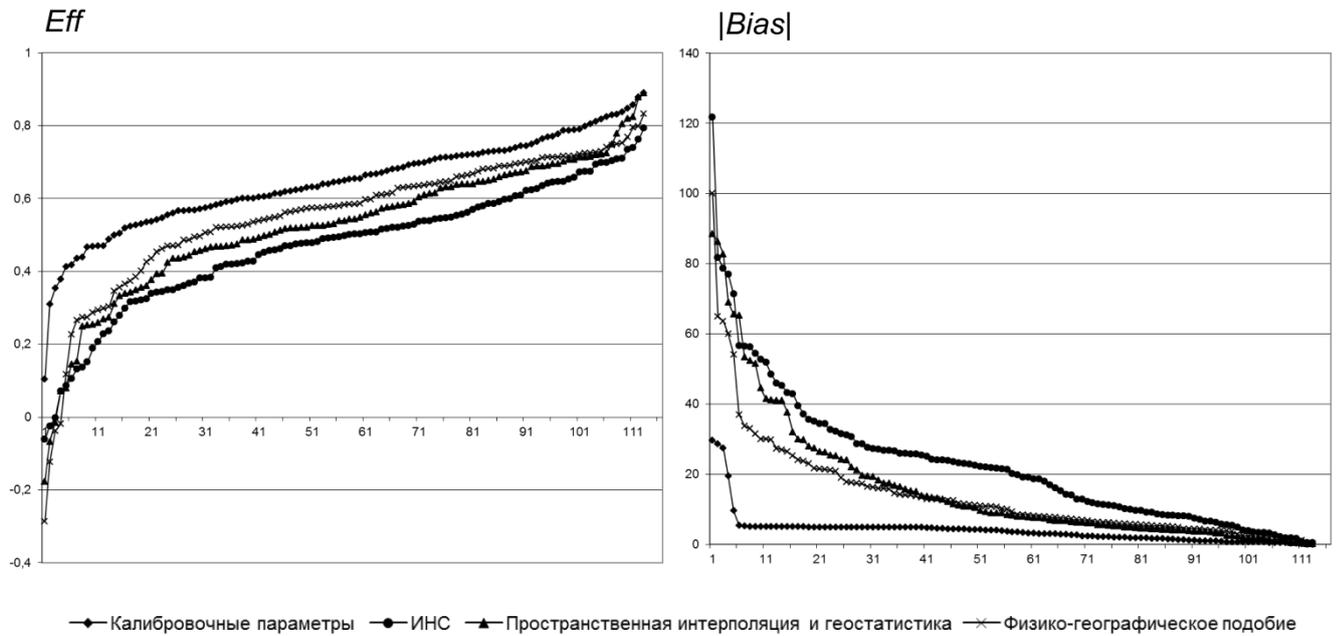


Рисунок 4. Эффективности Eff и систематические ошибки $|Bias|$ расчета суточных значений стока по модели SWAP для каждого из 113 водосборов с применением различных методов оценки модельных параметров. Статистики Eff упорядочены в порядке возрастания их значений, статистики $|Bias|$ — в порядке убывания.

Рассчитанные медианы Eff и $|Bias|$ равны 0.539 и 8.3% для группы методов пространственной интерполяции и геостатистики, и 0.583 и 9.3% для группы методов физико-географического подобия. В общем случае наибольшую эффективность при нахождении модельных параметров показал метод физико-географического подобия, использование вариаций которого дало лучшие результаты на 68-ми (из 113-ти) водосборах, в то время как разновидности методов пространственной интерполяции были лучшими на 32-х водосборах, а методы ИНС лишь на 13-ти (60, 28 и 12%, соответственно). Приведенные результаты были получены на основе исследования водосборов, расположенных на очень большой площади (вся территория США), в силу чего находящихся в различных природных условиях. Можно надеяться, что уменьшив диапазон этих условий, т.е. разделив всю территорию США на ряд регионов (провести ее районирование) и проделав описанные выше процедуры для каждого региона, удастся получить лучшие результаты по расчетам стока для выбранных бассейнов.

Для перехода от постериорных оценок выбора лучших методов районирования и получения модельных параметров к априорным, в **Главе 5** используется методология, основанная на выделении сходных в ландшафтном, географическом или гидрологическом плане районов (ландшафтно-гидрологический метод). В работе была использована классификация MOREX-водосборов по основным характеристикам наблюдаемого стока воды, в которой все исследуемые водосборы были разделены на 12 групп (районов) (Рисунок 5).

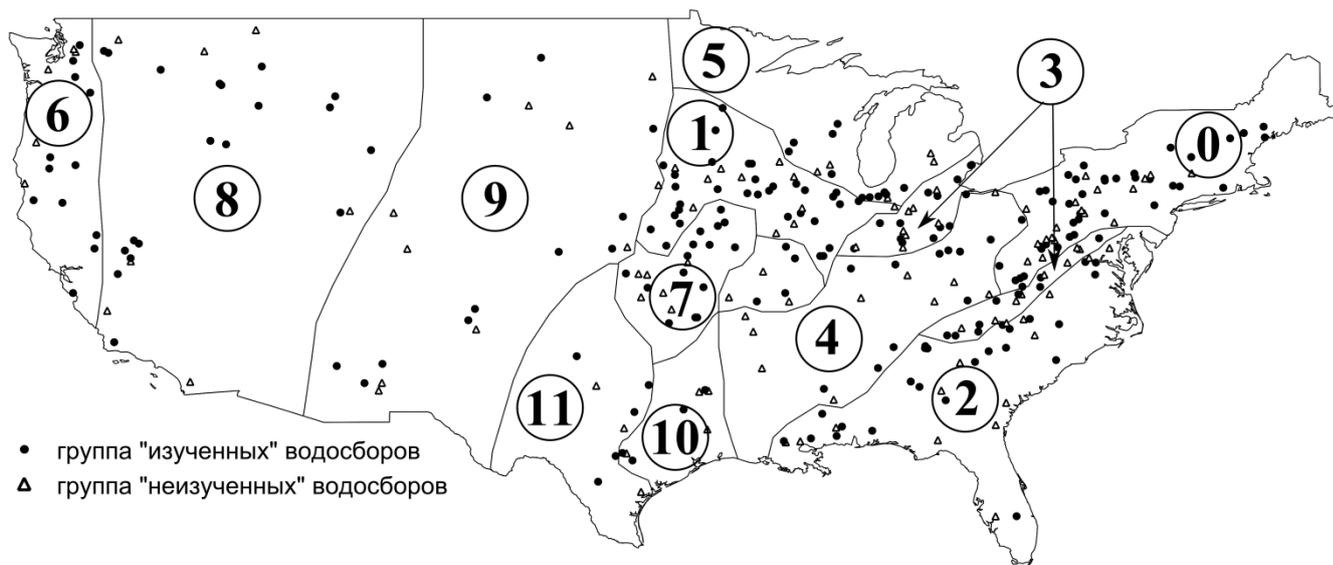


Рисунок 5. Районирование исследуемых водосборов

Результатом произведенного анализа эффективности применения реальных гидрологических районов для проверки гипотезы существования в их пределах таких реализаций методов районирования модельных параметров, при которых потеря качества расчетов будет минимальной, является утверждение о возможности использования данной классификации в рамках представленной исследовательской работы для нахождения робастной модели принятия решений расчета гидрографа речного стока при недостатке данных натурных наблюдений. В Таблице 3 систематизированы результаты расчетов стока с использованием различных наборов модельных параметров, полученных с помощью применения трех основных групп методов: регрессионного (в виде реализации методов ИНС), пространственной интерполяции и геостатистики, а также физико-географического подобия. Обобщенные результаты показывают, что при переходе

от концепции «исключительности» каждого водосбора, к концепции выделения лучшего метода «внутри географических групп», эффективности расчетов стока падают незначительно, при этом рост среднеквадратического отклонения также невелик.

Таблица 3. Статистические оценки расчетов стока в критериях Eff и $|Bias|$ для выделенных гидрологическим районированием групп водосборов

Группа	ИНС		Пространственная интерполяции и геостатистика		Физико-географическое подобие		Концепция "исключительности" (постериорная)		
	Eff	$ Bias $	Eff	$ Bias $	Eff	$ Bias $	Соотн. методов. %	Eff	$ Bias $
0	0.43	21.2	0.46	8.9	0.51	11.2	4/23/73	0.56	9.8
1	0.44	35.0	0.52	4.5	0.56	6.3	0/9/91	0.64	11.1
2	0.45	19.5	0.50	12.0	0.56	8.3	0/21/79	0.66	6.5
3	0.46	16.0	0.55	11.0	0.62	7.4	25/25/50	0.64	9.0
4	0.55	30.8	0.54	17.4	0.64	14.1	30/10/60	0.72	7.1
5	0.45	8.3	0.49	10.5	0.44	22.1	20/20/60	0.57	8.0
6	0.62	12.0	0.83	3.9	0.69	5.2	0/100/0	0.83	3.9
7	0.56	4.4	0.50	7.2	0.63	10.7	17/33/50	0.64	5.0
8	-0.03	34.4	0.38	5.7	0.36	21.5	0/57/43	0.49	15.8
9	0.05	65.6	0.08	34.6	0.05	39.1	30/40/30	0.29	23.7
10	0.40	39.2	0.46	6.4	0.56	9.1	25/0/75	0.59	6.0
11	0.15	85.5	0.63	26.1	0.33	34.4	0/67/30	0.63	7.1
Выборка	0.43	25.8	0.49	9.3	0.52	11.0	12/28/60	0.61	7.7

В результате при задаче расчета стока для произвольного неизученного водосбора на исследуемой территории мы получили эффективную методику принятия решений с минимальным падением производительности относительно постериорных оценок.

Для проверки разработанной методики принятия решений в постановке задачи поиска модельных параметров при отсутствии необходимой информации из расчетной выборки неизученных водосборов было отобрано по одному бассейну, попадающему в каждый из районов. Полученные результаты (для группы контрольных водосборов Eff 0.40÷0.83, $|Bias|$ 2÷26%) показывают, что разработанная методика принятия решений позволяет на удовлетворительном уровне рассчитывать слой суточного стока для водосборов, для которых получение модельных параметров затруднено в виду отсутствия информации, необходимой для процесса их автоматической калибровки.

В заключении сформулированы основные **результаты работы** и представлены полученные **выводы**.

1. Впервые для выборки в 323 МОРЕХ-водосбора на территории США с помощью модели тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой SWAP были рассчитаны суточные гидрографы стока за десятилетний период (1986-1995 гг.). Ряд модельных параметров для данных расчетов был получен путем их автоматической калибровки по наблюдаемому стоку.
2. Разработана и впервые применена методика районирования модельных параметров, опирающаяся на аппарат искусственных нейронных сетей и глобальные базы данных метеорологической информации, а также параметров почвенно-растительного покрова.
3. Эффективность разработанного в рамках настоящего диссертационного исследования метода районирования модельных параметров на основе аппарата искусственных нейронных сетей подтверждается удовлетворительными результатами расчетов речного стока для большой, географически и гидрологически разнородной выборки речных бассейнов. Данное обстоятельство, подкрепленное универсальностью предложенного метода в плане обеспеченности необходимой для его применения информацией, позволяет сделать заключение о перспективности его применения для расчетов стока как с гидрометрически неизученных речных бассейнов, так и с таких бассейнов, где получение модельных параметров путем калибровки невозможно из-за зарегулированности речного стока.
4. Впервые для исследуемой выборки бассейнов, охватывающей основные ландшафтно-географические зоны США, были применены классические методы поиска модельных параметров в условиях отсутствия информации об измеренном стоке. Всего в работе применяются 39 реализаций различных групп методов нахождения модельных параметров. Для большинства исследуемых МОРЕХ-водосборов лучшие результаты дает обобщенная группа методов физико-географического подобия, что объясняется особенностью метода, который на

«водосборе-мишени» использует перенесенный с «водосбора-донора» набор модельных параметров, обладающий большой устойчивостью.

5. На основе информации о модельных параметрах, полученной с помощью применения классических методов геостатистики и физико-географического подобию, для каждого водосбора из исследуемой выборки был рассчитан гидрограф суточного стока. Эффективность расчетов стока с использованием классических методов районирования модельных параметров незначительно превышает эффективность использования методики на основе ИНС. Выявленные особенности показателей эффективности того или иного метода районирования параметров к расчетам речного стока можно отнести исключительно к рассматриваемой территории, которая является хорошо изученной в гидрометрическом отношении. Можно предполагать большую перспективную эффективность метода на основе искусственных нейронных сетей для территорий, характеризующихся слабой гидрометеорологической изученностью.

6. На основе полученных в работе массивов модельных параметров, а также результатов модельных статистик эффективностей расчетов речного стока была разработана методика принятия решений по выбору стратегии расчетов суточного слоя речного стока для неизученных бассейнов, заключающаяся в использовании районирования территории США по основным стоковым характеристикам на 12 зон. Разработанная методика принятия решений позволяет на удовлетворительном уровне рассчитывать слой суточного стока для водосборов, для которых получение модельных параметров затруднено в виду отсутствия информации, необходимой для процесса их автоматической калибровки.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ*Статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я., Айзель Г.В. Моделирование стока рек Оленек и Индигирка с использованием модели взаимодействия поверхности суши с атмосферой SWAP // Водные ресурсы. 2013. Т. 40. № 5. С. 496-506;
2. Айзель Г.В. Особенности применения метода искусственных нейронных сетей в задачах расчета стока с неизученных водосборов // В мире научных открытий. 2014. Т. 50. № 2.1. С. 602-617;
3. Айзель Г.В. Применение метода искусственных нейронных сетей для поиска ряда параметров гидрологической модели // Российский научный журнал. 2014. Т. 40. № 2. С. 282-287;
4. Айзель Г.В. Расчеты речного стока для неизученных бассейнов: потенциал применения гидрологической модели и аппарата искусственных нейронных сетей // Инженерные изыскания. 2014. № 4. С. 12-18.

Статьи в других изданиях:

5. Айзель Г.В. Вариативность расчетов речного стока на основе модели SWAP для неизученных водосборов // Водные ресурсы, экология и гидрологическая безопасность: сборник трудов восьмой международной научной конференции молодых ученых и талантливых студентов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института водных проблем Российской академии наук (ФГБУН ИВП РАН). М.: ИВП РАН, 2014. С.88-91.
6. Айзель Г.В. Перспективы применения гидрологических моделей для расчета стока с малоизученных водосборов в практике инженерных изысканий // Инженерные изыскания в строительстве. Материалы девятой общероссийской конференции изыскательских организаций. М.: ООО «Геомаркетинг». 2013. С. 120 – 121.

7. Айзель Г.В. Получение параметров гидрологической модели при отсутствии наблюдений за стоком: сравнение различных групп методов // Сборник тезисов международной конференции и школы-семинара для молодых ученых и аспирантов «ПЕРВЫЕ ВИНОГРАДОВСКИЕ ЧТЕНИЯ. БУДУЩЕЕ ГИДРОЛОГИИ» памяти выдающегося российского гидролога Ю.Б. Виноградова. Спб.: Арт-Экспресс, 2013. С. 28-29.

8. Айзель Г.В. Применение метода искусственных нейронных сетей в задачах расчета речного стока с неизученных водосборов // Материалы Международного молодежного научного форума «Ломоносов-2014» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://lomonosov-msu.ru/rus/archive.html>;

9. Айзель Г.В. Сравнение применения различных групп методов оценки параметров гидрологической модели при отсутствии наблюдений за стоком // Водные ресурсы, экология и гидрологическая безопасность: сборник трудов седьмой международной научной конференции молодых ученых и талантливых студентов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института водных проблем Российской академии наук (ФГБУН ИВП РАН). М.: ИВП РАН, 2013. С.125-126.

Айзель Георгий Владимирович

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

**Расчеты речного стока на основе модели SWAP для водосборов с
недостаточным информационным обеспечением**

Подписано в печать 24.06.14. Формат 60x90 1/16. Гарнитура Times.

Печать цифровая. Усл.печ.л. 1.0. Тираж 140 экз. Заказ № 1.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт водных проблем Российской академии наук (ФГБУН ИВП РАН)

119333, Москва, ул. Губкина, дом 3

Отпечатано в ИВП РАН
