

Министерство образования и науки РФ
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
(РГГМУ)

На правах рукописи
УДК [556.16.048+556.16.06]”45”

Соловьев Филипп Леонидович

**Повышение устойчивости вероятностных
распределений многолетнего годового стока
при прогнозировании долгосрочных его изменений
(на примере Европейской территории России)**

Специальность 25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2009

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук,
профессор Коваленко Виктор Васильевич

Научный консультант: кандидат технических наук,
Гайдукова Екатерина Владимировна

Официальные оппоненты: доктор географических наук,
профессор Догановский Аркадий Михайлович
кандидат технических наук,
Грачев Николай Ричардович

Ведущая организация: Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт (ААНИИ)

Защита диссертации состоится «24» декабря 2009 г. в 15³⁰ часов на заседании специализированного совета Д212.197.02 Российского государственного гидрометеорологического университета по адресу: 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, 98

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета

Автореферат разослан «23» ноября 2009 г.

Заслуженный работник высшей школы РФ,
Ученый секретарь специализированного совета,
кандидат географических наук

Воробьев В. Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На протяжении многих лет гидрологи уделяют серьезное внимание способам оценок возможных тенденций изменения вероятностного режима многолетнего годового стока под воздействием климатических вариаций и хозяйственной деятельности. Характеристики годового стока и его многолетних колебаний широко используются в народном хозяйстве и являются важнейшими и наиболее устойчивыми среди характеристик других видов многолетнего стока, индикаторами обеспеченности водными ресурсами регионов интенсивного водопотребления. В последнее десятилетие, однако, получены результаты, указывающие на то, что статистические моменты вероятностных распределений годового стока (как и других его видов) могут быть неустойчивыми. При этом имеется в виду не неустойчивость их оценок из-за ограниченности рядов наблюдений, а физическая (генетическая) неустойчивость формирования вероятностного режима. Диссертация направлена на поиск путей получения моделей стока, позволяющих надежно прогнозировать статистически неустойчивые его изменения как из-за антропогенной деятельности на водосборах, так и за счет колебаний климата вне зависимости от того, какими факторами (антропогенными или природными) они вызываются. Однако в любом случае сам климатический сценарий предполагается задаваемым как внешнее воздействие на водосборы. Имея устойчивый и надежный прогноз (сценарную оценку) вероятностных распределений годового стока, можно обеспечивать оптимальное стратегическое управление водозависимыми отраслями экономики, уменьшив степень неопределенности принимаемых решений и снизив возможные риски до значений, полученных при обоснованно выбираемых климатических сценариях.

Цели и задачи исследования. Цель данного исследования – разработка методики устойчивого оценивания обеспеченных расходов воды в зонах неустойчивого формирования многолетнего годового стока.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

– созданы базы данных по годовому стоку, приземной температуре воздуха и влажности по 313 гидрометеорологическим пунктам наблюдения на ЕТР;

– сгенерировано 160 рядов годового испарения, вычисленных по методике А. Р. Константинова, с оценкой их надежности (погрешностей);

– выполнена статистическая обработка рядов испарения и получены оценки основных расчетных характеристик (нормы, коэффициентов вариации, асимметрии и автокорреляции), необходимых для вероятностного изучения формирования испарения (по аналогии с рядами речного стока);

– с использованием ГИС-технологий получены карты распределения статистических оценок характеристик испарения по ЕТР;

– численно оценен критерий устойчивости начальных моментов вероятностных распределений многолетних рядов годового испарения, проведено его картирование по ЕТР и сравнение с распределением аналогичного критерия многолетнего годового стока;

– построены гистограммы двумерных распределений плотности вероятности расходов и испарений, оценены параметры аппроксимирующих их аналитических распределений и получены сравнительные оценки обеспеченных расходов по двумерным и одномерным (условным и безусловным) распределениям;

– выполнены долгосрочные прогнозы (сценарные оценки) изменения вероятностного режима годового стока в Северо-Западном регионе и Пермском крае по условным и безусловным распределениям с использованием стохастической модели формирования стока; построены прогнозные карты характеристик распределений и проведена их сравнительная оценка.

Методика исследований и исходный материал. Решение перечисленных задач проводилось численными методами на основе статистической обработки исходной гидрометеорологической информации как коммерческими программами (*Excel* и *Statistica*), так и авторскими программами в визуальной среде *Borland C++ Builder*.

Долгосрочные оценки вероятностных характеристик годового стока осуществлялись при помощи математического моделирования на основе конечномерной аппроксимации уравнения Фоккера–Планка–Колмогорова (ФПК). Для построения карт использовались программы *Surfer*, *MapInfo*, *ArcView*.

Научная обоснованность и достоверность положений и выводов подтверждается статистическими оценками промежуточных результатов, а также использованием теории марковских случайных процес-

сов, приводящих к уравнению Пирсона, описывающему стационарные процессы формирования стока.

Научная новизна и практическая значимость. В ходе проведенного исследования были получены следующие основные результаты:

1. Сформирована локальная база данных, включающая первичную гидрометеорологическую информацию (годовой сток, приземная температура воздуха, влажность) по 313 пунктам наблюдения на ЕТР (83 речных водосбора), а также результаты ее статистической обработки, представленные рядами среднегодового испарения, нормой, коэффициентами вариации, асимметрии и автокорреляции для многолетних рядов стока и испарения по всем использованным сетевым наблюдениям.

2. Построены карты распределения по ЕТР нормы годового испарения и его коэффициентов вариации (последние впервые), и выявлены некоторые отличия первых от аналогичных карт, построенных методами водного баланса, связанные с эффектом детектирования почво-грунтовой емкости бассейна.

3. Выполнена численная оценка критериев устойчивости формирования многолетнего годового стока и испарения (последнее впервые) на ЕТР; проведено их картирование и установлено, что устойчивость начальных моментов распределений плотности вероятности испарения понижается с юго-запада на северо-восток (в отличие от расхода, для которого устойчивость понижается с севера-востока на юго-запад). Тем самым выявлен компенсационный механизм, обеспечивающий устойчивость двумерных совместных вероятностных распределений стока и испарения.

4. Разработана методика использования двумерных вероятностных распределений стока и испарения для обеспечения устойчивости прогнозирования долгосрочных изменений малообеспеченных значений расходов, используемых в строительном проектировании.

5. Проведена апробация разработанной методики повышения устойчивости вероятностных распределений при оценке долгосрочных изменений многолетнего годового стока в Северо-Западном регионе и в Пермском крае, получены прогнозные карты расчетных характеристик стока и выполнено их сравнение с подобными картами, полученными по уже известной методологии, основанной на стохастической модели с существенными мультипликативными шумами.

Практическое применение результатов диссертации определяется возможностью надежно (устойчиво) оценивать гидрологические

последствия изменения климата в тех регионах, где формирование многолетнего годового стока происходит неустойчиво по начальным моментам вероятностного распределения.

Работа выполнялась в рамках НИР кафедры гидрофизики и гидропрогнозов РГГМУ «Частично инфинитный механизм в моделировании и прогнозировании гидрологических катастроф» № госрегистрации 01.2006 03264, а также темы «Создание диагностических и прогностических моделей развития процессов катастрофического формирования многолетнего речного стока», выполняемых по заданию Федерального агентства по образованию на проведение научных исследований (№ 2.1.1/3355).

Ее результаты внедрены в учебный процесс по специальности «Гидрология» – 07.32.00, а также использованы в Санкт-Петербургском филиале горного института Уральского отделения РАН для целей обеспечения гидроэкологической безопасности калийного производства Пермского края.

На защиту выносятся следующие положения:

– методика и результаты сравнительной оценки устойчивости формирования вероятностных распределений многолетнего годового стока и испарения, приводящие к выводу о наличии компенсационного механизма, обеспечивающего устойчивость двумерных распределений;

– методика устойчивого долгосрочного прогнозирования (сценарных оценок) малообеспеченных характеристик годового стока на основе стохастических моделей с уменьшенными параметрическими шумами за счет использования двумерных и условных распределений;

– закартированные результаты оценок вероятностных характеристик многолетнего годового испарения, степени статистической устойчивости формирования стока и испарения на ЕТР и долгосрочные оценки возможного вероятностного режима годового стока Пермского края.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на научных семинарах кафедры гидрофизики и гидропрогнозов, итоговых сессиях ученого Совета РГГМУ (2007 г., 2008 г.), на конференциях «О-Мега форум» в рамках III международного полярного года РГГМУ (2008 г.), «Географическое образование и наука в России: история и современное состояние» СПбГУ, гидрометеорологическая секция (2008 г.), «Водный транспорт России: история и современность», ФГОУ ВПО СПГУВК (2009 г.).

По теме диссертации опубликовано 6 работ (3 по списку ВАКа).
Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения; четырех глав; заключения; списка литературы, содержащего 43 источника; 7 приложений. Работа выполнена на 131 странице текста, включая 25 рисунков и 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении излагается актуальность темы, а также основные цели и задачи диссертации.

В первой главе обосновывается мотивации проводимых исследований. Традиционные методы гидрологических расчетов базируются либо на непосредственных многолетних рядах наблюдений, либо на эмпирических зависимостях, полученных по данным наблюдений. Такой подход достаточно обоснован, пока многолетний гидрометеорологический режим можно рассматривать как статистически стационарный, т. е. пока одна многолетняя реализация случайного процесса формирования стока может рассматриваться как репрезентативный представитель случайного процесса в целом. В гидропрогнозах процессы рассматриваются как эволюционные (иначе нет прогностической задачи), а значит практически любая методика оценки изменений водного режима (в том числе и долгосрочных) опирается не на фактические ряды, а на генетическую (в том числе стохастическую) модель формирования стока. Решение же моделей может быть и неустойчивым. Именно это обстоятельство было обнаружено в отношении статистических начальных моментов многолетнего стока для регионов России, расположенных, в основном, южнее 55° северной широты (где значения коэффициентов стока незначительны). Причем эта неустойчивость именно физического характера, она не имеет непосредственного отношения к неустойчивости статистических оценок моментов в связи с недостаточной продолжительностью наблюдений.

Неустойчивость была обнаружена на моделях формирования стока, приводящих к семейству кривых Пирсона, а именно при анализе системы дифференциальных уравнений для начальных моментов m_n ($n = \overline{1, 4}$):

$$\begin{aligned}
dm_1/dt &= -(\bar{c} - 0,5G_{\tilde{c}})m_1 - 0,5G_{\tilde{c}\tilde{N}} + \bar{N}; \\
dm_2/dt &= -2(\bar{c} - G_{\tilde{c}})m_2 + 2\bar{N}m_1 - 3G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_1 + G_{\tilde{N}}; \\
dm_3/dt &= -3(\bar{c} - 1,5G_{\tilde{c}})m_3 + 3\bar{N}m_2 - 7,5G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_2 + 3G_{\tilde{N}}m_1; \\
dm_4/dt &= -4(\bar{c} - 2G_{\tilde{c}})m_4 + 4\bar{N}m_3 - 14G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_3 + 6G_{\tilde{N}}m_2,
\end{aligned} \tag{1}$$

где $c = 1/(k\tau) = \bar{c} + \tilde{c}$; $\bar{N} = X/\tau = \bar{N} + \tilde{N}$ (\bar{c} и \bar{N} – математические ожидания; \tilde{c} и \tilde{N} – белые шумы с интенсивностями $G_{\tilde{c}}$, $G_{\tilde{N}}$ и взаимной интенсивностью $G_{\tilde{c}\tilde{N}}$); k – коэффициент стока; τ – время релаксации бассейна.

Из системы (1) видно, что при $\bar{c} < 0,5nG_{\tilde{c}}$ производная $dm_n/dt > 0$, т. е. $m_n \rightarrow \infty$. Это и есть формальный признак неустойчивости. Если обозначить $\beta = G_{\tilde{c}}/\bar{c}$, то неустойчивость для момента n -го порядка m_n возникает при $\beta > 2/n$ (m_3 : $\beta > 2/3$, m_2 : $\beta > 1$, m_1 : $\beta \rightarrow 2$). Чем старше момент, тем меньшая относительная интенсивность шума $G_{\tilde{c}}$ требуется для его неустойчивости. Неустойчивость – индикатор того, что бассейны, в которых она имеет место, формируют сток по более сложной схеме, чем это следует из уравнения Пирсона. Например, распределения плотности вероятности двумодальны или имеют «толстый хвост». В последнем случае модель перестает контролировать (статистически предсказывать) появление значительных расходов воды (выбросов). Формально это означает, что при $G_{\tilde{c}} \approx \bar{c}$ мультипликативная составляющая в системе (1) стремится к нулю и при прогнозах для определения прогнозных моментов $m_n^{\text{пр}}$ производится операция деления на 0 (а «на нуль делить нельзя»).

Для преодоления возникшей проблемы в РГГМУ была разработана методология частично инфинитного моделирования, суть которой заключается в следующем. Неустойчивость рассматривается как атрибут процессов развития, а так как развитие системы означает появление (зарождение) у нее новых свойств (фазовых переменных), то включение в модель формирования стока новых переменных (наряду с расходом воды) уменьшает мультипликативный шум за счет частичного перераспределения внешнего воздействия на внутреннюю реак-

цию бассейна. Вместо одномерного уравнения ФПК применяется n -мерное

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\sum_{i=1}^n \frac{\partial(A_i p)}{\partial Y_i} + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \frac{\partial^2(B_{ij} p)}{\partial Y_i \partial Y_j}, \quad (2)$$

где p – плотность вероятности; $\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n)$ вектор состояния; A_i, B_{ij} – коэффициенты сноса и диффузии.

Методами фрактальной диагностики было установлено, что на ЕТР размерность пространства вложения (т. е. значение n в уравнении (2)) меняется, в основном, в пределах 1–3 (рис. 1).

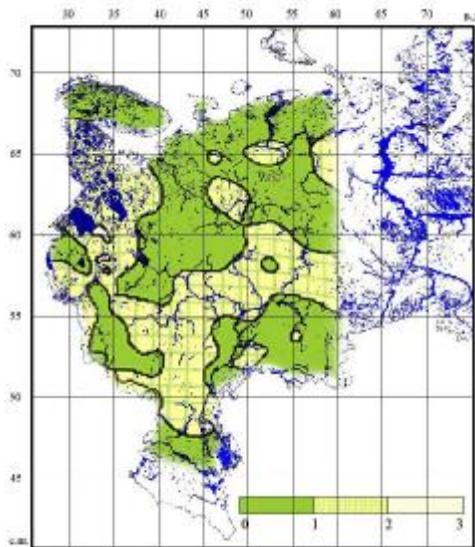


Рис.1. Распределение размерности пространства вложения для годового стока ЕТР

При этом сотрудниками кафедры гидрофизики и гидропрогнозов РГГМУ была установлена статистически значимая зависимость фрактальной размерности от испарения (и приземной температуры воздуха рис. 2). (Влияния на нее свойств подстилающей поверхности водосборов обнаружено не было.)

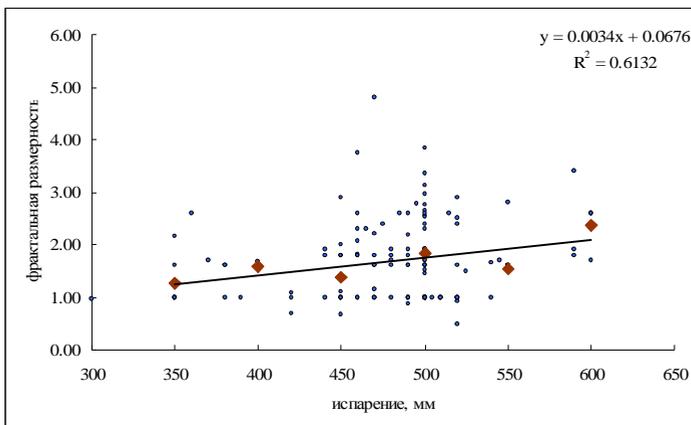


Рис.2. Зависимость фрактальной размерности от испарения

Эти результаты и явились мотивацией для выполнения данной диссертации. Необходимо было найти пути перехода от традиционно используемых в гидрологии распределений $p(Q)$ к распределениям $p(Q, E)$ и на основе последних выявить возможности по повышению устойчивости долгосрочных прогнозов малообеспеченных расходов воды (задачи, которые при этом решались, сформулированы выше).

Во второй главе излагается методика (ее сильные и слабые стороны) формирования рядов многолетнего испарения и картируются результаты их статистической обработки. Обычно считается, что уравнение водного баланса бассейна для годовых интервалов осреднения имеют вид

$$\bar{X} = Q + E \pm \Delta U, \quad (3)$$

где ΔU – изменение запасов воды в почво-грунтах.

Предполагается, что при многолетнем осреднении величина $\Delta \bar{U}$ стремится к нулю. Это дает основание по нормам \bar{X} и \bar{Q} вычислять многолетнюю норму испарения. Построены соответствующие карты распределения \bar{E} . Однако, для получения годовых значений E такой способ не годится, так как $\Delta U \neq 0$. Прямых непосредственных измерений испарения на стандартной метеорологической сети также не проводится. Однако существует методика А. Р. Константинова, позволяющая по стандартным измерениям приземной температуры воз-

духа и влажности, находить испарение. В ней есть как сильные стороны (теоретическая обоснованность, позволяющая ее распространять на различные по климату регионы), так и слабые (претензии на универсальность, не всегда подтвержденные эмпирическими данными – часто по объективным причинам). Тем не менее на сегодняшний день это, по-видимому, единственная возможность формировать многолетние ряды испарения, опираясь на стандартные, метрологически обоснованные наблюдения.

По данным самого Константинова и работам, в которых комментируется его методика, можно построить график, показывающий как уменьшается погрешность расчета испарения по мере роста интервала осреднения (рис. 3).

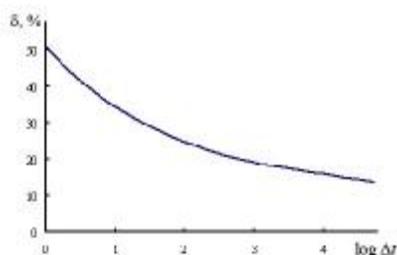


Рис. 3. Зависимость погрешности определения испарения от интервала осреднения Δt

Судя по этой зависимости, хотя погрешность годовых значений испарения достаточно велика (15–20 %), но все-таки соизмерима с погрешностью определения годовых расходов воды (в пределах 10 %).

По данной методике было сформировано 160 рядов испарения за период с 1951 по 1989 гг. по пунктам, относительно равномерно распределенным по ЕТР. Далее ряды были обработаны статистически с целью определения следующих характеристик: нормы и коэффициентов вариации, асимметрии, автокорреляции, а так же коэффициентов испарения. Результаты были закартированы по ГИС-технологиям с использованием компьютерных приложений *ArcView* и *Surfer*. Интерполяция была произведена методом кригинга с эффектом сглаживания изолиний. На рис. 4 представлены карты распределения нормы (в слоях) и коэффициента вариации испарения для ЕТР.

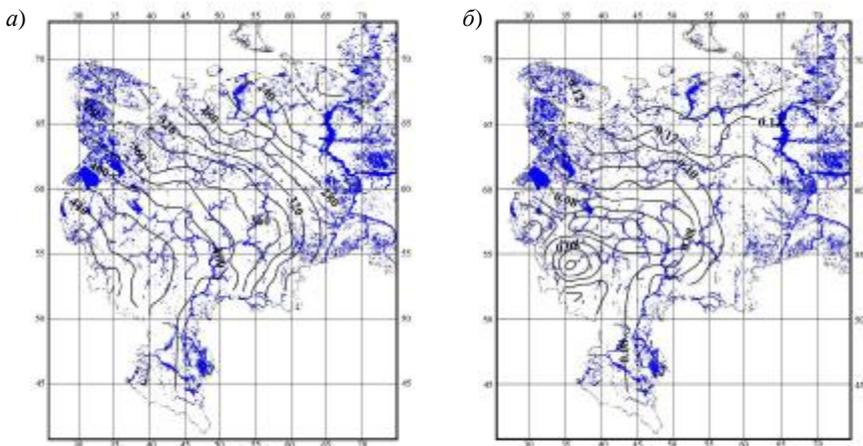


Рис. 4. Распределение по ЕТР нормы (а) и коэффициента вариации (б) испарения

Представленная карта распределения нормы испарения в целом соответствует таковой, полученной балансовым методом. Хотя имеются отличия в южных и западных районах. Причинами различий (они, там где есть, не превосходят 15–20 %) могут быть несовпадение временных интервалов, по которым строились карты; использование разных пунктов наблюдений (в нашем случае из-за отсутствия обработанных данных в некоторых локальных регионах производилась экстраполяция изолиний) и др. Следует обратить внимание, что повсеместное допущение $\overline{\Delta U} \rightarrow 0$ (а именно оно заставляет увязывать карты стока и испарения по балансу $\overline{X} = \overline{E} + \overline{Q}$) может оказаться и не верным. В работах сотрудников кафедры гидрофизики и гидропрогнозов РГГМУ (в частности в магистерской диссертации Е.Ю. Головановой) была показана возможность появления эффекта детектирования (смещение среднего значения относительно нуля) в вероятностных распределениях многолетних запасов воды в почво-грунтах (аналогичный эффект повсеместно наблюдается в рядах стока: коэффициент асимметрии отличен от нуля при практически симметричном распределении годовых сумм осадков).

Карта распределения коэффициента вариации аналогов не имеет, и построена впервые. В целом она соответствует известным результатам в отношении любых гидрометеорологических рядов: чем меньше норма, тем больше коэффициент вариации (норма испарения

к северо-востоку ЕТР уменьшается, а коэффициент вариации C_v увеличивается).

Карту распределения коэффициента асимметрии C_s для испарения построить не удалось. Известно, что даже для рядов стока (которые более надежны, чем ряды испарения) точно вычислить значения C_s не удастся, поэтому ограничиваются районированием отношения C_s/C_v . Для рядов испарения пока не удалось сделать и этого: примерно 46 % рядов имеют отрицательную асимметрию, а отношение C_s/C_v сильно меняется, иногда, на порядок.

Примерно такая же картина складывается в отношении коэффициента автокорреляции. Он меняется от $-0,25$ до $+0,41$ с преобладанием небольших значений в пределах полосы $\pm 0,15$, хотя прослеживается тенденция к преобладанию отрицательных значений в южных районах.

Полученные карты, тем не менее, позволяют их использовать для построения двумерных распределений $p(Q, E)$ (в нормальном приближении – с большой надежностью) и выявлять степень статистической устойчивости формирования не только многолетнего стока, но и испарения.

В третьей главе приводятся результаты теоретического анализа влияния увеличения размерности фазового пространства модели на ее устойчивость, а также дается эмпирическое обоснование теоретического вывода.

Устойчивость моментов в расширенной (за счет включения в уравнение испарения) модели ФПК (2) будет в случае сжимаемости частично инфинитной среды для двумерного распределения:

$$\text{div} \mathbf{A} = \sum \partial A_i / \partial Q_i = -(\bar{c}_Q - 0,5G_{\tilde{c}_Q}) - (\bar{c}_E - 0,5G_{\tilde{c}_E}) < 0, \quad (4)$$

где \bar{c}_E и $G_{\tilde{c}_E}$ математическое ожидание и интенсивность шума мультипликативной составляющей модели испарения.

Из выражения (4) следует, что учет дополнительной фазовой переменной в виде испарения увеличивает шансы на сжимаемость, если конечно, и для нее нет тенденции к неустойчивости ($G_{\tilde{c}_E} \rightarrow \bar{c}_E$). Чтобы проверить это утверждение в диссертации выражение (4) было приведено к виду (с учетом того, что $\beta = G_{\tilde{c}} / \bar{c}$):

$$\text{div} \mathbf{A} = -\bar{c}_Q (1 - 0,5\beta_Q) - \bar{c}_E (1 - 0,5\beta_E). \quad (5)$$

Для ЕТР были построены карты распределения β_Q и β_E . Вычисления проводились по полученной ранее формуле

$$\beta = 2k \ln r + 2, \quad (6)$$

где k – коэффициент стока (испарения); r – коэффициент автокорреляции стока (испарения) при годовой сдвиге.

Вся информация для вычислений по формуле (6) была получена в результате выполнения главы 2. На рис. 5 представлены карты распределения зон неустойчивости по стоку (а) и по испарению (б).

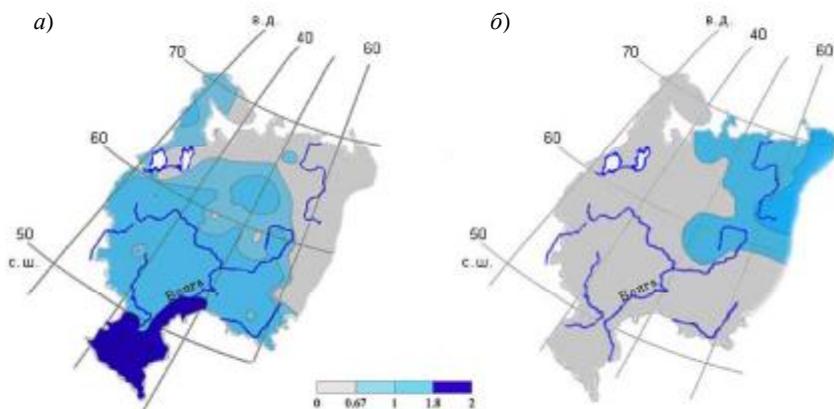


Рис. 5. Распределение зон неустойчивости по стоку (а) и по испарению (б)

Из рис. 5 видно, что имеет место относительная «зеркальность» зон неустойчивости. Причем, как видно из табл. 1, формулы (5) и рис. 6, каждая из переменных стабилизирует другую (тем в большей степени, чем неустойчивее последняя).

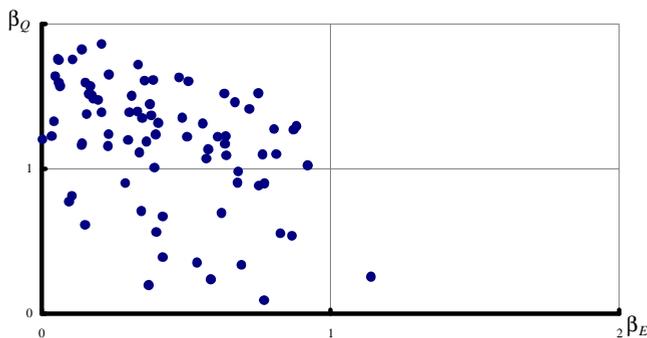
Таблица 1

Влияние широты местности на численные значения критериев устойчивости

№ п/п	Градус северной широты	Река – створ	β_Q	β_E
1	44,22	Кума – ст-ца Александрийская	1.93	0.00
2	48,00	Кундрючья – ст-ца Владимирская	1.78	0.01
3	50,63	Оскол – г. Старый Оскол	1.49	0.06

Продолжение табл. 1

№ п/п	Градус северной широты	Река – створ	β_Q	β_E
4	51,45	Большой Караман – пгт. Советское	1.85	0.02
5	52,67	Чагра – с. Новотулка	1.78	0.01
6	53,68	Кондурча – п. Украинка	1.59	0.33
7	54,22	Кондурча – с. Кошки	1.44	0.36
8	55,78	Летка – с. Казань	1.24	0.31
9	56,65	Уфа – г. Красноуфимск	1.20	0.04
10	57,48	Полисть – д. Подтополье	1.16	0.35
11	58,02	Нея – д. Буслаево	0.90	0.29
12	59,50	Воложба – д. Воложба	1.35	0.35
13	60,57	Юг – д. Гаврино	0.90	0.30
14	61,72	Вычегда – г. Сыктывкар	1.29	0.61
15	62,23	Яренга – с. Тохта	1.46	0.64
16	64,72	Пинега – с. Кулогоры	0.34	0.61
17	65,82	Пеза – д. Игумново	0.25	0.87

Рис. 6. Взаимозависимость между критериями устойчивости по стоку β_Q и испарению β_E

В четвертой главе приводится сравнительная оценка обеспеченных расходов воды, вычисленных и спрогнозированных по различным вариантам кривых обеспеченности и моделям в зонах устойчивого и неустойчивого формирования стока. Один из основных вариантов заключается в следующем. По имеющимся совместным рядам расхода и испарения строится эмпирическая двумерная гистограмма, рисунок 7, а. Если ориентироваться на безусловное распределение $p(Q)$ (рис. 7, б темные столбцы), то его хвост почти всегда более пологий (поднят) по сравнению с условным распределением $p(Q/E = \bar{E})$, построенным только по точкам, расположенным в интервале ΔE , обрамляющим центр \bar{E} распределения (минимальное число интервалов равно трем).

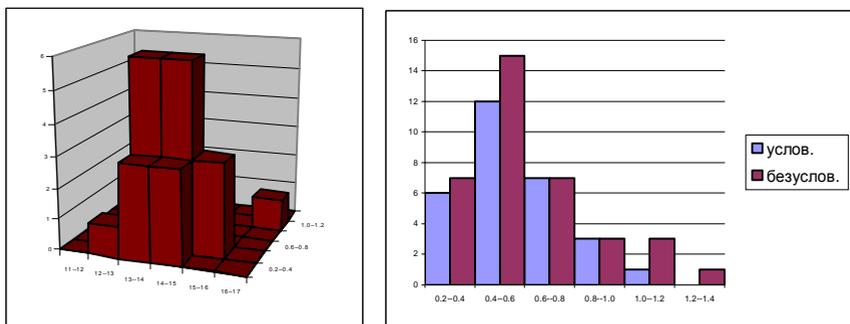


Рис. 7. Двумерная (а) и одномерная (б) гистограммы (р. Тихая Сосна – г. Алексеевка)

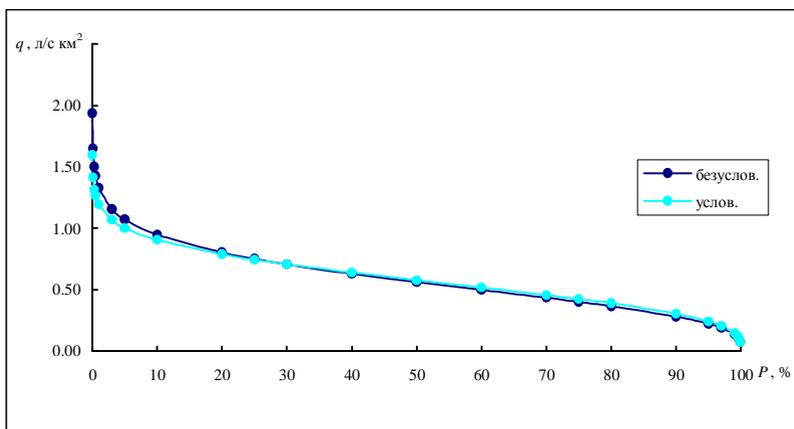


Рис. 8. Пример условной и безусловной кривой обеспеченности (р. Тихая Сосна – г. Алексеевка)

Это приводит к тому, что проэкстраполированный в зону малых обеспеченностей хвост условного распределения быстрее приближается к оси расходов, см. табл. 2, рис. 8.

Таблица 2

Отклонения расходов малой обеспеченности, вычисленные по условным и безусловным кривым распределения Крицкого–Менкеля

Река – Пункт	Обеспеченность, %			
	0,01	0,1	1	10
	Относительное отклонение ординаты кривых обеспеченности: ((безусл – усл)/безусл)100 %			
Зона устойчивого формирования стока				
р. Пеза – д. Игумново	-3,5	-2,8	-2,0	-0,9
р. Унжа – г. Кологрив	5,8	-1,7	-8,0	-11,7

Продолжение табл. 2

Река – Пункт	Обеспеченность, %			
	0,01	0,1	1	10
	Относительное отклонение ординаты кривых обеспеченности: ((безусл – усл)/безусл)100 %			
р. Белая – д. Сыртланово	11,3	7,6	3,7	-0,1
р. Печора – д. Якша	–	–	–	–
р. Паша – с. Часовенское	-6,8	-4,6	-1,6	1,0
р. Сясь – д. Яхново	-0,8	-0,7	-0,5	0,1
р. Мста – д. Девкино	–	–	–	–
р. Луга – ст. Толмачево	–	–	–	–
р. Сороть – д. Осинкино	-5,9	-5,8	-5,4	-4,6
ср.	0,02	-1,3	-2,3	-2,7
Зона неустойчивого формирования стока				
р. Юг – пгт. Подосиновец	18,0	17,9	17,4	15,9
р. Тихая Сосна – г. Алексеевка	28,6	23,6	17,9	10,8
р. Синухоа – с. Синуохин Брод	11,9	7,9	3,4	-1,6
р. Свяяга – с. Ивашевка	-10,7	-7,9	-4,6	-0,1
р. Самара – с. Елшанка	47,0	36,5	25,4	12,7
р. Цна – г. Княжево	11,9	9,9	7,3	2,7
р. Случь – с. Сарны	60,3	46,9	32,8	16,3
р. Десна – с. Разлеты	-5,7	-4,4	-2,8	-0,8
р. Псел – с. Запселье	13,8	13,3	12,4	10,9
р. Днепр – г. Смоленск	-3,5	-2,2	-1,0	0,4
р. Сейм – с. Лебяжье	–	–	–	–
ср.	17,2	14,2	10,8	6,7

Конечно, погрешность определения нормы, C_v и C_s по условной кривой больше, чем по безусловной (из-за неизбежного уменьшения числа точек, попадающих в центральный интервал ΔE и группирующихся вокруг \bar{E}). Например, при $C_v = 0,3$ и уменьшении объема выборки в два раза погрешность определения C_v увеличивается с 9,53 до 13,5%, т. е. на 30 %. Однако применение условных распределений открывает возможность корректного прогнозирования в зонах с неустойчивым формированием стока. Природу этой корректности можно пояснить на примере уравнения для первого момента из системы (1). Для равновесного климатического сценария можно принять, что $dm_1^{np} / dt = 0$. Тогда

$$m_1^{np} = (-0,5G_{\tilde{c}_N} + \bar{N}) / (\bar{c} - 0,5G_{\tilde{c}}). \quad (7)$$

Если $\beta = G_{\tilde{c}} / \bar{c} \rightarrow 2$, то надо делить на величину близкую к нулю. Если мы находимся в неустойчивых южных регионах ЕТР, где

$k=0,05$, то $\bar{c}=20$, а $G_{\bar{c}}$ близка к 40. Даже, если β далек от двух, то все равно из-за неизбежных погрешностей при параметризации мы имеем малую разность двух неточных величин. Это делает расчеты очень неточными (для старших моментов ситуация только усугубляется).

Если же мы перейдем к параметризации и прогнозу с использованием условных распределений и в качестве внешнего воздействия возьмем не просто $\bar{N} = \bar{X}$, а $\bar{N} = \bar{X} - \bar{E}$, то $\bar{c} \rightarrow 1$ и шуметь практически «нечему» ($G_{\bar{c}} \rightarrow 0, \beta \rightarrow 0$).

Результаты подобного прогнозирования для Пермского края, где имеет место неустойчивость по старшим моментам, представлена на рис. 9.

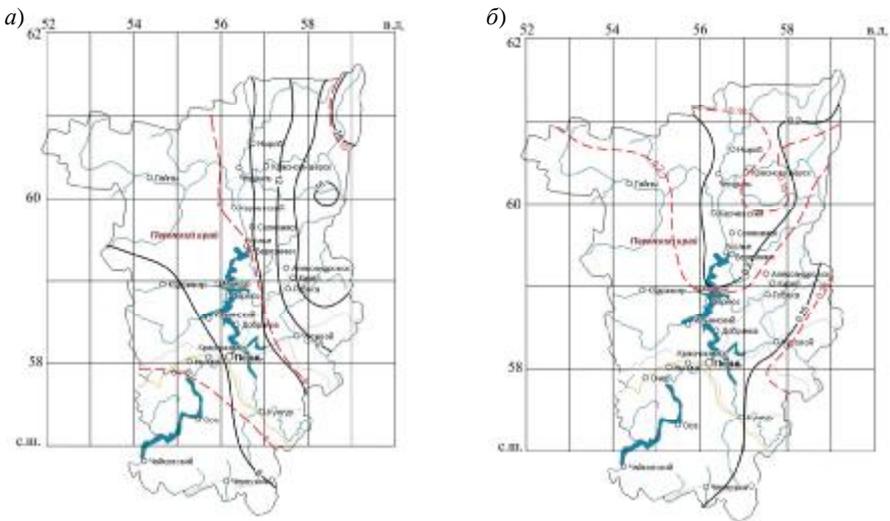


Рис. 9. Пример долгосрочных оценок вероятностных характеристик годового стока Пермского края для одного из наиболее вероятного климатического сценария на 2050 год (штриховые изолинии): а) модуль стока; б) коэффициент вариации

В заключении сформулированы основные результаты исследований:

1. Впервые сформированы многолетние ряды годового испарения, статистическая обработка которых позволила получить набор их основных статистических характеристик и построить карты распределения нормы (независимо от балансового метода) и коэффициента вариации испарения (впервые) для ЕТР.

2. Впервые выполнена численная оценка критерия устойчивости начальных моментов многолетнего годового испарения ЕТР; его картирование и сравнение с распределением аналогичного критерия для речного стока позволили выявить компенсационный механизм, обеспечивающий статистическую устойчивость двумерных совместных распределений стока и испарения.

3. Предложена методика использования двумерных вероятностных распределений стока и испарения для обеспечения устойчивости прогнозирования долгосрочных изменений обеспеченных расходов воды путем перехода к условным распределениям и разгрузки мультипликативных составляющих, воздействующих на речные бассейны шумов.

4. Получены устойчивые сценарные оценки нормы и коэффициентов вариации многолетнего годового стока для Северо-Западного региона и Пермского края (представляющих зоны устойчивого и неустойчивого формирования стока) для наиболее вероятного климатического сценария на 2050 год.

По теме диссертации опубликованы следующие работы (жиром отмечены публикации в рецензируемых журналах из списка ВАК):

1. Обеспечение устойчивости вероятностных характеристик при изменяющемся климате // Сборник трудов "О-Мега форум", 2008, С. 131–133 (в соавторстве с Чистяковым Д. В., Гайдуковой Е. В.).

2. Идентификация статистических характеристик годового испарения на ЕТР для формирования диагностических моделей в задачах частично инфинитной гидрологии // «Естественные и технические науки» № 2, 2009, С. 200–208 (в соавторстве с Коваленко В. В., Гайдуковой Е. В.).

3. Частично инфинитное расширение фазового пространства модели формирования многолетнего речного стока для статистически устойчивого прогнозирования катастроф // «Естественные и технические науки» № 2, 2009, С. 193–199 (в соавторстве с Коваленко В. В., Гайдуковой Е. В., Чистяковым Д. В.).

4. Оценка статистических характеристик многолетнего речного стока в регионах его неустойчивого (катастрофического) формирования // «Естественные и технические науки» № 3, 2009, С. 231–237 (в соавторстве с Коваленко В. В., Гайдуковой Е. В.).

5. Прогнозы речного стока и их использование при оценке экологического состояния водных объектов // «Водный транспорт России: история и современность», СПб.: ФГОУ ВПО СПГУВК, 2009, С.

196–200 (в соавторстве с Лесничим Л. И., Чистяковым Д. В., Поляковой А. В.).

6. Устойчивость формирования вероятностного режима многолетнего годового стока на Европейской территории России // Электронный журнал «Исследовано в России», 089, стр. 1161–1166, 2009, <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2009/089.pdf>

Отпечатано с готового оригинал-макета

Лицензия ЛР № 0203090 от 30.12.96

Подписано в печать с оригинал-макета 14.05.2008

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Печать трафаретная.

Уч.-изд. л. 1,0. Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ №

РГГМУ, 195196, СПб, Малоохтинский пр. 98