ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

УДК 556.048,556.167,556.5.01



ФИЛИППОВА Ирина Александровна

Минимальный сток рек Европейской части России и его оценка в условиях изменения климата

Специальность 25.00.27

Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Москва – 2014

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

Научный руководитель: **Болгов Михаил Васильевич**

доктор технических наук

Официальные оппоненты: **Фролова Наталья Леонидовна**

доктор географических наук, профессор

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», географический факультет, кафедра гидрологии суши

Долгов Сергей Владимирович

кандидат географических наук

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт географии Российской академии наук

Ведущая организация:
Федеральное государственное бюджетное учреждение Государственный Гидрологический Институт.

Защита состоится «19» февраля 2015 года в 14-00 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 « » января 2014 года.

Ученый секретарь
Диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук,

профессор Р.Г. Джамалов

Общая характеристика работы

Актуальность работы.

Многочисленные исследования, проведенные в последние десятилетия на основе актуальных данных гидрометеорологического мониторинга, показывают, что происходящие изменения климата в ряде крупных регионов приводят к существенным изменениям водного режима рек (Водные ресурсы, 2008). Учитывая уже состоявшееся потепление и высокую вероятность продолжения этой тенденции в ближайшие десятилетия, на первый план выходит проблема оценки изменений речного стока, тем более, что обеспечение нужд водохозяйственного и гидротехнического проектирования требует надежного определения параметров речного стока. Особое внимание в этой связи обращается на расчеты минимального стока, зачастую являющегося лимитирующим фактором социально-экономического развития.

Разработка методов количественного описания минимального стока всегда представляла собой важную задачу и для отечественной, и для зарубежной гидрологии, однако вопрос о существовании некой «теоретической» модели, наилучшим образом описывающей натурные данные о минимальном стоке, до сих пор остается открытым. В недавнем прошлом решение практических задач облегчалось тем, что при гидрологическом обосновании водохозяйственных мероприятий на короткие (в геологическом масштабе) сроки допускалась гипотеза стационарности процессов стока, что имело принципиальное значение для методики расчетов. Характер произошедших гидрометеорологических изменений вынуждают по-новому подходить к назначению параметров водохозяйственных систем и правил их эксплуатации. Усилившиеся процессы глобального потепления ставят под сомнение концепцию стационарности многолетних колебаний гидрометеорологических величин, и сейчас применение теоретических кривых распределения не позволяет

добиться необходимого согласования теоретических и эмпирических распределений. В этих условиях оценка минимального стока на фоне произошедших и будущих климатических изменений становится одной из актуальных проблем инженерной гидрологии.

Целью данной работы является изучение характера многолетних колебаний минимального стока в условиях климатических изменений и применение новых подходов и методов к его расчету. В соответствии с поставленной целью в работе решались следующие **задачи:**

1. Установление общих закономерностей колебаний минимального стока в пределах условно стационарного периода: получение обобщенных оценок параметров распределений минимального стока на гидрологически однородных территориях, а также изучение статистических свойств маловодных периодов.
2. Изучение пространственных закономерностей колебаний минимального стока и степени синхронности его колебаний, а также изменений параметров распределения минимального стока, произошедших вследствие потепления климата.
3. Исследование статистической структуры рядов минимального стока в бассейне р. Волги с привлечением новейших данных наблюдений за стоком.
4. Изучение изменения характеристик регулирования стока водохозяйственными системами под влиянием смены гидрологического режима.
5. Обоснование возможности применения к расчету минимального стока в нестационарных условиях метода «сумма распределений».

Методика и исходная информация.

В качестве объектов исследования рассматривались бассейны малых и средних рек на территории ЕТР. Предмет исследований – минимальный 30-

тидневный сток за зимнюю и летне-осеннюю межень. В основе исследования лежат вероятностно-статистические методы описания многолетних колебаний стока с привлечением методики группового анализа данных, модифицированного алгоритма районирования территории по синхронности колебаний стока, аппарата двумерных пространственно-корреляционных функций. Также в работе была использована модель притока к Москворецкой системе водохранилищ.

Статистическая обработка проводилась с помощью пакетов Excel, Statistica, HydroStatCalc2012 и программных средств, разработанных в Лаборатории моделирования поверхностных вод ИВП РАН.

Основные защищаемые положения.

1. На основе принципов совместного анализа для рек ЦЧО получены территориально общие статистические оценки параметров распределения минимального стока и показана возможность использования распределения Гумбеля для вероятностного описания минимального стока в пределах условно стационарного периода.
2. При исследовании свойств маловодий на территории ЕТР в качестве нормируемой характеристики предложено рассматривать продолжительность дефицитных периодов стока. Показано, что для изучения статистических свойств рядов продолжительностей дефицитных периодов наилучшим образом подходит распределение Вейбулла.
3. Исследование статистической структуры рядов наблюдений в бассейне р. Волги выявило значимые изменения минимального стока и нарушение стационарности в его рядах, соответствующее смене фазы водности для обширной территории. Смена режима минимального стока подчиняется географическим закономерностям.
4. Для усовершенствования метода расчета минимального стока предлагается рассматривать смену фаз водности в бассейне как смену

двух условно стационарных состояний гидролого-климатической системы.

5. Для расчета минимального стока в условиях климатических изменений на основе предложенной гипотезы рекомендуется метод «суммы распределений».

Практическая значимость работы заключается в том, что на основе регионального анализа климатически обусловленных изменений режима минимального стока сделан вывод о возможности применения метода «суммы распределений» для расчета минимального стока в нестационарных условиях. Использование полученных результатов позволит повысить обоснованность гидрологических расчетов минимального стока и точность расчетных характеристик, а, следовательно, и степень надежности принятия проектных решений.

Результаты анализа изменений характеристик гидрологического режима и метод расчета минимального стока в условиях изменяющегося климата вошли в отчет по Государственному контракту №№ 5/1-2012 НИОКР в рамках Федеральной целевой программы «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012– 2020 годах», были использованы при составлении «Методических рекомендаций по прогнозу вероятностных изменений характеристик стока в бассейне р. Волги» (Министерство природных ресурсов и экологии, Москва, 2013 г.). Ряд важных практических результатов получен при выполнении проекта по Гранту РФФИ 12-05-01034-а «Разработка метода прогнозирования стока рек в условиях неопределенности климатических изменений».

Разработка ряда разделов диссертации проведена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» по теме «Разработка моделей и технологий дистанционной диагностики состояния и режима водных объектов суши» и «Разработка методов мониторинга и прогноза состояния водных объектов в условиях нестационарного климата и

антропогенного воздействия в разных регионах Российской Федерации» (2012–2013).

Научная новизна заключается в следующем:

1. Впервые для бассейна р. Волги выполнено исследование изменений статистических параметров (среднего, коэффициента вариации) и пространственной коррелированности минимального стока в условиях современной климатической нестабильности.
2. Обнаружены географические закономерности в пространственном распределении изменений режима минимального стока в бассейне р. Волги.
3. Для описания колебаний минимального стока впервые предложена модель смены двух условно стационарных состояний гидролого-климатической системы, на основе которой в нестационарных условиях используется метод расчета минимального стока в виде «суммы распределений».
4. С помощью предложенного метода получены значения минимального стока расчетной обеспеченности 122 рек бассейна р. Волги.

Апробация работы. Результаты диссертационного исследования докладывались на Международной научной конференции "Экстремальные гидрологические события: теория, моделирование и прогнозирование" (Москва, 3 – 6 ноября 2003); Международной научной конференции «Экстремальные гидрологические события в Арало-Каспийском регионе» (Москва, 19–20 октября 2006г.); Международной научно-практической конференции «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов» (Пермь, 28– 30 мая 2013 г); Всероссийской научной конференции «Водная стихия: опасности, возможности прогнозирования, управления и предотвращения угроз» (Краснодар, 07–13 октября 2013г.); на VII гидрологическом съезде (С.-Петербург, 19 – 21 ноября 2013г.); Заседании Научного совета РАН по теории климата Земли (Институт физики

атмосферы РАН, Москва, 14 декабря 2013); 6th International Conference on Water Resources and Environmental Research «Water& Environmental Dynamics» (Koblenz, Germany, 3–7 June 2013); Nothern European FRIEND:Flow Regimes from International Experimental and Network Data, Project 2, Low Flows (22–24 May,2000. Poland); The Grand Challenges Facing Hydrology in the 21st Century: Dooge Nash International Symposium (Dublin, Ireland, 2014).

Публикации. Автором опубликовано 13 печатных работ, в том числе 4 в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 155 источников. Работа изложена на 210 страницах текста, включает 53 рисунка, 10 таблиц и 8 приложений.

Автор выражает благодарность научному руководителю д.т.н. Болгову М.В. за руководство и всестороннюю помощь в написании работы.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, определены цели и задачи работы, охарактеризована ее научная новизна, практическая значимость, приведены сведения об исходной информации.

В главе 1 предложен обзор основных методов и результатов в области исследования минимального стока. В *разделе 1.1* сформулированы основные понятия «*межень*» и «*минимальный сток*» и приведены основные расчетные характеристики, используемые в настоящее время в отечественной и зарубежной практике; в *разделе 1.2* рассмотрены основные физико-географические факторы формирования минимального стока рек и его изменчивости. *Раздел 1.3* представляет краткий исторический обзор исследований минимального стока и процессов его образования; *раздел 1.4* оценивает современное состояние проблемы расчетов минимального стока,

поскольку фиксируемое в последние десятилетия потепление климата существенно отражается на режиме минимального стока и ставит под вопрос возможность применения для его описания и расчетов сложившихся традиционных приемов. В *разделе 1.5* рассмотрены особенности статистического анализа стока, заключающиеся в том, что при его исследовании существует необходимость а) в принятии гипотезы стационарности его многолетних колебаний и б) исследовании циклической структуры рядов для выявления направленных изменений стока. На сегодняшний день гидрологи отдают предпочтение моделям стационарных случайных процессов, поскольку их применение вызывает меньше трудностей. В *разделе 1.6* изложены основные вероятностно-статистические методы расчета минимального стока, опирающиеся на концепцию стационарности и применяемые в настоящий момент. В разделе подчеркивается, что типы и параметры распределения вероятностей минимального стока в настоящее время считаются предметом исследований, поскольку указанные распределения дают существенные расхождения в зоне малых значений случайной величины.

На основе литературного обзора и анализа публикаций в главе сформулированы основные задачи, имеющиеся в области изучения минимального стока, а именно: разработка методов расчета характеристик минимального стока при различном объеме исходной информации с учетом влияния происходящих климатических изменений.

Вторая глава посвящена региональным исследованиям вероятностных закономерностей колебаний минимального стока в пределах условно стационарного периода. Поскольку изучение структуры временных рядов минимального стока рек ЕТР до 1980 года не обнаруживало статистически значимых нарушений однородности и стационарности, то период с 1936 по 1980 год был признан репрезентативным (Амусья и др.,1991) и в данной

главе использовались ряды наблюдений за минимальным стоком до 1980 года.

В *разделе 2.1.3* для рек Центрально-Черноземной области проведен статистический анализ пространственного распределения параметров ФРВ и получены их территориально общие устойчивые оценки, согласующиеся с физико-географическими условиями формирования минимального стока в данном регионе.

Объем исходной гидрометрической информации часто недостаточен для определения параметров ФРВ с необходимой точностью; в подобных случаях применяются методы, позволяющие увеличить объем используемой независимой информации за счет привлечения и обобщения дополнительных данных наблюдений с других водосборов, имеющих более или менее сходные условия формирования стока. В диссертации с этой целью использована методика совместного анализа Крицкого-Менкеля и получены обобщенные оценки коэффициентов C_s / C_v.

Основная идея, предложенная С.Н. Крицким и М.Ф. Менкелем, заключается в разделении дисперсии оценок параметров распределения объединяемых водосборов на две составляющие – случайную, вызванную ограниченностью выборок, и географическую, которая определяется географическими различиями (климатическими и ландшафтными особенностями водосборов). Объединение водосборов в однородный район происходит при соблюдении двух условий: 1)$\varepsilon_{\text{геогр}}. \leq \varepsilon_{\text{случ.}}$ и 2) достижения минимума дисперсии для объединенной совокупности, что означает их принадлежность к общему распределению.

Процедура совместного анализа была осуществлена с учетом пространственной скоррелированности данных наблюдений.

На рис. 1 приведены схемы районов, выделенных на основе объединенного анализа параметра C_S / C_V в пределах рассматриваемого

региона. Районы в целом соответствуют положению природных ландшафтных зон в бассейне. Средние по районам значения параметров C_s / C_v и соответствующие дисперсии приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты районирования на основе объединенного анализа параметра C_s / C_v (числитель – зима, знаменатель – лето)

Номер района	Количество пунктов	Cv	C_s / C_v	$\varepsilon^2_{ср}$
I	12/12	0,26/0,24	2,5/2,5	0,27/0,21
II	28/23	0,4/0,41	2,0/2,0	0,076/0,09
III	15/14	0,68/0,71	2,5/2,5	0,11/0,15

а) б)

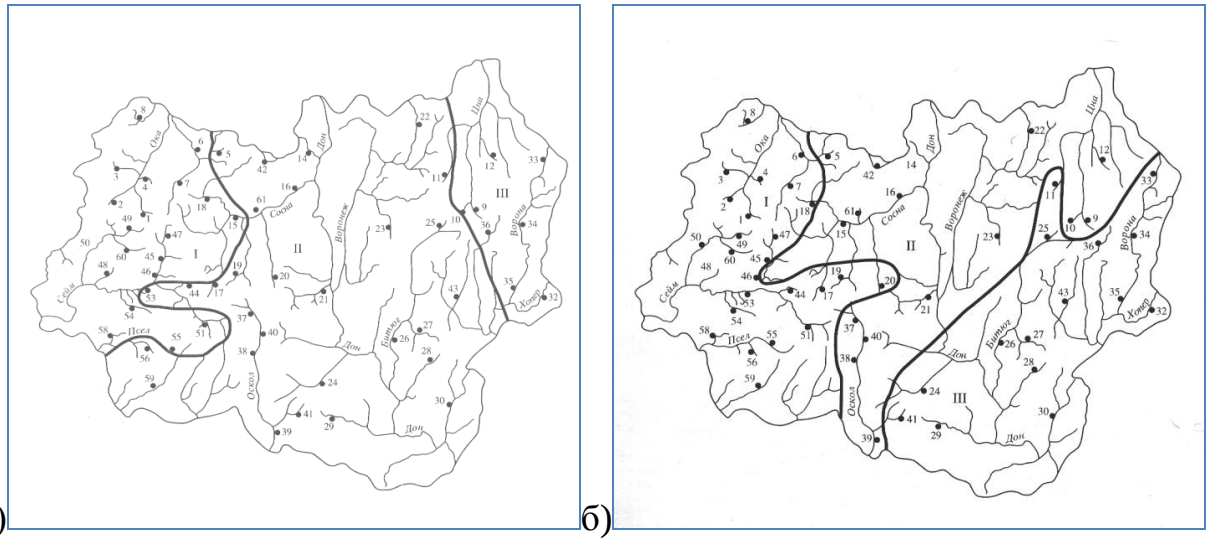


Рис. 1. Районы бассейна Верхнего Дона, однородные по значениям C_s / C_v

(а – лето, б – зима)

В *разделе 2.1.4* на основе процедуры районирования, предложенной С. Н. Крицким и М. Ф. Менкелем, и последующего группирования нормированных данных в пределах однородных районов, уточнен выбор

теоретической функции распределения. Для этого была получена осредненная гистограмма распределения минимальных расходов воды (рис.2). Также на рисунке представлены результаты подгонки нескольких распределений: нормальное(1), распределение Гумбеля(2), распределение Крицкого – Менкеля(3) и лог-Пирсоновское распределение(4).

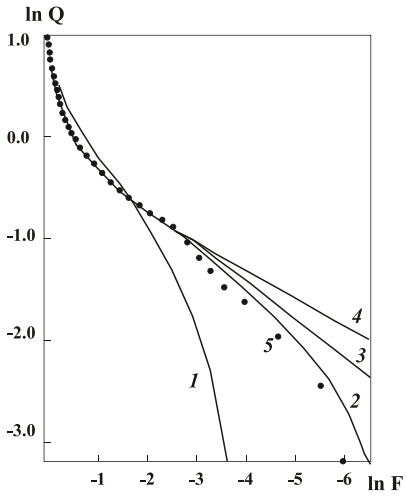


Рис. 2. Результаты подбора стохастических моделей для распределения величин минимального стока (ln Q– натуральный логарифм нормированных расходов воды, ln F– натуральный логарифм функции распределения)

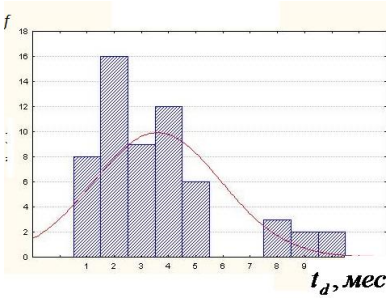
Наилучший результат дает распределение Гумбеля, которое можно рекомендовать в качестве теоретического распределения при описании минимального стока в условно стационарный период.

В *разделе 2.1.5* проведен анализ автокорреляционных функций минимального стока рек ЦЧО, который показал, что первый коэффициент корреляции *r(1)* в большинстве случаев положителен и изменяется в широком диапазоне от 0.7 до –0.25. Пространственная неоднородность *r(1)* для исследуемой территории свидетельствует о неправомерности районирования этой характеристики и нецелесообразности применения методики совместного анализа для определения средних районных величин *r(1)*.

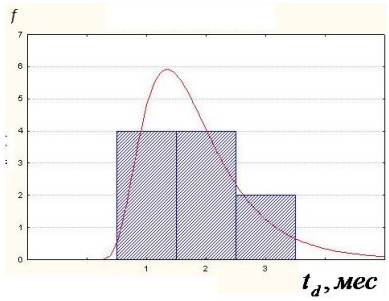
В *разделе 2.2* для исследования характеристик маловодных периодов 99 рек ЕТР за период наблюдений до 1980 г. применяется «пороговый» метод, предложенный В. Евджевичем. Количественная характеристика минимального стока основывается на введении некоего «порогового» значения расхода, ниже которого сток считается меженным и

характеризуется дефицитом воды, а период, в течение которого наблюдается снижение расходов воды ниже порогового, – дефицитным.

В качестве пороговых значений выбраны квантили распределений минимальных расходов различной обеспеченности (50%, 75% и 85%), рассчитанные с помощью распределения экстремумов Гумбеля. По полученным рядам продолжительностей дефицитных периодов для каждой реки построены гистограммы распределения и аппроксимированы различные теоретические распределения при порогах различной обеспеченности. Установлено, что форма эмпирического распределения продолжительностей дефицитного периода становится более симметричной (рис.3) при переходе от порогового значения меньшей обеспеченности к пороговому значению большей обеспеченности (85%).



а)



б)

Рис. 3. Гистограммы продолжительности дефицитного периода р. Чепцы – с. Полом, аппроксимация распределением Вейбулла: а) пороговое значение 50%, б) пороговое значение 85%

Обнаружено, что для статистического описания рядов продолжительности дефицитов воды ниже порога 85% обеспеченности в подавляющем числе случаев наилучшим образом подходит распределение Вейбулла.

С точки зрения статистической структуры рядов продолжительности дефицитных периодов стока, рассматриваемую территорию ЕТР можно считать однородной (табл.2).

Таблица 2. Осредненные значения статистических характеристик рядов продолжительности дефицитных периодов стока для выбранных районов

Район	$\overline{Cv}$	$\overline{Cs/Cv}$
Бассейн рр.Сура, Цна	0,60	1,8
Бассейн В. Оки, Сейма, Псела	0,60	2,3
Бассейн р.В.Днепра, Десны	0,62	2,4
Бассейн р. В Волги	0,60	1,7
Бассейн р. Вятки	0,52	1,3
Бассейн р. Камы	0,68	1,5
Бассейн р. Самары	0,66	1,8
Бассейн р.Урала	0,70	1,7
Бассейн р. Уфы	0,56	1,4

Глава 3 посвящена современным изменениям гидрологического режима рек в маловодные фазы, произошедшим с середины 70-х годов относительно предыдущего периода. В *разделе 3.2* произведена оценка изменения статистических характеристик минимального стока рек ЕТР за период 1978–2010 гг. по отношению к таким же характеристикам за предшествующий период до 1978 г. Результаты, осредненные по гидрографическим районам, представлены в табл. 3.

Таблица 3. Средние по районам величины изменения характеристик минимального стока (в %)

Район	$\Delta Q_{ср}$	ΔC_v	$\Delta Q_{80\%}$	$\Delta Q_{95\%}$
Север	20	20	40	40
Бассейн р. В.Волги	70	-20	90	110
Бассейн р. Камы.	50	-10	50	60
Бассейн р. Дон	90	-16	130	190

Практически на всей территории ЕТР отмечается увеличение нормы минимального стока, особенно в степной и лесостепной зонах. Изменение C_v более неоднородно по территории и по направленности, хотя в целом можно говорить об уменьшении изменчивости для рассматриваемого региона. Таким образом, основной значимой для дальнейших расчетов особенностью современных изменений водного режима рек на рассматриваемой территории является существенное изменение

параметров распределения вероятности (среднего, изменчивости) минимального стока на коротком промежутке времени (последние 30 лет).

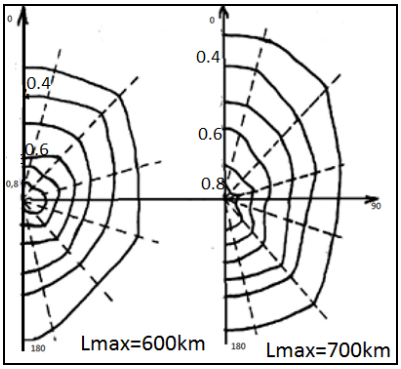
В *разделе 3.3* рассматривается изменение структуры полей сезонного и минимального стока за два периода, соответствующих разным состояниям гидролого-климатической системы: до и после 1978 года. Для анализа пространственной структуры поля минимального стока используются РПКФ – двумерные (развернутые) пространственные корреляционные функции $r=f(l,\varphi)$, представляющие собой зависимости выборочных парных коэффициентов корреляции от расстояния между центрами тяжести водосборов и направления линии, соединяющей эти центры.

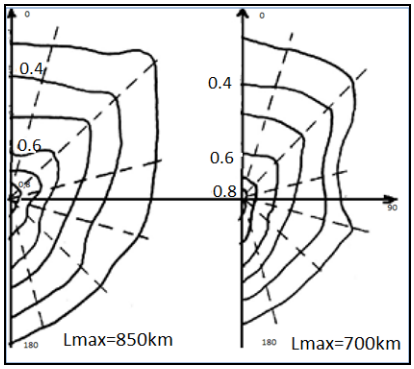
Графики развернутой пространственно-корреляционной функции построены в полярной системе координат (для правой полуплоскости в силу центральной симметрии РПКФ); расстояния l откладывались на биссектрисах углов соответствующих секторов. Вид полученных кривых линий уровня (изокоррелят) отражает тесноту связи пространственной скоррелированности в определенном направлении. Увеличение расстояния между линиями уровня в определенном направлении свидетельствует об увеличении связности рядов стока в этом направлении в пределах рассматриваемой территории. Если случайное поле изотропно, линии уровня РПКФ близки к окружностям.

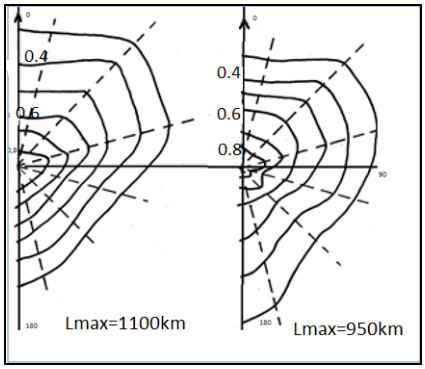
На рис.4 представлены графики РПКФ, построенные для полей стока для всей исследуемой территории ЕТР (слева – до 1978 г., справа – после 1978 г.). РПКФ для полей снегозапасов и суммы положительных температур за зимний период представлены на рис. 5.

Развернутые пространственно-корреляционные функции полей стока демонстрируют существенную анизотропию для обоих периодов исследования. Форму РПКФ можно объяснить различием генетических составляющих стока: так, линии изокоррелят летне-осеннего и годового стока имеют повышенную связность в широтном направлении, что отражает преимущественное влияние основных атмосферных процессов,

определяющих выпадение осадков на этой территории.

а) 

б) 

в) 

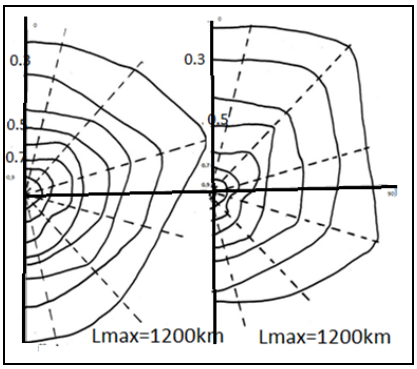
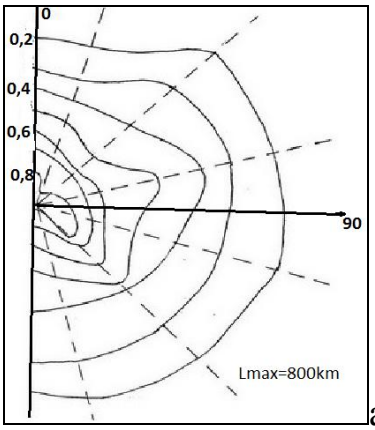
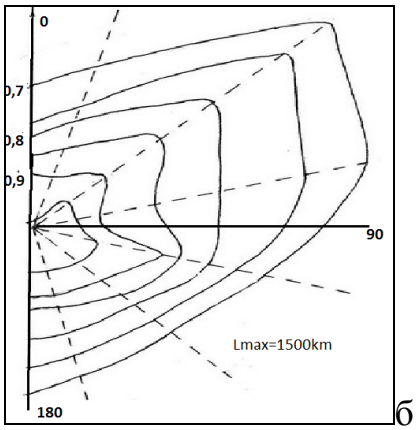
г) 

Рис.4. РПКФ поля стока а) зимней межени; б) минимального стока, в) летне-осенней межени, г) годового стока.



а)



б

Рис.5. РПКФ поля а) снегозапасов, б) суммы положительных температур за зимний период

Аналогия между характером линий РПКФ зимних температур и минимального стока показывает, что пространственная изменчивость минимального стока на этой территории определяется в значительной

степени пространственной изменчивостью температуры воздуха за зимний период.

В *разделе 3.3.3* к 66 речным бассейнам на исследуемой территории ЕТР применен модифицированный алгоритм гидрологического районирования по синхронности многолетних колебаний стока типа кластер-анализа, предложенный в работах В.А.Жука и Е.А.Романовой. В работе выделены районы с синхронными колебаниями минимального стока до и после 1978 года.

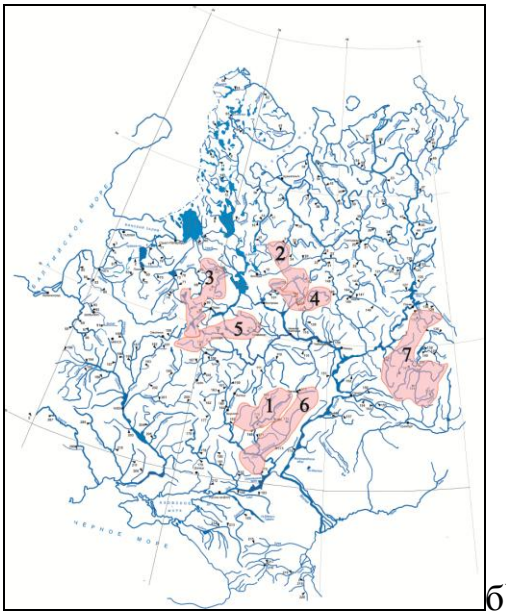
Алгоритм классификации заключается в анализе корреляционной матрицы по всем рассматриваемым пунктам наблюдений с целью выделения групп, элементы которой связаны между собой корреляцией не ниже критического значения. При этом теснота связи объектов внутри группы остается не ниже заранее установленного уровня $r_{кр}$, а корреляция между объектами из разных кластеров ниже, чем внутри групп.

Процесс образования групп идет последовательно с некоторым шагом до достижения критического уровня. На каждом шаге вычисляются средние значения коэффициента корреляции для района и среднее квадратическое отклонение. Объединение объектов и кластеров прекращается, если дисперсия начинает резко увеличиваться.

Районирование всей исследуемой территории выполнено при значении критического уровня $r_{кр}= 0,5$ (табл.4). При сравнительном анализе результатов кластеризации стока за периоды до и после 1978 года хорошо прослеживается изменение пространственных очертаний районов синхронного стока (рис.6), что указывает на изменение структуры пространственно-многолетних колебаний минимального стока в условиях происходящего потепления климата.

Таблица 4. Выделенные районы синхронного колебания минимального стока

до 1978 года			после 1978 года		
районы	$r_{вн}$	σ	районы	$r_{вн}$	σ
1	0,75	0,08	1	0,67	0,188
2	0,67	0,035	2	0,69	0,097
3	0,73	0,078	3	0,64	0,088
4	0,73	0,062	4	0,67	0,096
5	0,66	0,095	5	0,6	0,076
6	0,63	0,042	6	0,71	0,127
7	0,61	0,109			

а) 

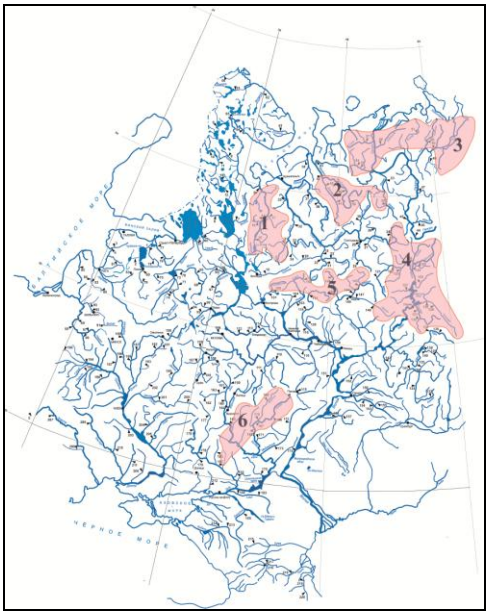
б) 

Рис. 6. Схема расположения районов с синхронными колебаниями минимального стока

а) до 1978 года, б) после 1978 года

В ***главе 4*** проведен статистический анализ динамики минимального 30ти-дневного стока за зимний и летне-осенний период 122 средних рек в бассейне р. Волги за период наблюдений до 2010 г.

Обнаружено, что для большинства рек характерна смена двух фаз водности – периода пониженной водности на период повышенной водности (рис.7). Выбранная с помощью РИК дата перелома используется для исследования стационарности ряда с помощью критериев Стьюдента и Фишера. Большая часть рядов демонстрирует нестационарность и по

среднему, и по дисперсии относительно даты перелома, выбранной для каждого ряда.

а) б)

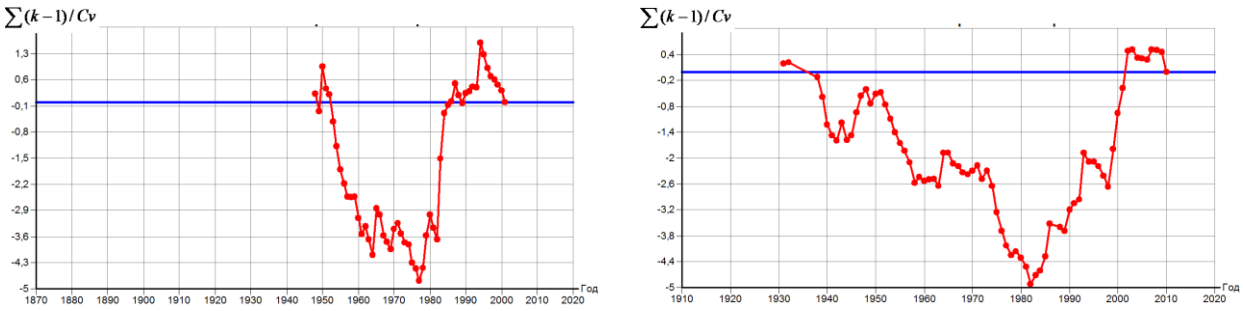


Рис. 7. Разностно-интегральные кривые 30ти-суточного минимального стока а) р. Кама – п. Ширяевский, б) р. Ай – с. Метели за период открытого русла.

Ориентируясь на гистограммы распределения дат перелома РИК (рис. 8), были назначены две наиболее характерные даты перелома – 1978 и 1985 годы. Эти даты приняты в качестве границ условного разбиения периода наблюдений на две части: периода пониженной водности и периода повышенной водности.

а) б)

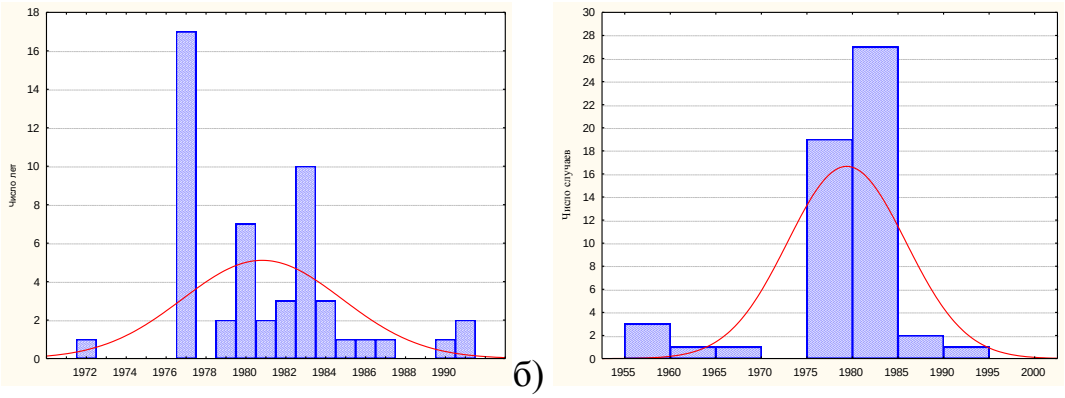


Рис.8. Распределение даты нарушения стационарности в рядах 30ти-дневного минимального стока в бассейне р. Камы а) в зимний период, б) в период открытого русла

Полученные даты нанесены на карту-схему бассейна соответственно постам наблюдений (рис.9-10), что позволяет условно разделить рассматриваемую территорию бассейна р. Волги на два региона, различающихся по году смены фазы водности. Обнаружено, что при

наблюдающейся в целом синхронности многолетних колебаний минимального стока отклик водосборов на изменения стокоформирующих характеристик происходит неодновременно. Очевидно, что западная часть всего бассейна р. Волги (в соответствии с преобладающим направлением переноса воздушных масс над этой территорией) является более чувствительной к изменениям стокоформирующих факторов.

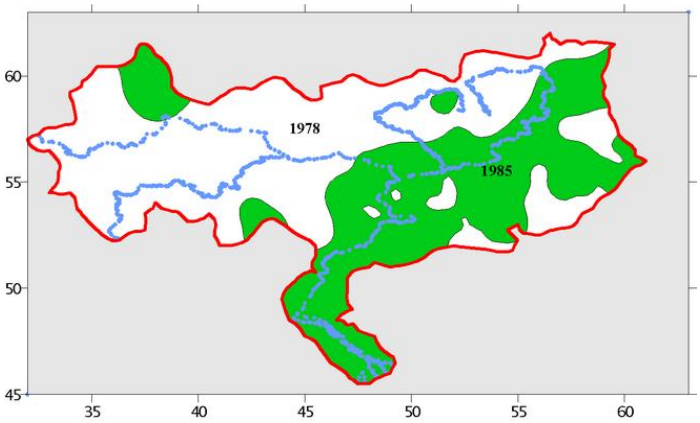


Рис.9. Даты нарушения стационарности в рядах минимального стока за зимний период

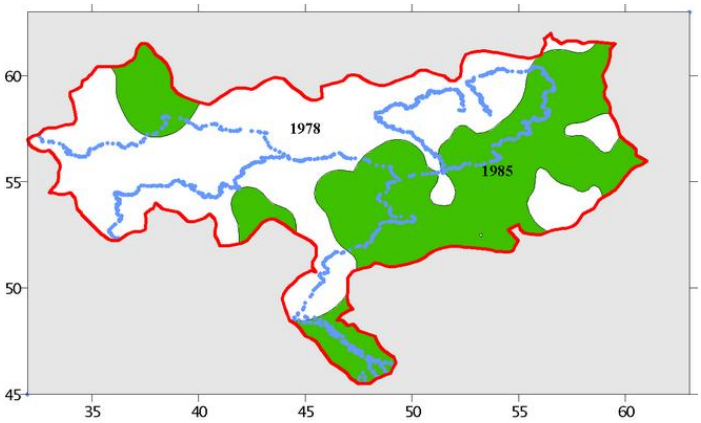


Рис.10. Даты нарушения стационарности в рядах минимального стока за период открытого русла

Изменения среднемноголетнего минимального стока в долях относительно предыдущего периода представлены на рис. 11-12 и в табл.5.

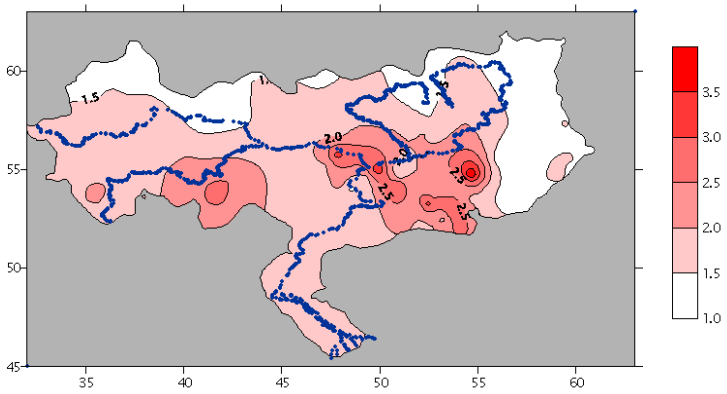


Рис. 11. Увеличение среднего минимального 30ти-дневного расхода относительно предыдущего периода на территории бассейна р. Волги за зимний период (в долях)

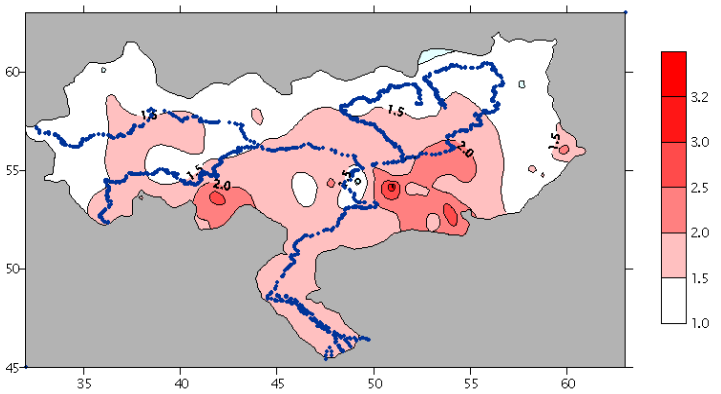


Рис. 12. Увеличение среднего минимального 30ти-дневного расхода относительно предыдущего периода на территории бассейна р. Волги за период открытого русла

Таблица 5. Средние по районам величины изменения минимальных характеристик стока

Район	Зимний период		Период открытого русла	
	*K**	Δq, л/с км²	*K**	Δq, л/с км²
Верхняя Волга	1.36	1.02	1.27	0.91
Бассейн р.Камы	1.63	0.56	1.39	0.58
Нижняя Волга	2.16	0.49	1.61	0.37

* *K*– отношение среднего многолетнего 30ти-дневного расхода за период после даты разбиения (1978 или 1985 гг.) к среднему многолетнему 30ти-дневному расходу за предыдущий период.

Увеличение минимального стока произошло на всей исследуемой территории, причем наибольший рост отмечается в южных частях бассейна, в степной и лесостепной зонах. Существенное изменение параметров ФРВ

минимального стока на коротком временном отрезке и подтвержденный факт нарушения стационарности в рядах не позволяет далее рассматривать колебания минимального стока в рамках гипотезы стационарности.

В *разделе 4.3* был рассчитан приток к Рублевскому гидроузлу по 5 участкам водосборной площади и получены ряды дефицитов полезного объема с 1914 по 2010 годы. Полученные ряды были разделены на 2 части соответственно смене фаз водности в рассматриваемом регионе – до и после 1978 года. Кривые обеспеченности этих рядов представлены на рис. 13.

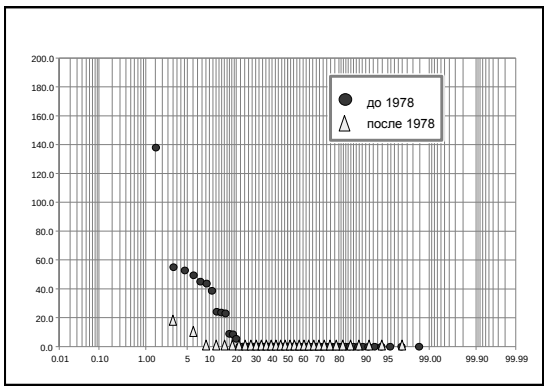


Рис.13. Кривые распределения дефицитов воды за периоды "до" и "после" 1978 г.

Изменения речного стока привели к соответствующей статистической неоднородности рядов дефицита воды и существенным изменениям параметров кривых обеспеченности дефицитов полезного объема относительно периода до 1978 года. Это обстоятельство диктует необходимость разработки таких методов расчета, в которых гипотеза стационарности не является обязательной или имеется возможность учета нестационарности в имеющихся последовательностях.

*В **главе 5*** на основе анализа изменения минимального стока на реках бассейна р. Волги предложено рассматривать имеющиеся ряды минимального стока как смену условно стационарных частей, отвечающих различным состояниям гидролого-климатической системы. Эти части имеют свои параметры распределения и удовлетворительно описываются

стандартными распределениями, применяемыми в рамках гипотезы стационарности. Тогда, для получения расчетных характеристик всего периода наблюдений и позволяющих учесть все лимитирующие значения стока, можно использовать метод «суммы распределений». Для каждого условно-стационарного участка подбирается закон распределения (кривая обеспеченности); расчетная кривая обеспеченности для всего ряда строится как сумма двух законов распределения с весами, пропорциональными длинам выборок. В таком случае для плотности распределения $f(x)$ и кривой обеспеченности $P(x)$ справедливы следующие выражения.

$$f(x)=\lambda_1 f_1(x)+\lambda_2 f_2(x) \tag{1}$$

$$P(x)=1-\int_0^x f(x)dx=1-\int_0^x[\lambda_1 f_1(x)+\lambda_2 f_2(x)]dx \tag{2}$$

где $f_1(x)$ – закон распределения (плотность) для первого условно однородного периода; $f_2(x)$ – то же для второго условно однородного периода; для аппроксимации $f_1(x)$ и $f_2(x)$ в работе используется логарифмическая модификация распределения Пирсона III типа; λ_1 и λ_2 – весовые коэффициенты , определяемые в следующем виде

$$\lambda_2=\frac{n_2}{n_1+n_2}, \tag{3}$$

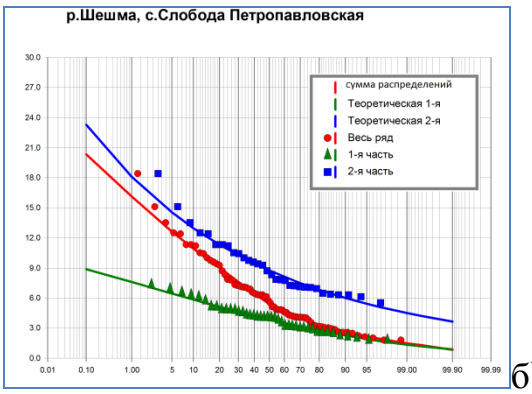
где n_1 и n_2 – продолжительность (длина ряда) первого и второго условно однородного периода соответственно. Для сохранения вероятностного смысла формулы (1) необходимо выполнение условия

$$\lambda_1+\lambda_2=1 \tag{4}$$

Задача оценивания параметров распределения (1) сводится в таком случае к раздельному оцениванию параметров для каждой компоненты. Расчетная кривая обеспеченности строится путем численного

интегрирования (2) при всех известных параметрах отдельных компонент и заданных весовых коэффициентах.

В диссертации с помощью предложенного метода получены ординаты кривых обеспеченности минимального стока для 122 рек бассейна р. Волги в нестационарном случае. Примеры аппроксимации приведены на рис.16. Показаны эмпирические и теоретические (ЛРП III) кривые обеспеченности изучаемых характеристик для первого условно-стационарного периода и второго условно-стационарных периодов, эмпирическая кривая обеспеченности для всего ряда и кривая распределения, полученная в виде суммы распределений.

а) 

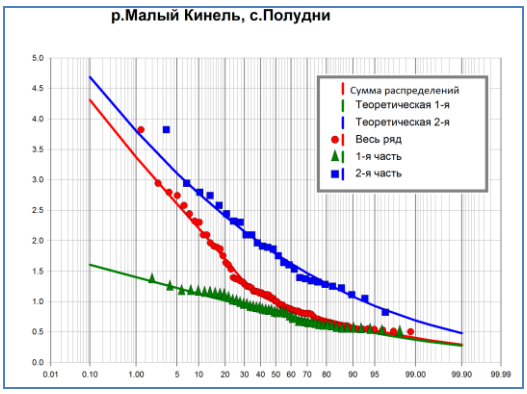
б) 

Рис.16. Кривые обеспеченности минимального стока

а) р. Шешма – с. Слобода Петропавловская, б) р. Малый Кинель – с. Полудни

В заключении сформулированы ***основные выводы и результаты***:

1. На примере рек ЦЧО получены устойчивые территориально общие оценки параметров распределения минимального стока в пределах условно стационарного периода (до 1980 г). В качестве теоретического распределения рекомендовано распределение Гумбеля.

2. Для описания рядов продолжительности маловодных периодов, полученных с помощью «порогового» метода, предложено распределение Вейбулла.

3. Выявлены существенные изменения параметров распределения минимального стока на коротком временном отрезке. Показано, что на территории ЕТР пространственную связность минимального стока определяет пространственная связность температуры воздуха за зимний период.

4. На основе модифицированного алгоритма анализа матрицы парных корреляций обнаружено изменение границ районов с синхронными колебаниями сезонного и минимального стока, произошедшее в последние десятилетия.

5. На основе анализа статистической структуры рядов минимального стока показано, что в условиях происходящего потепления климата не представляется возможным рассматривать колебания минимального стока в рамках гипотезы стационарности.

6. Расчет притока к Москворецкому гидроузлу за 1915-2010 гг. и анализ полученных рядов дефицита стока показал, что следствием наблюдаемых климатических изменений стало увеличение естественного регулирования стока. Это означает, что методы расчета характеристик водохозяйственных систем требуют корректировки ввиду изменения режима притока.

7. В качестве основы для методики расчета минимального стока в условиях изменения климата предложена модель описания его колебаний в виде смены условно стационарных периодов, отражающих смену гидролого-климатических состояний.

8. Для учета всех значений минимального стока, лимитирующих надежное функционирование водохозяйственных систем, на основе предложенной модели использован метод «суммы распределений», позволяющий наилучшим образом описать имеющиеся нестационарные последовательности и вычислены значения минимального стока расчетной обеспеченности для 122 рек, расположенных в бассейне р. Волга.

Работы, опубликованные по теме диссертации

в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК:

1. **Филиппова И.А**. О вероятностных закономерностях колебаний минимального стока (на примере рек Центрально-Черноземной области)// Водные ресурсы, 1996. – т.23, №4. –С.389-395.
2. Болгов М.В., **Филиппова И.А.** Пороговые стохастические модели минимального стока.//Метеорология и гидрология, 2006. – №3. –С.88-94.
3. Болгов М.В., Коробкина Е.А., Трубецкова М.Д., Филимонова М.К., **Филиппова И.А**. Современные изменения минимального стока на реках бассейна р. Волги//Метеорология и гидрология,2014. – №3. – С.75-85.
4. Болгов М.В., Трубецкова М.Д., Филимонова М.К., **Филиппова И.А**. Современные изменения климатических характеристик и вероятностная оценка изменений минимального стока в бассейне р. Волги// Водное хозяйство России, 2014. –№3. –С.83-99.

в других журналах и сборниках:

5. **Филиппова И.А**. О статистических характеристиках минимального стока/Раткович Д.Я., Болгов М.В. Стохастические модели колебаний составляющих водного баланса речного бассейна. – М., 1997. – С.233-237.
6. **Филиппова И.А.** О распределении вероятностей продолжительностей маловодных периодов на реках центра ЕТС//Труды Международной научной конференции "Экстремальные гидрологические события: теория, моделирование и прогнозирование" Москва, 3 - 6 ноября 2003. – С.208-211.
7. **Филиппова И.А.** О распределении вероятностей продолжительностей маловодных периодов на реках центра ЕТС// Труды международной научной конференции «Экстремальные гидрологические события в Арало-Каспийском регионе». Москва, 19-20 октября 2006 г. – С.191-193.
8. Bolgov M.V., Filippova I.A., Osipova N.V. Regionalization as a method of reliable estimator of stochastic models//Technical note for the Low Flow Group Meeting No.10.Nothern European FRIEND. – Poland, 2000. – P.49-53.
9. **Филиппова И.А.** Региональный подход к оценке распределения вероятностей продолжительности маловодных периодов//Болгов М.В., Мишон В.М., Сенцова Н.И. Современные проблемы оценки водных ресурсов и водообеспечения. – М.:Наука, 2005. – С.148-174.
10. **Филиппова И.А.** Анализ пространственной структуры полей минимального стока в условиях изменяющегося климата//Труды Международной научно-практической конференции (28мая-30 мая

2013, г. Пермь) «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов». Т.1 «Управление водными ресурсами. Гидро- и геодинамические процессы». – С.113-116.

11. **Филиппова И.А.** Пространственно-временная структура полей меженного и минимального стока рек Европейской территории России в условиях меняющегося климата//Материалы Всероссийской научной конференции «Водная стихия: опасности, возможности прогнозирования, управления и предотвращения угроз»,г. Краснодар, 07-12 октября 2013 г. – Новочеркасск:ЛИК, 2013. – С.255-261.
12. **Filippova I.,** Bolgov M. Changes in the spatial-temporal structure of the low flow fields of European Russia rivers in the conditions of changing climate. Water& Environmental Dynamics. 6th international Conference on Water Resources and Environmental Research, Koblenz, Germany, 3-7 June 2013.
13. Bolgov M, Korobkina E, **Filippova I.** Bayesian Decision for Low Flow Evaluation in Non-Stationary Conditions//The Grand Challenges Facing Hydrology in the 21st Century. Dooge Nash International Symposium 2014, Dublin, Ireland. –P.65-74.