

Министерство образования и науки Российской Федерации
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (РГГМУ)

На правах рукописи

УДК (556.167: 551.583).072

Громова Марина Николаевна

МЕТОДИКА ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ХАРАКТЕРИСТИК
ВЫБРОСОВ МИНИМАЛЬНОГО СТОКА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА

Специальность 25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2007

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете

Научный руководитель: доктор технических наук
профессор В. В. Коваленко

Научный консультант: кандидат технических наук
Н. В. Викторова

Официальные оппоненты: доктор географических наук
профессор В. А. Шелутко
кандидат технических наук
доцент В. Л. Трушевский

Ведущая организация: Государственный гидрологический институт (ГГИ)

Защита диссертация состоится «15» ноября 2007 г., в 15³⁰ часов на заседании специализированного совета (Д.212.197.02) 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 « 15 » октября 2007 г.

Ученый секретарь специализированного совета,
кандидат географических наук

Воробьев В. Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время уделяется серьезное внимание возможным тенденциям изменения гидрологического режима под воздействием климатических вариаций и хозяйственной деятельности. Разрабатываются общие и региональные методики долгосрочных прогнозов речного стока. Среди прогнозируемых величин особое место занимают характеристики минимального стока и его многолетних колебаний. Они широко используются в национальном хозяйстве, особенно в водохозяйственном проектировании. Важным является их изучение и оценка в современных условиях возрастающего дефицита водных ресурсов и ухудшения экологического состояния водных систем и отдельных водных объектов в районах интенсивного водопотребления. Особую значимость приобретает постановка задачи о выбросах случайного процесса минимального стока за определенный уровень заданной обеспеченности. С точки зрения практической гидрологии решение этой задачи отвечает на вопрос о группировках лет с водностью ниже некоторого заданного значения (их продолжительности и частоты появления). Это актуально, например, для гидроэнергетики и водоснабжения. Имея карты подобных характеристик в условиях нового климата, мы фактически прогнозируем статистические характеристики засух.

Цели и задачи исследования. Цель данного исследования – разработка методики долгосрочного прогноза (сценарной оценки) характеристик выбросов минимального зимнего и летне-осеннего стока России при возможном изменении климата.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- собраны и статистически обработаны данные о минимальном 30-суточном зимнем и летне-осеннем стоке рек России;

- численно оценены характеристики выбросов (частота и длительность), соответствующие текущему гидрологическому режиму и получен комплект карт с применением ГИС-технологий;

- выполнена параметризация стохастической модели формирования минимального стока для текущей гидрологической ситуации на территории России;

- сделан прогноз (сценарная оценка) вероятностных характеристик минимального стока с использованием стохастической модели, основанной на уравнении Фоккера–Планка–Колмогорова (ФПК), при возможном изменении климата в XXI веке и построены соответствующие карты;

- выполнен прогноз характеристик выбросов минимального стока на XXI век с учетом изменения климатической ситуации и получен комплект прогнозных карт и карт отклонений значений этих характеристик от таковых, соответствующих текущему климату;

- оценены возможные пути использования полученных результатов.

Методика исследований и исходный материал. Решение перечисленных задач проводилось численными методами на основе статистической обработки исходной гидрологической информации. Для расчета характеристик группировок использовался аппарат теории выбросов с помощью программ, написанных на языке Pascal. Решение задачи долгосрочного прогнозирования характеристик минимального стока осуществлялось при помощи математического моделирования на основе уравнения ФПК.

Для построения карт использовались программы Surfer и Idrisi.

Научная обоснованность и достоверность положений и выводов подтверждается статистической оценкой промежуточных результатов, а также использованием теории марковских случайных процессов, приводящих к уравнению Пирсона, описывающему стационарные процессы формирования стока.

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

1. Выполнена параметризация стохастической модели формирования минимального стока на территории России с плотностью 30 км² на расчетную точку по фактическому гидрометеорологическому режиму;

2. Произведена оценка характеристик группировок минимального стока, соответствующих фактическому гидрометеорологическому режиму. Построены карты этих характеристик;

3. Выполнены прогнозы вероятностных характеристик минимального 30-суточного стока с учетом климатического сценария, при котором происходит повышение температуры воздуха в будущем и почти повсеместное увеличение количества осадков. Построены карты этих характеристик, позволяющие оценивать чувствительность различных отраслей национального хозяйства к возможным изменениям статистических характеристик минимального стока;

4. Выявлены и построены зависимости коэффициента корреляции между смежными рядами минимального стока и такими характеристиками, как модуль минимального стока и коэффициент вариации. Первые использовались для определения коэффициентов $r(1)$ в новой климатической ситуации;

5. Выполнены прогнозы характеристик (частоты и продолжительности выбросов) группировок минимального стока с учетом возможных изменений климата. Построены карты этих характеристик.

6. Рекомендованы пути возможного практического применения полученных результатов.

Практическое применение результатов диссертации определяется возможностью использования полученных карт статистических характеристик минимального стока при оценке чувствительности

производственных функций различных отраслей экономики к вариациям гидрологической ситуации вследствие изменения климата.

Работа выполнялась в рамках госбюджетной темы кафедры гидрофизики и гидропрогнозов РГГМУ «Моделирование и прогнозирование гидрологических процессов в условиях антропогенного изменения речного стока», а также двух тем («Фрактальная диагностика речного стока для целей частично инфинитного прогнозирования гидроэкологических катастроф» и «Частично инфинитный механизм в моделировании и прогнозировании гидрологических катастроф»), выполняемых по заданию федерального агентства по образованию на проведение научных исследований (№№ гос. рег. 01.2004 09546, 01.2006 03264). Ее результаты внедрены в учебный процесс по специальности «Гидрология» – 07.32.00.

На защиту диссертации выносятся:

- результаты оценок характеристик выбросов минимального 30-суточного летне-осеннего и зимнего стока, соответствующих фактическому гидрометеорологическому режиму;
- результаты прогнозов вероятностных характеристик минимального 30-суточного стока для территории Сибири и Дальнего Востока по климатическому сценарию, связанному с удвоением содержания углекислого газа в атмосфере;
- закартированные результаты прогнозных оценок частоты и продолжительности выбросов случайного процесса минимального стока для территории России;
- методика долгосрочного прогнозирования характеристик выбросов минимального стока для равновесных климатических сценариев.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на научных семинарах кафедры гидрофизики и гидропрогнозов, итоговых сессиях ученого Совета РГГМУ в 2005, 2006 г.г., на конференции молодых ученых «Изменение климата и окружающая среда» в 2005 г., на VI

международном молодежном экологическом форуме стран Балтийского региона «Экобалтика» в 2006 г., на политехническом симпозиуме «Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона» в 2006 г., на дне молодого ученого в Политехническом университете в 2007 г.

По теме диссертации опубликовано 9 работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, содержащего 79 источников, 5 приложений. Работа изложена на 265 страницах текста, включая 32 рисунка и 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе рассматривается влияние основных физико-географических факторов на формирование и распределение по территории России минимального стока. Оцениваются возможные изменения основных факторов, формирующих минимальный сток. Приводятся существующие методы оценки гидрологических последствий изменений климата. Описываются существующие прототипы данной методики. Ставятся задачи исследования.

Во второй главе описываются исходные данные и математический аппарат, который лежит в основе разрабатываемой методики.

Экспериментальными данными для расчета и прогноза характеристик группировок служили ряды наблюдений за минимальным 30-суточным зимним и летне-осенним стоком на территории России, приведенные в изданиях Государственного водного Кадастра (Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши). При этом использовалась информация по створам на реках с водосборной площадью в пределах от

1200 до 50000 км² в зависимости от территориального расположения и рельефа местности. Рассматривались реки, сток которых не искажен влиянием антропогенной деятельности. Для расчетов было отобрано 365 рядов наблюдений за минимальным 30-дневным зимним стоком, и 450 рядов – за минимальным 30-дневным летне-осенним. Средняя продолжительность рядов наблюдений составила 40 лет. После статистической обработки выяснилось, что из всех исходных гидрологических рядов репрезентативными оказалось для зимнего стока 354 ряда, для летне-осеннего – 421.

Основной моделью в диссертации служила стохастическая модель формирования стока Фоккера–Планка–Колмогорова (ФПК). Исследование возможности прогнозирования по этой модели характеристик минимального стока было выполнено Н. В. Викторовой в 2002 г. Однако эти исследования остались логически не полностью завершенными, так как, во-первых, рассматривалось только несколько регионов Европейской территории России, а, во-вторых, были опущены вопросы, связанные с прогнозом характеристик выбросов, что является основой данной диссертационной работы.

Уравнение ФПК имеет вид:

$$\frac{\partial p(Q,t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial Q} [A(Q,t)p(Q,t)] + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial Q^2} [B(Q,t)p(Q,t)] \quad (1)$$

где $p(Q, t)$ – плотность вероятности расхода воды;

Q – расход воды в замыкающем створе;

t – время;

$A(Q, t)$ и $B(Q, t)$ – соответственно коэффициенты сноса и диффузии, определяемые по выражениям:

$$\begin{aligned} A &= -(\bar{c} + 0.5G_{\tilde{c}})Q - 0.5G_{\tilde{c}\tilde{N}} + \bar{N}; \\ B &= G_{\tilde{c}}Q^2 - 2G_{\tilde{c}\tilde{N}} + G_{\tilde{N}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $G_{\tilde{c}}$ – интенсивность внутреннего шума (\tilde{c});

$G_{\tilde{N}}$ – интенсивность внешнего климатического шума (\tilde{N});

$G_{\tilde{c}\tilde{N}}$ – взаимная интенсивность шумов.

\bar{c} и \bar{N} – соответственно статистические нормы бассейновых и климатических шумов.

В установившемся режиме (а климатические сценарии предполагают равновесную ситуацию), уравнение ФПК переходит в уравнение Пирсона

$$\frac{dp}{dQ} = \frac{Q - a}{b_0 + b_1Q + b_2Q^2} p, \quad (3)$$

где a , b_0 , b_1 и b_2 – параметры, которые характеризуют физико-статистические свойства водосбора и рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} a &= \frac{G_{\tilde{c}\tilde{N}} + 2\bar{N}}{2\bar{c} + G_{\tilde{c}}}; & b_0 &= \frac{-G_{\tilde{N}}}{2\bar{c} + G_{\tilde{c}}}; \\ b_1 &= \frac{2G_{\tilde{c}\tilde{N}}}{2\bar{c} + G_{\tilde{c}}}; & b_2 &= \frac{-G_{\tilde{c}}}{2\bar{c} + G_{\tilde{c}}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Процедура прогнозирования состоит из следующих этапов:

- 1) параметризация модели, то есть определение численных значений коэффициентов, соответствующих текущей климатической ситуации и уровню хозяйственной деятельности;

- 2) задание внешнего воздействия (приземной температуры воздуха и нормы годовых осадков из заданного климатического сценария);
- 3) задание трендов хозяйственной деятельности, демографии и т. д. с помощью коэффициентов, входящих в модель;
- 4) численное интегрирование уравнения ФПК (прогноз характеристик стока на требуемую заблаговременность).

Обоснованность применимости этой модели объясняется тем, что она подходит для всех видов многолетнего стока, в частности для минимального, так как ее решением в равновесном (квазистационарном) режиме является семейство кривых Пирсона, которыми (как правило) исчерпываются запросы практической гидрологии.

При оценке характеристик группировок минимального стока использовался аппарат теории случайных выбросов. Ряд минимального стока рассматривался как случайная последовательность, так как для него характерны иррегулярные колебания и дискретное задание данных.

Случайная последовательность $\{x_k\} (k = 0, \pm 1, \pm 2 \dots)$ удовлетворяет условию стационарности. Это означает, что любая m -мерная плотность распределения вероятности $p_x(x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_m})$ зависит только от взаимного расположения моментов времени i_1, i_2, \dots, i_m и не меняется при сдвиге всех отсчетов на одни и те же интервалы времени τ :

$$p_x(x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_m}) = p_x(x_{i_1+\tau}, x_{i_2+\tau}, \dots, x_{i_m+\tau}) \quad (5)$$

Считается, что в i -тый момент времени имеет место выброс случайной последовательности $\{x_k\}$ сверху вниз (отрицательный выброс), если

$$x_{i-1} \geq a, \quad x_i < a. \quad (6)$$

В данном случае за значение a принят расход воды в реке, ниже которого не могут быть полностью удовлетворены промышленно-бытовые или какие-либо другие требования (минимальный 30-суточный расход 80 %-ной обеспеченности). В этом случае число выбросов сверху вниз и их продолжительность показывают, сколько раз за интересующий нас промежуток времени будут наблюдаться перебои с водоснабжением и какая будет их длительность. Если данные показатели выше допустимых, то встает вопрос о дополнительных источниках водоснабжения.

В данной работе рассчитывались основные характеристики группировок, такие как средняя их длительность и частота появления.

Частота группировок рассчитывается по формуле

$$u = P\{X_0 \leq a, X_1 > a\}, \quad (7)$$

где $P\{X_0 \leq a, X_1 > a\}$ находится по зависимости

$$P\{X_0 \leq a, X_1 > a\} = \iint p_x(x_1, x_2) dx_2 dx_1, \quad (8)$$

где $p_x(x_1, x_2)$ – двумерная плотность распределения смежных членов последовательности $\{X_k\}_{k=0}^{\infty}$.

Средняя длительность отрицательной группировки

$$El^- = \frac{1 - P\{x_0 > a\}}{P\{x_0 \leq a, x_1 > a\}} \quad (11)$$

или

$$EI^- = \frac{1 - P\{x_0 > a\}}{u} \quad (12)$$

В работе В. А. Румянцева и И. В. Бовыкина было предложено осуществлять предварительную нормализацию исходного ряда $\{x_i\}$. Нормализованные значения Y_i удобно получать с помощью преобразования, которое нашло широкое применение при использовании метода Монте-Карло:

$$Y_i = \Phi^{-1}(F(x_i)), \quad (13)$$

где $F(x_i)$ – одномерная функция распределения исходного ряда;

Φ^{-1} – функция, обратная функции распределения случайной величины, распределенной по нормальному закону с параметрами ноль и единица.

Преобразованный таким образом ряд значений $\{Y_i\}$ находится во взаимно однозначном соответствии с исходным рядом $\{X_i\}$ и подчиняется одномерному закону распределения $N(0, 1)$. Если взять величину b , удовлетворяющую условию

$$b = \Phi^{-1}(F(a)), \quad (14)$$

то каждой группировке значений минимального 30-дневного стока $\{X_i\}$ относительно уровня a будет однозначно соответствовать аналогичная группировка значений $\{Y_i\}$ относительно уровня b .

Расчет характеристик группировок минимального стока подразумевает выполнение следующих этапов:

1) определение коэффициента вариации исходного гидрологического ряда;

2) расчет коэффициента автокорреляции между смежными членами ряда минимального стока;

3) осуществление нормализации исходного асимметричного ряда и определение коэффициента корреляции между смежными членами нормальной нормированной последовательности;

4) определение характеристик группировок по соответствующим таблицам в зависимости от коэффициента автокорреляции нормализованного ряда и уровня, ниже которого и рассчитываются выбросы минимального стока.

Для прогноза возможных значений характеристик группировок необходимо иметь информацию об изменении значений коэффициентов вариации и автокорреляции $r(1)$ в новых климатических условиях.

Для частоты появления группировок ν и средней продолжительности отрицательных группировок Et входными параметрами для таблиц служат уровень b и коэффициент корреляции между смежными членами нормированной последовательности $\{y_i\}$. Как таковой методики для прогноза коэффициента корреляции между смежными членами ряда минимального стока найдено не было. В этом случае целесообразно применять графические зависимости и аналитические выражения, связывающие величину коэффициента корреляции между смежными членами ряда и такими характеристиками стока, как среднеголетний модуль M , коэффициент вариации и т. д. Последние прогнозируются при помощи стохастической модели формирования стока ФПК. Используя найденное значение коэффициента корреляции нормированного ряда, соответствующего новой климатической ситуации, при заданном уровне водности b , определяется частота появлений и средняя длительность группировок минимального 30-дневного стока в будущем при изменении водности.

В третьей главе рассчитываются основные характеристики группировок минимального стока, соответствующие текущей

гидрометеорологической ситуации и дается прогноз статистических характеристик и характеристик группировок на XXI в. с учетом наиболее вероятного климатического сценария. Для прогнозов выбросов необходима информация о возможном изменении коэффициента корреляции между смежными членами ряда в будущем. В диссертации был сделан новый шаг в прогнозировании коэффициента автокорреляции с использованием связи, существующей между коэффициентом автокорреляции, модулем минимального стока и коэффициентом вариации. Подобная связь была установлена по имеющимся рядам наблюдений. Полученное поле точек оказалось достаточно хаотичным, однако после разбиения его на определенные градации, удалось получить статистически значимые зависимости (рисунок 1)

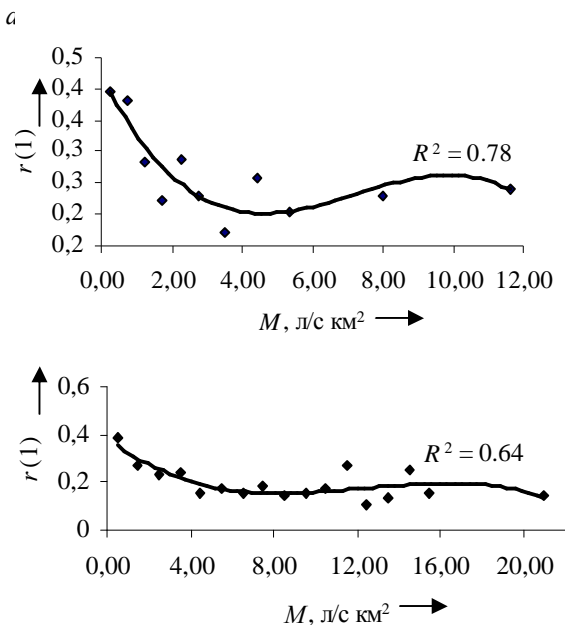


Рисунок 1 – Зависимость $r(1) = f(M)$ для минимального 30-суточного зимнего (а) и летне-осеннего (б) стока на территории России

Построены прогнозные карты вероятностных характеристик минимального стока и карты отклонений выбросов минимального стока в новой климатической ситуации от тех, которые соответствуют существующему гидрометеорологическому режиму (рисунки 2, 3).

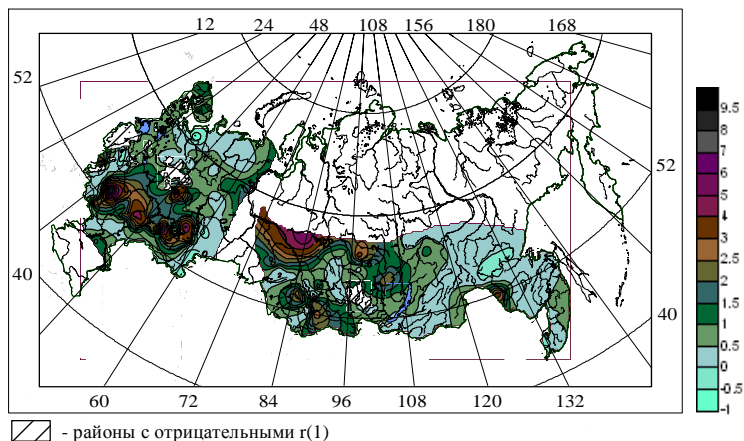


Рисунок 2 – Изолинии отклонений частоты прогнозируемых на 2100 год группировок минимального 30-суточного зимнего стока от существующих, %

На основании полученных результатов, можно сделать следующие выводы. Возможное потепление на Земле в значительной степени скажется на вероятностных характеристиках минимального стока России. К 2100 году их изменение составит 20 %. Что касается характеристик выбросов, то влияние изменения климата на них при использованном сценарии скажется меньше. С практической точки зрения, результаты исследований могут быть применены при составлении водохозяйственных балансов на перспективу, при усовершенствовании методик экологического использования речных бассейнов.

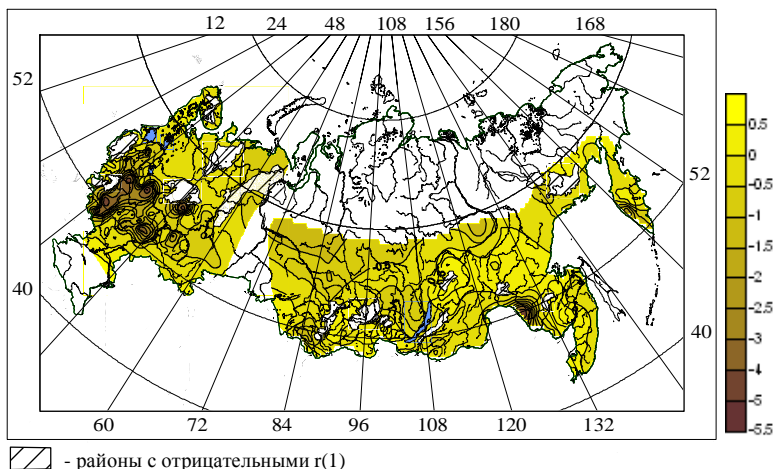


Рисунок 3 – Изолинии отклонений длительности прогнозируемых на 2100 год группировок минимального 30-суточного летне-осеннего стока от существующих, %

В заключении сформулированы основные результаты исследований:

1. Впервые произведена оценка характеристик выбросов минимального 30-суточного зимнего и летне-осеннего стока, соответствующих фактическому гидрометеорологическому режиму и построены карты этих характеристик для территории России;
2. Выполнены прогнозы вероятностных характеристик минимального 30-суточного стока по климатическому сценарию, связанному с удвоением CO_2 в атмосфере, для территории Сибири и Дальнего Востока, а также построены карты этих характеристик;
3. Разработана методика прогнозирования коэффициента автокорреляции на основе выявленной связи этого коэффициента с модулем минимального стока и коэффициентом вариации;
4. Выполнены прогнозы (сценарные оценки) частоты и продолжительности выбросов минимального стока для территории России и построены соответствующие карты.

В приложении представлены результаты расчетов и прогнозов, а также справка об эффективности результатов исследований.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Оценка влияния возможных изменений минимального стока на экономическое развитие северо-запада ЕТР // Материалы итоговой сессии ученого совета 27 – 28 января 2004 года. Информационные материалы. Часть I. Секции метеорологии, гидрологии, экономических и социально-гуманитарных наук. – СПб.: изд. РГГМУ, 2004. – С. 66 – 67 (в соавторстве с Н. В. Викторовой);

2. Влияние возможных изменений минимального стока на экономическое развитие Северо-Запада ЕТР // Проблемы современной гидрологии. Сборник научных трудов РГГМУ. – СПб: изд. РГГМУ, 2004. – С. 45 – 53 (в соавторстве с Н. В. Викторовой);

3. Прогнозы стока на территории Северо-Запада ЕТР // Материалы итоговой сессии ученого совета 25 – 26 января 2005 года. Информационные материалы. – СПб.: изд. РГГМУ, 2005. – С. 8 – 9. (в соавторстве с С. М. Губановым)

4. Оценка характеристик выбросов минимального стока ЕТР. // Сборник трудов международной школы-конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Изменение климата и окружающая среда». – СПб.: Изд. «Гранд», 2005. – С. 177 –183.

5. Оценка и прогноз характеристик выбросов минимального стока рек ЕТР // Тезисы докладов итоговой сессии ученого совета 25 – 26 января 2006 года. – СПб.: изд. РГГМУ, 2006 – С. 12 – 13.

6. Application of stochastic model for the forecast of the minimal runoff of the rivers of basin of the Baltic sea // Сборник трудов VI международного молодежного экологического форума стран Балтийского региона «Экобалтика». – СПб: Изд. СПбГПУ, 2006. – С. 139 (в соавторстве с Н. В. Викторовой).

7. Прогноз характеристик минимального стока для целей управления водными ресурсами // Материалы конференций Политехнического симпозиума «Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона». – СПб.: Изд. СПбГПУ, 2006. – С. 13 (в соавторстве с Н. В. Викторовой).

8. Влияние нормы модуля и коэффициента вариации минимального стока на коэффициент корреляции между смежными членами ряда Электронный журнал "Исследовано в России", 230, стр. 2199-2205, 2006 г. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2006/230.pdf> (в соавторстве с Н. В. Викторовой).

В рецензируемых журналах из списка ВАК

9. Прогноз характеристик минимального стока для целей управления водными ресурсами // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – СПб.: Изд. СПбГПУ, 2007. – № 2 (50). – С. 284 – 287 (в соавторстве с Н. В. Викторовой).