

Изменения режима максимального стока в Арктике

Е.В. Шевнина¹

ФГБОУ ВПО «Российский государственный гидрометеорологический университет», 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, д. 98.

Информация о статье

УДК 556.16:551.583

Финансовая поддержка:

Грант Министерства образования и науки РФ «Адаптация математических моделей формирования вероятностных характеристик многолетних видов речного стока к физико-географическим условиям России» №1413

История

Подана в редакцию 7 июня 2014
Принята 12 июля 2014

Ключевые слова

многолетний режим, максимальный сток, изменения климата, строительное проектирование, Российская Арктика.

АННОТАЦИЯ

В работе дана оценка статистических характеристик многолетнего максимального стока на территории Российской Арктики на период 2010-39 гг.

Результаты получены согласно ожидаемым изменениям климата по сценариям COMMIT, SRES:A2, SRES:A1B и SRES:B1 и результатов четырех моделей общей циркуляции атмосферы.

Методика долгосрочной оценки статистических характеристик максимального стока базируется на стохастической модели формирования многолетнего стока весеннего половодья с учетом региональной специфики северных территорий.

Показано, что на части арктической территории ожидается значительные изменения климата и режима формирования многолетнего максимального стока. Получены

карты районов, где при подготовке гидрологического обоснования строительства гидротехнических сооружений рекомендуется учитывать ожидаемые изменения режима максимального стока в расчетах максимальных расходов малой обеспеченности. Показаны примеры расчетов максимальных расходов однопроцентной обеспеченности для двух водных объектов.

Содержание

Введение	129
Обзор литературы	129
Постановка задачи	130
Описание исследования	131
Заключение	135

¹

Контактный автор:

+7 (911) 733 2083, eshevnikina@gmail.com (Шевнина Елена Валентиновна, к.т.н., доцент)

Введение

Стратегия развития арктической зоны Российской Федерации [23] предусматривает широкомасштабное освоение месторождений полезных ископаемых. Это предполагает строительство социально-экономической инфраструктуры для добычи, переработки и транспортировки природных ресурсов в центральные районы страны. В строительном проектировании требуются сведения о расчетных расходах/уровнях определенной обеспеченности (вероятности). Методическую основу таких расчетов в Советском Союзе обеспечивали Строительные Нормы и Правила [21]. В Российской Федерации принято опираться на Свод Правил [22] и ряд методических рекомендаций [11-14]. Руководящие документы регламентируют расчеты всех видов многолетнего стока (годового, минимального и максимального), но для территории Российской Арктики наиболее актуальным является максимальный сток, поскольку его характеристики используются при проектировании трубопроводов, мостовых переходов, водопропускных и водозаборных сооружений нефте- и газодобывающих и перерабатывающих предприятий. Максимальный сток на арктической территории формируется в период весеннего половодья.

Научной основой нормативных документов по подготовке гидрологического обоснования в строительном проектировании является ряд гипотез:

1. Многолетние ряды годового, минимального и максимального стока формируются как случайные совокупности [9, 18];
2. Статистические свойства таких совокупностей могут быть представлены трех-параметрическими вероятностными распределениями [9, 10];
3. Процесс формирования основных видов многолетнего стока является стационарным [20].

Последняя гипотеза позволяет рассматривать многолетние статистические характеристики ретроспективных рядов наблюдения репрезентативными на период эксплуатации объекта строительства [21, 22, 33]. Гипотеза стационарности была подтверждена анализом данных наблюдений, полученным с начала прошлого столетия до 1980 года [20]. Однако, в последние годы эта гипотеза подвергается сомнению [36] и обсуждаются проблемы наличия трендов в многолетних рядах и разработки методов расчета статистических характеристик максимального стока в условиях нестационарности [35]. По данным российских исследований, в многолетних рядах стока весеннего половодья с учетом наблюдений в последние 25-30 лет имеются статистически значимые изменения начальных моментов вероятностных распределений, начало которых можно отнести к концу 1970-х годов [5, 25]. Изменения гидрологического режима принято объяснять наблюдаемыми в последние десятилетия флуктуациями климата. Разработаны сценарии изменения климата в будущем, для которых имеются результаты численных экспериментов моделей общей циркуляции атмосферы (МОЦА). Многолетние осреднения результатов моделирования распространяются Межправительственной Группой Экспертов по Изменению Климата (МГЭИК). Наиболее широкое применение получили равновесные (квазистационарные) сценарии, представленные в виде изменений норм климатических характеристик для интервалов времени 20-30 лет [31].

Обзор литературы

Оценки изменений метеопараметров в будущем используются при моделировании влияния климата на гидрологический режим, например, на основе системы уравнений водного баланса [5, 28] или динамических моделей типа «осадки-сток» [32, 35], иногда дополненных генератором погоды [4]. Расчеты по таким моделям позволяют на основе рядов осадков сгенерировать ряды стока и использовать их для расчета средних [5, 29, 30] и экстремальных значений стока [35]. Основной областью применения моделей типа «осадки-сток» является оперативное прогнозирование стока на частных водосборах [38], они требуют значительного объема исходных данных о свойствах подстилающей поверхности, трудоемкой калибровки, регионального представления климатических сценарных оценок и используют прогнозные ряды метеопараметров во временном разрешении сутки и часы. Это ограничивает их применение на территориях, где недостаточно исходных данных, в частности арктических.

При решении задачи об оценке влияния климата на режим многолетнего стока альтернативой динамическим и балансовым моделям является подход, сформулированный в работах [7, 8]. Он основан на упрощениях уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова (ФПК), связанных с аппроксимацией вероятностных кривых обеспеченности многолетнего стока в рамках трех-параметрических

распределений и представлениями о «квазистационарности» ожидаемых изменений климата. «Входным воздействием» в модель является сценарные оценки статистических характеристик метеопараметров. При параметризации модели учитывается специфика стока (годовой, минимальный, максимальный сток) и/или географические особенности региона [3, 24, 27]. Модель не требует значительных объемов исходных данных и трудоемких приемов калибровки, что делает ее привлекательной для решения задачи об оценке изменений режима максимального стока на территории Российской Арктики. Основные методологические принципы использования подхода при решении задач строительного проектирования при неустановившемся климате сформулированы в работе [7]: ряды многолетнего стока рассматриваются как дискретные случайные последовательности типа простой цепи Маркова, для моделирования которых используются дифференциальные уравнения со случайной компонентой, решения которых статистически эквивалентны решением уравнения ФПК [1]. В общем случае, плотность вероятности эквивалентна бесконечному числу статистических моментов. Однако, в практической гидрологии ограничиваются первыми тремя моментами вероятностных распределений [22]. Тогда, уравнение ФПК можно аппроксимировать системой уравнений для начальных статистических моментов (m_i , где $i = 1, 2, 3$) [8]:

$$\begin{aligned} dm_1/dt &= -(\bar{c} - 0,5G_{\bar{c}})m_1 - 0,5G_{\bar{c}\bar{N}} + \bar{N}, \\ dm_2/dt &= -2(\bar{c} - G_{\bar{c}})m_2 + 2\bar{N}m_1 - 3G_{\bar{c}\bar{N}}m_1 + G_{\bar{N}}, \\ dm_3/dt &= -3(\bar{c} - 1,5G_{\bar{c}})m_3 + 3\bar{N}m_2 - 7,5G_{\bar{c}\bar{N}}m_2 + 3G_{\bar{N}}m_1 \end{aligned} \quad (1)$$

где, свойства подстилающей поверхности и осадков описываются взаимно коррелированными случайными процессами с математическими ожиданиями \bar{c} , \bar{N} и интенсивностями изменчивости $G_{\bar{c}}$, $G_{\bar{N}}$ и взаимной интенсивностью изменчивости $G_{\bar{c}\bar{N}}$. Этой системы уравнений достаточно для определения расчетных гидрологических характеристик: нормы $\bar{Q} = m_1$, коэффициентов вариации $C_v = f(m_1, m_2)$ и асимметрии $C_s = f(m_1, m_2, m_3)$. Из-за коротких рядов гидрологических наблюдений точность определения третьего момента невысока, поэтому коэффициент асимметрии можно рассчитывать по соотношению C_s/C_v , т. е. система (1) состоит из двух уравнений. Климатические сценарии распространяются в виде норм для 20-30-летних интервалов времени [31], для которых режим стока можно считать квазистационарным (dm_i/dt).

Для решения задачи об оценке статистических характеристик многолетнего стока, сначала по данным о норме и коэффициенту вариации за период наблюдений вычисляют начальные моменты вероятностных распределений $m_1 = \bar{Q}$, $m_2 = m_1^2(C_v^2 - 1)$ и выполняют параметризацию модели: $\bar{c} = \bar{N}/m_1$ и $G_{\bar{N}} = 2(\bar{c}m_2 - \bar{N}m_1)$. Затем, по метеорологическим нормам из климатического сценария рассчитывают прогнозные значения моментов $m_1^{pp} = \bar{N}^{pp}/\bar{c}$, $m_2^{pp} = (2\bar{N}^{pp}m_1^{pp} + G_{\bar{N}})/2\bar{c}$ и характеристики гидрологического режима: $\bar{Q}^{pp} = m_1^{pp}$, $C_v^{pp} = \sqrt{(m_2^{pp} - m_1^{pp2})}/m_1^{pp}$ и $C_s^{pp} = kC_v^{pp}$ (где, $k=C_s/C_v$, рассчитанный за период наблюдений). На основании полученных гидрологических характеристик определяют расходы необходимой обеспеченности согласно обычной процедуре (см. например [19]).

Параметры модели могут быть заданы постоянными на прогнозный интервал времени [8] или переменными в зависимости от ожидаемых статистических характеристик метеопараметров. В настоящей работе, для задания параметра \bar{c} использовались региональные зависимости, полученные для отдельных районов Российской Арктики, поскольку это улучшает качество методики оценки статистических характеристик максимального стока на арктической территории до 67-83 % [27].

Постановка задачи

В работе решается задача об оценке статистических характеристик максимального стока на территории Российской Арктики на период 2010-39 гг. на основе четырех моделей общей циркуляции атмосферы для четырех климатических сценариев из набора МГЭИК. Решение этой задачи позволит определить районы, где режим максимального стока существенно отличается от исторического. Результаты получены для территории Арктики в пределах водно-ресурсной границы [6, 16], которая включает территорию арктической зоны Российской Федерации: Ненецкий, Ямало-Ненецкий, Таймырский (Долгано-Ненецкий), Чукотский автономные округа и частично территории Республики Саха (Якутия), Красноярского края, Архангельской и Мурманской областей, согласно решению Государственной комиссии по делам Арктики при Совете Министров СССР от 22 апреля 1989 года.

Описание исследования

Региональная оценка режима максимального стока на территории Российской Арктики получена на основе климатических сценариев COMMIT, SRES:A2, SRES:A1B и SRES:B1, в которых рассматриваются альтернативные пути развития общества с учетом демографии, экономики и развитие технологий [31]. В работе даны результаты для временного интервала 2010-39 гг., поскольку этот период представляет наибольший интерес с точки зрения гидрологического обеспечения строительного проектирования развивающейся инфраструктуры арктического региона [23].

Максимальный сток на арктической территории формируется в период весеннего половодья. Расчетные расходы малой обеспеченности определяются статистическими характеристиками слоя стока весеннего половодья по формуле из [19, 22]. В дальнейшем, оценка статистических характеристик дана для величины слоя стока весеннего половодья. Необходимым условием для применения подхода [8] является квазистационарность климата и режима формирования стока за периоды наблюдений и долгосрочной оценки.

Режим стока за период наблюдений характеризуется нормой слоя стока весеннего половодья [мм] и коэффициентом его вариации закартированных в приложениях к [21]. Карты построены по данным наблюдений за период с начала 1930-х до 1975 года и представляют временной интервал со стационарным режимом формирования стока весеннего половодья [20]. Климатические нормы годовых сумм осадков и среднегодовой температуре воздуха за исторический период получены по данным наблюдений на 115 метеорологических станциях из Научно-прикладных справочников по климату СССР (см. например [16]). Возможность использования годовых сумм осадков в модели формирования стока весеннего половодья на северных территориях обоснована в работе [26]. Нормы метеопараметров интерполированы в пределах арктической территории на основе алгоритма из [34]. Данные об ожидаемых климатических нормах в период 2010-39 гг. для каждого из сценариев получены по результатам моделей MPIM:ECHAM5, CGCM2, GFDL:CM2 и UKMO:HADCM3 (таблица 1).

Таблица 1. Климатические нормы годовых сумм осадков (\bar{N} , [мм]) и среднегодовой температуры воздуха (\bar{T} , [°C]): данные наблюдений и в период 2010-39 гг. по осредненным данным четырех МОЦА

Регион	1936-80		COMMIT		SRES:A1B		SRES:A2		SRES:B1	
	\bar{N}	\bar{T}	\bar{N}	\bar{T}	\bar{N}	\bar{T}	\bar{N}	\bar{T}	\bar{N}	\bar{T}
Арктика в целом	378	-10.3	418	-10.2	433	-9.9	435	-9.2	437	-9.4
Карелия и Кольский п-ов	506	-0.6	580	-2.0	589	-1.6	596	-1.2	598	-1.3
Северный край	528	-2.1	583	-3.7	603	-3.5	602	-2.7	608	-3.0
Обь-Енисейский район	438	-7.1	404	-11.1	506	-7.8	429	-9.9	426	-10.3
Восточная Сибирь	296	-14.5	350	-12.8	379	-12.2	359	-11.8	364	-12.1

На территории Российской Арктики в целом, согласно сценариям ожидается увеличение нормы годовой суммы осадков в среднем на 14 % и потепление на 0.6 °C. Наибольшие изменения прогнозируются на территории Кольского п-ва и Карелии, а также в Восточной части Сибири: увеличение нормы осадков на 17%/22% и похолодание около 1.5/2.3 °C соответственно. Минимальные/максимальные изменения климатических норм ожидаются согласно сценарию COMMIT/SRES:A2. На арктической территории, климатический сценария SRES:A1B предполагает средние изменения норм метеопараметров, однако их оценки существенно отличаются для различных МОЦА (таблица 2).

Таблица 2. Климатические нормы годовых сумм осадков (\bar{N} , [мм]) и среднегодовой температуры воздуха (\bar{T} , [°C]): данные наблюдений и в период 2010-39 гг. для SRES:A1B

Регион	1936-80		ECHAM5		GFDL		CGCM		HADCM3	
	\bar{N}	\bar{T}	\bar{N}	\bar{T}	\bar{N}	\bar{T}	\bar{N}	\bar{T}	\bar{N}	\bar{T}
Арктика в целом	378	-10.3	502	-9.9	407	-8.8	396	-10.4	427	-10.3
Карелия и Кольский п-ов	506	-0.6	689	-0.6	600	-0.8	469	-1.7	597	-3.4
Северный край	528	-2.1	721	-3.0	577	-2.7	523	-4.3	592	-3.9
Обь-Енисейский район	438	-7.1	565	-8.0	478	-7.6	476	-7.2	506	-8.2
Восточная Сибирь	296	-14.5	443	-12.8	352	-10.8	363	-12.8	358	-12.2

По сценарию SRES:A1B, в целом по территории и для регионов значительное увеличение осадков предсказывает модель ECHAM5: на 33 % - для Арктики и на 50% - для Восточной Сибири. Наименьшие оценки изменений нормы осадков дают модели CGCM и GFDL. На территории Арктики в целом, значительное потепление ожидается согласно расчетам по моделям GFDL и HADCM3.

Ожидаемые климатические нормы получены из центра данных МГЭИК [31]. Далее, на основе климатических норм и статистических характеристик слоя стока весеннего половодья за период наблюдений рассчитаны значения параметра $G_{\bar{N}}$ модели (1). Значения параметра \bar{c} получены с использованием региональных регрессионных зависимостей [27]. На период 2010-39 гг. рассчитаны статистические моменты, нормы и коэффициенты вариации слоя стока весеннего половодья для каждого из климатических сценариев/МОЦА. По данным о существующих и прогнозных значениях норм и коэффициентов вариации стока весеннего половодья выделены районы, где ожидаются значительные изменения режима. В таких районах, расходы малой обеспеченности, рассчитанные по данным наблюдений, могут существенно отличаться от значений ожидаемых в новых климатических условиях.

Согласно полученным результатам, в целом на территории Арктики ожидается увеличение нормы стока весеннего половодья на 23 % и снижение коэффициента его вариации на 14 % при осреднении по всем сценариям (таблица 3).

Таблица 3. Нормы слоя стока весеннего половодья (m_1 , [мм]) и коэффициенты его вариации (C_v): данные наблюдений и оценки на период 2010-39 гг. по осредненным данным четырех МОЦА

Регион	1936-80		COMMIT		SRES:A1B		SRES:A2		SRES:B1	
	m_1	C_v	m_1	C_v	m_1	C_v	m_1	C_v	m_1	C_v
Арктика в целом	162	0.30	191	0.27	200	0.26	205	0.25	203	0.25
Карелия и Кольский п-ов	179	0.32	129	0.38	129	0.36	135	0.36	129	0.36
Северный край	203	0.29	303	0.23	303	0.22	293	0.22	295	0.22
Обь-Енисейский район	204	0.23	209	0.23	222	0.22	222	0.22	220	0.22
Восточная Сибирь	108	0.38	129	0.36	150	0.28	159	0.28	155	0.27

Такая тенденция ожидается и в регионах: наиболее сильное увеличение нормы стока весеннего половодья прогнозируется на территории Северного Края (в среднем на 47 %) и большей части Восточной Сибири за исключением Чукотского полуострова (в среднем на 37 %). Одновременно, на этих же территориях, ожидается снижение коэффициентов вариации стока на 22-23 %. Противоположная

тенденция получена для территории Кольского полуострова и Карелии, где прогнозируется значительное снижение норм стока весеннего половодья (в среднем на 27 %) и увеличение коэффициентов его вариации (в среднем на 14 %). Похожие результаты в оценке ожидаемых изменений режима максимального стока на сопредельной территории северной Финляндии получены в работе [38].

Осредненные по всем климатическим сценариям изменения статистических характеристик стока весеннего половодья наиболее близки к результатам, полученным для сценария SRES:A1B. Однако, различия в оценках, полученных на основе различных МОЦА, велики в рамках этого сценария (таблица 4). В целом по Арктике, изменения по норме/коэффициенту вариации стока весеннего половодья составляют от 16%/7% (CGCM2) до 28%/28% (ECHAM5). Наибольшие изменения режима стока половодья ожидаются согласно модели ECHAM5.

Таблица 4. Норма стока весеннего половодья (m_1 , [мм]) и коэффициент его вариации (Cv): данные наблюдений и в период 2010-39 гг. согласно сценарию SRES:A1B

Регион	1936-80		ECHAM5		GFDL		CGCM		HADCM3	
	m_1	Cv	m_1	Cv	m_1	Cv	m_1	Cv	m_1	Cv
Арктика в целом	162	0.30	208	0.22	198	0.26	188	0.28	204	0.26
Карелия и Кольский п-ов	179	0.32	104	0.38	137	0.35	147	0.37	126	0.37
Северный край	203	0.29	319	0.18	264	0.23	306	0.24	323	0.22
Обь-Енисейский район	204	0.23	253	0.18	204	0.23	201	0.24	228	0.21
Восточная Сибирь	108	0.38	139	0.26	174	0.27	138	0.31	147	0.31

С точки зрения практики, наибольший интерес представляют карты районов, где на период 2010-39 гг. ожидаются значительные изменения по норме слоя стока весеннего половодья (более 15 %) и по коэффициенту его вариации (более 25 %) (рисунок 1). В таких районах, расчетные максимальные расходы малой обеспеченности в период эксплуатации объекта строительства могут существенно отличаться от значений, полученных на основе данных наблюдений. В районах, где ожидается увеличение нормы и/или коэффициента вариации стока весеннего половодья, расчеты по [22] могут существенно занижать значения максимальных расходов малой обеспеченности.

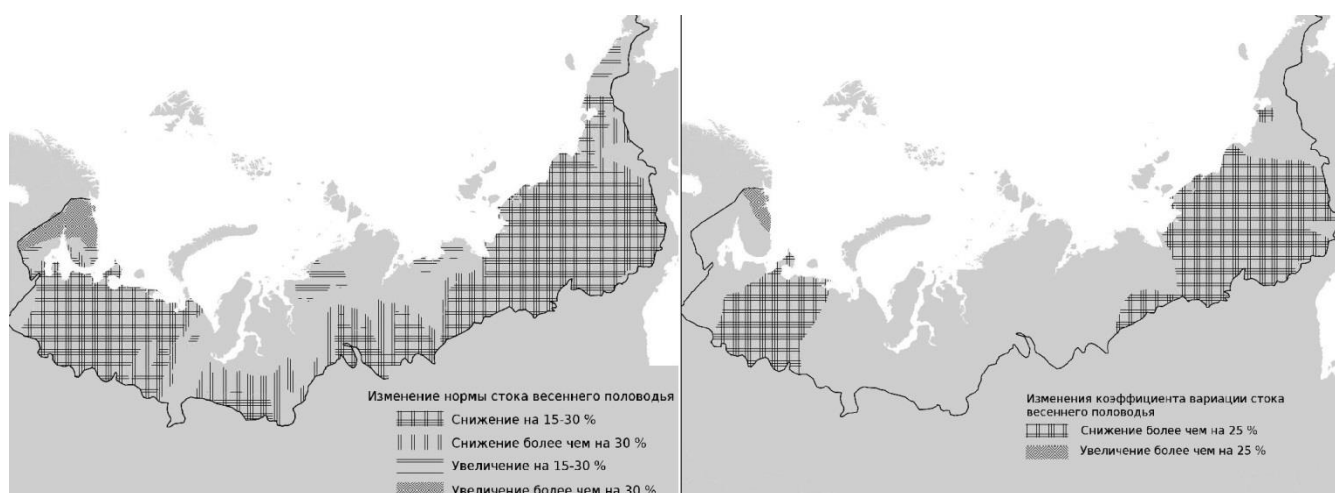


Рисунок 1. Регионы с ожидаемыми значимыми изменениями статистических характеристик стока весеннего половодья в период 2010-39 гг.: сценарий SRES:A1B

Согласно результатам осреднения по четырем МОЦА, ожидается снижение нормы стока весеннего половодья более чем на 15 % в Мурманской области, северо-западных районах Республики Карелия, на севере Ямало-Ненецкого АО и северо-восточных районах Долгано-Ненецкого АО. На северо-западе

Мурманской обл. снижение нормы стока весеннего половодья сопровождается увеличением коэффициента его вариации более чем на 25 %. Увеличение нормы стока более чем на 15 % прогнозируется в южных районах Ямало-Ненецкого АО и Долгано-Ненецкого АО, на севере Республики Саха и Магаданской обл., а также на востоке Чукотского АО. При этом, в восточных районах Архангельской обл., западной части Ненецкого АО и Республики Коми, северо-восточных районах Республики Саха и на севере Магаданской обл. увеличение нормы стока весеннего половодья сопровождается снижением коэффициента его вариации более чем на 25 %.

Практическое использование методики оценки статистических характеристик максимального стока [27] и карт, полученных в настоящей работе, покажем на примере двух водосборов (рис. 2). Река Ура является перспективным водным объектом для строительства малой гидроэлектростанции [15]. Бассейн реки расположен на северо-западе Мурманской области, где в период 2010-39 гг. ожидается снижение нормы стока весеннего половодья и увеличение коэффициента его вариации. Проект железнодорожной магистрали «Северный широтный ход» предусматривает строительство моста через реку Надым. Водосбор расположен в южной части Ямало-Ненецкого АО, где ожидается увеличение нормы стока весеннего половодья. Считаем, что для гидротехнических сооружений ГЭС (р. Ура) и мостового перехода (р. Надым) требуются расчеты максимальных расходов 1 %-ой обеспеченности.

Для каждого выбранного створа, по данным наблюдений рассчитаны нормы, коэффициенты вариации и асимметрии слоя стока весеннего половодья с учетом требований [11, 12, 14] и максимальный расход 1 %-ой обеспеченности согласно [19, 22]. Считается, что в период эксплуатации сооружений этот расход может быть превышен 1 раз в 100 лет, и оцениваются затраты на строительство, риски возникновения аварии и проч. Для учета ожидаемых климатических изменений расчеты дополнены: (i) — по данным одного или нескольких сценариев/МОЦА на период 2010-39 гг. получены нормы годовых сумм осадков (\bar{N} , мм) и среднегодовой температуры (\bar{T} , °C); (ii) — по наблюдаемой и прогнозной климатологии рассчитаны параметры модели и ожидаемые статистические моменты слоя стока весеннего половодья и (iii) — рассчитаны «климатически скорректированные» норма, коэффициент вариации и асимметрии, а также слой стока ($h_{1\%}$, мм) / расход ($Q_{1\%}$, м³с⁻¹) малой обеспеченности (таблица 5).

Таблица 5. Расчет максимальных расходов 1 %-ной обеспеченности на период 2010-39 гг.: по данным наблюдений и с учетом изменений климата по сценарию SRES:A1B

Статистики	р. Ура — Ура Губа					р. Надым — г. Надым				
	1935-80	CGCM	GFDL	HAD3	ECHAM 5	1955-80	CGCM	GFDL	HAD3	ECHAM 5
\bar{N} , мм	525	324	547	641	702	431	466	474	535	609
\bar{T} , °C	-0.9	-1.5	-0.8	-3.9	-1.3	-5.9	-6.3	-6.1	-7.1	-6.3
m_1 , мм	227	151	151	97.4	91.1	160	173	176	199	226
C_v	0.23	0.36	0.28	0.32	0.31	0.28	0.26	0.25	0.23	0.20
$h_{1\%}$, мм	343	298	261	180	166	277	290	290	317	341
$Q_{1\%}$, м ³ с ⁻¹	215	188	164	113	104	8572	8970	8970	9801	10544

Для выбранных водосборов максимальные расходы малой обеспеченности, рассчитанные по данным наблюдений и с учетом ожидаемых изменений климата и режима многолетнего стока, отличаются. Для р. Ура ожидается, что исторический максимальный расход 1 %-ой обеспеченности в условиях новой климатической ситуации имеет вероятность превышения существенно меньшую, чем за период наблюдений (рисунок 2 слева). На таком объекте риск возникновения аварии мал, однако стоимость проекта гидротехнических сооружений ГЭС может быть завышена.

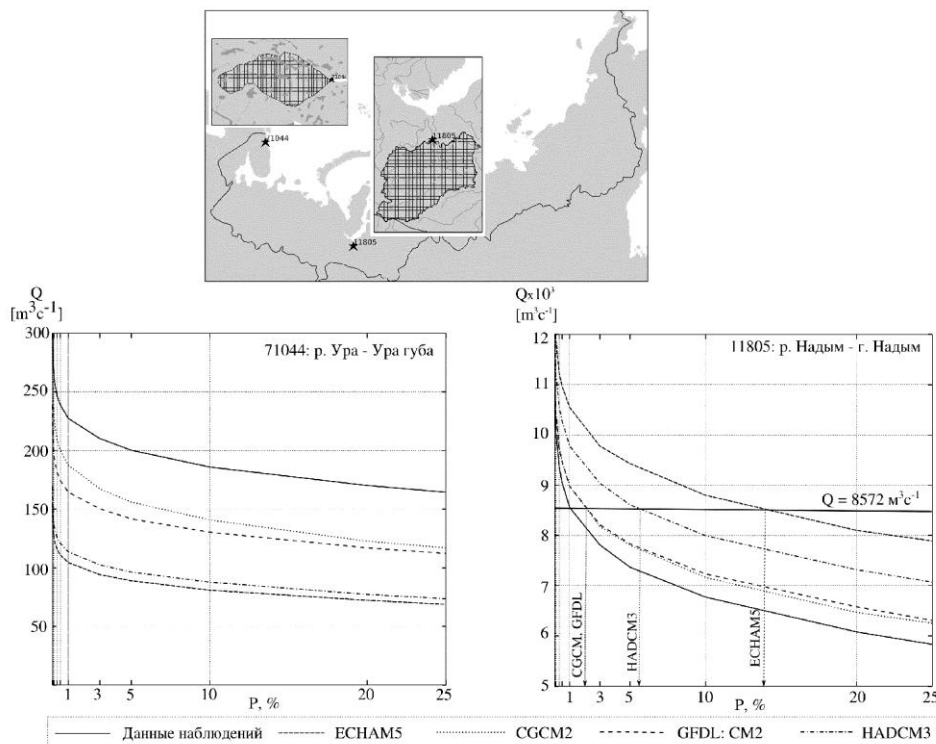


Рисунок 2. Исторические и «климатически скорректированные» расходы малой обеспеченности для двух водных объектов на территории Российской Арктики

Для р. Надым ситуация обратная: в период 2010-39 гг. максимальные расходы 1 %-ой обеспеченности, рассчитанные с учетом данных МОЦА существенно выше, чем расход полученный по данным наблюдений (рисунок 2 справа). В среднем по всем моделям для сценария SRES:A1B ожидается, что максимальный расход 1 %-ой обеспеченности может превышать историческое значение на 1000 м³/с. Вероятность превышения величины исторического максимального расхода при реализации среднего климатического сценария может составлять от 2 до 12 % согласно оценкам различных МОЦА. Риск возникновения аварии на мостовом переходе через р. Надым больше, чем оценивается на основе данных наблюдений.

Заключение

В работе представлена оценка статистических характеристик многолетнего максимального стока на территории Российской Арктики на период 2010-39 гг. Методика оценки основана на стохастической модели формирования многолетнего стока весеннего половодья с учетом региональной специфики. Результаты получены для климатических сценариев COMMIT, SRES:A2, SRES:A1B и SRES:B1 и моделей общей циркуляции атмосферы MPIM:ECHAM5, CGCM2, GFDL:CM2 и UKMO:HADCM3 из набора МГЭИК.

Показано, что в настоящее время гипотеза о «стационарности» режима формирования многолетнего стока подвергается сомнению, что делает актуальными исследования об оценке влияния климата на многолетнего стока. Показано, что на территории Российской Арктики в целом ожидается увеличение нормы годовых осадков и среднегодовой температуры воздуха. Климатический сценарий SRES:A1B представляет средние сценарные оценки изменений норм метеопараметров на арктической территории.

Показано, что в целом для арктического региона ожидается увеличение нормы стока весеннего половодья на 23 % и снижение коэффициента его вариации на 14 % согласно осреднению по всем сценариям изменения климата. Наиболее значительное увеличение нормы стока при одновременном снижении коэффициента вариации ожидается на территории Северного Края и большей части Восточной Сибири за исключением Чукотского полуострова. На Кольском полуострове и в Карелии прогнозируется снижение норм стока весеннего половодья и увеличение коэффициентов его вариации.

Показано, что в период 2010-39 гг. ожидается значительное изменение статистических характеристик стока весеннего половодья в Мурманской области, северо-западных районах Республики

Карелия, Архангельской обл., Республики Коми, на территории Ненецкого, Ямало-Ненецкого и Долгано-Ненецкого АО, на севере Республики Саха и Магаданской обл., а также части Чукотского АО. Построены карты районов, где величина изменений по норме/коэффициенту вариации стока весеннего половодья превышает 15%/25% по сравнению с историческими значениями. В таких районах, расчеты максимальных расходов малой обеспеченности по данным наблюдений [22] без учета ожидаемых изменений климата может привести к занижению/завышению расчетных величин на период эксплуатации гидротехнических сооружений.

Представлены примеры практического использования методики оценки статистических характеристик стока весеннего половодья на территории Российской Арктики [27] и карт районов, где ожидаются значительные изменения режима формирования многолетнего стока в 2010-39 г.. По данным наблюдений и с учетом ожидаемых изменений климата сделаны расчеты максимальных расходов 1 %-ой обеспеченности для двух водных объектов на территории Российской Арктики.

Исследования по оценке долгосрочных изменений статистических характеристик максимального стока могут быть продолжены в направлении улучшения качества методики за счет учета ожидаемых изменений вариации метеопараметров. Кроме того, на основе имеющихся климатических сценариев на временные интервалы 2040-69 и 2070-99 могут быть получены общие тенденции изменений режима максимального стока на территории Российской Арктики до конца текущего столетия.

Исследования финансировались Министерством образования и науки РФ при выполнении НИР «Адаптация математических моделей формирования вероятностных характеристик многолетних видов речного стока к физико-географическим условиям России для целей обеспечения устойчивости их решений при моделировании и прогнозировании» (№ 1413).

Литература

1. Баруча-Рид А.Т. Элементы теории Марковских процессов и их приложения. М.: Наука, 1969. 511 с.
2. Безручко Б.П., Смирнов Д.А. Математическое моделирование и хаотические временные ряды. Саратов: Из-во ГосУНЦ «Колледж», 2005. 320 с.
3. Викторова Н.В. Исследование применимости стохастической модели формирования летне-осеннего и зимнего минимального стока для оценки гидрологических последствий антропогенного изменения климата. Автореф. дисс. канд. техн. наук. СПб: РГГМИ, 2002. 19 с.
4. Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования стока. М.: Наука, 2007. 279 с.
5. Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.Л. Гидрологический режим и водные ресурсы // В кн. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М.: Росгидромет, 2012. С. 53-86.
6. Иванов В.В., Янкина В.А. Водные ресурсы Арктики, их изученность и очередные задачи исследований // Проблемы Арктики и Антарктики. Вып. 66. 1991. С. 118-128.
7. Коваленко В.В. Гидрологическое обеспечение надежности строительных проектов при изменении климата. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2009. 100 с.
8. Коваленко В.В., Викторова Н.В., Гайдукова Е.В., Громова М.Н., Хаустов В.А., Шевнина Е.В. Методические рекомендации по оценке обеспеченных расходов проектируемых гидротехнических сооружений при неустановившемся климате. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2010. 51 с.
9. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. О приемах исследования случайных колебаний речного стока // Труды НИУ ГУГМС. Сер.IV, вып.29. 1946. С.3-32.
10. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Водохозяйственные расчеты. Л.: Гидрометеиздат, 1952. 392 с.
11. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при наличии данных гидрометрических наблюдений. Нижний Новгород: Вектор-Тис, 2007. 134 с.
12. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при недостаточности данных гидрометрических наблюдений. СПб: Из-во ААНИИ, 2008. 66 с.
13. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. СПб: Нестор-История, 2009. 193 с.
14. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определении их расчетных значений по неоднородным данным. СПб: Нестор-История, 2010. 162 с.
15. Минин В.А., Дмитриев Г.С. Перспективы освоения нетрадиционных и возобновляемых источников энергии на Кольском полуострове. Мурманск: Изд-во Белтона, 2007. 94 с.
16. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1-6. Выпуск 2. Мурманская область. Л. Гидрометеиздат. 1988. 315 с.
17. Никаноров А.М., Иванов В.В., Брызгалов В.А. Реки Российской Арктики в современных условиях антропогенного воздействия. Ростов-на-Дону: Изд-во НОК, 2007. 271 с.
18. Поляков Б.В. Гидрологический анализ и расчеты. Л.: Гидрометеиздат, 1946. 479 с.
19. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. Л.: Гидрометеиздат. 1984. 447 с.
20. Пространственно-временные колебания стока рек СССР. Под ред. Рождественского А.В. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 375 с.
21. СНиП 2.01.14-83. Определение расчетных гидрологических характеристик.
22. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик.
23. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.youngscience.ru/pages/main/documents/5124/11484/index.shtml> (дата обращения: 30.04.2014)
24. Хаустов В.А. Чувствительность вероятностных характеристик максимального стока к антропогенным изменениям климата // В сб.: Экстремальные гидрологические события в Арало-Каспийском регионе. М: Россельхозакадемия, 2006. с. 129-133.

25. Шевнина Е.В. Анализ стационарности многолетних рядов стока весеннего половодья на водосборах Российской Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 2011. №1 (87). С. 56-64.
26. Шевнина Е.В. Анализ связи норм годовых и зимних осадков с нормами стока весеннего половодья рек Российской Арктики // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2011. № 20. С. 6-12.
27. Шевнина Е.В. Оценка качества методики долгосрочного прогнозирования вероятностных характеристик многолетнего слоя стока весеннего половодья на ретроспективном материале // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. №3 (93). С 40-50.
28. Шикломанов И.А. Влияния антропогенных изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы // В кн.: Глобальные изменения климата и их последствия для России. М.: Росгидромет, 2002. С. 384-404.
29. Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.Л. О влиянии потепления климата на сток крупных рек России. Проблемы гидрометеорологии и мониторинга загрязнения окружающей среды в бассейне великих рек // В сб. материалов конгресса международного научно-промышленного форума: «Великие реки 1999-2004». СПб.: Гидрометеоиздат, 2005. С. 211-213.
30. Assessing the Impact of Climate Change on Water Supply and Flood Hazard in Ireland Using Statistical Downscaling and Hydrological Modeling Techniques (2006) / Charlton R., Fealy R., Moore S., Sweeney J., Murphy C. Climatic change. 2006. Vol. 74. Issue 4. Pp.475-491.
31. Climate Change: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC. 2007. 107 p.
32. Lawrence D., Haddeland I. (2011) Uncertainty in hydrological modeling of climate change impacts in four Norwegian catchments. Hydrology Research. 2011. Vol. 42. Issue 6. Pp. 457-471.
33. Guidelines for determining flood flow frequency: Bulletin 17-B. Hydrology Subcommittee: Interagency Committee on Water Data (IACWD). 1982. 8 p.
34. Hofierka J., Parajka J., Mitasova H. [et. al.] (2002). Multivariate interpolation of precipitation using regularized spline with tension. Transaction in GIS. 2002. Vol.6. Issue 2. Pp. 135-150.
35. A review of applied methods in Europe for flood-frequency analysis in a changing environment (2013) / Madsen H., Lawrence D., Lang M., Martinkova M., Kjeldsen T.R. NERC/Centre for Ecology & Hydrology on behalf of COST. 2013. 170 p.
36. Milly P., Betancourt J., Falkenmark M. [et. al.] (2008) Stationarity is Dead: Whither Water Management. Science. 2008. 319. pp.573-574.
37. Vinogradov Y. B., Semenova O. M., Vinogradova T. A. (2011) An approach to the scaling problem in hydrological modelling: the deterministic modelling hydrological system. Hydrological Processes. 2011. Vol. 25. Pp. 1055–1073.
38. National scale assessment of climate change impacts on flooding in Finland (2010) / Veijalainen, N. Lotsari E., Alho P., Vehviläinen B., Käyhkö J. Journal of Hydrology. 2010. 391. Pp. 333- 350.

Changes of maximal flow regime in Arctic

E.V. Shevnina¹

Russian State Hydrometeorological University, Malookhtinsky prospect 98, Saint-Petersburg, 195196, Russia

ARTICLE INFO

Original research article

Grant from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation "Adaptation of mathematical models of the formation of the probability characteristics of perennial species of river flow to the physiographic conditions of Russia", №1413

Article history

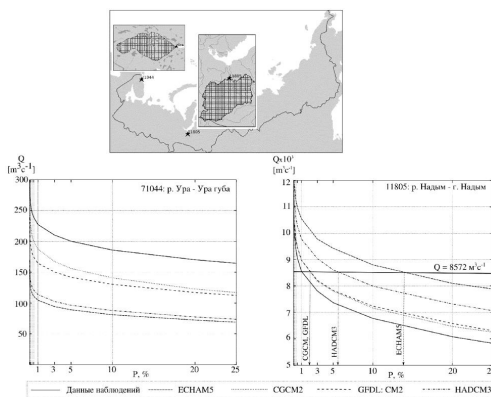
Received 7 June 2014
Accepted 12 July 2014

Keywords

long-term estimation,
multi-year statistics,
maximal flow,
climate change,
construction design,
the Russian Arctic

ABSTRACT

For the Russian Arctic territory, expected changes of multi-annual maximal flow statistics is estimated for the period of 2010-39. Results are obtained for the climate scenarios SRES:A2, SRES:A1B and SRES:B1 for four projections from Global Circulation Models. The method of the long-term estimation of the multi-annual maximal flow statistic is based on stochastic model of a spring flood flow with regional adaptation. For the most part of Arctic, the significant changes of the multi-annual maximal flow are expected. Regions with expected significant changes in multi-annual mean values and variation coefficients are outlined. In such zone, the correction of maximal discharge "upper-tail" values is recommended. Examples of maximal discharges of 1 % probability of exceedance are shown for two catchments.



1

Corresponding author:
+7 (911) 733 2083, eshevnina@gmail.com (Elena Valentinovna Shevnina, Ph. D., Associate Professor)

References

1. Barucha-Rid A. (1969) *Elementy teorii Markovskikh processov i ee prilozheniya* [Elements of the teoria of a Markov processes and their applications]. Moscow: Nauka, 1969. 511 p. (rus)
2. Bezruchko B. P., Smirnov D.A. (2005) *Matematicheskoe modelirovanie i haoticheskie vremennye ryady* [Mathematical modeling and chaotic time series] Saratov: izd-vo GosUNC «Kolledge», 2005. 320 p. (rus)
3. Viktorova N.V. (2002) *Issledovanie primenimosti stohasticheskoy modeli formirovaniya letne-osenego i zimnego stoka dlya ocenki gidrologicheskoy posledstviy antropogennogo izmeneniya klimata* [Study of an applicability of a summer-autumn and winter minimum flow stochastic model to estimate a hydrological responce to an anthropogenic climate change] PhD tesis. Sankt Peterburg: RSHI, 2002. 19 p. (rus)
4. Gelfan A.N. (2007) *Dinamiko-stohasticheskoe modelirovanie formirovaniya stoka* [Dynamic-stochastic modeling of runoff formation] Moskow: Naika, 2007. 279 p. (rus)
5. Gorgievskiy V.U., Shalygin A.L. (2012) *Gidrologicheskii regim i vodnye resursy* [Hydrological regime and water resources]. V kn. *Metody ochenki posledstviy izmeneniya klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh sistem* [In book: Methods to estimate climate change impact to a physical and biological systems]. Moskow:Rosgidromet, 2012. Pp. 53-86. (rus)
6. Ivanov V.V., Yankina V.A. (1991) Problem of Arctic and Antarctic. 1991. Issue 66. Pp. 118-128.
7. Kovalenko V. V. (2009) *Gidrologicheskoe obespechenie nadegnosti stroitelnykh proektov pri izmenenii klimata* [Hydrological justification for a building projects under the climate change] Sankt Petersburg: RSHU, 2009. 100 p. (rus)
8. *Metodicheskie rekomendatsii po ocenke obespechennykh pashodov proektiruemyykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy pri neustanovivshemsya climate* / Kovalenko V., Viktorova N., Gaydukova E., Gromova M., Khaustov V., Shevnina E. [Guidelines to estimate a multi-annual runoff values under non-steady climate for a hydraulic contractions projects]. Sankt Petersburg:RSHU, 2010. 51 p. (rus)
9. Kritskiy S.N., Menkel M. F. (1946) Proceeding of NIU GUGMS. 1946. Part IV, Issue 29. Pp.3-32. (rus)
10. Kritskiy S.N., Menkel M. F. (1952) *Vodohozyaistvennyye raschety* [Water resources calculations]. Leningrad: Gidrometizdat, 1952. 392 p. (rus)
11. *Metodicheskie rekomendatsii po opredeleniyu raschetnykh gidrologicheskikh harakteristik pri nalichii dannykh gidrometricheskikh nabljudeniy* [Guidelines to estimate design hydrological characteristics with hydrometric observations]. Nizhny Novgorod: Vektor-TiS, 2007. 134 p. (rus)
12. *Metodicheskie rekomendatsii po opredeleniyu raschetnykh gidrologicheskikh harakteristik pri nedostatochnosti dannykh gidrometricheskikh nabljudeniy* [Guidelines to estimate design hydrological characteristics with limited hydrometric observations]. Sankt Peterburg: AARI, 2008. 66 p. (rus)
13. *Metodicheskie rekomendatsii po opredeleniyu raschetnykh gidrologicheskikh harakteristik pri otsutstviy dannykh gidrometricheskikh nabljudeniy* [Guidelines to estimate design hydrological characteristics with absence of a hydrometric observations] Sankt Peterburg: Nestor-Istoriya, 2009. 193 p. (rus)
14. *Metodicheskie rekomendatsii po ocenke odnorodnosti gidrologicheskikh harakteristik i opredelenii ih raschetnykh znacheniy po neodnorodnym dannym* [Guidelines to evaluate of a hydrological characteristics and to estimate of their values for a heterogeneous data] Sankt Peterburg: Nestor-Istoriya, 2010. 162 p. (rus)
15. Minin V.A., Dmitriev G.S. (2007) *Perspektivy osvoeniya netraditsionnykh i vobnovlyаемyykh istochnikov jenergii na Kol'skom poluostrove* [Prospects of alternative and renewable energy sources development in the Kola Peninsula]. Murmansk: Beltona, 2007. 94 p. (rus)
16. *Nauchno-prikladnoy spravochnik po klimatu SSSR. Seriya 3. Mnogoletnie dannye. Chasti 1-6. Vypusk 2. Murmanskaya oblast'* [Applied Research handbook on climate of the USSR. Series 3. Multi-annual data. Parts 1-6. Issue 2. Murmansk region]. Leningrad:Gidrometeoizdat, 1988. 315 p. (rus)
17. Nikanorov A.M., Ivanov V.V., Bryzgalo V.A. (2007) *Reki Rossijskoj Arktiki v sovremennykh usloviyakh antropogennogo vozdeystviya* [The Russian Arctic rivers in modern conditions of anthropogenic impact]. Rostov-na-Donu: NOK, 2007. 271 p. (rus)
18. Polyakov B.V. (1946) *Gidrologicheskii analiz i raschety* [Hydrologic analysis and calculations]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1946. 479 p. (rus)
19. *Posobie po opredeleniyu raschetnykh gidrologicheskikh harakteristik* [Handbook to estimate design hydrological characteristics]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984. 447 p. (rus)

20. *Prostranstvenno vremennye kolebaniya stoka rek SSSR* [Spatial and temporal variations of a river runoff in USSR]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988. 375 p. (rus)
21. SNiP 2.01.14-83. *Opreделение raschetnykh gidrologicheskikh harakteristik* [Definition of a design hydrological characteristics] (rus)
22. SP 33-101-2003. *Opreделение osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh harakteristik*. [Definition of a basic design hydrological characteristics] (rus)
23. *Strategiya razvitiya Arkticheskoy zony Rossijskoj Federacii i obespecheniya nacional'noj bezopasnosti na period do 2020 goda*. [Development Strategy of the Russian Arctic and national security for the period until 2020]. [web source]. URL: <http://www.youngscience.ru/pages/main/documents/5124/11484/index.shtml> (date of reference: 30.04.2014)
24. Haustov V.A. (2006) *Chuvstvitel'nost' veroyatnostnykh harakteristik maksimal'nogo stoka k antropogennym izmeneniyam klimata* [Sensitivity of probabilistic characteristics maximum runoff to anthropogenic climate change] V sb.: Jekstremal'nye gidrologicheskie sobytija v Aralo-Kaspijskom regione [In book: Extreme hydrological events in Aral-Caspian region]. Moscow: Rossel'hozakademiya, 2006. Pp. 129-133. (rus)
25. Shevnina E.V. Problems of Arctic and Antarctic. 2011. No 1 (87). Pp. 56-64. (rus)
26. Shevnina E.V. Scientific reports of Russian State Hydrometeorological University. 2011. No 20. Pp. 6-12. (rus)
27. Shevnina E.V. Problems of Arctic and Antarctic. 2012. No 3 (93). Pp. 40-50. (rus)
28. Shiklomanov I.A. *Vlijaniya antropogennykh izmenenij klimata na gidrologicheskij rezhim i vodnye resursy* [Anthropogenic climate change influence to a hydrological regime and water resources]. V kn.: Global'nye izmeneniya klimata i ih posledstviya dlja Rossii. [In book: Global climate change and its consequences for Russia]. Moscow: Rosgydromet, 2002. Pp. 384-404. (rus)
29. Shiklomanov I.A., Georgievskij V.Ju., Shalygin A.L. (2005) *O vlijanii potepleniya klimata na stok krupnykh rek Rossii. Problemy gidrometeorologii i monitoringa zagryazneniya okruzhajushhej sredy v bassejne velikih rek* [Climate warming influence to large rivers of Russia. Problems of hydrometeorology and monitoring of environmental pollution in the basin of great rivers] V sb. Velikie reki: 1999-2004 [In book: Great Rivers 1999-2004]. Sankt Peterburg: Gidrometeoizdat, 2005. Pp. 211-213. (rus)
30. Charlton R., Fealy R., Moore S. [et. al.] (2006) Assessing the Impact of Climate Change on Water Supply and Flood Hazard in Ireland Using Statistical Downscaling and Hydrological Modeling Techniques. Climatic change. 2006. Vol. 74. Issue 4. Pp. 475-491.
31. Climate Change: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC. 2007. 107 p.
32. Lawrence D., Haddeland I. Uncertainty in hydrological modeling of climate change impacts in four Norwegian catchments // Hydrology Research. 2011. 42(6). pp. 457-471.
33. Guidelines for determining flood flow frequency: Bulletin 17-B. Hydrology Subcommittee: Interagency Committee on Water Data (IACWD). 1982. 8 p. and appendices.
34. Multivariate interpolation of precipitation using regularized spline with tension. / Hofierka J., Parajka J., Mitasova H., Mitas L. Transaction in GIS. 2002. Vol. 6. Issue 2. Pp. 135-150.
35. A review of applied methods in Europe for flood-frequency analysis in a changing environment (2013) / Madsen H., Lawrence D., Lang M., Martinkova M., Kjeldsen T.R NERC/Centre for Ecology & Hydrology on behalf of COST. 2013. 170 p.
36. Stationarity is Dead: Whither Water Management. (2008) / Milly P., Betancourt J., Falkenmark M., Hirsch R.M., Kundzewicz Z.W., Lettenmaier D.P., Stouffer R.J. Science. 2008. 319. Pp.573-574.
37. Vinogradov Y. B., Semenova O. M., Vinogradova T. A. (2011) An approach to the scaling problem in hydrological modelling: the deterministic modelling hydrological system. Hydrological Processes. 2011. 25. Pp. 1055-1073.
38. National scale assessment of climate change impacts on flooding in Finland (2010) / Veijalainen, N. Lotsari E., Alho P., Vehviläinen B., Käyhkö J. Journal of Hydrology. 2010. 391. Pp. 333- 350.