

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ОТСУТСТВИИ ДАННЫХ ГИДРОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ: ПОТЕНЦИАЛ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕГИОНАЛЬНОГО СЕТОЧНОГО РЕАНАЛИЗА РЕЧНОГО СТОКА

Г.В. Айзель<sup>1</sup>, Е.В. Белозёров<sup>2</sup>, Л.С. Курочкина<sup>1</sup>

E-mail: hydrogo@yandex.ru

<sup>1</sup> ФГБУ «Государственный гидрологический институт»,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук»,  
Москва, Россия

**АННОТАЦИЯ:** Инженеры-гидрологи сталкиваются с необходимостью определения расчетных гидрологических характеристик для участков рек, не охваченных регулярной сетью гидрометрических наблюдений. Данная задача обычно решается с помощью классических методов, изложенных в СП 33-101-2003 «Определение основных расчетных гидрологических характеристик», и имеет высокую трудоемкость, связанную как с поиском и приобретением гидрологических данных, так и с процедурой расчетов. В представленной работе предложено свести определение характеристик речного стока при отсутствии данных наблюдений к более простой для решения задаче определения характеристик речного стока при наличии данных наблюдений.

Предлагается использовать региональный сеточный реанализ речного стока R5 в качестве источника модельного приближения реальных расходов воды в речных створах. Результаты расчетов показывают высокий потенциал предложенного подхода для определения расчетных характеристик речного стока. Так, для речных бассейнов Верхней Волги отклонения расчетных величин от справочных данных оказались минимальны. База данных R5 получена с использованием свободно распространяемого программного обеспечения и открытых источников данных – концептуальной модели формирования речного стока GR4J и метеорологического реанализа WFDEI. База данных охватывает как большой географический домен в рамках Европейской территории России, так и продолжительный временной период (1979–2016 гг.).

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** речной сток, гидрологические характеристики, гидрологическое моделирование, водосбор, реанализ стока.

Речной сток – важная гидрологическая характеристика, определяющая кумулятивный отклик сложноорганизованной ландшафтной системы водосборного бассейна на внешние метеорологические воздействия. Понимание

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-60005

© Айзель Г.В., Белозёров Е.В., Курочкина Л.С., 2020

процессов формирования речного стока и его пространственно-временной изменчивости является важнейшим направлением развития гидрологической науки и имеет непосредственное влияние на практику инженерно-гидрометеорологических изысканий [1, 2]. Так, определение расчетных характеристик речного стока является неотъемлемой частью работ по проектированию объектов капитального строительства (например, систем напорных трубопроводов, автомобильных и железных дорог), а также объектов инженерной инфраструктуры (защитных дамб и водопропускных коллекторов). Таким образом, эффективный и надежный расчет характеристик речного стока лежит в основе мер по минимизации воздействия опасных гидрологических явлений на важные инфраструктурные объекты, а также дает представление о потенциале развития водохозяйственного комплекса [3].

На протяжении многих лет расчеты характеристик речного стока в рамках инженерно-гидрометеорологических изысканий для строительства проводятся на основе методик, изложенных в СП 33-101-2003 «Определение основных расчетных гидрологических характеристик», которые являются минорным обновлением СНиП 2.01.14-83. Таким образом, методологическая основа определения расчетных характеристик речного стока не обновлялась более 35 лет. Данное обстоятельство легло в основу дискуссии о необходимости изменения существующих методических подходов, т. к. надежность их применения в современных условиях быстро изменяющейся природной среды зачастую вызывает вопросы [4, 5].

К сожалению, стагнация методических основ определения характеристик речного стока является далеко не единственной проблемой в области инженерно-гидрологических изысканий. В открытом доступе отсутствуют данные продолжительных рядов наблюдений за речным стоком на гидрологических постах, зачастую их необходимо приобретать на коммерческой основе у авторизованных государственных структур. Эти вопросы особенно остро встают при проведении расчетов характеристик речного стока для неизученных бассейнов, что требует как трудозатратных вычислений, так и получения рядов наблюдений для большого числа рек-аналогов [6].

В данном исследовании предлагается взглянуть на проблему определения расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений с точки зрения современных тенденций в области гидрологического моделирования [7, 8]. Так, разработка новых гидрологических моделей и методик районирования их модельных параметров [9, 10], а также новых продуктов метеорологического реанализа [11], публикация открытых баз данных наблюдений за речным стоком [12, 13] дали толчок к появлению глобальных и региональных сеточных баз данных реанализа речного стока [8, 14, 15]. Таким образом, стала возможной оценка речного стока за продолжительный период для любого водосбора, входящего в домен соответствующего реанализа стока [14].

Тем не менее, открывшаяся возможность использования глобальных и региональных сеточных реанализов для определения характеристик речного стока при отсутствии данных наблюдений не нашла должного применения в сфере инженерно-гидрометеорологических изысканий. Закрыть указанный пробел можно на основе использования регионального сеточного реанализа речного стока R5 [16] в качестве источника модельного приближения реальных расходов воды, на базе которого будут рассчитаны основные характеристики речного стока на конкретных водосборах.

Цель данного исследования – оценка потенциала использования регионального сеточного реанализа речного стока R5 применительно к задаче определения расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений.

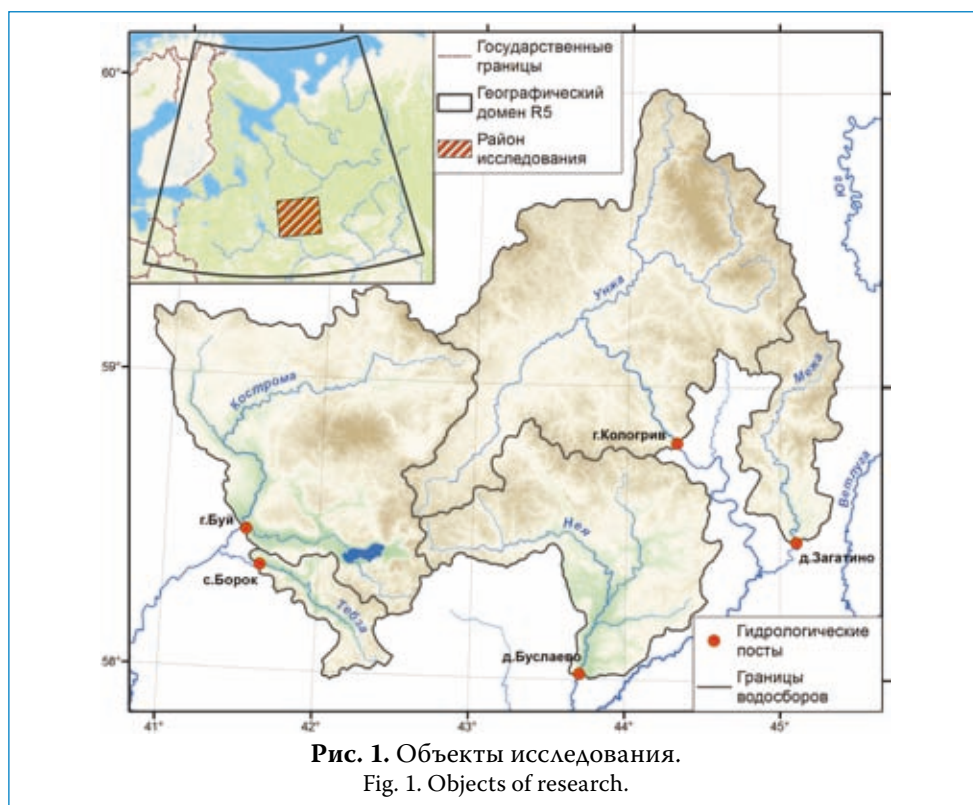
### **ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Для исследования выбрано пять речных водосборов в бассейне Верхней Волги (рис. 1, табл. 1). Важно отметить, что данные водосборы не были использованы при создании сеточного реанализа речного стока R5 [16], а значит полученные для них оценки речного стока можно охарактеризовать как независимые. Основные физико-географические характеристики бассейна Верхней Волги, а также характеристики гидрологической сети и ее изученности представлены в научно-прикладном справочнике ГГИ (далее – Справочник ГГИ) [17].

Основные характеристики регионального сеточного реанализа речного стока R5:

- географический домен: 25–57° в.д., 55–70° с.ш.;
- доступный период: 1979–2016 гг.;
- разрешение по времени один месяц;
- пространственное разрешение 0,5°;
- в открытом доступе по ссылке: <https://zenodo.org/record/2600695>.

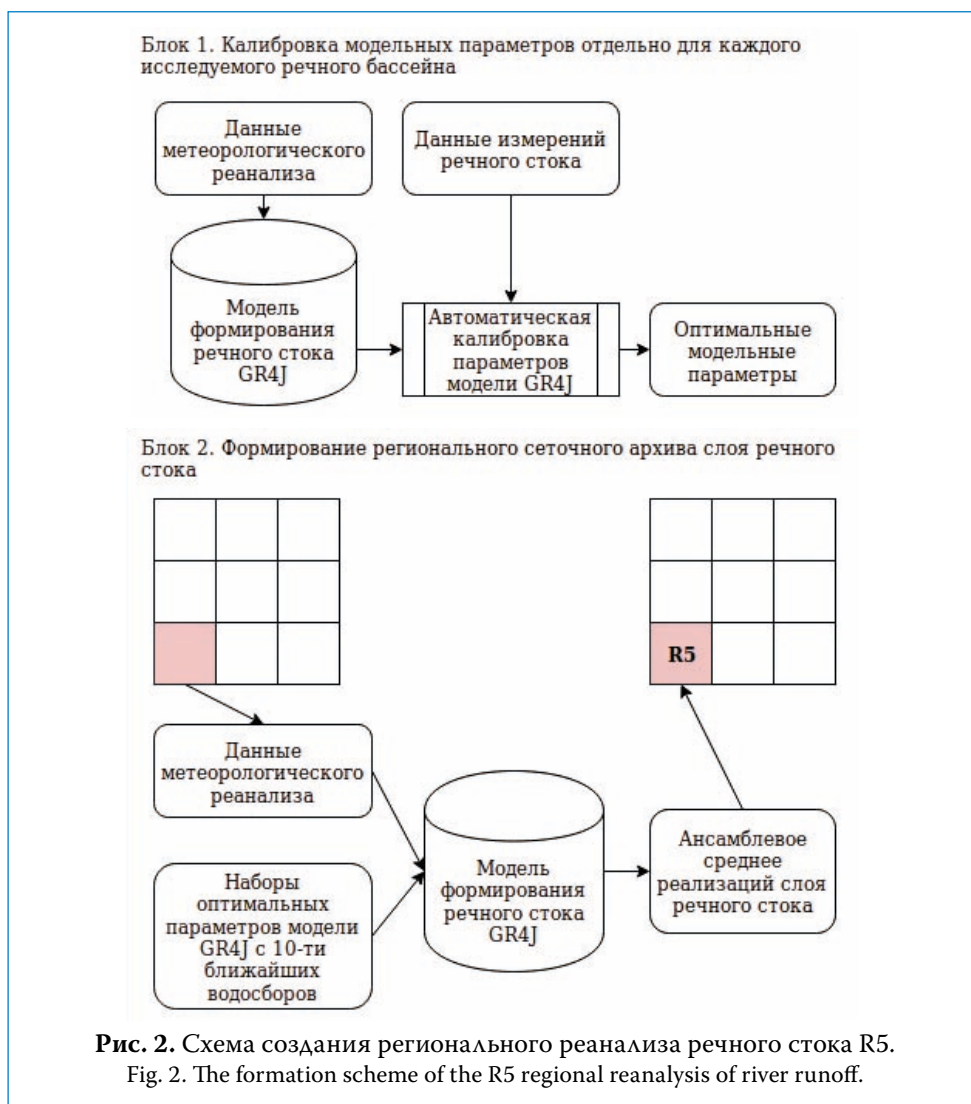
На рис. 2 представлена принципиальная схема разработки регионально-сеточного реанализа речного стока R5 [16]. В основе создания реанализа R5 лежит концептуальная гидрологическая модель GR4J [18], которая была сопряжена с моделью формирования снежного покрова Сема-Neige [19]. Модели GR4J и Сема-Neige имеют, соответственно, четыре и два свободных параметра, значения которых определяются путем численной оптимизации с использованием глобального алгоритма дифференциальной эволюции [20]. В качестве входных метеорологических данных для модели GR4J выступают суточные ряды средней температуры воздуха, количества осадков, а также суммарного испарения. В качестве источника метеорологической информации использован сеточный реанализ WFDEI [21], охватывающий временной интервал с 1979 по 2016 гг. Разработанный реанализ речного стока R5 имеет аналогичный временной охват.



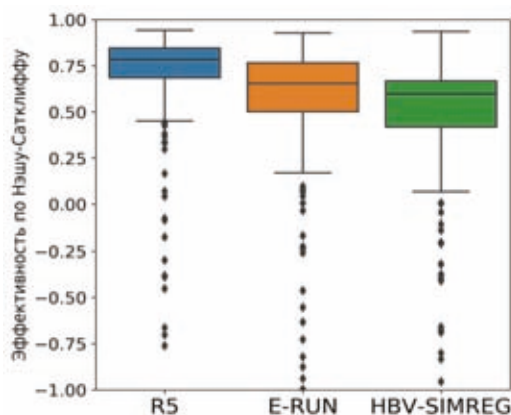
**Таблица 1.** Основные характеристики исследуемых водосборов  
Table 1. Main characteristics of the catchment territories under investigation

Река – створ	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Широта, ° с.ш.	Долгота, ° в.д.	Высота, м. абс.
р. Кострома – г. Буй	8910	58,48	41,53	161
р. Тебза – с. Борок	1030	58,35	41,63	156
р. Унжа – г. Кологрив	11 600	59,33	43,5	180
р. Межа – д. Загатино	2110	58,47	45,1	173
р. Нея – д. Буславо	5630	58,02	43,72	158

При подготовке реанализа R5 использованы продолжительные ряды наблюдений на 289 гидрометрических створах, для водосборов которых откалиброванная модель GR4J показала хорошие результаты [16]. Для получения оценки речного стока в конкретной ячейке реанализа R5 (всего 1920 ячеек), для этой ячейки определены десять ближайших (в пространстве) речных водосборов, с которых были перенесены оптимальные параметры



модели GR4J для последующего расчета речного стока. В итоге полученный ансамбль реализаций суточного речного стока был усреднен и преобразован в среднемесячные оценки (рис. 2). Сравнение продукта R5 с другими региональными [22] и глобальными [23] сеточными реанализами речного стока на основе критерия эффективности Нэша–Сатклиффа (рис. 3) для водосборов северо-запада Европейской территории России показало, что R5 превосходит конкурирующие продукты по точности моделирования среднемесячного речного стока [16].



**Рис. 3.** Сравнение R5 с другими продуктами регионального (E-RUN) и глобального (HBV-SIMREG) сеточного реанализа речного стока.

Fig. 3. Comparison of R5 with other products of regional (E\_RUN) and global (HBV-SIMREG) gridded reanalysis of river runoff.

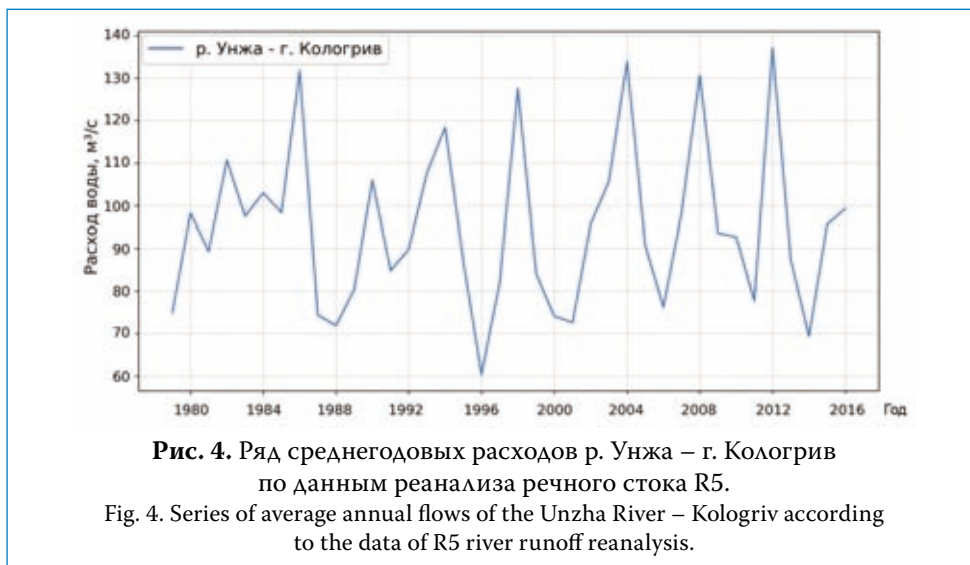
### Авторский метод расчета основных гидрологических характеристик

В данном исследовании предлагается авторская методика расчета основных гидрологических характеристик, основанная на использовании открытого программного обеспечения, а именно языка программирования python и его специализированных библиотек для статистического анализа *scipy* [24] и *numpy* [25]. Применение открытого программного обеспечения для анализа свободно распространяемого продукта R5 сделает данное исследование более доступным для широкой аудитории и инициирует новые исследования по оценке эффективности реанализа стока R5 для решения других гидрологических задач.

Предложенный метод состоит из нескольких простых этапов. Во-первых, для каждого исследуемого водосбора проведена оценка среднегодовых расходов воды за период с 1979 по 2016 гг. на основе реанализа R5 (рис. 4). Для этого определен удельный вес, который занимает каждая индивидуальная ячейка R5, лежащая в пределах границ исследуемого водосбора. Далее, на основе полученных весов, вычисляется средневзвешенное значение годовых расходов воды ( $\text{м}^3/\text{с}$ ). В итоге для каждого объекта исследования получен ряд модельного приближения среднегодовых расходов воды продолжительностью 38 лет (1979–2016 гг.), который можно считать продолжительным в соответствии с рекомендациями СП 11-103-97 (п. 4.12). Данный ряд используется для дальнейшего расчета основных характеристик речного стока:

- среднегодового многолетнего расхода воды,  $q$ ;
- коэффициента вариации речного стока,  $cv$ ;

- отношения коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации речного стока,  $cs/cv$ ;
- коэффициента автокорреляции первого порядка,  $ar(1)$ ;
- среднегодовых расходов воды обеспеченностью 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95, 98, 99.



Предварительно полученные ряды среднегодовых расходов воды были проанализированы на однородность по среднему и дисперсии методом Т-теста Стьюдента (Student's T-test [26]) и теста Ливена (Levene Test [27]) соответственно. Проведенный анализ не выявил статистически значимых различий в оценках средних и дисперсий за периоды 1979–1997 гг. и 1998–2016 гг. Расчеты среднего многолетнего расхода воды и коэффициента вариации проведены в соответствии с рекомендациями СП 33-101-2003 [28], в то время как для расчета коэффициента асимметрии был использован метод Фишера–Пирсона [29]. Для сглаживания и экстраполяции эмпирических кривых распределения ежегодных вероятностей превышения (кривых обеспеченностей) применено распределение Пирсона III типа [30].

Необходимые для полного воспроизведения результатов программный код и данные реанализа R5 по исследуемым бассейнам, представленным в данном исследовании, доступны в открытой среде научных вычислений Google Colab: <http://shorturl.at/aexXZ>.

#### **Нормативный метод расчета основных гидрологических характеристик**

В данной работе использован также нормативный метод расчета основных гидрологических характеристик для исследуемых водосборов, осно-

ванный на рекомендациях СП 33-11-2003 [28] и реализованный в сертифицированной автоматизированной системе инженерных гидрологических расчетов HydroStatCalc [31]. Для расчета характеристик речного стока полученный из реанализа R5 ряд модельного приближения среднегодовых расходов воды продолжительностью 38 лет (1979–2016 гг.) загружали в программный комплекс HydroStatCalc (рис. 5). Для сглаживания и экстраполяции эмпирических кривых обеспеченностей в HydroStatCalc было выбрано трехпараметрическое распределение Крицкого–Менкеля.



Рис. 5. Пример результатов расчета в программном комплексе HydroStatCalc.

Fig. 5. An example of the calculation outputs in HydroStatCalc software complex.

Основные характеристики годового речного стока, рассчитанные на основе использования данных сеточного реанализа речного стока R5, а также с применением авторского и нормативного методов, в данном исследовании сравнили с справочными данными, приведенные в научно-прикладном справочнике ГГИ по Верхней Волге [17]. Исходными материалами для анализа характеристик годового стока рек бассейна Верхней Волги, приведенными в справочнике ГГИ, послужили ежегодные данные по 462 постам, в т. ч. и ранее закрытым, с рядами наблюдений от 1 до 130 лет [17]. Расчеты параметров основных гидрологических характеристик



выполнены с использованием программного комплекса HydroStatCalc, но дополнительно предусматривают следующие процедуры:

- приведение данных наблюдений за стоком и их параметров к многолетнему периоду;
- оценку однородности и стационарности данных наблюдений статистическими методами, учитывающими специфику многолетних колебаний основных гидрологических характеристик (асимметрию и автокорреляцию).

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты применения распределения Пирсона III типа для сглаживания и экстраполяции эмпирических кривых обеспеченностей среднегодового расхода воды в рамках предложенной авторской методики представлены на рис. 6. Основываясь на визуальном анализе полученных результатов, можно сделать вывод об удовлетворительной эффективности применения распределения Пирсона III типа в рамках данного исследования. Необходимо также отметить, что применение предложенного метода для сглаживания и экстраполяции эмпирических кривых обеспеченностей полностью автоматизировано и не требует дополнительной информации, например, табличных данных или номограмм, предложенных в СП 33-101-2003 [28].

Результаты определения основных характеристик среднегодового речного стока на основе различных методов и источников данных обобщены в табл. 2 и табл. 3. Следует отметить, что авторский и нормативный методы расчета выполнены на основе данных реанализа R5 продолжительностью 38 лет (1979–2016 гг.). Однако в справочнике ГГИ приведены результаты расчета с использованием более длительных периодов наблюдений: 134 года (1877–2010 гг.) для поста р. Тебза – с. Борок и 115 лет (1896–2010 гг.) для остальных объектов исследования. Таким образом, оценки характеристик среднегодового речного стока, представленные в справочнике ГГИ, являются более надежными и их можно считать базовыми при сравнении результатов.

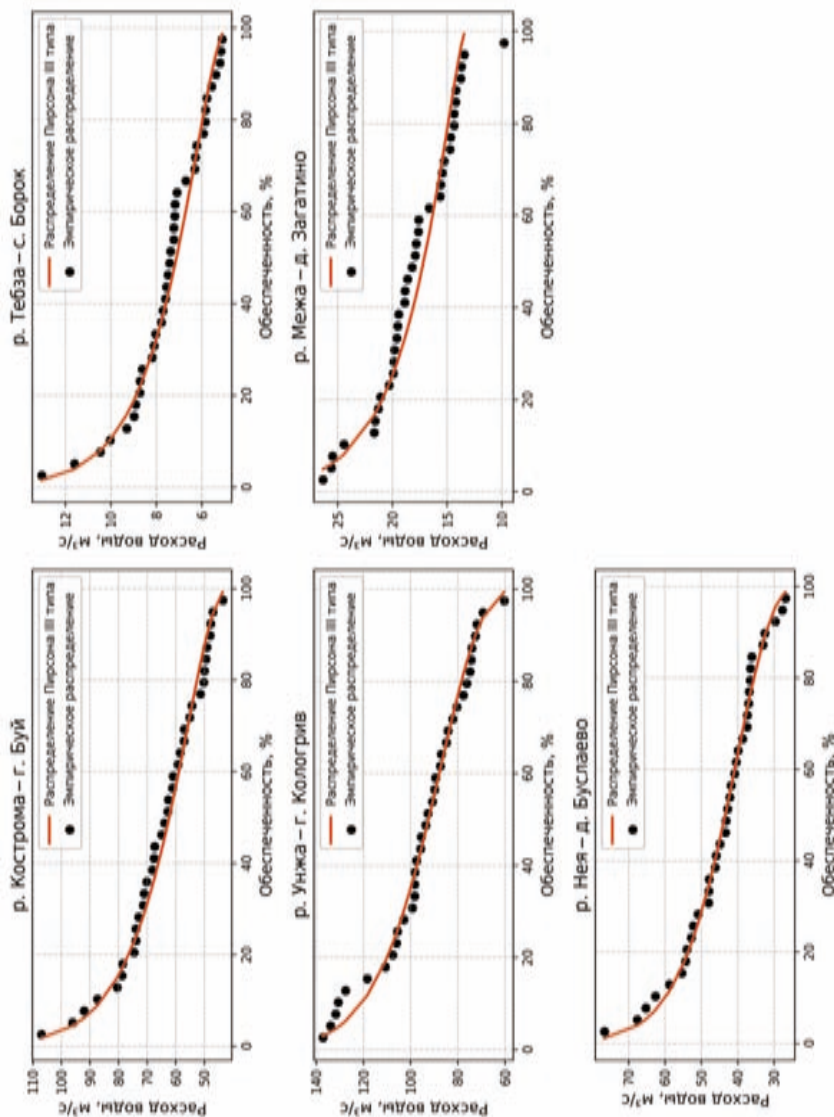
Оценки среднегодового многолетнего расхода воды ( $Q$ ), полученные с помощью авторского и нормативного методов расчета, показывают минимальные отклонения от оценок, приведенных в справочнике ГГИ (табл. 2). Так, максимальное отклонение от справочных данных составляет 8,4 % для поста р. Межа – д. Загатино, для остальных водосборов оно не превышает 3,4 %. Этот результат показывает, что сеточный реанализ стока R5 является надежным источником данных для оценки среднегодового расхода воды для исследуемой территории. Соответственно, реанализ R5 может применяться для регионального анализа водных ресурсов, что в настоящее время весьма актуально для решения задач управления водными ресурсами и развития водного хозяйства.

Полученные на основе использования реанализа стока R5 оценки коэффициента вариации среднегодового расхода воды ( $C_v$ ) являются заниженными по сравнению с оценками  $C_v$  в справочнике ГГИ. Это характерно и для оценок

коэффициента автокорреляции первого порядка – AR(1). Различие в оценках  $C_v$  и AR(1) может быть объяснено использованием намного более продолжительного периода наблюдений за стоком в справочнике ГГИ (превышение более чем в три раза по сравнению с данными R5). В отличие от оценок  $Q$ ,  $C_v$  и AR(1), которые не отличаются для предложенных авторского и нормативного методов, оценки  $C_s/C_v$  имеют видимые различия. Прежде всего, это связано с различием между двумя методиками в способах оценки коэффициента асимметрии стока ( $C_s$ ). Так, в авторской методике  $C_s$  рассчитан на основе использования метода Фишера–Пирсона [29], в то время как в рамках нормативной методики и в справочнике ГГИ  $C_s$  рассчитан методом наибольшего правдоподобия по номограммам в зависимости от статистики [28]. Таким образом, применение данных реанализа стока R5 для районирования территории по соотношению коэффициентов асимметрии и вариации или коэффициенту автокорреляции первого порядка является проблематичным, т. к. не обеспечивает должного уровня консистентности с данными справочника ГГИ.

**Таблица 2.** Результаты сравнения расчетных характеристик среднегодового речного стока для исследуемых водосборов бассейна Верхней Волги  
Table 2. The results of comparison of the estimated characteristics of the average annual river flow for the Upper Volga basin water bodies under investigation

Параметры стока					
Источник	Расчетный период, гг.	$Q$ , м <sup>3</sup> /с	$C_v$ , б/р	$C_s/C_v$ , б/р	AR(1)
р. Кострома – г. Буй					
Справочник ГГИ	1896–2010	67,7	0,28	3	0,26
Нормативный	1979–2016	65,4	0,23	4,2	0
Авторский метод	1979–2016	65,4	0,22	3,6	0
р. Тезза – с. Борок					
Справочник ГГИ	1877–2010	7,79	0,28	1,68	0,38
Нормативный	1979–2016	7,55	0,23	4,5	0
Авторский метод	1979–2016	7,55	0,23	4,25	0
р. Унжа – г. Кологрив					
Справочник ГГИ	1896–2010	94,7	0,27	4,11	0,22
Нормативный	1979–2016	95	0,2	3,1	0,01
Авторский	1979–2016	95	0,2	2,95	0
р. Межа – д. Загатино					
Справочник ГГИ	1896–2010	16,7	0,31	2,61	0,27
Нормативный	1979–2016	18,1	0,21	1,8	0,16
Авторский	1979–2016	18,1	0,21	1,57	0,16
р. Нея – д. Буслаево					
Справочник ГГИ	1896–2010	45	0,28	2	0,22
Нормативный	1979–2016	45	0,25	3,6	0,1
Авторский	1979–2016	45,1	0,25	3,2	0,1



**Рис. 6.** Эмпирические и аналитические кривые обеспеченности среднегодовых расходов воды для исследуемых водосборов.

Fig. 6. Empiric and analytical frequency curves for average annual water flows for the water bodies under investigation.

**Таблица 3.** Результаты сравнения оценки среднегодовых расходов воды различной обеспеченности для исследуемых водосборов бассейна Верхней Волги  
 Table 3. The results of comparison of assessment of the average annual river flow of different frequency for the Upper Volga basin water bodies under investigation

Параметры стока	Расчетный период	Среднегодовой расход воды (м <sup>3</sup> /с) различной обеспеченности, %									
		1	5	10	25	50	75	90	95	98	99
<b>р. Кострома – г. Буй</b>											
Справочник ГГИ	1896–2010	123	103	93	79	65	54	46	42	38	35
Нормативный метод	1979–2016	110	92,5	84,6	74	63	55	49	45	42	40
Авторский метод	1979–2016	114	94,7	85,9	73	62	54	49	47	45	44
<b>р. Тезза – с. Борок</b>											
Справочник ГГИ	1877–2010	13,6	11,7	10,7	9,2	7,6	6,2	5,1	4,5	3,8	3,4
Нормативный метод	1979–2016	13	10,8	9,85	8,5	7,3	6,3	5,6	5,2	4,8	4,6
Авторский метод	1979–2016	13,8	11,2	10,1	8,5	7,1	6,2	5,6	5,3	5,2	5,1
<b>р. Унжа – г. Кологрив</b>											
Справочник ГГИ	1896–2010	173	143	129	108	90	76	67	62	58	56
Нормативный метод	1979–2016	150	130	120	107	93	81	72	67	62	58
Авторский метод	1979–2016	151	131	121	106	92	81	73	68	64	62
<b>р. Межа – д. Загатино</b>											
Справочник ГГИ	1896–2010	31,9	26,4	23,8	20	16	13	11	9,5	8,3	7,7
Нормативный метод	1979–2016	28	24,8	23,1	21	18	15	13	12	11	10
Авторский метод	1979–2016	32,3	26,3	23,6	20	17	15	14	14	14	14
<b>р. Нея – д. Буслаево</b>											
Справочник ГГИ	1896–2010	79,1	67,4	61,7	53	44	36	30	27	23	21
Нормативный метод	1979–2016	78,7	65,7	59,6	51	44	37	32	30	27	26
Авторский метод	1979–2016	77,9	65,7	60	51	43	37	32	30	28	27

Оценка среднегодовых расходов воды заданной обеспеченности является важной процедурой при проведении водохозяйственного планирования. Так, в первом приближении данные оценки позволяют охарактеризовать водообеспеченность водосбора (или региона), а также провести классификацию периода наблюдений на многоводный ( $Q > Q_{25}$ ), средневодный ( $Q_{25} < Q < Q_{75}$ ) или маловодный ( $Q < Q_{75}$ ) периоды. Результаты показывают, что для постов р. Кострома – г. Буй и р. Унжа – г. Кологрив оценки среднегодовых расходов воды 1 % обеспеченности, полученные с использо-

ванием авторской методики, являются заниженными относительно оценок справочника ГГИ на 7,3 % и 12,7 %, соответственно. Для других объектов исследования полученная разница не превышает 1,5 %. Тем не менее, для постов р. Кострома – г. Буй и р. Унжа – г. Кологрив отмечается тенденция сокращения в разнице оценок между авторской методикой и справочником ГГИ для обеспеченностей в промежутке от 5 % до 75 %. Что касается среднегодовых расходов воды высокой обеспеченности (от 75 % до 99 %), то основанные на реанализе стока R5 оценки являются завышенными относительно приведенных в справочнике ГГИ: от 10 % для поста р. Унжа – г. Кологрив и до 75 % для поста р. Межа – д. Загатино. Причем оценки для области высоких обеспеченностей, проведенные по нормативной методике, в целом более близки к данным справочника, чем оценки, проведенные по авторской методике. Данное обстоятельство свидетельствует о преимуществе использования распределения Крицкого–Менкеля перед распределением Пирсона III типа для сглаживания эмпирических кривых обеспеченностей в области высоких квантилей.

#### ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

В представленном исследовании предложено взглянуть на проблему определения расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений в ракурсе применения авторской методики, основанной на использовании открытой региональной базы данных реанализа речного стока R5, а также свободно распространяемого программного обеспечения. Для пяти водосборов в бассейне Верхней Волги показано, что отклонения расчетных величин среднегодового стока от справочных данных ГГИ являются незначительными. Таким образом, применение представленной в статье методики имеет высокий потенциал для региональных исследований в области управления водными ресурсами, а также для решения практических задач водохозяйственного планирования.

Следует отметить, что предложенный подход не призван заменить практику определения расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений для задач инженерно-гидрометеорологических изысканий, основанную на использовании СП 33-101-2003. Не предлагается отказываться от использования мониторинговых наблюдений в пользу региональных обобщений (реанализа речного стока) – именно данные определения речного стока на гидрометрической сети должны стать фундаментом при проведении нормативных расчетов для инженерных изысканий. Тем не менее, данная авторская методика может быть применена для первичной оценки пространственно-временной изменчивости среднегодового речного стока и его статистических характеристик в силу своей открытости и простоты использования. Так, для

применения предложенной методики на практике не нужно прикладывать значительные усилия по поиску необходимых данных, а также для получения лицензионных прав на специализированное программное обеспечение: данные регионального реанализа речного стока R5 открыты, также доступны и программные продукты для расчетов.

Необходимо обратить внимание на то, что оценки основных расчетных гидрологических характеристик для азональных рек (например, с высокой степенью закарстованности водосбора или антропогенной нагрузки), которые могут быть получены на основе предложенного метода, следует использовать и интерпретировать с осторожностью: разработка и валидация реанализа R5 проводилась без учета таких речных водосборов и соответствующих им факторов формирования речного стока.

Отметим дополнительно, что разработанный региональный реанализ речного стока находится в открытом доступе (<https://zenodo.org/record/2600695>), что дает возможность использовать его для проведения новых научных и практических исследований. Применение новых методов, а также валидация новых региональных и глобальных источников данных по речному стоку для решения научно-прикладных задач позволят вывести область расчетов речного стока из продолжительной методической стагнации, что в полной мере соответствует целям и задачам стратегии научно-технологического развития Российской Федерации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука, 2010. 328 с.
2. Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: Изд-во РАН, 2019. 300 с.
3. Данилов-Данильян В.И., Гельфан А.Н. Водная безопасность // Федеральный справочник. Национальная безопасность России / Центр стратегических программ. М.: Изд. центр «Президент», 2015. С. 269–276.
4. Макарьева О.М., Бельдиман И.Н., Лебедева Л.С., Виноградова Т.А., Нестерова Н.В. К вопросу об обоснованности рекомендаций СП 33-101-2003 для расчетов характеристик максимального стока малых рек в зоне распространения многолетней мерзлоты // Инженерные изыскания. 2017. № 6–7. С. 50–63.
5. Клименко Д.Е., Харламова Е.О. Инженерные методы расчета высших уровней воды неизученных озер Зауралья // Инженерные изыскания. 2018. № 12. С. 28–36.
6. Макарьева О.М., Виноградова Т.А., Нестерова Н.В., Виноградов А.Ю., Бельдиман И.Н., Колупаева А.Д. Моделирование катастрофических паводков в бассейне р. Туапсе // Геориск. 2018. Т. 12. № 3. С. 34–45.
7. Hrachowitz M., Savenije H.H.G., Blöschl G., McDonnell J.J., Sivapalan M., Pomeroy J.W., Cudennec C. A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB)—a review // Hydrological Sciences Journal. 2013. Vol. 58(6). P. 1198–1255.

8. *Addor N., Do H.X., Alvarez-Garreton C., Coxon G., Fowler K., Mendoza P.A.* Large-sample hydrology: recent progress, guidelines for new datasets and grand challenges. *Hydrological Sciences Journal*. 2019. P. 1–14.
9. *Beck H.E., van Dijk A.I.J.M., de Roo A., Miralles D.G., McVicar T.R., Schellekens J., Bruijnzeel L.A.* Global-scale regionalization of hydrologic model parameters. *Water Resources Research*. 2016. Vol. 52. P. 3599–3622.
10. *Ayzel G.V., Gusev E.M., Nasonova O.N.* River runoff evaluation for ungauged watersheds by SWAP model. 2. Application of methods of physiographic similarity and spatial geostatistics // *Water Resources*. 2017. Vol. 44. P. 547–558
11. *Beck H.E., Pan M., Roy T., Weedon G.P., Pappenberger F., van Dijk A.I.J.M., Huffman G.J., Adler R.F., Wood E.F.* Daily evaluation of 26 precipitation datasets using Stage-IV gauge-radar data for the CONUS. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2019. Vol. 23. P. 207–224.
12. *Newman A.J., Clark M.P., Sampson K., Wood A., Hay L.E., Bock A., Viger R.J., Blodgett D., Brekke L., Arnold J.R., Hopson T., Duan Q.* Development of a large-sample watershed-scale hydrometeorological data set for the contiguous USA: data set characteristics and assessment of regional variability in hydrologic model performance. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2015. Vol. 19. P. 209–223.
13. *Arsenault R., Bazile R., Ouellet Dallaire C., Brissette F.* CANOPEX: A Canadian hydrometeorological watershed database // *Hydrological Processes*. 2016. Vol. 30 (15). P. 2734–2736.
14. *Beck H.E., van Dijk A.I.J.M., de Roo A., Dutra E., Fink G., Orth R., Schellekens J.* Global evaluation of runoff from ten state-of-the-art hydrological models. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2017. Vol. 21. P. 2881–2903.
15. *Ayzel G., Izhitskiy A.* Climate Change Impact Assessment on Freshwater Inflow into the Small Aral Sea. *Water*, 2019. Vol. 11(11). P. 2377.
16. *Ayzel G., Kurochkina L., Zhuravlev S.* The influence of regional hydrometric data incorporation on the accuracy of gridded reconstruction of monthly runoff. *Hydrological Sciences Journal*. 2019. (на рецензии).
17. Основные гидрологические характеристики рек бассейна Верхней Волги / научно-прикладной спр., под ред. В.Ю Георгиевского. Ливны, 2015. CD-ROM.
18. *Perrin C., Michel C., Andréassian V.* Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *J. Hydrol.* 2003. Vol. 279. P. 275–289.
19. *Valéry A., Andréassian V., Perrin C.* As simple as possible but not simpler: What is useful in a temperature-based snow-accounting routine? Part 2 – Sensitivity analysis of the Cemaneige snow accounting routine on 380 catchments. *J. Hydrol.* 2014. Vol. 517. P. 1176–1187.
20. *Ayzel G., Varentsova N., Erina O., Sokolov D., Kurochkina L., Moreydo V.* OpenForecast: The First Open-Source Operational Runoff Forecasting System in Russia. *Water*. 2019. Vol. 11(8). P. 1546.
21. *Weedon G.P., Balsamo G., Bellouin N., Gomes S., Best M.J., Viterbo P.* The WFDEI meteorological forcing data set: WATCH Forcing Data methodology applied to ERA-Interim reanalysis data. *Water Resour. Res.* 2014. Vol. 50 (9). P. 7505–7514.

22. Gudmundsson L., Seneviratne S.I. Observation-based gridded runoff estimates for Europe (E-RUN version 1.1). *Earth System Science Data*. 2016. Vol. 8 (2). P. 279–295.
23. Schellekens J., Dutra E., Martínez-De La Torre A., Balsamo G., van Dijk A., Sperna Weiland F., Weedon G.P. A global water resources ensemble of hydrological models: The earthH2Observe Tier-1 dataset. *Earth System Science Data*. 2017. Vol. 9 (2). P. 389–413.
24. Jones E., Oliphant T., Peterson P. SciPy: open source scientific tools for Python. Режим доступа: <https://scipy.org/> (дата обращения 29.06.2018).
25. Oliphant T.E. A guide to NumPy. New York: Trelgol Publishing, 2006. 486 p.
26. Student. The probable error of a mean. *Biometrika*, 1908. P. 1–25.
27. Levene H. Contributions to Probability and Statistics: Essays in Honor of Harold Hotelling. Stanford University Press, 1960. P. 278–292.
28. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М.: Госстрой России, 2003.
29. Zwillinger D., Kokoska S. CRC Standard Probability and Statistics Tables and Formulae. New York: Chapman & Hall, 2000. 514 p.
30. Vogel R.W., McMartin D.E. Probability Plot Goodness-of-Fit and Skewness Estimation Procedures for the Pearson Type 3 Distribution. *Water Resources Research*, 1991. Vol. 27. P. 3149–3158.
31. Кокорев А.В., Рождественский А.В., Лобанова А.Г. Автоматизированная система обобщения основных гидрологических характеристик в пунктах гидрометрических наблюдений за многолетний период // *Метеорология и гидрология*. 2012. № 3. С. 84–95.

*Для цитирования:* Айзель Г.В., Белозёров Е.В., Курочкина Л.С. Определение расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений: потенциал использования регионального сеточного реанализа речного стока // *Водное хозяйство России*. 2020. № 2. С. 83–101.

#### **Сведения об авторах:**

**Айзель Георгий Владимирович**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Россия, 199004, г. Санкт-Петербург, 2-ая линия Васильевского острова, д. 23; e-mail: hydrogo@yandex.ru

**Белозёров Егор Васильевич**, младший научный сотрудник, ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук» (ИВП РАН), Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3; e-mail: Egora1000@mail.ru

**Курочкина Любовь Сергеевна**, научный сотрудник, ФГБУ «Государственный гидрологический институт» (ГГИ), Россия, 199004, г. Санкт-Петербург, 2-ая линия Васильевского острова, д. 23; e-mail: plathanthera@gmail.com



DETERMINATION OF ESTIMATED HYDROLOGICAL CHARACTERISTICS  
IN THE ABSENCE OF HYDROMETRIC OBSERVATIONS: POTENTIAL  
FOR THE USE OF REGIONAL GRIDDED RIVER RUNOFF REANALYSIS

Georgiy V. Ayzel<sup>1</sup>, Yegor V. Belozero<sup>2</sup>, Lubov S. Kurochkina<sup>1</sup>

E-mail: hydrogo@yandex.ru

<sup>1</sup> Russian State Hydrological Institute, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Abstract:** Engineers in the field of hydrology often face the task of determining the hydrological characteristics for river gauges not covered by a regular network of hydrometric observations. This task is usually solved using classical methods and approaches, as described in SP 33-101-2003 «Determination of Basic Hydrological Characteristics», and is highly time-consuming, both in terms of search and acquisition of hydrological data and the time-consuming computational procedure. At the same time, modern progress in hydrological modeling allows us to look at the solution to this problem from a different angle. Thus, in this paper we propose to reduce the problem of determining the characteristics of river runoff in the absence of observation data to a simpler problem of determining the characteristics of river runoff in the presence of observation data. For this purpose, we propose to use regional gridded reanalysis of river runoff R5 as a source of model-based runoff approximation in the river gauges of interest. The results of the performed calculations show high potential of the proposed approach for determining the characteristics of river runoff. Thus, for the studied Upper Volga river basins the deviations of the calculated values from the reference data of the State Hydrological Institute are negligible. R5 runoff reanalysis was developed using freely distributed software and open data sources – GR4J conceptual hydrological model and WFDEI meteorological reanalysis. The R5 database covers both a large geographical domain within the European territory of Russia and a long time period (1979–2016) and is freely available at: <https://zenodo.org/record/2600695>.

**Key words:** river runoff, hydrological characteristics, hydrological calculations, hydrological modeling, ungauged basins, absence of observations, runoff reanalysis.

**About the authors:**

Ayzel Georgy V., Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Russian State Hydrological Institute, 2-Ya Liniya V. O., 23, Saint Petersburg, 199004, Russia; e-mail: hydrogo@yandex.ru

Belozero Yegor V., Junior Researcher, Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, ul. Gubkina, 3, Moscow, 119333, Russia; e-mail: Egora1000@mail.ru

Kurochkina Liubov S., Researcher, Russian State Hydrological Institute, 2-Ya Liniya V. O., 23, Saint Petersburg, 199004, Russia; e-mail: plathanthera@gmail.com

**For citation:** Ayzel A.V., Belozero Y.V., Kurochkina L.S. *Determination of Estimated Hydrological Characteristics in the Absence of Hydrometric Observations: Potential for the Use of Regional Gridded River Runoff Reanalysis // Water Sector of Russia. 2020. No. 2. P. 83–101.*

REFERENCES

1. Gusev E.M., Nasonova O.N. Modelirovanie teplo- i vlagoobmena poverkhnosti sushy i atmosfery [Modeling of the heat- and moisture transfer between land surface and atmosphere]. M.: Nauka, 2010. 328 p.
2. Motovilov Iu.G., Gel'fan A.N. Modeli formirovaniia stoka v zadachakh gidrologii rechnykh basseinov [Runoff formation models for basin-scale hydrology]. M.: Izd-vo RAN, 2019. 300 p.

3. *Danilov-Danil'ian V.I., Gel'fan A.N.* Vodnaia bezopasnost' [Water security] // Federal'nyi spravochnik Natsional'naia bezopasnost' Rossii / Tsentri strategicheskikh programm. M.: Izdatel'skii tsentr «PREZIDENT», 2015. P. 269-276.
4. *Makar'eva O.M., Bel'diman I.N., Lebedeva L.S., Vinogradova T.A., Nesterova N.V.* K vo-prosu ob obosnovannosti rekomendatsii SP 33-101-2003 dlia raschetov kharakteristik maksimal'nogo stoka mal'kh rek v zone rasprostraneniia mnogoletnei merzloty [Toward the utilization of SP 33-101-2003 for maximum runoff prediction in permafrost basins] // *Inzhenernye izyskaniia*. 2017. №6-7. P. 50-63.
5. *Klimenko D.E., Kharlamova E.O.* Inzhenernye metody rascheta vysshikh urovnei vody neizuchennykh oz'er zaural'ia [Engineering-based techniques for high water levels for ungauged lakes of Zaural'e] // *Inzhenernye izyskaniia*. 2018. №12. P. 28-36.
6. *Makar'eva O.M., Vinogradova T.A., Nesterova N.V., Vinogradov A.Iu., Bel'diman I.N., Kolupaeva A.D.* Modelirovanie katastroficheskikh pavodkov v basseine r. Tuapse [Flash-floods modeling in Tuapse river basin] // *Georisk*. 2018. Vol. 12. № 3. P. 34-45.
7. *Hrachowitz M., Savenije H.H.G., Blöschl G., McDonnell J.J., Sivapalan M., Pomeroy J.W., Cudennec C.* A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB)—a review. *Hydrological Sciences Journal*. 2013. Vol. 58(6). P. 1198–1255.
8. *Addor N., Do H.X., Alvarez-Garreton C., Coxon G., Fowler K., Mendoza P.A.* Large-sample hydrology: recent progress, guidelines for new datasets and grand challenges. *Hydrological Sciences Journal*, 2019. P. 1–14.
9. *Beck H.E., van Dijk A.I.J.M., de Roo A., Miralles D.G., McVicar T.R., Schellekens J., Bruijnzeel L.A.* Global-scale regionalization of hydrologic model parameters. *Water Resources Research*, 2016. Vol. 52. P. 3599–3622.
10. *Ayzel G.V., Gusev E.M., Nasonova O.N.* River runoff evaluation for ungauged watersheds by SWAP model. 2. Application of methods of physiographic similarity and spatial geostatistics. *Water Resources*, 2017. Vol. 44. P. 547–558
11. *Beck H.E., Pan M., Roy T., Weedon G.P., Pappenberger F., van Dijk A.I.J.M., Huffman G.J., Adler R.F., Wood E.F.* Daily evaluation of 26 precipitation datasets using Stage-IV gauge-radar data for the CONUS. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2019. Vol. 23. P. 207–224.
12. *Newman A.J., Clark M.P., Sampson K., Wood A., Hay L.E., Bock A., Viger R.J., Blodgett D., Brekke L., Arnold J.R., Hopson T., Duan Q.* Development of a large-sample watershed-scale hydrometeorological data set for the contiguous USA: data set characteristics and assessment of regional variability in hydrologic model performance. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2015. Vol. 19. P. 209–223.
13. *Arsenault R., Bazile R., Ouellet Dallaire C., Brissette F.* CANOPEX: A Canadian hydrometeorological watershed database. *Hydrological Processes*, 2016. Vol. 30(15). P. 2734–2736.
14. *Beck H.E., van Dijk A.I.J.M., de Roo A., Dutra E., Fink G., Orth R., Schellekens J.* Global evaluation of runoff from ten state-of-the-art hydrological models. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2017. Vol. 21. P. 2881–2903.
15. *Ayzel G., Izhitskiy A.* Climate Change Impact Assessment on Freshwater Inflow into the Small Aral Sea. *Water*, 2019. Vol. 11(11). P. 2377.
16. *Ayzel G., Kurochkina L., Zhuravlev S.* The influence of regional hydrometric data incorporation on the accuracy of gridded reconstruction of monthly runoff. *Hydrological Sciences Journal*, 2019. (на рецензии)
17. *Nauchno-prikladnoi spravochnik: Osnovnye gidrologicheskie kharakteristiki rek basseina Verkhnei Volgi [Elektronnyi resurs] [Scientific-applied guidebook: Main hydrological characteristics of the Upper Volga Basin rivers [Electronic resource]] / Kollektiv avtorov; pod redaktsiei Georgievskogo V.Iu. Livny: Izdatel' Mukhametov G.V., 2015. CD-ROM.*

18. Perrin C., Michel C., Andréassian V. Improvement of a parsimonious model for stream-flow simulation. *J. Hydrol.*, 2003. Vol. 279, P. 275–289.
19. Valéry A., Andréassian V., Perrin C. As simple as possible but not simpler': What is useful in a temperature-based snow-accounting routine? Part 2 – Sensitivity analysis of the Cemaneige snow accounting routine on 380 catchments. *J. Hydrol.*, 2014. Vol. 517. P. 1176–1187.
20. Ayzel G., Varentsova N., Erina O., Sokolov D., Kurochkina L., Moreydo V. OpenForecast: The First Open-Source Operational Runoff Forecasting System in Russia *Water*, 2019. Vol. 11(8). P. 1546.
21. Weedon G.P., Balsamo G., Bellouin N., Gomes S., Best M.J., Viterbo P. The WFDEI meteorological forcing data set: WATCH Forcing Data methodology applied to ERA-Interim reanalysis data. *Water Resour. Res.*, 2014. Vol. 50(9). P. 7505–7514.
22. Gudmundsson L., Seneviratne S.I. Observation-based gridded runoff estimates for Europe (E-RUN version 1.1). *Earth System Science Data*, 2016. Vol. 8(2). P. 279–295.
23. Schellekens J., Dutra E., Martínez-De La Torre A., Balsamo G., van Dijk A., Sperna Weiland F., Weedon G.P. A global water resources ensemble of hydrological models: The earth2Observe Tier-1 dataset. *Earth System Science Data*, 2017. Vol. 9(2). P. 389–413.
24. Jones E., Oliphant T., Peterson P. *SciPy: open source scientific tools for Python*. PAvailable at: <https://scipy.org/> (access date: 29.06.2018).
25. Oliphant T.E. *A guide to NumPy*. New York: Trelgol Publishing, 2006. 486 p.
26. Student. The probable error of a mean. *Biometrika*, 1908. P. 1–25.
27. Levene H. *Contributions to Probability and Statistics: Essays in Honor of Harold Hotelling*. Stanford University Press, 1960. P. 278–292.
28. SP 33-101-2003. *Opređenje osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik*. M.: Gosstroii Rossii, 2003.
29. Zwillinger D., Kokoska S. *CRC Standard Probability and Statistics Tables and Formulae*. New York: Chapman & Hall, 2000. 514 p.
30. Vogel R.W., McMartin D.E. Probability Plot Goodness-of-Fit and Skewness Estimation Procedures for the Pearson Type 3 Distribution. *Water Resources Research*, 1991. Vol. 27. P. 3149–3158.
31. Kokorev A. V., Rozhdestvenskii A. V., Lobanova A.G. Avtomatizirovannaia sistema obobshcheniia osnovnykh gidrologicheskikh kharakteristik v punktakh gidrometricheskikh nabliudenii za mnogoletnii period [Automated system for the main hydrological characteristics description in hydrometric gauges based on long-term observation] // *Meteorologiya i gidrologiya*. 2012. № 3. P. 84–95.