

УДК 556.5

DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-1-101-118

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ  
В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
И СОПРЕДЕЛЬНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ  
РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ**

*О.М. МАКАРЬЕВА<sup>1,2,3,4\*</sup>, Н.В. НЕСТЕРОВА<sup>3,4</sup>, И.Н. БЕЛЬДИМАН<sup>1</sup>,  
Л.С. ЛЕБЕДЕВА<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> — ООО НПО «Гидротехпроект», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> — Институт мерзлотоведения им. М.П. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

<sup>3</sup> — Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup> — ФБГУ «Государственный гидрологический институт», Санкт-Петербург, Россия

\*omakarieva@gmail.com

**ACTUAL PROBLEMS OF HYDROLOGICAL ASSESSMENTS  
IN THE ARCTIC ZONE OF RUSSIAN FEDERATION  
AND CONTIGUOUS PERMAFROST-AFFECTED TERRITORIES**

*O.M. MAKARIEVA<sup>1,2,3,4\*</sup>, N.V. NESTEROVA<sup>3,4</sup>, I.N. BELDIMAN<sup>1</sup>,  
L.S. LEBEDEVA<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> — Ltd «Gidrotehproekt», St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> — Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

<sup>3</sup> — St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

<sup>4</sup> — State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

\*omakarieva@gmail.com

Received April, 06, 2018

Accepted April, 20, 2018

*Keywords:* Arctic zone, floods, hydrological engineering, hydrological safety, mathematical modeling, permafrost, SP-33-101-2003.

**Summary**

The article reveals the main problems facing hydrologists in engineering design in the Arctic zone of Russia and adjacent territories of permafrost. Climate warming and degradation of permafrost cause a significant transformation of the hydrological cycle. The retrospective observations of runoff cannot be considered therefore in modern conditions. The density of the hydrological network in the permafrost zone of Russia has decreased by more than 1.5 times, and on small rivers – more than three

**Citation:** O.M. Makarieva, N.V. Nesterova, I.N. Beldiman, L.S. Lebedeva. Actual Problems of Hydrological Assessments in the Arctic Zone of Russian Federation and Adjacent Permafrost Territories. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64 (1): 101–118. [In Russian]. doi:10.30758/0555-2648-2018-64-1-101-118

times in recent decades. Thus, the use of standard calculation methods (SP 33-101-2003) to assess the runoff characteristics in the Arctic regions is practically impossible. It is shown that in the developed Arctic countries where the size of the territories and their inaccessibility could be compared with Russia, the low density of the standard observation network is compensated by the organization of small scientific research stations for studying hydrological processes in various physical and geographical conditions and the development of mathematical modeling methods. It is shown that historically Russia was the leader of hydrological research in cold regions. It is stated that there is an urgent need to create a state program aimed at restoring the previously operating in the cryolithozone and organizing new research hydrological watersheds, improving the standard hydrological network, and developing complex modeling systems and methods for their parameterization.

*Поступила 06 апреля 2018 г.*

*Принята к печати 20 апреля 2018 г.*

*Ключевые слова:* Арктическая зона, гидрологическая безопасность, инженерное проектирование, математическое моделирование, мерзлота, паводки, СП-33-101-2003.

В статье раскрыты основные проблемы, стоящие перед гидрологами при инженерном проектировании в Арктической зоне России и прилегающих территориях распространения многолетней мерзлоты. Основной из них является практическая невозможность использования стандартных методов расчета (СП 33-101-2003) для оценки характеристик стока в регионах с крайне ограниченными данными наблюдений гидрометрической сети в современных условиях изменений климата. Констатируется срочная необходимость создания государственной программы, направленной на восстановление ранее действовавших в криолитозоне и организацию новых научно-исследовательских гидрологических стационаров, совершенствование стандартной гидрологической сети, а также развитие комплексных моделирующих систем и методов их параметризации.

## ВВЕДЕНИЕ

Стратегия развития Арктической зоны (АЗ) Российской Федерации [1] предусматривает ширококомасштабное развитие социально-экономической инфраструктуры, позволяющей добывать, перерабатывать и транспортировать природные ресурсы Арктики. Основу программы составляет формирование восьми опорных зон (рис. 1), связанных Северным морским путем и выбранных исходя из существующего административно-территориального деления, транспортных узлов и ресурсной базы, а также перспектив социально-экономического развития АЗ. Опорные зоны будут влиять и на развитие «тяготеющих территорий», хозяйственная деятельность которых напрямую зависит от состояния АЗ и ее инфраструктуры [2].

В настоящий момент сформирован перечень «якорных» проектов, запланированных для реализации в АЗ, из них транспортные проекты составляют 18 % от общего числа и являются приоритетными [2].

К крупным сухопутным транспортным проектам относится строительство «Северного широтного хода», железнодорожной магистрали, которая должна соединить ст. Обская на левом берегу р. Оби – Салехард – Надым – Коротчаево (рис. 1). В перспективе планируется продолжить магистраль до г. Норильска через города Игарка и Дудинка, то есть связать наземным транспортным коридором бассейны рек Обь и Енисей. Также начата реализация проекта железной дороги «Бованенково – Сабетта» на п-ве Ямал (рис. 1).

В последнее время получила развитие идея, имеющая 100-летнюю историю, а именно — проект строительства железнодорожной магистрали «Белкомур», которая

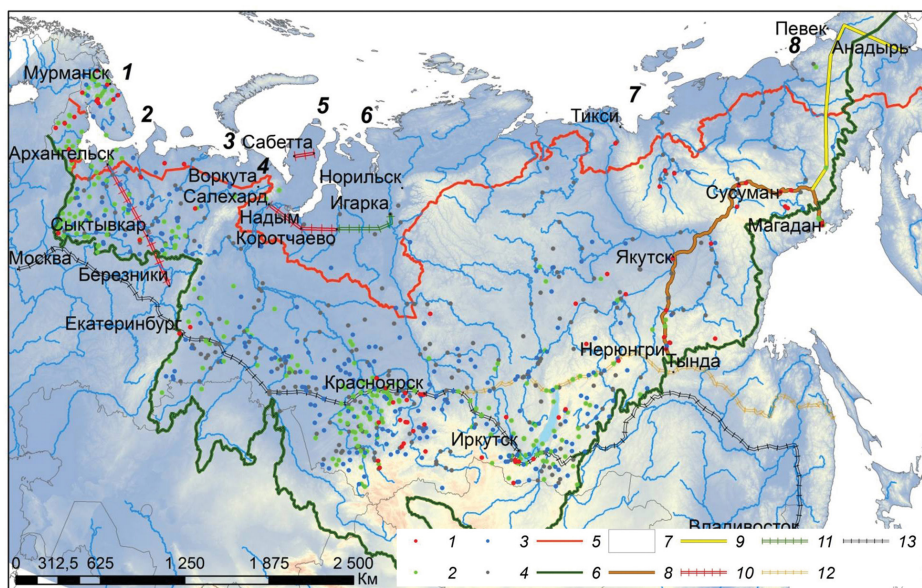


Рис. 1. Действовавшие в 2008 г. гидрологические посты, на которых измерялись расходы воды, на территории бассейна СЛО, а также существующие и планируемые транспортные проекты АЗ и сопредельных территорий РФ.

1, 2, 3, 4 — гидрологические посты, замыкающие водосборы площадью менее 200, 200–2000, 2000–10000 и более 10000 км<sup>2</sup> соответственно; 5 — граница АЗРФ; 6 — граница рек бассейна СЛО; 7 — государственные границы; 8 — федеральная трасса «Колыма» и часть федеральной трассы «Лена»; 9 — автомобильная трасса «Колыма» – Анадырь (проектируемая); 10 — ж/д «Северный широтный ход», «Бованенково – Сабетта», «Белкомур» (программа АЗРФ); 11 — ж/д Коротчаево — Игарка (проектируемая); 12 — Байкало-Амурская ж/д магистраль; 13 — Транссибирская ж/д магистраль. Цифрами (1–8) обозначены опорные зоны АЗРФ

Fig. 1. Discharge hydrological gauges in 2008 at the territory of the Arctic Ocean basin and existing and planned transport projects of the Arctic Zone and coherent territories of Russia.

1, 2, 3, 4 — hydrological gauges that closes an area of less than 200, 200–2000, 2000–10000 and more than 10000 km<sup>2</sup>; 5 — boundary of Arctic Zone of Russian Federation; 6 — the border of the Arctic Ocean basin; 7 — state borders; 8 — the Kolyma highway and the part of the Lena highway; 9 — the Kolyma — Anadyr highway (projected); 10 — the railway lines “Seyerny shirotny khod”, “Bovanenkovo-Sabetta”, “Belkomur” (the program of the Russian Arctic development); 11 — the railway Korotchaevo — Igarka (projected); 12 — the Baikal-Amur Mainline; 13 — Transsiberian railway. Numbers (1–8) — the base zones of the Russian Arctic development program

должна соединить порт Архангельск с городом Березники в Пермском крае, однако окончательное решение о его реализации пока не принято [3].

Регионы северо-востока страны также включены в программу развития Арктики. Восьмая опорная зона будет развиваться на Чукотке. В настоящее время транспортное сообщение с этим регионом осуществляется путем авиа и морских перевозок. В 2011 г. в рамках реализации федеральной целевой программы «Экономическое и социальное развитие Дальнего Востока и Забайкалья на период до 2013 года» началось строительство автодороги Колыма – Омсукчан – Омолон – Анадырь. Ее длина должна составить более 1800 км (рис. 1). Эта магистраль объединит три региона Дальнего Востока — Чукотку, Магаданскую область и Якутию, в том числе через федеральную трассу «Колыма».

Ежегодный ущерб от паводков на территории России оценивается примерно в 100 млрд рублей [4]. Значительная часть ущерба связана с повреждением транспортной инфраструктуры — размывами участков дорог, подтоплениями, смывами мостовых конструкций, разрушением гидротехнических сооружений.

Например, статистика по Магаданской области свидетельствует, что за последние пять лет катастрофические паводки в этом регионе происходят ежегодно. Так, в результате прохождения паводка в августе 2013 г. повреждено 74 км дорог и 15 мостов, в том числе на федеральной трассе «Колыма», ущерб составил более 600 млн рублей [5]. В 2014 г. в результате паводка оказалась закрыта областная дорога «Магадан – Балаганное – Талон», ущерб был оценен в размере 700 млн рублей. В августе 2016 г. ущерб от паводка в регионе достиг 250 млн рублей. В 2017 г. произошло разрушение подъезда к мосту на 542-м км трассы «Колыма», что привело к перекрытию трассы [5] и, как следствие, к блокаде некоторых населенных пунктов.

Чрезвычайные ситуации часто вызваны тем, что водопропускные и гидротехнические сооружения не справляются с пропуском паводков редкой обеспеченности. Они могут быть связаны не только с неправильной эксплуатацией, но и с ошибками на этапе инженерно-гидрологических изысканий, проектирования и строительства, в том числе с необоснованностью используемых методов расчета гидрологических характеристик при отсутствии данных наблюдений за стоком.

Учитывая высокую стоимость строительных проектов в Арктике, а также сопредельных территориях Сибири и Дальнего Востока, запланированная Программа развития АЗ требует научно обоснованных методов расчета характеристик стока рек, прогноза и оценки риска наводнений для проектируемой и уже действующей промышленной и социальной инфраструктуры.

Особенно актуальна данная задача в условиях изменения климата [6, 7]. Арктический регион претерпевает наиболее выраженные климатические изменения, которые влияют на все компоненты окружающей среды, включая водный баланс и гидрологический режим речных бассейнов [8, 9].

Целью статьи является анализ обеспеченности АЗ Российской Федерации данными гидрологических наблюдений, необходимыми для проведения инженерных изысканий и расчетов, а также формирование общих предложений по развитию научно-исследовательской гидрологической сети и созданию новых методов расчета характеристик стока на основе математического моделирования.

#### **ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ БАСЕЙНОВ АРКТИЧЕСКИХ РЕК В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ КЛИМАТА**

Одним из основных факторов, влияющих на процессы формирования стока Арктической зоны, является мерзлота. Тесная взаимосвязь потоков воды и тепла в речных бассейнах АЗ обуславливает значительную чувствительность системы к климатическим и антропогенным изменениям. Потепление климата и деградация многолетней мерзлоты вызывают трансформацию гидрологического цикла в арктической и субарктических зонах, в том числе изменения динамики влажности почвогрунтов, интенсификацию связи подземных и поверхностных вод, сезонное перераспределение элементов водного баланса [10].

Многочисленные исследования показывают увеличение общего стока воды крупных арктических рек во второй половине XX в. [11–13], смещение сроков половодий на более раннее время [14] и существенные изменения во внутригодовом распределении стока [15].

Так, в Западной Сибири и северной части европейской территории России за период 1936–1999 гг. увеличился минимальный сток рек, приходящийся в основном на зимний период [16]. Максимальный сток рек весеннего половодья снижается на Дальнем Востоке и в южной части Сибири, включая южные части бассейнов рек Енисей и Обь [17]. В то же время максимальные расходы средних и малых рек в бассейне р. Лены увеличивались за период 1930–2015 гг. [18].

Е.В. Шевнина [6] на основе климатических сценариев МГЭИК получила оценки ожидаемых изменений норм и коэффициентов вариации стока весеннего половодья рек АЗ до конца текущего столетия. По ее оценкам, на территории Российской Арктики ожидается увеличение нормы стока весеннего половодья на 23 % и снижение коэффициента его вариации на 14 % при осреднении по всем сценариям. В регионах наиболее сильное увеличение нормы стока весеннего половодья прогнозируется на территории Архангельской области, Республики Коми и Ненецкий АО (в среднем на 47 %) и большей части Восточной Сибири за исключением Чукотского полуострова [6]. В период 2010–2039 гг. значительные изменения нормы стока весеннего половодья ожидаются на территории Мурманской области, Республики Карелия, Ямало-Ненецкого АО и Долгано-Ненецкого АО, севере Республики Саха и Магаданской области, а также на востоке Чукотского АО [6].

Сложность взаимодействия процессов тепло- и влагопереноса в арктических ландшафтах обуславливает нелинейность реакции гидрологического цикла на климатические изменения, наблюдаемые в Арктике в настоящее время [19]. Неопределенность прогнозов характера гидрологических изменений в будущем связана в первую очередь с неизученностью механизмов, которые приводят к наблюдаемым изменениям речного стока в Арктической зоне [12, 16].

#### **ПРОБЛЕМА СОКРАЩЕНИЯ СТАНДАРТНОЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЕТИ НАБЛЮДЕНИЙ В АЗ**

Прогноз и оценка изменений гидрологических режима и характеристик стока осложняется также стремительным сокращением сети наблюдений. Несмотря на возрастающий интерес к ресурсам АЗ, она до сих пор является наименее обеспеченной данными стандартных гидрометеорологических измерений. Арктическая зона РФ является частью бассейна Северного Ледовитого океана (СЛО). Площадь СЛО составляет более 10 млн км<sup>2</sup>, континентальной части АЗ — 2,2 млн км<sup>2</sup>.

Расход воды различной обеспеченности является основной инженерной характеристикой стока. В 2008 г. количество гидрологических постов, на которых производились наблюдения за расходом воды на территории российского бассейна СЛО, составило 944 [20]. В 1980 г. общее количество расходных постов на той же территории составляло 1476 [21]. Из этого следует, что за последние 30 лет плотность сети сократилась более чем в полтора раза. С очень малыми реками (площадь водосбора < 200 км<sup>2</sup>) ситуация еще острее — количество пунктов наблюдений за стоком сократилось в три раза. На малых реках (площадь водосбора < 2000 км<sup>2</sup>) сокращение составило около 40 % (таблица, рис. 1).

К 2008 г. в АЗ количество расходных гидрологических постов в бассейнах любого размера составило 79 [20]. Из них чуть менее половины (38) находятся в подчинении Мурманского УГМС (площадь менее 150 000 км<sup>2</sup>), еще 16 — Северного УГМС. Таким образом, почти 70 % постов находятся на европейской части АЗ, только 25 — в Сибири.

Количество постов бассейна СЛО, в том числе в АЗ в 1980 и 2008 гг.

S водосбора/ УГМС	<200			200–2000			2000–10000			>10000			Любой площади		
	1980	2008		1980	2008		1980	2008		1980	2008		1980	2008	
		Σ	АЗ		Σ	АЗ		Σ	АЗ		Σ	АЗ		Σ	АЗ
Забайкальское	10	6	0	39	28	0	35	32	0	23	24	0	107	90	0
Западно- Сибирское	12	5	0	82	65	0	69	53	0	48	46	0	211	169	0
Иркутское	17	6	0	44	31	0	45	32	0	28	27	0	134	96	0
Колымское	34	7	0	16	6	1	18	3	0	16	4	2	84	20	3
Мурманское	20	8	8	39	18	18	15	11	11	9	1	1	83	38	38
Обь- Иртышское	7	0	0	35	18	2	35	23	2	54	37	5	131	78	9
Северное	18	7	2	91	58	7	63	47	4	34	31	3	206	143	16
Северо- Западное	12	6	0	27	16	0	10	4	0	7	0	0	56	26	0
Средне- Сибирское	34	15	0	80	45	1	41	34	1	52	43	6	207	137	8
Уральское	26	2	0	33	13	0	18	10	0	15	13	0	92	38	0
Якутское	43	20	2	30	13	0	27	17	0	65	59	3	165	109	5
Всего	233	82	12	516	311	29	376	266	18	351	285	20	1476	944	79

Анализ обеспеченности гидрологическими наблюдениями сибирских арктических регионов позволяет отнести их к категории гидрологически не изученных территорий:

– Ямало-Ненецкий автономный округ (опорная зона № 5, рис. 1), имеющий площадь около 770 тыс. км<sup>2</sup>, занимает одно из ведущих мест в России по запасам углеводородов, природного газа и нефти. Именно в данном регионе до 2022 г. будет вестись наиболее активное строительство новых железнодорожных магистралей («Северный широтный ход», «Бованенково – Сабетта»). На территории округа на 2008 г. наблюдения за стоком велись на 9 постах, из них по 2 поста, замыкающих площади до 2000 и до 10000 км<sup>2</sup>, 5 постов — более 10000 км<sup>2</sup>;

– на территории севера Красноярского края, входящей в шестую Таймыро-Тухаранскую опорную зону (рис. 1), включающую северную часть бассейна р. Енисей, бассейны рек Пясины, Хатанги, Анабара, малые водосборы п-ова Таймыр и составляющую более 1 млн км<sup>2</sup>, в 2008 г. функционировали 8 гидрологических постов, на которых велись измерения расходов воды, из них не было ни одного поста, замыкающего водосборы площадью менее 200 км<sup>2</sup>, только 1 пост, замыкающий бассейн до 2000 км<sup>2</sup>, 1 пост с площадью до 10000 км<sup>2</sup>, 6 с площадями более 10000 км<sup>2</sup>, из них 1 зарегулированный;

– в Республике Саха (Якутия), площадь которой составляет более 3 млн км<sup>2</sup>, насчитывается 33 расходных поста на малых реках, из них 20 постов с площадью водосбора до 200 км<sup>2</sup> и 13 — до 2000 км<sup>2</sup>. Основная часть постов расположена на юго-востоке региона, на севере и северо-востоке территории, относящейся к Арктической зоне, сеть за стоком наблюдений практически отсутствует. В АЗ Якутии

(опорная зона № 7) в 2008 г. функционировали всего 4 поста, 3 из которых являются замыкающими створами крупных рек Лена, Яна и Оленёк;

– на протяжении федеральной трассы «Колыма» (длина 2032 км), соединяющей города Якутск и Магадан, в 2008 г. количество действующих гидрологических постов составляло 11 (6 постов имели замыкающие площади менее 200 км<sup>2</sup>), из которых большая часть (5 постов) сконцентрирована в районе города Магадана;

– на Чукотке (737 тыс. км<sup>2</sup>, опорная зона № 8) в 2008 г. действовали только 3 поста, на которых велись наблюдения за стоком: два — на реках с площадью водосбора более 10000 км<sup>2</sup>, один — менее 2000 км<sup>2</sup>, посты на очень малых реках отсутствуют.

Для сравнения: в Норвегии, площадь которой сопоставима с площадью Магаданской области и составляет 385 тыс. км<sup>2</sup>, действует около 650 гидрологических постов, наблюдения на большинстве из них автоматизированы, по 300 постам данные наблюдений доступны пользователям сети Интернет в режиме реального времени [22].

### **СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ИНЖЕНЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТОКА**

Любое строительство требует проведения изысканий и проектирования. В настоящее время рекомендованным к использованию является расчетный Свод правил СП 33–101–2003 (далее СП) [23], основанный на применении методов статистической обработки многолетних рядов наблюдений за стоком и регламентирующий порядок гидрологических расчетов.

СП является актуализированной редакцией документа СНиП 2.01.14-83 [24], выпущенного в 1983 г., и принципиально ничем не отличается от своего предшественника в вопросах методик расчета характеристик стока. Предыдущая редакция издания базировалась на предположении о том, что гидрологические процессы являются статистически стационарными, а следовательно, ретроспективные наблюдения могут считаться репрезентативными для представления режима стока на период эксплуатации проектируемого объекта. В настоящее время все чаще для получения глобальных и региональных оценок изменения среднегодового стока, его внутригодового распределения и расчета наводнений редкой повторяемости используются сценарии изменения климата [25–29]. Авторы СП признают климатические изменения и требуют использования современной гидрометеорологической информации при проведении расчетов, а также уточнения параметров расчетных формул, основанного на обобщении современных данных по стоку. В последнее десятилетие был также выпущен ряд Методических рекомендаций [30–33], которые дополняют СП 33-101-2003, в том числе в части оценок расчетных значений по неоднородным рядам наблюдений. Однако такие рекомендации не предлагают путей учета влияния климата на режимные характеристики основных видов многолетнего стока [6].

В работе [34] на основе рекомендаций СП 33-101-2003 проведен расчет характеристик максимального стока для рек в зоне распространения многолетней мерзлоты. В качестве «неизученных» выбраны четыре очень малых (площадью до 200 км<sup>2</sup>) и две малых (до 2000 км<sup>2</sup>) реки в бассейне Северного Ледовитого океана с различным гидрологическим режимом, имеющие длинные ряды наблюдений за стоком. Рассчитанные характеристики максимального стока половодья и паводков сравнивались с величинами расходов воды, определенных по кривым обеспеченности, построенным на основе наблюдаемых данных. Оказалось, что в районах исследования выбор рек-аналогов, обеспеченных данными наблюдений за последние

20–25 лет, ограничен 2–3 вариантами водотоков, не имеющими альтернативы для территорий площадью до нескольких сотен тысяч квадратных километров. С этим связана практическая невозможность выполнения требований СП 33-101-2003 по уточнению параметров расчетных формул на основании современных фактических материалов наблюдений. Авторами показано, что рассчитанные величины расходов половодья и паводков различной обеспеченности могут отличаться в разы при использовании нескольких рек-аналогов, одновременно соответствующих требованиям СП 33-101-2003. Вместе с тем рекомендации СП 33-101-2003 по использованию усеченных кривых при нестационарности рядов рек-аналогов носят неопределенный характер, их применение приводит к большим погрешностям расчетных величин. Ввиду отсутствия каких-либо ближайших перспектив расширения существующей гидрометеорологической сети наблюдений дальнейшее развитие методов СП 33-101-2003 для обширных территорий Арктической зоны РФ практически невозможно. Выводы [34] подтверждаются анализом количества действующих гидрологических постов (см. таблицу, рис. 1).

#### **МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КАК АЛЬТЕРНАТИВА ТРАДИЦИОННЫМ МЕТОДАМ РАСЧЕТА ИНЖЕНЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТОКА**

В условиях огромной и труднодоступной АЗ и сопредельных территорий, где сеть гидрометеорологических наблюдений либо очень редка, либо вообще отсутствует, представляется, что будущее любых гидрологических расчетов и прогнозов связано с использованием математических моделей формирования стока.

Детерминированные гидрологические модели позволяют рассчитывать непрерывные гидрографы стока воды в замыкающем створе речных бассейнов разных размеров. Входом в модель являются поля метеорологических данных разного временного разрешения. Метеорологические данные могут иметь различные источники: наземные метеорологические станции, данные реанализа, климатические модели, стохастические модели погоды. На основе результатов моделирования могут быть построены кривые распределения любых характеристик стока (годовых, месячных, суточных, максимальных и минимальных расходов), а также рассчитаны объемы стока половодья и паводков и пр. Дополнительно могут быть получены характеристики элементов водного баланса, переменных состояний почвенного и снежного покрова.

Метод детерминированно-стохастического (ДС) моделирования основан на совместном использовании двух моделей: детерминированной гидрологической модели и стохастической модели погоды. Он позволяет делать вероятностные оценки любых характеристик стока (например, экстремальных) или переменных состояний водосбора для прошлых, настоящих и будущих условий и ситуаций в бассейне, в том числе и с учетом прогнозных сценариев изменений климата и ландшафтов [35].

Арктика предъявляет повышенные требования к гидрологическим моделям. Подавляющая часть гидрологических моделей, хорошо себя зарекомендовавших на территориях с умеренным климатом, не может быть использована для расчета стока воды в АЗ. Динамика формирования деятельного слоя является одним из основных факторов, определяющих характер протекания гидрологических процессов АЗ, поэтому моделирование процессов формирования стока должно проводиться с учетом энергетического баланса не только поверхности водосборов, но и толщи почвогрунтов. Основными требованиями являются физическая обоснованность со-



ответствия моделей природным процессам [35], их универсальность в плане использования, как в различных ландшафтах, так и пространственных и временных масштабах, и главное, возможность оценки параметров модели на основе измеряемых свойств ландшафтов. Важно также, чтобы моделирование могло проводиться в условиях дефицита данных наблюдений, характерного для большей части арктических территорий, как России, так и мира. Такой подход характерен для последователей школы гидрологического моделирования проф. Ю.Б. Виноградова [35]. Необходимо отметить, что канадские исследователи [36] также работают над созданием и усовершенствованием физически обоснованной гидрологической модели Cold Region Hydrological Model (CRHM), оценка параметров которой производится без использования методов калибровки, на основе представлений о процессах формирования стока и ландшафтно-климатических условиях. Очевидно, что ограниченная доступность наблюдаемых данных, сложность процессов их формирования в условиях холодного климата подталкивает исследователей северных бассейнов к разработке альтернативных общему тренду методов математического моделирования.

### **СПЕЦИАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА СТОКОМ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РОССИИ И ДРУГИХ СТРАН**

Для совершенствования и возможности применения методов математического моделирования в гидрологии необходимо изучение физических механизмов процессов тепло- и влагообмена в бассейнах арктических рек. Одним их важнейших препятствий для таких исследований является сложность получения натуральных данных специальных и экспериментальных наблюдений.

Стационарные наблюдения на малых исследовательских водосборах являются главным источником информации о физических механизмах формирования стока и происходящих изменениях гидрологического цикла. Поэтому в Канаде и США (Аляска), где размеры арктических территорий и их труднодоступность соизмеримы АЗ России, низкая плотность стандартной сети наблюдений компенсируется развитием сети научно-исследовательских водосборов.

В США с 1980 г. функционирует многолетняя экологическая научная сеть Long-term Ecological Research Network [37], которая включает в себя 27 комплексных научно-исследовательских стационаров в США и Антарктиде. Также ведутся наблюдения на многочисленных научных водосборах на Аляске: Fish Creek, Toolik station, Tanana River, Kuparuk River, Imnavait River, Putuligayuk River и др., функционируют программы мониторинга арктических областей NPR-Hydrology [38], Arctic Observatory Network [39].

Высоким уровнем организации мониторинга гидрологических процессов в холодных регионах отличается Канада (рис. 2). Всего в Канаде существует более 20 научно-исследовательских водосборов площадью от 10 до 200 км<sup>2</sup>, расположенных от южной границы страны до Канадского Арктического архипелага в различных условиях климата, растительности, рельефа и мерзлотных характеристик. Стандартные регулярные гидрометеорологические наблюдения дополняются специальными и экспериментальными исследованиями отдельных гидрологических процессов. Данные измерений обычно находятся в свободном доступе, например выкладываются в Интернете [40].

Исследования на водосборах в Канаде объединены в научные программы и сопровождаются обработкой и анализом данных, а также разработкой и применением методов математического моделирования. Например, проект Changing Cold Regions Network включает в себя полевые исследования на 14 водосборах и использование

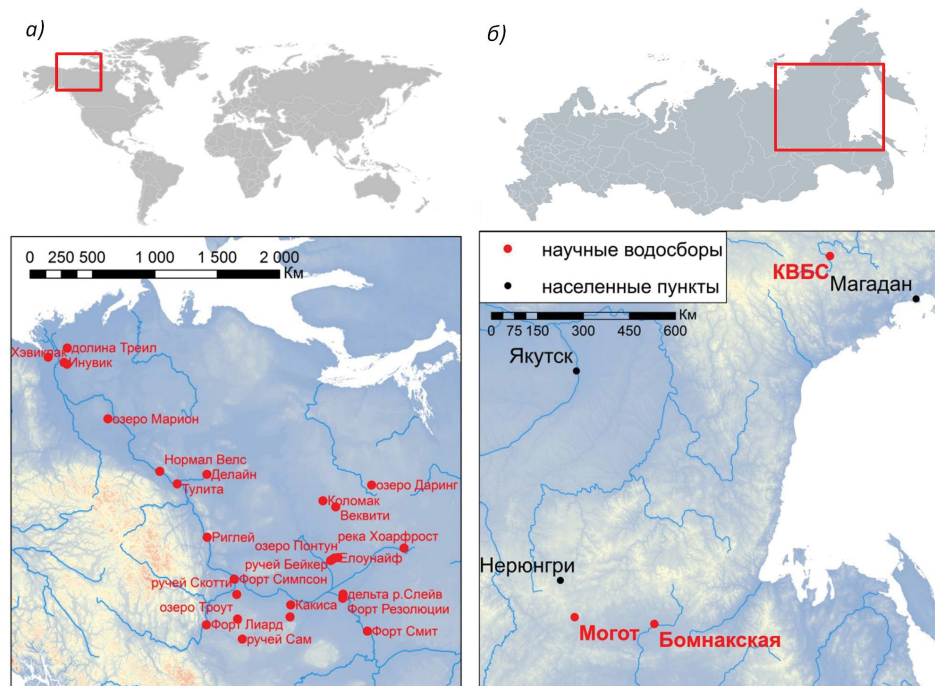


Рис. 2. Научно-исследовательские гидрологические стационары в криолитозоне Канады и России: а) — канадские действующие [41] научно-исследовательские водосборы в зоне распространения мерзлоты; б) — исторические отечественные научно-исследовательские водосборы в зоне распространения мерзлоты

Fig. 2. Research watersheds in Canada and Russia: а) — Canadian current [41] research watersheds in permafrost zone; б) — historical research watersheds in permafrost zone of Russia

двух канадских моделей. Проект Improving Processes & Parameterization for Prediction in Cold Regions Hydrology (IP3) объединял 10 научно-исследовательских водосборов и четыре гидрологические модели.

Глобальный масштаб проблемы изучения гидрологического режима арктических территорий отражается в программах исследований развитых стран. В Канаде в 2017 г. началась 7-летняя программа по изучению гидрологического цикла в холодном климате «Глобальное будущее воды» [42]. В рамках программы ведущие университеты Канады получили финансирование в размере более пяти миллиардов рублей (в пересчете на российские деньги) на научные исследования гидрологических процессов с привлечением на постоянной основе 750 новых научных сотрудников и технического персонала.

В инструментальных исследованиях процессов гидрологического цикла за последние 30 лет Россия значительно отстала от других арктических стран, хотя именно в СССР была организована первая в мире система комплексных научных гидрологических стационаров в различных климатических условиях.

В 1925 г. М.А. Великанов впервые предложил организовать специальные гидрологические стационары в различных физико-географических условиях, а в 1933 г. Д.Л. Соколовским был составлен план размещения 45 полевых лабораторий по

территории СССР. С 1928 по 1940 г. уже существовало 11 таких станций, однако во время Великой Отечественной войны большинство из них были полностью закрыты.

В 1954 г. вышла книга с первым обобщением опыта комплекса основных наблюдений гидрологических стационаров, именуемых стоковыми станциями [43]. Стоковые станции производили комплексные наблюдения над всеми элементами водного баланса и факторами, обуславливающими их изменения. Объектами изучения являлись характерные для региона малые водосборы и стоковые площадки.

В 1973 г. Государственный гидрологический институт под научным руководством А.И. Чеботарева выпустил «Руководство водно-балансовым станциям» [44]. К 1981 г. на территории СССР действовало 16 водно-балансовых станций (ВБС) на естественных водосборах (не подверженных мелиорации) и 9 болотных водно-балансовых станций.

Единственным комплексным научно-исследовательским стационаром в условиях арктического климата была Колымская водно-балансовая станция (КВБС), которой в 2017 г. исполнилось 70 лет [45]. Местоположение КВБС (верховья р. Колымы, Магаданская область) было выбрано так, что оно являлось репрезентативным для обширных горных территорий зоны распространения мерзлоты Восточной Сибири, Северо-Востока и Дальнего Востока России. Детальные наблюдения за формированием речного стока и процессами сезонного протаивания и промерзания грунтов производились на КВБС до 1997 г. [46]. На основе анализа данных наблюдений были изучены процессы формирования водного баланса, надмерзлотных вод и речного стока в различных ландшафтах КВБС, проанализировано распределение осадков, испарения и стока воды в условиях многолетнемерзлых пород и горного рельефа.

Дополнительно к сетевым стационарам в Советском Союзе организовывались и специальные экспедиции, целью которых была разработка методов гидрологического обоснования крупных проектов хозяйственного развития.

С середины 1960-х гг. по 1993 г. Западно-Сибирская экспедиция ГГИ проводила масштабные режимные исследования с целью изучения гидрометеорологического режима заболоченных территорий Западной Сибири [47].

Другим примером является гидрологический полигон «Могот» Байкало-Амурской экспедиции ГГИ (1976–1985 гг.), который был расположен в 60 км к северу от г. Тынды на водоразделе рек Амур и Алдан. Полигон «Могот» был создан для обеспечения проектных, строительных решений и любой другой хозяйственной деятельности методами гидрологических расчетов в зоне хозяйственного освоения Байкало-Амурской магистрали [48]. Результаты исследований процессов формирования стока и других элементов водного и теплового баланса были положены в основу совершенствования расчетных методик [49, 50].

Несмотря на правомерную критику ошибок организации и проведения наблюдений на ВБС [51], они внесли значительный вклад в развитие как прикладной, так и фундаментальной гидрологии. В современный период в России «влачат жалкое существование» три ВБС (Подмосковная, Каменная Степь, Нижнедевицкая) на европейской территории и одна (Приморская) на юге Дальнего Востока. В АЗ и на сопредельных территориях нет ни одного постоянно действующего государственного гидрологического стационара. Ограниченные по объему и продолжительности исследования проводятся отдельными научными коллективами на непостоянной основе грантового финансирования и без единых методик.

Дополнением к наблюдениям на научно-исследовательских стационарах может являться реализация концепции нестационарных репрезентативных водосборов и по-

лигонов [51], метода «мобильного стационара» [52]. Проведение кратковременных интенсивных наблюдений на специально подобранных репрезентативных водосборах, несмотря на свою отрывочность, позволяют составить общее представление об условиях формирования стока и гидрологических явлениях рассматриваемой территории и, главное, произвести приближенную количественную оценку параметров математических моделей гидрологических процессов [51]. Однако, не имея в своем основании задач создания, параметризации модели или уточнения существующих методов расчета характеристик стока, такие наблюдения теряют большую часть своей ценности и не оправдывают вложенных затрат. Реализация методов кратковременных исследований не может полностью компенсировать потерю сети научных стационаров, целью которых являлось комплексное изучение гидрологических процессов и всех элементов водного баланса, в том числе их долгосрочные изменения.

### ВЫВОДЫ

Анализ обеспеченности АЗ сетевыми гидрологическими наблюдениями показал, что в средняя площадь, приходящаяся на один гидрологический расходный пост, замыкающий створ реки с площадью водосбора менее 2000 км<sup>2</sup>, составляет около 130 тыс. км<sup>2</sup> (без учета Мурманской области, составляющей менее 10 % территории АЗ, содержащей 50 % всех постов на малых реках АЗ). Это означает, что большую часть АЗ можно отнести к категории гидрологически не изученных территорий. В настоящее время расчеты характеристик стока в АЗ ведутся на основе использования региональных параметров. Их уточнение было произведено более 30 лет назад, когда обобщение данных производилось наиболее полно, с применением единых методик, разработанных в Государственном гидрологическом институте (ГГИ).

Итак, стоят серьезные научно-практические проблемы — как в условиях крайней ограниченности и низкого качества данных наблюдений, а также отсутствия ресурсов для восстановления полноценной наблюдательной гидрометрической сети наблюдений Арктической территории России: 1) рассчитывать характеристики стока в задачах инженерно-изыскательских работ и проектирования; 2) оценивать величину и повторяемость катастрофических паводков, заблаговременно прогнозировать их прохождение; 3) прогнозировать приток воды в водохранилища для нужд гидроэнергетики и водного транспорта.

Решение поставленных задач может быть достигнуто только на государственном уровне и должно осуществляться в трех направлениях.

1. Создание государственной программы по организации (восстановлению) сети репрезентативных водосборов в различных климатических зонах страны для комплексного мониторинга основных компонентов водного баланса и гидрологических процессов с применением современного оборудования с высоким временным разрешением, внедрением новых методов исследований. На территории Арктики научные стационары должны быть организованы в каждой опорной зоне. Также необходимо рассмотреть целесообразность восстановления исторических стационаров с продолжительными рядами наблюдений на прилегающих территориях криолитозоны, например Колымской водно-балансовой станции [45, 46].

2. Государственный заказ на разработку методов определения основных гидрологических характеристик для решения задач инженерно-изыскательских работ и проектирования на основе методов математического моделирования. Создание и развитие комплексных гидрологических моделирующих систем и методов их параметризации для использования в основных ландшафтах, характерных для тер-

риторий Арктической зоны, позволит изучать, рассчитывать и прогнозировать процессы формирования стока и их изменения в будущем.

3. Совершенствование (в АЗ — расширение) стандартной гидрологической сети наблюдений, в том числе на основе современных методов моделирования и дистанционного зондирования [53].

На пути решения поставленных задач встанут многие проблемы, которые требуют изменения сложившейся в российской гидрологии ситуации. Среди них — острый дефицит квалифицированных специалистов в области гидрометеорологии (от наблюдателей до научных сотрудников), потеря опыта организации и проведения комплексных гидрологических исследований, отставание в разработке современных гидрометеорологических приборов отечественного производства, финансирование отрасли по остаточному принципу и т.п. Будем надеяться на то, что задачи освоения АЗ поставят государство перед неизбежной необходимостью начать распутывать клубок накопившихся гидрологических проблем, которым в последние десятилетия практически не уделялось должного внимания.

**Благодарности.** Исследование выполнено в рамках усилий по восстановлению Колымской Водно-Балансовой станции, первого в мире комплексного гидрологического стационара в зоне мерзлоты. Авторы благодарны руководству Института мерзлотоведения им. П.А. Мельникова СО РАН за всестороннюю поддержку и понимание важности проведения гидрологических исследований в криолитозоне.

**Acknowledgments.** The study was carried out as the part of the efforts to restore the Kolyma Water-Balance Station, the first in the world hydrological research watershed in permafrost zone. The authors are grateful to the administration of Melnikov Permafrost Institute SB RAS for the comprehensive support and understanding of the importance of conducting hydrological studies in the permafrost zone.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственная программа Российской Федерации «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации», утверждена постановлением Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2014 г. № 366 (в редакции постановления Правительства Российской Федерации от 31 августа 2017 г. № 1064). URL: <http://static.government.ru/media/files/GGu3GTtv8bvV8gZxSEAS1R7XmzloK6ar.pdf> (дата обращения 19.04.2017).
2. Смирнова О.С., Липина С.А., Кудряшова Е.В., Крейденко Т.Ф., Богданова Ю.Н. Формирование опорных зон в Арктике: методология и практика // Арктика и север. 2016. № 25. doi: 10.17238/issn2221-2698.2016.25.148.
3. Проект «Белкомур». ОАО МК «Белкомур» URL: <http://www.belkomur.com/belkomur/3.php> (дата обращения 19.04.2018).

## REFERENCES

1. *Gosudarstvennaja programma Rossijskoj Federacii "Social'no-jekonomicheskoe razvitie Arkticheskoy zony Rossijskoj Federacii"*, utverzhdena postanovleniem Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 21 aprelya 2014 g. № 366 (v redakcii postanovlenija Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 31 avgusta 2017 g. № 1064). The state program of the Russian Federation "Socio-economic development of the Arctic zone of the Russian Federation". approved by the Government of the Russian Federation of April 21, 2014, No. 366 (as amended by Government Decree No. 1064 of August 31, 2017). Available at: <http://static.government.ru/media/files/GGu3GTtv8bvV8gZxSEAS1R7XmzloK6ar.pdf>. [In Russian]. (accessed 19.04.2018).
2. *Smirnova O.S., Lipina S.A., Kudriashova E.V., Kreidenko T.F., Bogdanova Ju.N.* Formation of support zones in the Arctic: methodology and practice. *Arktika i sever*: Arctic and North. 2016, 25. doi: 10.17238 / issn2221-2698.2016.25.148. [In Russian].

4. Ляпичев Ю.П. Гидрологическая и техническая безопасность гидросооружений: Учебное пособие. М.: РУДН, 2008. 222 с.
5. РИА Новости. Россия сегодня. URL: <https://ria.ru/society/20170717/1498659385.html> (дата обращения 19.04.2017).
6. Шевнина Е.В. Долгосрочная оценка статистических характеристик максимального слоя на территории российской Арктики: Дис. ... д-ра техн. наук. СПб.: РГГУ, 2015. 358 с.
7. Madsen H., Lawrence D., Lang, M., Martin-kova M., Kjeldsen T.R. A review of applied methods in Europe for flood-frequency analysis in a changing environment: Floodfreq COST action ES0901: European procedures for flood frequency estimation // Centre for Ecology & Hydrology. Wallingford, U. K., 2013. 180 p.
8. Holmes R.M., Coe M.T., Fiske G.J., Gurtovaya T., McClelland J.W., Shiklomanov A.I., Spencer G. M., Tank S.E., Zhulidov A.V. Climate Change Impacts on the Hydrology and Biogeochemistry of Arctic Rivers, in Climatic Change and Global Warming of Inland Waters: Impacts and Mitigation for Ecosystems and Societies / Publisher John Wiley and Sons. Chichester, UK, 2012. doi: 10.1002/9781118470596.ch1.
9. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 2. Последствия изменений климата. М.: Росгидромет, 2008. 290 с.
10. Walvoord M.A., Kurylyk B.L. Hydrologic Impacts of Thawing Permafrost — A Review // Vadose Zone Journal. 2016. Vol. 15. № 6. doi: 10.2136/vzj2016.01.0010.
11. Kattsov V.M., Kallen E., Cattle H., Christensen J., Drange H., Hanssen-Bauer I., Johannesen T., Karol I., Raisanen J., Svensson G., Vavulin S. Future climate change: modeling and scenarios for the Arctic // Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. P. 99–150.
12. Rawlins M.A., Serreze M.C., Schroeder R., Zhang X., McDonald K.C. Diagnosis of the record discharge of Arctic-draining Eurasian Rivers in 2007 // Environmental Research Letters. 2009. V. 4, № 4. doi:10.1088/1748-9326/4/4/045011.
13. Алексеевский Н.И., Магрицкий Д.В., Михайлов В.Н. Антропогенные и естественные
3. Project “Belkomur”. OAO MK “Belkomur”. Interregional Company Belkomur. Available at: <http://www.belkomur.com/belkomur/3.php>. [In Russian]. (accessed 19.04.2018)
4. Liapichev Iu.P. *Gidrologicheskaja i tehni-cheskaja bezopasnost' gidrosooruzhenij: Uchebnoe posobie*. Hydrological and technical safety of hydraulic structures: Proc. allowance. Moscow: RUDN, 2008: 222 p. [In Russian].
5. RIA Novosti. *Rossija segodnja*. RIA News. Russia today. Available at: <https://ria.ru/society/20170717/1498659385.html> [In Russian]. (accessed 19.04.2018)
6. Shevmina E.V. *Dolgosrochnaja ocenka statisticheskikh harakteristik maksimal'nogo sloja na territorii rossijskoj Arktiki. Diss. doct. tehn. nauk*. Long-term assessment of statistical characteristics of the maximum layer on the territory of the Russian Arctic. Dr. tech. sci. diss. Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, 2015: 358 p. [In Russian].
7. Madsen H., Lawrence D., Lang, M., Martin-kova M., Kjeldsen T.R. A review of applied methods in Europe for flood-frequency analysis in a changing environment: Floodfreq COST action ES0901: European procedures for flood frequency estimation. Centre for Ecology & Hydrology, 2013: 180 p.
8. Holmes R.M., Coe M.T., Fiske G.J., Gurtovaya T., McClelland J.W., Shiklomanov A.I., Spencer R.G.M., Tank S.E., Zhulidov A.V. Climate Change Impacts on the Hydrology and Biogeochemistry of Arctic Rivers, in Climatic Change and Global Warming of Inland Waters: Impacts and Mitigation for Ecosystems and Societies. Publisher John Wiley and Sons. Chichester. UK, 2012. doi: 10.1002/9781118470596.ch1.
9. *Ocenochnyj doklad ob izmenenijah klimata i ih posledstvijah na territorii Rossijskoj Federacii. T. 2. Posledstviya izmenenij klimata*. Evaluation report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. V. 2. Consequences of climate change. Moscow: Roshydromet, 2008: 290 p. [In Russian].
10. Walvoord M.A., Kurylyk B.L. Hydrologic Impacts of Thawing Permafrost – A Review. Vadose Zone Journal. 2016, 15, 6. doi:10.2136/vzj2016.01.0010.
11. Kattsov V.M., Kallen E., Cattle H., Christensen J., Drange H., Hanssen-Bauer I., Johannesen T., Karol I., Raisanen J., Svensson G., Vavulin S. Future climate change: modeling and scenarios for the Arctic. Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge: Cambridge University Press, 2005: 99–150.
12. Rawlins M.A., Serreze M.C., Schroeder R., Zhang X., McDonald K.C. Diagnosis of the record discharge of Arctic-draining Eurasian Rivers in 2007. Environ. Res. Lett. 2009, 4 (4). doi:10.1088/1748-9326/4/4/045011.

- изменения гидрологических ограничений для природопользования в дельтах рек Российской Арктики // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2015. № 1. С. 14–31.
14. *Tan C.S., Zhang T.Q.* Surface runoff and subsurface drainage phosphorus losses under regular free drainage and controlled drainage with sub-irrigation systems in southern Ontario // *Canadian Journal of Soil Science*. 2011. V. 91 (3). P. 349–359.
15. *Yang D., Kane D. L., Hinzman L., Zhang X., Zhang T., Ye H.* Siberian Lena River hydrologic regime and recent change // *Journal of geophysical research*. 2002. V. 107 (D23). doi:10.1029/2002JD002542.
16. *Smith L.C., Pavelsky T.M., MacDonald G.M., Shiklomanov A.I., Lammers R.B.* Rising minimum daily flows in northern Eurasian rivers: A growing influence of groundwater in the high-latitude hydrologic cycle // *Journal of geophysical research*. 2007. V. 112. doi:10.1029/2006JG000327.
17. *Shiklomanov N.I., Anisimov O.A., Zhang T., Marchenko S., Nelson F.E., Oelke C.* Comparison of model produced active layer fields: Results for northern Alaska // *Journal of geophysical research*. 2007. V. 112. doi:10.1029/2006JF000571.
18. *Tananaev N.I., Makarieva O.M., Lebedeva L.S.* Trends in annual and extreme flows in the Lena River basin, Northern Eurasia // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. doi:10.1002/2016GL070796.
19. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2016 год. М.: Росгидромет, 2017. 70 с.
20. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). URL: <https://gmvo.skniivh.ru> (дата обращения 19.04.2018)
21. Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши, 1976–1980: Вып. 1–17, Л.: Гидрометеиздат.
22. Норвежское управление водных ресурсов и энергетики (NVE). URL: <https://www.nve.no> (дата обращения 16.03.2018)
23. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М.: Госстрой России, 2004. 73 с.
13. *Alekseevskii N.I., Magritskii D.V., Mikhailov V.N.* Anthropogenic and natural changes in hydrological restrictions for the use of natural resources in the deltas of the Russian Arctic. *Vodnoe hozjajstvo Rossii: problemy, tehnologii, upravlenie*. Water management in Russia: problems, technologies, management. 2015, 1: 14–31.
14. *Tan C.S., Zhang T.Q.* Surface runoff and subsurface drainage phosphorus losses under regular free drainage and controlled drainage with sub-irrigation systems in southern Ontario. *Can. J. Soil Sci.* 2011, 91 (3): 349–359.
15. *Yang D., Kane D. L., Hinzman L., Zhang X., Zhang T., Ye H.* Siberian Lena River hydrologic regime and recent change. *Journal of geophysical research*. 2002, 107 (D23). doi:10.1029/2002JD002542.
16. *Smith L.C., Pavelsky T.M., MacDonald G.M., Shiklomanov A.I., Lammers R.B.* Rising minimum daily flows in northern Eurasian rivers: A growing influence of groundwater in the high-latitude hydrologic cycle. *Journal of geophysical research*. 2007, 112. doi:10.1029/2006JG000327.
17. *Shiklomanov N.I., Anisimov O.A., Zhang T., Marchenko S., Nelson F.E., Oelke C.* Comparison of model produced active layer fields: Results for northern Alaska. *Journal of geophysical research*. 2007, 112. doi:10.1029/2006JF000571.
18. *Tananaev N.I., Makarieva O.M., Lebedeva L.S.* Trends in annual and extreme flows in the Lena River basin, Northern Eurasia. *Geophys. Res. Lett.* 2016, 43. doi:10.1002/2016GL070796.
19. *Doklad ob osobennostjakh klimata na territorii Rossijskoj Federacii za 2016 god.* Report on the peculiarities of climate on the territory of the Russian Federation for 2016. Moscow: Roshydromet, 2017: 70 p. [In Russian].
20. *Avtomatizirovannaja informacionnaja sistema gosudarstvennogo monitoringa vodnyh ob'ektov (AIS GMVO).* Automated information system of state monitoring of water objects (AIS GMVO). Available at: <https://gmvo.skniivh.ru>. [In Russian]. (accessed 16.03.2018)
21. *Gosudarstvennyj vodnyj kadastr. Mnogoletnie dannye o rezhime i resursah poverhnostnyh vod sushi, 1976–1980: Vyp. 1–17.* State water cadastre. Long-term data on the regime and resources of surface waters of the land, 1976–1980: 1–17. Leningrad: Gidrometeoizdat. [In Russian].
22. *Norvezhskoe upravlenie vodnyh resursov i jenergetiki.* Norwegian Water Resources and Energy Administration (NVE). Available at: <https://www.nve.no>. (accessed 16.03.2018).
23. *SP 33-101-2003. Opredelenie osnovnyh raschetnyh gidrologicheskikh harakteristik.* SP 33-101-2003. Determination of basic calculated

24. СНИП 2.01.14-83. Определение расчетных гидрологических характеристик. М.: Стройиздат, 1983. 97 с.
25. Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.Л. Гидрологический режим и водные ресурсы // Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М.: Росгидромет, 2012. С. 53–86.
26. Алексеевский Н.И., Фролова Н.Л., Христофоров А.В. Мониторинг гидрологических процессов и повышение безопасности водопользования. М.: Географический факультет МГУ, 2011. 387 с.
27. Добровольский С.Г. Глобальные изменения речного стока. М.: Геос, 2011. 659 с.
28. Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю. Влияние изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек России // Гидрологические последствия изменения климата. Новосибирск, 2007. С. 192–204.
29. Мохов И.И., Семенов В.А., Хон В.Ч. Оценка возможных изменений гидрологического режима в XXI веке на основе глобальных климатических моделей // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 2. С. 150–165.
30. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при наличии данных гидрометрических наблюдений. Нижний Новгород: Вектор-ТиС, 2007. 134 с.
31. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при недостаточности данных гидрометрических наблюдений. СПб.: ААНИИ, 2008. 66 с.
32. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. СПб.: Нестор-История, 2009. 193 с.
33. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определении их расчетных значений по неоднородным данным. СПб.: Нестор-История, 2010. 162 с.
34. 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 (в порядке дискуссии) // Инженерные изыскания. 2017. № 6–7. С. 50–63.
- hydrological characteristics. Moscow: Gosstroy of Russia, 2004: 73 p. [In Russian].
24. *SNiP 2.01.14-83. Opredelenie raschetnyh gidrologicheskikh harakteristik.* SNiP 2.01.14-83. Determination of calculated hydrological characteristics. Moscow: Stroyizdat, 1983: 97 p. [In Russian].
25. *Georgievskii V.Iu., Shalygin A.L.* Hydrological regime and water resources. *Metody otsenki posledstviy izmeneniia klimata dlia fizicheskikh i biologicheskikh sistem.* Methods for assessing the effects of climate change on physical and biological systems. Moscow: Roshydromet, 2012: 53–86. [In Russian].
26. *Alekseevsky N.I., Frolova N.L. Khristoforov A.V.* *Monitoring gidrologicheskikh processov i povyshenie bezopasnosti vodopol'zovaniia.* Monitoring of hydrological processes and improving the safety of water use. Moscow: Geography Department of Moscow State University, 2011: 387 p. [In Russian].
27. *Dobrovolskii S.G.* *Global'nye izmeneniia rechnogo stoka.* Global changes in river flow. Moscow: Geos, 2011: 659 p. [In Russian].
28. *Shiklomanov I.A., Georgievskii V.Iu.* *Vliianie izmeneniia klimata na gidrologicheskii rezhim i vodnye resursy rek Rossii.* The impact of climate change on the hydrological regime and water resources of the Russian rivers. Hydrological consequences of climate change. Novosibirsk, 2007: 192–204. [In Russian].
29. *Mokhov I.I., Semenov V.A., Khon V.Ch.* Assessment of possible changes in the hydrological regime in the 21st century based on global climate models. *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana.* 2003, 39, 2: 150–165. [In Russian].
30. *Metodicheskie rekomendacii po opredeleniiu raschetnyh gidrologicheskikh harakteristik pri nalichii dannyh gidrometricheskikh nabljudenij.* Methodological recommendations for determining the calculated hydrological characteristics in the presence of hydrometric observations. Nizhny Novgorod: Vector-TiS, 2007: 134 p. [In Russian].
31. *Metodicheskie rekomendacii po opredeleniiu raschetnyh gidrologicheskikh harakteristik pri nedostatochnosti dannyh gidrometricheskikh nabljudenij.* Methodological recommendations for the determination of computed hydrological characteristics when hydrometric observations are inadequate. St. Petersburg: AARI, 2008: 66 p. [In Russian].
32. *Metodicheskie rekomendacii po opredeleniiu raschetnyh gidrologicheskikh harakteristik pri otsutstvii dannyh gidrometricheskikh nabljudenij.* Methodological recommendations for determining the calculated hydrological characteristics in the absence of hydrometric observations. St. Petersburg: Nestor-History, 2009: 193 p. [In Russian].



35. *Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А.* Математическое моделирование в гидрологии. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 298 с.
36. *Pomeroy J.W., Gray D.M., Brown T.* The cold regions hydrological model: a platform for basing process representation and model structure on physical evidence // *Hydrol. Process.* 2007. V. 21. P. 2650–2667.
37. National Science Foundation Long-Term Ecological Research (LTER). URL: <https://lternet.edu> (дата обращения 01.04.2018)
38. NPR-A Hydrology, Water and Environmental Research Centre. URL: <http://ine.uaf.edu> (дата обращения 01.04.2018)
39. Arctic Observatory Network (AON). International Study of Carbon, Water, and Energy Balances in the Terrestrial Arctic. URL: <http://aon.iab.uaf.edu> (дата обращения 01.04.2018)
40. University of Saskatchewan. URL: <http://www.usask.ca> (дата обращения 01.04.2018)
41. CRRС Sites around Canada. URL: <http://www.scottycreek.com> (дата обращения 25.01.2018)
42. Global water futures. URL: <https://gwf.usask.ca/> (дата обращения 01.04.2018)
43. Руководство стоковым станциям. Л.: Гидрометеиздат, 1954. 287 с.
44. Руководство воднобалансовым станциям. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 306 с.
45. *Макарьева О.М., Лебедева Л.С., Сушанский С.И., Нестерова Н.В.* 70 лет Колымской водно-балансовой станции // География и природные ресурсы. 2018. № 1. С. 215.
46. *Makarievа O., Nesterova N., Lebedeva L., Sushansky S.* Water-balance and hydrology research in a mountainous permafrost watershed in upland streams of the Kolyma River, Russia: a database from the Kolyma Water-Balance Station, 1948–1997 // *Earth System Science Data.* 2018. V. 10. № 2. P. 689–710.
47. Гидрология заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири. СПб.: ВВМ, 2009. 536 с.
48. *Василенко Н.Г.* Гидрология рек зоны БАМ: экспедиционные исследования. СПб.: Нестор-История. 2013. 672 с.
49. Практические рекомендации по расчету гидрологических характеристик в зоне хо-
33. *Metodicheskie rekomendacii po ocenki odnorodnosti gidrologicheskikh karakteristik i opredelenii ih raschetnykh znachenij po neodnorodnym dannym.* Methodical recommendations for assessing the uniformity of hydrological characteristics and determining their calculated values for heterogeneous data. St. Petersburg: Nestor-History, 2010: 162 p. [In Russian].
34. *Makarievа O.M., Bel'diman I.N., Lebedeva L.S., Vinogradova T.A., Nesterova N.V.* To the question of the validity of the recommendations of SP 33-101-2003 for calculating the characteristics of the maximum runoff of small rivers in the zone of permafrost area (in the order of discussion). *Engineering Surveys.* 2017, 6–7: 50–63. [In Russian].
35. *Vinogradov Iu.B., Vinogradova T.A.* *Matematicheskoe modelirovanie v gidrologii.* Mathematical modeling in hydrology. Moscow: Publishing Center “Akademiya”, 2010: 298 p. [In Russian].
36. *Pomeroy J.W., Gray D.M., Brown T.* The cold regions hydrological model: a platform for basing process representation and model structure on physical evidence. *Hydrol. Process.* 2007, 21: 2650–2667.
37. National Science Foundation Long-Term Ecological Research (LTER). Available at: <https://lternet.edu> (accessed 01.04.2018)
38. NPR-A Hydrology, Water and Environmental Research Centre. Available at: <http://ine.uaf.edu> (accessed 01.04.2018)
39. Arctic Observatory Network (AON). International Study of Carbon, Water, and Energy Balances in the Terrestrial Arctic. Available at: <http://aon.iab.uaf.edu> (accessed 01.04.2018)
40. University of Saskatchewan. Available at: <http://www.usask.ca> (accessed 01.04.2018)
41. CRRС Sites around Canada. Available at: <http://www.scottycreek.com> (accessed 25.01.2018)
42. Global water futures, Available at: <https://gwf.usask.ca/> (accessed 01.04.2018)
43. *Rukovodstvo stokovym stancijam.* Management of flow stations. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1954: 287 p. [In Russian].
44. *Rukovodstvo vodnobalansovym stancijam.* Management of water balance stations. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973: 306 p. [In Russian].
45. *Makarievа O.M., Lebedeva L.S., Sushchanskii S.I., Nesterova N.V.* 70 years of the Kolyma water-balance station. *Geografii i prirodnye resursy.* Geography and natural resources. 2018, 1: 215 p. [In Russian].
46. *Makarievа O., Nesterova N., Lebedeva L., Sushansky S.* Water-balance and hydrology research in a mountainous permafrost watershed in upland streams of the Kolyma River, Russia: a database from the Kolyma Water-Balance Station, 1948–1997, *Earth System Science Data.* 2018, 10 (2): 689–710.

зайтвенного освоения БАМа. Л.: Гидрометеиздат. 1986. 180 с.

50. *Василенко Н.Г., Херсонский Э.С.* Расчет максимальных расходов дождевых паводков в районе трассы БАМ // Труды ГГИ. 1986. Вып. 312. С. 93–104.

51. *Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А.* Прикладная гидрология. СПб.: СПбГЛТУ, 2014. 196 с.

52. *Гарцман Б.И., Шамов В.В.* Натурные исследования стокоформирования в Дальневосточном регионе на основе современных средств наблюдений // Водные ресурсы. 2015. № 6. С. 589–599.

53. *Фролова Н.Л., Алексеевский Н.И., Жук В.А.* Мониторинг гидрологических процессов и обеспечение безопасности водопользования // Природообустройство. 2014. № 3. С. 66–68.

47. *Gidrologija zabolochennyh territorij zony mnogoletnej merzloty Zapadnoj Sibiri.* Hydrology of wetlands in the zone of permafrost in Western Siberia. St. Petersburg: BBM, 2009: 536 p. [In Russian].

48. *Vasilenko N.G. Gidrologija rek zony BAM: jekspedicionnye issledovanija.* Hydrology of the rivers of the BAM zone: expeditionary research. St. Petersburg: Nestor-History, 2013: 672 p. [In Russian].

49. *Prakticheskie rekomendacii po raschetu gidrologicheskikh harakteristik v zone hozjajstvennogo osvoenija BAMA.* Practical recommendations on the calculation of hydrological characteristics in the zone of economic development of the Baikal-Amur Mainline. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986: 180 p. [In Russian].

50. *Vasilenko N.G., Khersonskii E.S.* Calculation of the maximum expenditure of rain floods in the area of the BAM trail. Trudy GGI. Proceedings of SHI. 1986, 312: 93–104. [In Russian].

51. *Vinogradov Ju.B., Vinogradova T.A. Prikladnaja gidrologija.* Applied hydrology. St. Petersburg: SPbGLTU, 2014: 196 p. [In Russian].

52. *Gartsman B.I., Shamov V.V.* Full-scale studies of stack formation in the Far East region on the basis of modern observational means. *Vodnye resursy.* Water resources. 2015, 6: 589–599. [In Russian].

53. *Frolova N.L., Alekseevskii N.I., Zhuk V.A.* Monitoring of hydrological processes and ensuring the safety of water use. *Prirodoobustroistvo.* Environmental management. 2014, 3: 66–68. [In Russian].