

ГИДРОЛОГИЯ

УДК 556.048

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОГРАФОВ СТОКА АРКТИЧЕСКИХ РЕК ЗАПАДНОЙ СИБИРИ В ПРОГРАММЕ HBV-LIGHT ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ РАСХОДОВ ПОВОДОДЬЯ



С.Г. Копысов¹, В.А. Земцов¹, Х. Мацуяма², А.О. Елисеев¹

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

²Столичный университет Токио, Токио, Япония

Исследованы возможности предвычисления гидрографов стока арктических рек и максимумов заданной вероятности превышения на основе концептуальной модели HBV-light. Расчеты выполнены для рек Полуй, Надым, Пур, Таз и др. Проведена калибровка и обобщение параметров модели. Точность расчета гидрографов при небольшом объеме данных стандартных наблюдений не уступает точности более сложных детерминированных моделей, требующих больший объем и лучшее качество исходных данных.

Ключевые слова: Западная Сибирь, арктические реки, моделирование гидрографа, максимальный расход воды, модель HBV-light.

Введение

В настоящее время активизируется деятельность по освоению и использованию природных ресурсов Арктических регионов, в нашей стране выполняется государственная программа «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации». Проблемы обеспечения и развития гидрологических расчетов в арктической зоне России и сопредельных районов становятся все более актуальными [Макарьева и др., 2018; Магрицкий и др., 2019].

Возрастает и роль гидрологических прогнозов на северных реках. Решение гидрологических задач затрудняется тем, что для всего региона характерно весьма слабое развитие стационарной сети гидрометеорологических наблюдений, что относится и к северу Западной Сибири, где крайне ограничены многолетние данные по режиму речного стока. В процессе климатических изменений, наиболее интенсивно происходящих в Арктике, и соответствующей трансформации природной среды [Второй оценочный доклад, 2014], решение задач гидрологических расчетов и прогнозов еще более осложняется вследствие неполноты данных и нестационарности ранее накопленных рядов гидрометеорологических наблюдений. Паводки и вызываемые ими наводнения в силу неопределенности прогнозов представляют собой наиболее распространенные и опасные природные явления, формируемые метеорологическими факторами в контексте изменений климата, определяя важность оценки их величины и риска [Alfieri et al., 2017].

В таких условиях возрастает роль гидрологических моделей для оценки и прогноза гидрографов

стока и его экстремальных характеристик в бассейнах, отличающихся разной степенью гидрологической изученности, в том числе и неизученных рек. Актуальность работы обусловлена наличием пропусков в гидрологических наблюдениях, необходимых для мониторинга климатических изменений, строительства и рационального природопользования на заболоченных нефтегазоносных территориях. Важнейшей гидрологической задачей является оценка режима паводков и наводнений. Также важен прогноз изменений гидрологического режима территории при ожидаемых изменениях климата и ландшафтов.

Принимая во внимание слабое развитие сетей гидрологических наблюдений, недостаточное количество и статистическую неоднородность многолетних рядов наблюдений на многих реках мира, Международная ассоциация гидрологических наук (IAHS) организовала две десятилетние программы скоординированных исследований, нацеленные на получение гидрологической информации, необходимой для изучения и комплексного управления водными ресурсами. Первая из них посвящена расчетам стока неизученных рек – «Prediction on Ungauged Basins, PUB», 2003–2012 [Hrachowitz et al., 2013], вторая – «Panta Rhei» (от слов философа Гераклита «Все течет»), 2013–2022, ориентирована на исследование влияния изменений климата и трансформации ландшафтов водосбора на сток рек [Montanari et al., 2013; Thirel et al., 2015]. Основными задачами здесь являются оценка показателей стока неизученных рек, а затем – влияния на него изменений климата и характера землепользования в бассейнах.

С точки зрения моделирования гидрографов стока рек, прежде всего с суточным (или часовым) разрешением, наибольший интерес для решения практических задач представляют достаточно простые концептуальные полураспределенные модели резервуарного типа, такие, например, как Tank Model [Sugawara et al., 1974], разработанная в Национальном исследовательском центре по предотвращению стихийных бедствий в Токио (Япония) и модель HBV Шведского института метеорологии и гидрологии, впервые представленная в 1972 г. С. Бергстремом [Bergström, Forsman, 1973]. После испытаний эффективности на разных реках мира программы HBV и Tank Model включены в фонд алгоритмов и программ Гидрологической оперативной многоцелевой системы ГОМС (http://www.wmo.int/pages/prog/hwtr/homs/homs_ru.html) Всемирной метеорологической организации, соответственно, как компоненты J04.2.02 и J04.1.01, предлагаемые для использования в гидрологических прогнозах [Руководство..., 2012; Романов, 2018]. Для включения в фонд ГОМС, который обновляется недостаточно оперативно, программы должны быть доступными и строго документированными. Отечественных программ в указанном фонде пока нет.

Концептуальная модель HBV существует в разных версиях и нашла широкое применение в разнообразных физико-географических условиях различных стран. С этой точки зрения она достаточно универсальна и стала прототипом для разработки поздней модели HBV-light [Seibert, 2005; Seibert, Vis, 2012]. В настоящее время программа применяется в ряде университетов мира для обучения студентов и выполнения исследовательских проектов. Основные концепции модели хорошо известны в профессиональном гидрологическом сообществе.

Более сложные детерминированные модели применяются в слабоизученных районах, в том числе на севере Западной Сибири, менее широко – в силу отсутствия исходных данных для их использования. В частности, Е.М. Гусев и соавт. [2015] исследовали формирование стока рек Таз, Пур, Надым и снежного покрова в бассейне Таза на основе детерминированной модели тепло- и влагообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP в сочетании с информацией глобальных баз данных по характеру подстилающей поверхности (топография, почвы, растительность) и материалов наблюдений на метеостанциях региона. Калибровка параметров выполнялась по данным о речном стоке. Расчеты гидрографов стока рек с суточным разрешением показали обнадеживающие результаты.

Цель настоящей работы – определение возможности воспроизведения гидрографов стока ряда северных рек (включая максимальные расходы половодья и паводков) на основе относительно простой

концептуальной модели HBV-light, определения и географического обобщения параметров модели и вычисления максимальных расходов воды заданной вероятности превышения. При положительных результатах это сделает возможным также оптимизировать систему гидрологического мониторинга в труднодоступных районах и решать другие задачи, в том числе оценивать реакции гидрологических систем на задаваемые сценарии изменения климата.

Территория исследований и формирование стока рек

Исследуемый регион расположен на севере Западно-Сибирской равнины и объединяет как разные по размерам бассейны собственно арктических рек Таз, Пур, Пяку-Пур, Правая Хетта, Надым и Полуй, текущих к северу от Сибирских Увалов (в официальных границах Арктической зоны Российской Федерации [Макарьева и др., 2018]), и субарктических рек Аган и Вах, течение которых направлено к долине реки Обь в юго-западном направлении (рис. 1). Общая площадь бассейнов до створов, для которых моделировался сток воды, составляет более 330 тыс. км². Наиболее контрастный рельеф наблюдается в верховьях рек Таза, Пура и Ваха, к северу поверхность становится относительно ровной с небольшим уклоном в северном направлении.

Климат большей части территории умеренно континентальный с холодной продолжительной зимой и коротким летом. Атмосферное увлажнение избыточное. Хорошо выражена широтная зональность и сезонность гидроклиматических показателей. Приустьевые участки крупных северных рек находятся в зоне тундры и лесотундры, которая южнее переходит в подзону северной тайги. В бассейне Ваха распространены северо-таежные ландшафты на севере и среднетаежные – на юге.

Основным гидрологическим сезоном на реках является хорошо выраженное весеннее половодье, в течение которого на северных реках проходит около половины объема годового стока. Половодье отличается достаточно резким подъемом и спадом расходов и уровней воды. Впервые подробный гидрологический анализ половодья в Западной Сибири выполнен Д.А. Бураковым [1978], который показал, что основная роль в формировании половодья северных рек принадлежит запасам воды в снеге перед началом таяния и осадкам периода снеготаяния. Они формируют сток талых вод, который составляет в среднем от 75 до 80 % стока половодья на реках Надым, Пур и Таз соответственно. Второе место по величине притока воды в половодье составляет подземный сток (12–18 %). Именно межгодовая изменчивость талого стока, в основном, и определяет высоту максимумов половодья в разные годы. В летне-осенний период наблюдаются дождевые паводки.

Зима, в течение которой реки переходят на подземное питание, продолжается более полугода.

В более поздней работе по гидрологии севера Западной Сибири [Zakharova et al., 2009] с привлечением данных спутникового зондирования показано, что на фоне возрастания температуры воздуха и атмосферных осадков происходит снижение стока рек Полуй и Пур. На Надыме существенно снизилась доля талого стока в годовом – до 29 % в среднем за 2000–2008 гг. (за счет увеличения базового стока) – по сравнению с 49 % талого стока на р. Пур. В [Zakharova et al., 2011] исследована зависимость стока половодья от определенных по спутниковым данным максимальных запасов воды в снежном покрове. Обнаружен рост потерь талого стока примерно на 50 мм/год в бассейне Полуя, Надыма, Пура и Таза в 1988–2006 гг. При этом максимальный расход половодья на реках Полуй, Надым и Пур в 7 раз превышает средний годовой расход воды, а на р. Таз – в 3,5 раза [Zakharova et al., 2011].

Арктические реки протекают в области распространения многолетней мерзлоты. С севера на юг сменяются зоны сплошной, прерывистой и островной многолетней мерзлоты. Бассейны Агана и Ваха расположены большей частью в пределах зоны островной мерзлоты. В связи с потеплением, особенно интенсивно проявляющимся на севере в последние годы, наблюдается таяние и деградация мерзлоты, что наряду с некоторым ростом атмосферного увлажнения способствует увеличению притока как подземных, так и поверхностных вод в реки. Параллельно в связи с замедленным отводом воды с плоских междуречных заболоченных и заозеренных пространств происходит еще большее увлажнение территории бассейнов северных арктических рек.

Исходные данные и методы исследования

На территории Сибири сеть метеостанций и гидрометрических постов крайне редкая – расстояния между пунктами наблюдений измеряются десятками или сотнями километров. Северная половина Западной Сибири относится к наименее изученным в гидрометеорологическом отношении областям континента [Гидрология..., 2009]. Всего моделировались процессы формирования стока с девяти бассейнов. Площадь самого малого бассейна р. Правая Хетта до п. Пангоды равна 1 200, а самого крупного бассейна р. Таз до п. Сидоровск – 100 тыс. км² (табл. 1).

Ежедневные расходы воды для имитационного моделирования водного цикла в замыкающих створах модельных бассейнов получены из открытых источников Государственного водного кадастра (гидрологических ежегодников), а за последние годы – из Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов [АИС ГМВО]. Данные по ежедневным осадкам и температурам воздуха с 1937 по 2017 г. для ближайших ме-

теорологических станций получены из базы данных Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных [ВНИГМИ-МЦД].

Наряду с разреженностью пунктов гидрометеорологической сети качество гидрологических данных невысокое, так как ряды наблюдений за 1990–2000-е гг. содержат значительное количество пропусков, а сами измеренные расходы воды – значительные погрешности в результате затопления обширных речных пойм и ледовых явлений во время прохождения высоких вод половодья, а также наличия ледового покрова и внутриводного льда в реках зимой. Таким образом, при моделировании гидрографов мы вынуждены сталкиваться с результатами воздействия механических факторов собственно в руслах рек.

Гидрологическая модель

Для решения поставленных задач использована модель HBV-light в базовой простой Windows-версии, позволяющей оперировать имеющимися в регионе данными сетевых наблюдений за атмосферными осадками и температурой воздуха с суточным разрешением и в интерактивном режиме выполнять калибровку параметров и анализировать результаты расчетов [Seibert, 2005; Seibert, Vis, 2012].

Модель HBV описывает общий баланс воды в бассейне следующим образом:

$$P = E + Q + \frac{d}{dt}(SP + SM + UZ + LZ + VL), \quad (1)$$

где P – осадки, E – суммарное испарение, Q – сток, SP – снежный покров, SM – влажность почвы, UZ – запас воды в верхней зоне подземных вод, LZ – в нижней зоне подземных вод и VL – объем озер (все составляющие выражены в миллиметрах слоя воды).

Исследуемый географически неоднородный водосбор может быть разделен на подбассейны, а также более или менее однородные зоны растительности или землепользования. HBV-light преобразовывает суточный приток воды, осадки, температуру воздуха и среднесуточный месячный слой потенциального испарения в снеготаяние, водоотдачу и затем сток воды. Осадки моделируются как снег или дождь в зависимости от температуры: выше или ниже пороговой.

Основные модули программы включают: 1) накопление и таяние снега (последнее – по температурным коэффициентам стаивания), водоотдачу талых вод; 2) расчет влажности почвы и формирование испарения, просачивания воды в почву и стока в верхнем и нижнем слое почвогрунта; 3) расчет гидрографа стока воды в замыкающем створе. Параметры модели определяются путем их калибровки, исходя из критерия качества модели, обеспечивающего как можно лучшее соответствие рассчитанных модельных ежедневных расходов воды в замыкающем створе бассейна наблюдаемым расходам.

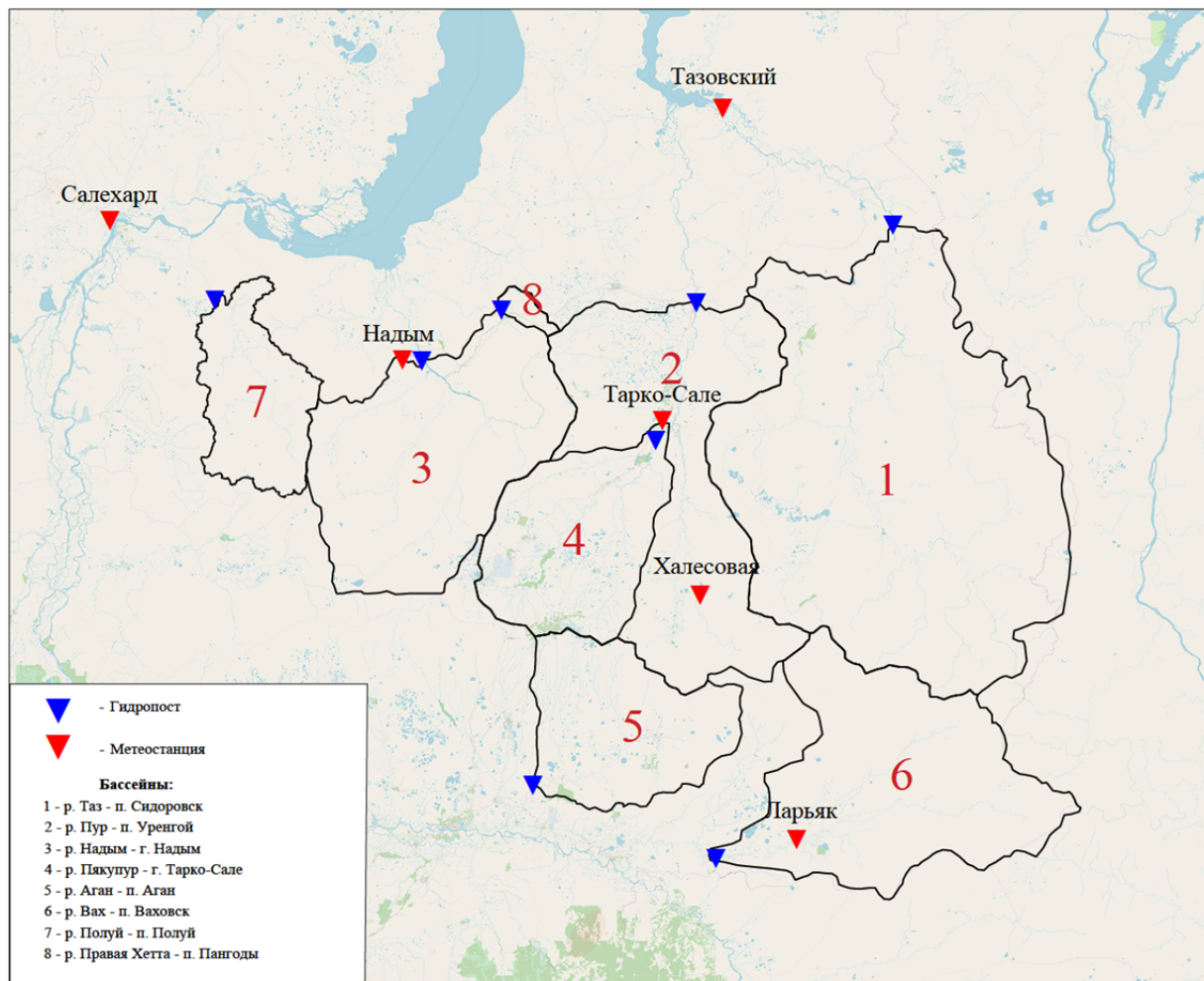


Рис. 1. Территория исследований

Бассейны: 1 – р. Таз – п. Сидорск; 2 – р. Пур – п. Уренгой; 3 – р. Надым – г. Надым; 4 – р. Пякупур – г. Тарко-Сале; 5 – р. Аган – п. Аган; 6 – р. Вах – п. Ваховск; 7 – р. Полуй – п. Полуй; 8 – р. Правая Хетта – п. Пангоды

Fig. 1. The study area

Numbers indicate the model river basins: 1 – Taz River – Sidorovsk; 2 – Pur River – Urengoy; 3 – Nadym River – Nadym; 4 – Pyaku-Pur River – Tarko-Sale; 5 – Agan River – Agan; 6 – Vakh River – Vakhovsk; 7 – Poluy River – Poluy; 8 – Prevaya Hetta River – Pangody. Gauge Stations are indicated by blue triangles, Meteorological Stations – by red triangles

Таблица 1

Сведения о модельных бассейнах, метеостанциях и весовых коэффициентах к осадкам на метеостанциях для определения осадков на водосборе, показатели точности

Table 1

Information about model basins, meteorological stations and weights to precipitation depths at meteorological stations to determine precipitation in the catchment, model performance statistics

Река – пост	$A, \text{ км}^2$ / $H_{\text{ср}}, \text{ м}$	Метеостанции (высота, м над у. м.)	Координаты центра водосбора	Период калибровки	Коэффициент детерминации R^2	Коэффициент эффективности модели $Reff$	Коэффициент эффективности $Reff$ за половодье
Вах – Ваховск	56 200 /100	0,85Ларьяк (57) +0,15Александровское (48)	N61°37' E81°37'	2008–2015	0,91	0,90	0,93
Вах – Лобчинское	56 400 /100	0,85Ларьяк (57) +0,15Александровское (48)	N61°37' E81°37'	1962–1973	0,88	0,88	0,89
Аган – Аган	29 700 /95	0,5Ларьяк (57) +0,5Халесовая (67)	N62°14' E76°15'	1971–1976	0,85	0,85	0,87

Река – пост	A, км ² / H _{ср} , м	Метеостанции (высота, м над у. м.)	Координаты центра водосбора	Период калибровки	Коэффициент детерминации R ²	Коэффициент эффективности модели Reff	Коэффициент эффективности Reff за половодье
Пяку-Пур – Тарко-Сале	32 900 /80	0,5Тарко-Сале (25) +0,5Халесовая (67)	N64°06' E75°47'	2008–2017	0,81	0,78	0,86
Надым – Надым	48 000 /50	0,7Надым (19) +0,3Тарко-Сале (25)	N64°37' E73°11'	2012–2016	0,67	0,42	0,63
Пур – Уренгой	80 400 /90	0,7Тарко-Сале (25) +0,3Халесовая (67)	N64°18' E76°48'	2008–2018	0,78	0,72	0,85
Таз – Сидоровск	100 000 /90	0,5Толька (33) +0,5Тарко-Сале (25)	N64°28' E82°23'	1987–1990	0,86	0,85	0,85
Правая Хетта – Пангоды	1 200 /70	0,5Надым (19) +0,5Тарко-Сале (25)	N65°53' E74°52'	1983–1990	0,72	0,71	0,80
Полуй – Полуй	15 100 /70	0,3Салехард (16) +0,7Надым (19)	N65°12' E69°25'	2008–2018	0,86	0,85	0,90

Примечание. A – площадь водосбора; H_{ср} – средняя высота водосбора.

Note. A – watershed area; H_{ср} – mean basin altitude.

Ежедневные слои осадков на водосборе определялись по данным наблюдений на метеостанциях, расположенных в пределах его площади либо на метеостанциях, ближайших к нему. Названия метеостанций, выбранных для каждого модельного водосбора, и весовые коэффициенты к слою осадков каждой станции указаны в третьем столбце табл. 1. Величина осадков принималась одинаковой на всей площади соответствующего модельного бассейна.

В программе HBV-light потенциальное испарение (испаряемость) задается среднегодовыми месячными значениями на метеостанции, поэтому межгодовая изменчивость испаряемости не учитывается. На наш взгляд, это один из основных недостатков данной программы, в которой отдельным файлом задаются среднегодовые значения испаряемости за каждый месяц (мм/сут).

Величина испаряемости, согласно рекомендациям И.В. Карнацевича и др. [2007], вычислялась нами по сумме месячных температур выше 0 °C с учетом затрат тепла на таяние снежного покрова и сезонной мерзлоты, а затем распределялась пропорционально дефициту влажности. За расчетный период принят современный (1986–2015 гг.) период оценки составляющих водного баланса суши [Паромов и др., 2017].

Калибровка модели

В результате калибровки требуется определить значения ряда параметров, показанных в табл. 2. Калибровка, т.е. подбор значений модельных параметров, выполнялась вручную, с пошаговым контролем результатов. В качестве критериев качества модели мы использовали: 1) коэффициент детерминации R², равный квадрату коэффициента линейной корреляции связи между рассчитанными и наблюдаемыми ежедневными расходами воды в замыкающем створе модельного бассейна, а также 2) коэффициент эффективности R_{eff} Нэша–Сатклиффа, рассчитываемый по формуле:

$$R_{eff} = 1 - \frac{\sum (Q_{sim}(t) - Q_{obs}(t))^2}{\sum (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})^2}, \quad (2)$$

где Q_{sim} – смоделированный расход воды, мм/сут; Q_{obs} – наблюдаемый расход, мм/сут; t – время, сут. Так как критерий R_{eff} более чувствителен к пиковым расходам [Seibert, Vis, 2012; Wijayarathne, Coulibaly, 2020], он вычислялся для всего калибровочного периода и отдельно – для периода половодья. Коэффициент детерминации характеризует сходимость модельных расходов воды с наблюдаемыми во всем диапазоне их колебаний. Промежутки времени для калибровки параметров на разных реках не совпадают по той причине, что многие ряды, как сказано

выше, содержат значительное количество пропусков наблюдений.

Качество аппроксимации гидрографов стока достаточно высокое, о чем говорят близкие к единице значения всех трех критериев качества аппроксимации у большинства модельных водосборов. Эффективность моделей для периода половодья несколько выше, чем для всего массива данных по каждому бассейну. Моделирование стока р. Надым у пос. Надым показало несколько худшие результаты. Нужно отметить, что для бассейнов Надыма, Пура и Таза точность воспроизведения гидрографов с суточным разрешением почти не отличается от таковой, полученной Е.М. Гусевым и др. [2015] с помощью намного более сложной детерминированной модели SWAP.

В результате калибровочных расчетов параметры модели удалось разделить на две группы: индивидуальные и общие. Параметры первой группы подбирались индивидуально для каждого бассейна, значения параметров второй группы оказались общими для всех модельных водосборов, учитывая относительное сходство ландшафтных условий на всей исследуемой территории (см. табл. 3). Основным определяемым для каждого водосбора параметром является пороговая температура начала снеготаяния ТТ, зависящая от расположения метеостанций от-

носительно центра водосбора расчетной реки. От размера, т.е. площади водосбора, и других условий стока, влияющих на скорость добегания, зависит параметр MAXBAS, он отражает количество дней, на которые распределяется генерируемый суточный сток на каждом временном шаге, с учетом весовых коэффициентов. Также для каждого водосбора подбирались коэффициенты сработки вод нижнего и верхнего яруса – таким образом, чтобы точнее описать меженный (базовый) сток в зависимости от гидрогеологических условий в конкретном бассейне. Подбирался и параметр FC (характеризует запас воды в деятельном слое водосбора), он интегрально учитывает мощность деятельного слоя и его гранулометрический состав (пески, глины, торф). Параметр LP определяет часть максимального запаса воды в почве, при которой фактическое испарение достигает величины потенциального испарения. Все остальные параметры для всей исследуемой территории подобраны одинаковыми, т.е. имеют региональное значение. Региональные значения параметров использовались, например, одним из авторов для моделирования стока неизученных рек региона в работе [Pokrovsky et al., 2020]. В любом случае важно, чтобы данные для калибровки включали в себя разные по водности годы, обычно для этого бывает достаточно нескольких лет [Seibert, Vis, 2012].

Таблица 2

Параметры модели, определяемые калибровкой

Table 2

Model parameters to be defined by means of calibration

Параметр	Описание	Единицы измерения
ТТ	Пороговая температура начала снеготаяния (зависит от расположения метеостанций)	°С
CFMAX	Коэффициент стаивания, смещает пик половодья во времени	мм/(°С*сут)
SFCF	Поправочный коэффициент к твердым осадкам	–
SP	Сезонная изменчивость коэффициента стаивания	–
CFR	Коэффициент повторного замерзания талой воды	–
CWH	Водоудерживающая способность снега в долях от запаса воды в снежном покрове	–
FC	Максимальный запас воды в почве	мм
LP	Влагосодержание почвы, при котором испарение с нее достигает величины потенциального испарения	мм
Beta	Коэффициент, определяющий распределение дождевой или талой воды между пополнением запаса воды в почве и пополнением подземных вод	–
K0	Коэффициент истощения вод деятельного слоя	1/сут
K1	Коэффициент истощения верхнего горизонта подземных вод	1/сут
K2	Коэффициент истощения нижнего горизонта подземных вод	1/сут
UZL	Глубина воды в верхнем горизонте подземных вод (влияет на максимум гидрографа)	мм
PERC	Максимальная интенсивность просачивания из верхнего горизонта в нижний	мм/сут
MAXBAS	Параметр, определяющий количество дней, на которые распределяется генерируемый суточный сток на каждом временном шаге с учетом весовых коэффициентов (зависит от площади водосбора и скорости добегания)	сут

Таблица 3

Значения параметров модели HBV-light для северных рек, ориентированные на оценку максимумов половодья

Table 3

Model HBV-light parameter values for northern rivers selected for flood peaks prediction

Условное обозначение	Единица измерения	Правая Хетта – Пангоды	Полуй – Полуй	Надым – Надым	Пур – Уренгой	Пяку-Пур – Тарко-Сале	Таз – Сидоровск	Вах – Ваховск	Вах – Лобчинское	Аган – Аган
ТТ	°С	–0,5	–1,9	–1,4	–1,2	–1,0	–1,0	0,5		–1,5
CFMAX	мм/(°С*сут)	2,5								
SFCF	–	1								
SP		1								
CFR	–	0,05								
CWH	–	0,1								
FC	мм	200	300	200	180	200	150	300	150	250
LP	–	0,8	0,5	0,1	0,6	1,0	0,3	0,5		0,5
Beta	–	1,0								
K ₀	1/сут	0,1								
K ₁		0,2	0,95	0,5	0,7	0,5	0,2	0,5		0,7
K ₂		0,02	0,006	0,005	0,006	0,01	0,009	0,05		0,007
UZL	мм	10								
PERC	мм/сут	2								
MAXBAS	сут	4	30	50	42	36	45	80		60

Результаты и обсуждение

Воспроизведение гидрографов стока в модели HBV-light, реализованной в виде программного продукта [Seibert, Vis, 2012], заключается в подготовке исходных данных и подборе модельных параметров, позволяющих рассчитывать суточный слой стока по температуре и осадкам с ближайших метеостанций. В данной работе разделение водосборов на высотные и ландшафтные зоны не производилось, чтобы не создавать избыточную информативность, не подтвержденную исходной метеорологической информацией. Была выбрана стандартная структура модели без учета специфики землепользования в бассейне. Параметры получены целиком для всей площади каждого модельного бассейна, без ее фрагментации. Основной проблемой для моделирования стока является недостаточная метеорологическая изученность территории.

Для визуальной проверки результатов моделирования за период калибровки приведен рис. 2, откуда видно, что фактические и модельные гидрографы стока практически наложены друг на друга, а пики максимального стока наблюдаются в одни и те же промежутки времени на обоих гидрографах, прослеживается синхронность колебаний. Критерий качества за период калибровки высокий, и модели после дальнейшей проверки могут быть использованы для оценки изменения речного стока в усло-

виях современного изменения климата, а также на более отдаленную перспективу.

При моделировании для створа р. Вах – п. Ваховск было выявлено, что если для калибровки использовать данные за 2008–2015 гг., то пики на модельных гидрографах до 1990 г. всегда ниже наблюдаемых. Данных за период 1991–2007 гг. в свободном доступе нет. Переносом поста из Лобчинского в Ваховск такое снижение качества моделирования с 0,90 до 0,77 объяснить невозможно. Поэтому были подобраны параметры за 1962–1973 гг., когда пост находился в п. Лобчинский. При этом качество моделирования возросло с 0,77 до 0,89 после уменьшения всего лишь одного параметра FC, отражающего максимальный запас воды в деятельном слое водосбора с 300 до 150 мм. Подобное можно объяснить климатическими изменениями, приведшими к уменьшению глубины промерзания и увеличению мощности деятельного слоя в период между 1990 и 2008 гг.

Пик половодья, обусловленный снеготаянием, хорошо моделируется и может хорошо прогнозироваться. Это объясняется тем, что величина осадков, фиксируемая на метеостанциях, является случайной величиной, но за период снегонакопления случайные колебания взаимно компенсируются, что позволяет смоделировать максимальный снеговой запас на водосборе и его таяние. Если же на снеговое половодье накладывается случайная величина дождевых

осадков, не отражающих ситуацию в целом на водосборе, то качество моделирования падает. Такая же ситуация имеет место при моделировании паводков, обусловленных локальным выпадением жидких осадков. Известно, что наибольшие отличия смоделированного и измеренного стока возникают из-за несоответствия измеренных на одной-двух метеостанциях осадков, используемых для моделирования, усредненному по всей водосборной площади увлажнению.

Для проверки эффективности полученных моделей осуществлена их валидация на независимом материале, т.е. с использованием данных гидрометеорологических наблюдений, которые не принимались в расчет при определении модельных параметров (табл. 4). При этом модели прогонялись с параметрами из табл. 3. За некоторыми исключениями, согласно принятым в Росгидромете критериям оценки качества методики прогноза [Георгиевский, Шаноч-

кин, 2007] по R^2 или по отношению стандартной погрешности оценки суточных расходов воды по модели к среднему квадратическому отклонению наблюдаемых данных, модель дает удовлетворительные результаты даже для р. Надым у п. Надым, а для р. Вах – хорошие результаты.

В заключение, по аналогии с работой [Nesterova et al., 2019], покажем возможность оценки максимумов половодья заданной вероятности превышения, опираясь на модельные данные. Для этого выбраны бассейны р. Вах до п. Лобчинское и р. Пяку-Пур до п. Тарко-Сале, для которых получено достаточно высокое качество моделирования как по результатам калибровки, так и на этапе валидации модели. Сравнение эмпирических кривых обеспеченности, построенных отдельно для наблюдаемых и смоделированных значений максимальных расходов половодья показывает их хорошее соответствие (рис. 3, 4).

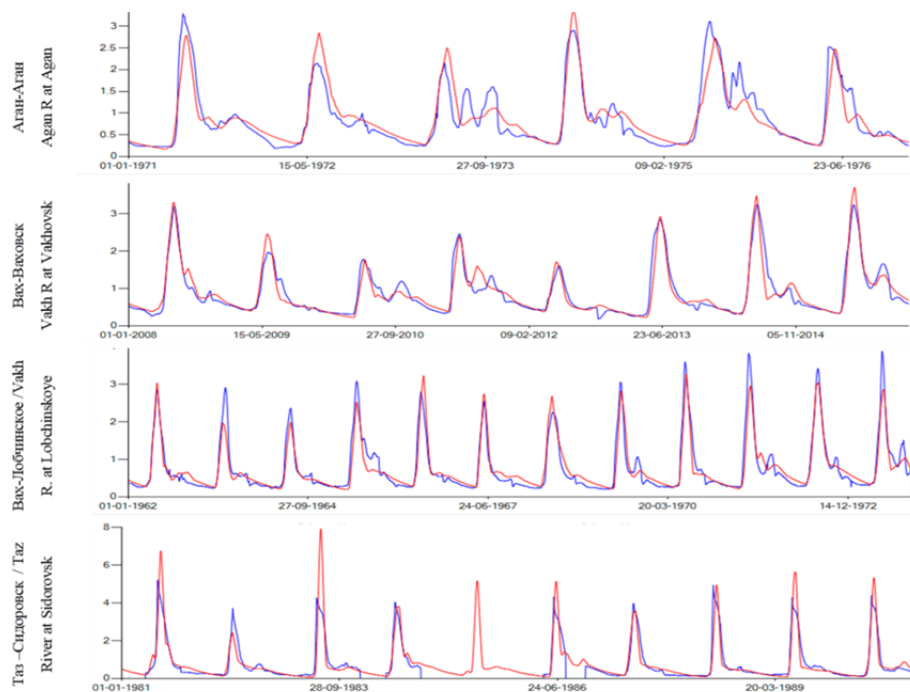


Рис. 2. Наблюдаемые (линии синего цвета) и смоделированные в HBV-light (красные линии) гидрографы стока (мм/сут) за период подбора модельных параметров для оценки максимальных расходов воды

Fig. 2. Observed (blue lines) and simulated (red lines) in the HBV-light model water flow hydrographs (mm day⁻¹) over the period of parameter calibration for maximum water discharges prediction

Таблица 4

Результаты проверки качества моделирования на независимых данных

Table 4

Results of the simulation quality testing based on independent data

Река – пост	Период калибровки	Коэффициент детерминации R^2	Коэффициент эффективности модели R_{eff}	Эффективность моделирования половодья R_{eff}
Вах – Ваховск	2017–2018	0,86	0,70	0,78
Вах – Лобчинское	1955–1961	0,81	0,78	0,78
	1982–1990	0,80	0,78	0,84
Аган – Аган	05.1966–1968	0,75	0,75	0,77

Река – пост	Период калибровки	Коэффициент детерминации R^2	Коэффициент эффективности модели R_{eff}	Эффективность моделирования половодья R_{eff}
	1978–1979	0,75	0,56	0,56
Пяку-Пур – Тарко-Сале	2018	0,77	0,22	0,19
Надым – Надым	07.2017–2018	0,64	0,53	0,61
Таз – Сидоровск	05.1981–1983	0,76	0,59	0,54
Правая Хетта – Пангоды	1981–04.1982	0,76	0,73	0,72

Примечание. Полужирным шрифтом показаны низкие показатели качества.

Note. Low values of the model performance criteria are shown in Bold.

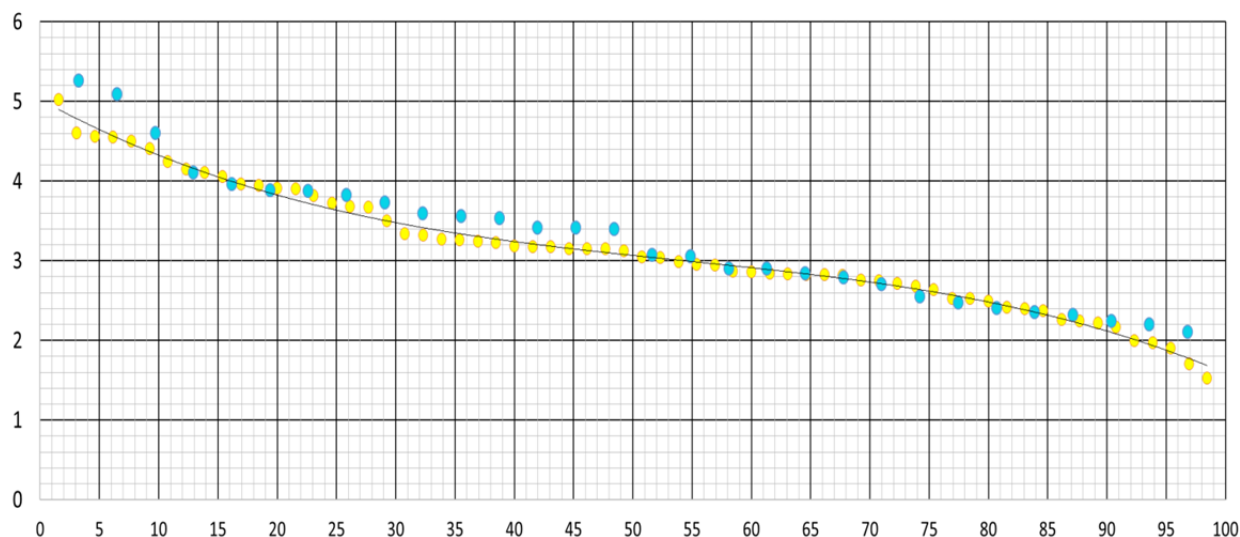


Рис. 3. Кривые обеспеченности наблюдаемых и смоделированных максимальных суточных слоев стока воды (мм/сут), р. Вах – п. Лобчинское

Голубые значки – данные наблюдений за 1956–1990 гг.; желтые значки – модельные данные за 1956–2019 гг.

Fig. 3. Probability of exceedance functions for observed and simulated maximum daily runoff depths (mm/day), the Vakh River at Lobchinskoye

Light blue marks – data observed in 1956–1990; yellow marks – data modeled for 1956–2019

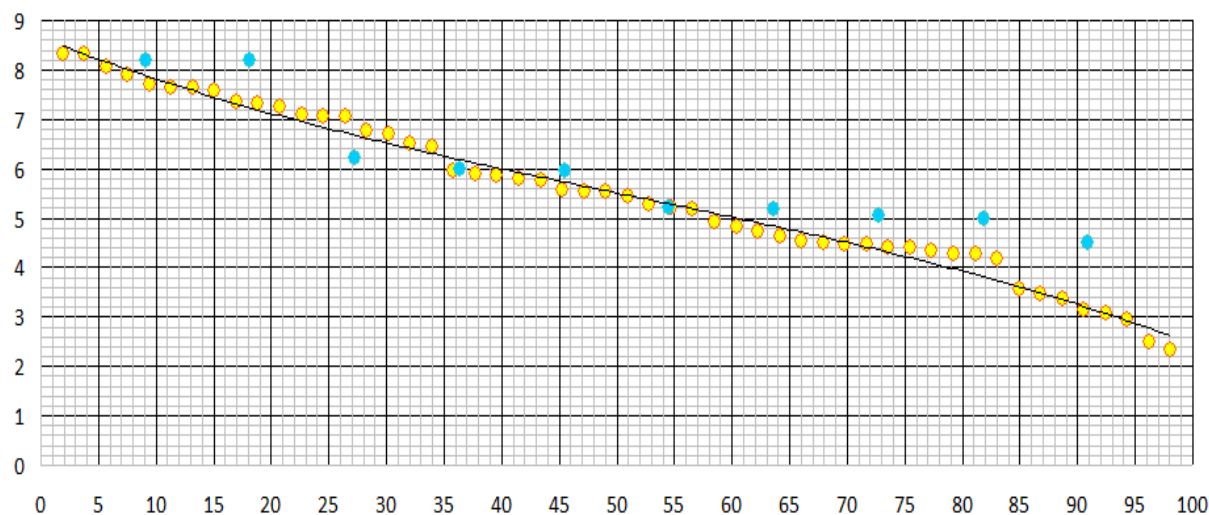


Рис. 4. Кривые обеспеченности наблюдаемых и смоделированных максимальных суточных слоев стока воды (мм/сут), р. Пяку-Пур – п. Тарко-Сале

Голубые значки – данные наблюдений за 2008–2018 гг.; желтые значки – модельные данные за 1967–2018 гг.

Fig. 4. Probability of exceedance functions for observed and simulated maximum daily runoff depths (mm/day), the Pyaku-Pur River at Tarko-Sale

Light blue marks – data observed in 2008–2018, yellow marks – data modeled for 1967–2018

Заключение

По данным наблюдений за температурой воздуха и суммой атмосферных осадков с суточным разрешением на метеостанциях севера Западно-Сибирской равнины и ежедневным расходом воды, получены значения параметров концептуальной модели HBV-light [Seibert, Vis, 2012] для вычисления гидрографов стока арктических рек Полуй, Надым, Малая Хетта, Пяку-Пур, Пур и Таз, а также рек субарктики Вах и Аган. Площадь самого малого бассейна р. Правая Хетта до п. Пангоды равна 1 200, а самого крупного бассейна р. Таз до п. Сидоровск составляет 100 тыс. км².

Воспроизведение гидрографов стока в модели HBV-light заключается в подготовке исходных данных и подборе модельных параметров, позволяющих рассчитывать суточный слой стока по температуре и атмосферным осадкам на ближайших метеостанциях. В данной работе разделение водосборов на высотные и ландшафтные зоны не производилось, чтобы не создавать избыточную информативность, не подтвержденную наличием исходной метеорологической информацией. Была выбрана стандартная структура модели без учета специфики землепользования в бассейне. Параметры получены целиком для всей площади каждого модельного бассейна, без ее детализации.

Калибровка модельных параметров для рек показывает, что относительно простая концептуальная модель HBV-light хорошо воспроизводит внутригодовую динамику стока, в том числе расходы воды в период половодья. Точность воспроизведения гидрографов стока северных рек не уступает точности более сложных детерминированных моделей в связи с отсутствием достаточно густой сети гидрометеорологических наблюдений и необходимостью определения многочисленных параметров сложных моделей.

Ручная калибровка модельных параметров позволяет осмысленно использовать модель HBV-light для регионального моделирования элементов водного цикла и гидрографов стока. При этом определяются

шесть индивидуальных для каждого бассейна параметров и девять общих региональных, отражающих сходство ландшафтных условий на всей исследуемой территории. К индивидуальным параметрам отнесены: пороговая температура начала снеготаяния TT, параметр MAXBAS, коэффициенты истощения вод нижнего и верхнего яруса модели, максимальное влагосодержание деятельного слоя FC и параметр LP. Показано, что значения каждого из остальных девяти параметров модели могут задаваться одинаковыми для всей исследуемой территории, т.е. имеют региональный характер, что позволяет вычислять гидрографы стока, в том числе максимальные расходы воды неизученных и слабо изученных рек.

В целом полученные критерии качества за период калибровки и валидации моделей достаточно высоки, и модель может быть при определенных условиях использована для оценки изменения речного стока в условиях современного изменения климата, а также на более отдаленную перспективу. Пик половодья, обусловленный снеготаянием, моделируется лучше, чем пики, вызванные дождевыми паводками. Фиксируемая на метеостанциях величина осадков принимает случайные значения, но за период снегонакопления – случайные колебания взаимно компенсируются. Поэтому для бассейнов с высоким качеством моделирования сравнение эмпирических кривых обеспеченности показывает хорошее соответствие наблюдаемых и смоделированных значений максимальных расходов половодья по всей амплитуде их изменения.

Для южной части исследуемой территории – бассейна р. Вах, результаты моделирования показывают увеличение мощности деятельного слоя в конце XX – начале XXI в., в результате уменьшения глубины промерзания из-за потепления климата.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта ФЦП RFMEFI61419X0002. X. Мацуяма поддержан грантом JST/SICORP номер JPMJSC1901 (Япония).

ЛИТЕРАТУРА

- Автоматизированная** информационная система государственного мониторинга водных объектов. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения: 27.04.2019).
- Базы данных** Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (ВНИГМИ-МЦД). URL: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (дата обращения: 27.04.2019).
- Бураков Д.А.** Гидрологический анализ весеннего половодья в лесной зоне Западно-Сибирской равнины // Вопросы географии Сибири. 1978. Вып. 10. С. 69–89.
- Второй** оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М. : Росгидромет, 2014. С. 1004.
- Георгиевский Ю.М., Шаночкин С.В.** Гидрологические прогнозы. СПб. : Изд-во РГГМУ, 2007. 436 с.
- Гидрология** заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири / ред. С.М. Новиков. СПб. : ВВМ, 2009. 536 с.
- Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я., Айзель Г.В.** Моделирование формирования стока рек и снежного покрова на севере Западной Сибири // Водные ресурсы. 2015. Т. 42 (4). С. 387–395.
- Карнацевич И.В., Мезенцева О.В., Тусупбеков Ж.А., Бикбулатова Г.Г.** Возобновляемые ресурсы тепловлагообеспеченности Западно-Сибирской равнины и динамика их характеристик. Омск : Изд-во Омского аграрного ун-та, 2007. 268 с.
- Магрицкий Д.В., Поваляшишкова Е.С., Фролова Н.Л.** История изучения стока воды и водного режима рек Арктической зоны России в XX в. и начале XXI в. // Арктика и Антарктика. 2019. № 3. С. 61–96.

Макарьева О.М., Нестерова Н.В., Бельдман И.Н., Лебедева Л.С. Актуальные проблемы гидрологических расчетов в арктической зоне Российской Федерации и сопредельных территориях распространения многолетней мерзлоты // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Т. 64 (1). С. 101–118.

Паромов В.В., Земцов В.А., Копысов С.Г. Климат Западной Сибири в фазу замедления потепления (1986–2015 гг.) и прогнозирование гидроклиматических ресурсов на 2021–2030 гг. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328 (1). С. 62–74.

Романов А.В. Развитие системы прогнозирования наводнений в Российской Федерации. Часть 2. Специфика изменений // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 1 (367). С. 39–63.

Руководство по гидрологической практике. Т. II: Управление водными ресурсами и практика применения гидрологических методов. СПб.: Изд-во ВМО, 2012. № 168. 321 с.

Alfieri L., Bisselink B., Dottori F., Naumann G., de Roo A., Salamon P., Wyser K., Feyen L. Global projections of river flood risk in a warmer world // *Earth's Future*. 2017. V. 5. P. 171–182.

Bergström S., Forsman A. Development of a conceptual deterministic rainfall–runoff model // *Nordic Hydrology*. 1973. V. 4 (3). P. 147–170.

Hrachowitz M., Savenije H.H.G., Blöschl G., McDonnell J.J., Sivapalan M., Pomeroy J.W., Arheimer B., Blume T., Clark M.P., Ehret U., Fenicia F., Freer J.E., Gelfan A., Gupta H.V., Hughes D.A., Hut R.W., Montanari A., Pande S., Tetzlaff D., Troch P.A., Uhlenbrook S., Wagener T., Winsemius H.C., Woods R.A., Zehe E., Cudennec C. A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB) – a review // *Hydrological Sciences Journal*. 2013. V. 58 (6). P. 1198–1255.

Montanari A., Young G., Savenije H.H.G., Hughes D.A., Wagener T., Ren L.L., Koutsoyiannis D., Cudennec C., Toth E., Grimaldi S., Blöschl G., Sivapalan M., Beven K., Gupta H., Hipsey M.R., Schaefl B., Arheimer B., Boegh E., Schymanski S.J., Di Baldassarre G., Yu B., Hubert P., Huang Y., Schumann A., Post D.A., Srinivasan V., Harman C.J., Thompson S., Rogger M., Viglione A., McMillan H., Characklis G.W., Pang Z., Belyaev V. “PantaRhei – Everything Flows”: Change in hydrology and society – The IAHS Scientific Decade 2013–2022 // *Hydrological Sciences Journal*. 2013. V. 58 (6). P. 1256–1275.

Nesterova N., Makarieva O., Post D. Methods of mathematical modelling for calculating flow characteristics of ungauged rivers in engineering design tasks (by the example of the Khemchik River, Tyva Republic, Russia) // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2019. 381 012068. 9 p.

Pokrovsky O.S., Manasypov R.M., Kopysov S.G., Krickov I.V., Shirokova L.S., Loiko S.V., Lim A.G., Kolesnichenko L.G., Vorobyev S.N., Kirpotin S.N. Impact of permafrost thaw and climate warming on riverine export fluxes of carbon, nutrients and metals in western siberia // *Water*. 2020. V. 12 (6). P. 1817.

Seibert J. HBV light version 2. User's Manual. Stockholm University, 2005. 32 p.

Seibert J., Vis M. J.P. Teaching hydrological modeling with a user–friendly catchment–runoff–model software package // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2012. V. 16. P. 3315–3325.

Sugawara M. et al. Tank model and its application to Bird Creek, Wollombi Brook, Bikin River, Kitsu River, Sanaga River and Nam Mune // *Research note of the National Research Center for Disaster Prevention*. 1974. No 11. P. 1–64.

Thirel G., Andréassian V., Perrin C., Audouy J.-N., Berthet L., Edwards P., Foltin N., Furusho C., Kuentz A., Lerat J., Lindström G., Martin E., Mathevet T., Merz R., Parajka J., Ruelland D., Vaze J. Hydrology under change: an evaluation protocol to investigate how hydrological models deal with changing catchments // *Hydrological Sciences Journal*. 2015. V. 60 (7–8). P. 1184–1199.

Wijayarathne D.B., Coulibaly P. Identification of hydrological models for operational flood forecasting in St. John's, Newfoundland, Canada // *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2020. No 27. P. 100646. DOI: 10.1016/j.ejrh.2019.100646

Zakharova E.A., Kouraev A.V., Biancamaria S., Kolmakova M.V., Mognard N.M., Zemtsov V.A., Kirpotin S.N., Decharme B. Snow Cover and Spring Flood Flow in the Northern Part of Western Siberia (the Poluy, Nadym, Pur, and Taz Rivers) // *J. Hydrometeorol.* 2011. V. 12. P. 1498–1511.

Zakharova E.A., Kouraev A.V., Kolmakova M.V., Mognard N.M., Zemtsov V.A., Kirpotin S.N. The modern hydrological regime of the northern part of Western Siberia from in situ and satellite observations // *International Journal of Environmental Studies*. 2009. V. 66 (4). P. 447–463.

Авторы:

Копысов Сергей Геннадьевич, кандидат географических наук, доцент, кафедра гидрологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: wosypok@mail.ru

Земцов Валерий Алексеевич, доктор географических наук, заведующий кафедрой, кафедра гидрологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: zemtsov_v@mail.ru

Мацуяма Хироши, профессор, департамент географии, столичный университет Токио, Токио, Япония.

E-mail: yamahoshi@mv.biglobe.ne.jp

Елисеев Артем Олегович, инженер, проблемная научно-исследовательская лаборатория гляциоклиматологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: kuzoller@gmail.com

Geosphere Research, 2020, 4, 108–120. DOI: 10.17223/25421379/17/9

S.G. Kopysov¹, V.A. Zemtsov¹, H. Matsuyama², A.O. Eliseev¹

¹National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

²Tokyo Metropolitan University, Tokyo, Japan

RIVER FLOW HYDROGRAPH SIMULATION IN THE WESTERN SIBERIA LOWLAND NORTH FOR THE EXTREME FLOOD FLOW PREDICTION BASED ON THE HBV-LIGHT MODEL

The purpose of this work is to study the possibility of predicting the flow hydrographs of the Arctic rivers (including maximum discharges of snowmelt and rain floods) and estimating the maximum water discharges of a given probability of exceedance on a basis of

the conceptual model HBV-light. The calculations were performed for the rivers Poluy, Nadym, Pur, Taz, etc. In total, the processes of runoff formation from nine basins were modeled. The area of the smallest river basin of the Pravaya Hetta River at Pangody is 1200, and the largest basin of the Taz River at the settlement of Sidorovsk is 100,000 km² in area.

Prediction of runoff hydrographs in the HBV-light model consists of the preparation of initial data and the selection of model parameters that allow calculating the daily runoff depth based on daily air temperature and precipitation at the nearest weather stations. In this work, the division of catchments into altitude and landscape zones was not carried out. A standard model structure was chosen without taking into account the specifics of land use in the basin. The parameters were obtained for a whole area of each model catchment, without its detailing.

Calibration of model parameters for rivers shows that the relatively simple conceptual model HBV-light reproduces well the intra-annual dynamics of runoff, including water discharge during the flood period. The accuracy of reproducing the hydrographs of the northern rivers runoff is not inferior to the accuracy of more complex deterministic models due to the lack of a sufficiently dense network of hydrometeorological observations and the need to determine the numerous parameters of more complex deterministic models.

Manual calibration of the model parameters makes it possible to meaningfully use the HBV-light model for regional modeling of the elements of the water cycle and flow hydrographs. In this case, six individual parameters for each basin and nine general regional parameters are determined, reflecting the similarity of landscape conditions throughout the study area. The individual parameters include: TT, FC, LP, K1, K2, MAXBAS. It is shown that the values of each of the other nine parameters of the model can be set the same for the entire study area, that is, they have a regional character, which makes it possible to calculate runoff hydrographs, including the maximum water discharge of ungauged and poorly studied rivers.

In general, the obtained model quality criteria for the period of calibration and validation of the models are quite high, and some models could, under certain conditions, be used to assess the change in river runoff induced by the climate change, as well as in the longer time period. Peak flood due to snowmelt is modeled better than peaks due to rainfall floods. Therefore, for basins with high model performance, a comparison of empirical probability distribution functions shows a good agreement between the observed and modeled values of the maximum flood flow rates over the entire amplitude of their fluctuations.

Keywords: *Western Siberia, Arctic rivers, flow hydrograph simulation, maximum water discharge, the HBV-light model*

This study was supported by the Russian Federal Target Program Grant RFMEFI61419X0002. H. Matsuyama was supported by the JST/SICORP Grant Number JPMJSC1901 (Japan).

References

- Avtomatizirovannaya informatsionnaya sistema gosudarstvennogo monitoringa vodnykh ob'yektov* [Automated information system for state monitoring of water bodies]. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> Date accessed: 27.04.2019. In Russian
- Burakov D.A. *Gidrologicheskiy analiz vesennego polovoda v lesnoy zone Zapadno-Sibirskoy ravniny* [Hydrological analysis of spring floods in the forest zone of the West Siberian Plain] // *Voprosy geografii Sibiri*. 1978. No 10. pp. 69–89. In Russian
- Databases of Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center (RIHMI-WDC) <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> Date accessed: 27.04.2019. In Russian
- Vtoroy otsenochnyy doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii* [Second Roshydromet assessment report on climate change and its consequences in Russian Federation]. Moscow: Rosgidromet, 2014. 1004 p. In Russian
- Georgiyevskiy Yu.M., Shanochkin S.V. *Gidrologicheskiye prognozy*. [Hydrological forecasts] St. Petersburg.: Izd. RGGMU, 2007. 436 p. In Russian
- Gidrologiya zabolochennykh territoriy zony mnogoletney merzloty Zapadnoy Sibiri* [Hydrology of wetlands in the permafrost zone of Western Siberia] / Ed. CM. Novikov. 2009. St. Petersburg: VVM. 536 p. In Russian
- Gusev E.M., Nasonova O.N., Dzhogan L.Y., Ayzel G.V. Simulating the formation of river runoff and snow cover in the northern West Siberia // *Water Resources*. 2015. V. 42. pp. 460–467.
- Karnatsevich I.V., Mezentseva O.V., Tusupbekov G.A., Bikhula-tova G.G. *Vozobnovlyayemye resursy teplovлагообеспеченности Zapadno-Sibirskoy ravniny i dinamika ikh kharakteristik* [Study of dynamics and mapping of elements of energy and water balance and characteristics of energy and water availability]. Omsk, Omsk State Agricultural University Press, 2007. 268 p. In Russian
- Magritskii D.V., Povalishnikova E.S., Frolova N.L. *Istoriya izucheniya stoka vody i vodnogo rezhima rek Arkticheskoy zony Rossii v XX v. i nachale XXI v.* [History of the study of water flow and water regime of rivers of the Arctic zone of Russia in the XX century and the beginning of the XXI century] // *Arktika i Antarktika*. 2019. No 3. pp. 61–96. In Russian
- Makarieva O.M., Nesterova N.V., Beldiman I.N., Lebedeva L.S. *Aktual'nyye problemy gidrologicheskikh raschetov v arkticheskoy zone Rossiyskoy Federatsii i sopredel'nykh territoriyakh rasprostraneniya mnogoletney merzloty* [Actual Problems of Hydrological Assessments in the Arctic Zone of Russian Federation and Adjacent Permafrost Territories] // *Problemy Arktiki i Antarkтики*. 2018. V. 64 (1). pp. 101–118. In Russian
- Romanov A.V. *Razvitiye sistemy prognozirovaniya navodneniy v Rossiyskoy Federatsii. Chast' 2. Spetsifika izmeneniy* [Development of a flood forecasting system in the Russian Federation. Part 2. Specificity of changes] // *Hydrometeorological studies and forecasts (Gidrometeorologicheskiye issledovaniya i prognozy)*. 2018. No 1 (367). pp. 39–63. In Russian
- Rukovodstvo po gidrologicheskoy praktike. Tom II. Upravleniye vodnymi resursami i praktika primeneniya gidrologicheskikh metodov*. [Guide to Hydrological Practices. V. II. Management of Water Resources and Applications of Hydrological Practices WMO]. No 168. 2009. 302 p. In Russian
- Alfieri L., Bisselink B., Dottori F., Naumann G., de Roo A., Salamon P., Wyser K., Feyen L. Global projections of river flood risk in a warmer world // *Earth's Future*. 2017. V.5. pp. 171–182.
- Bergström S., Forsman A. Development of a conceptual deterministic rainfall-runoff model // *Nordic Hydrology*. 1973. V. 4 (3). pp. 147–170.
- Hrachowitz M., Savenije H.H.G., Blöschl G., McDonnell J.J., Sivapalan M., Pomeroy J.W., Arheimer B., Blume T., Clark M.P., Ehret U., Fenicia F., Freer J.E., Gelfan A., Gupta H.V., Hughes D.A., Hut R.W., Montanari A., Pande S., Tetzlaff D., Troch P.A., Uhlenbrook S., Wagener T., Winsemius H.C., Woods R.A., Zehe E., Cudennec C. A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB) – a review // *Hydrological Sciences Journal*. 2013. V. 58(6). pp. 1198–1255.

Montanari A., Young G., Savenije H.H.G., Hughes D.A., Wagener T., Ren L.L., Koutsoyiannis D., Cudennec C., Toth E., Grimaldi S., Blöschl G., Sivapalan M., Beven K., Gupta H., Hipsey M.R., Schaeff B., Arheimer B., Boegh E., Schymanski S.J., Di Baldassarre G., Yu B., Hubert P., Huang Y., Schumann A., Post D.A., Srinivasan V., Harman C.J., Thompson S., Rogger M., Viglione A., McMillan H., Characklis G.W., Pang Z., Belyaev V. "PantaRhei – Everything Flows": Change in hydrology and society – The IAHS Scientific Decade 2013–2022 // *Hydrological Sciences Journal*. 2013. V. 58(6). pp. 1256–1275.

Nesterova N., Makarieva O., Post D. Methods of mathematical modelling for calculating flow characteristics of ungauged rivers in engineering design tasks (by the example of the Khemchik River, Tyva Republic, Russia) // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2019. 381 012068. 9 p.

Paromov V.V., Zemtsov V.A., Kopysov S.G. Climate of West Siberia during the slowing phase of warming (1986–2015) and prediction of hydroclimatic resources for 2021–2030 // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2017. V. 328 (1). pp. 62–74. In Russian

Pokrovsky O.S., Manasypov R.M., Kopysov S.G., Krickov I.V., Shirokova L.S., Loiko S.V., Lim A.G., Kolesnichenko L.G., Vorobyev S.N., Kirpotin S.N. Impact of permafrost thaw and climate warming on riverine export fluxes of carbon, nutrients and metals in western siberia // *Water*. 2020. V. 12(6). pp. 1817.

Seibert J. HBV light version 2. User's Manual. Stockholm University, 2005. 17 p.

Seibert J., Vis M. J. P. Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package // *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2012. V. 16. pp. 3315–3325.

Sugawara M., et al., Tank model and its application to Bird Creek, Wollombi Brook, Bikin River, Kitsu River, Sanaga River and Nam Mune. Research note of the National Research Center for Disaster Prevention. 1974. No 11. pp. 1–64.

Thirel G., Andréassian V., Perrin C., Audouy J.-N., Berthet L., Edwards P., Folton N., Furusho C., Kuentz A., Lerat J., Lindström G., Martin E., Mathevet T., Merz R., Parajka J., Ruelland D., Vaze J. Hydrology under change: an evaluation protocol to investigate how hydrological models deal with changing catchments // *Hydrological Sciences Journal*. 2015. V. 60(7–8). pp. 1184–1199.

Wijayarathne D.B., Coulibaly P. Identification of hydrological models for operational flood forecasting in St. John's, Newfoundland, Canada // *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2020. V. 27. 100646. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100646>

Zakharova E.A., Kouraev A.V., Biancamaria S., Kolmakova M.V., Mognard N.M., Zemtsov V.A., Kirpotin S.N., Decharme B. Snow Cover and Spring Flood Flow in the Northern Part of Western Siberia (the Poluy, Nadym, Pur, and Taz Rivers) // *J. Hydrometeor.* 2011. V. 12, pp. 1498–1511.

Zakharova E.A., Kouraev A.V., Kolmakova M.V., Mognard N.M., Zemtsov V.A., Kirpotin S.N. The modern hydrological regime of the northern part of Western Siberia from in situ and satellite observations // *International Journal of Environmental Studies*. 2009. V. 66(4). pp. 447–463.

Author's:

Kopysov Sergey G., Cand. Sci (Geography), Associate Professor, Department of Hydrology, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: wosypok@mail.ru

Zemtsov Valerii A., Dr. Sci. (Geography), Professor, Department of Hydrology, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: zemtsov_v@mail.ru

Matsuyama Hiroshi, Professor, Department of Geography, Tokyo Metropolitan University, Tokyo, Japan.

E-mail: yamahoshi@mvg.biglobe.ne.jp

Eliseev Artem O., Engineer, Laboratory of Glacioclimatology, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: kuzoller@gmail.com