

ПОВЕРХНОСТНЫЕ И ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ СУШИ

УДК 551.345, 556

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-1(43-56)

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА
НА МАЛЫХ ГОРНЫХ ВОДОСБОРАХ КРИОЛИТОЗОНЫ
(ПО МАТЕРИАЛАМ КОЛЫМСКОЙ ВОДНО-БАЛАНСОВОЙ СТАНЦИИ)****О.М. Макарьева^{1,2}, Л.С. Лебедева¹, Т.А. Виноградова²**¹ *Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН,
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; omakarieva@gmail.com*² *Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле,
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9, Россия*

На основе анализа данных наблюдений за динамикой характеристик деятельного слоя, распределением снежного покрова, речным стоком и процессами испарения на малых водосборах Колымской водно-балансовой станции выделены пять основных стокоформирующих типов ландшафтов, репрезентативных для горных территорий Северо-Востока России: гольцы на водоразделах; горная тундра и заросли кедрового стланика на склонах южной экспозиции; мохово-лишайниковое редколесье на склонах северной экспозиции; лиственный лес в долинах рек; лиственный лес в условиях надмерзлотного талика. Для каждого типа ландшафта разработана схематизация почвенно-растительного покрова и оценены параметры распределенной детерминированной гидрологической модели "Гидрограф". Проведено моделирование элементов водного баланса и гидрографов стока воды для водосбора руч. Контактный (створ Нижний, площадь 21.3 км²) и трех входящих в него микроводосборов (ручьи Северный, Южный и Морозова), однородных по типам выделенных ландшафтов. Расчет проводился с суточным шагом за период 1951–1997 гг. На основе сравнения рассчитанных величин с данными наблюдений результаты моделирования оценены как удовлетворительные. Новизна исследования состоит в предложенном подходе априорной оценки параметров гидрологической модели без использования методов калибровки. Такой подход перспективен для анализа будущего развития процессов формирования стока и эволюции мерзлых пород в условиях изменений климата.

Колымская водно-балансовая станция, гидрологическая модель "Гидрограф", сток воды, криолитозона, сезонный слой, ландшафты, водный баланс

**MODELLING OF RUNOFF FORMATION PROCESSES
AT SMALL MOUNTAIN WATERSHEDS IN THE PERMAFROST ZONE
(BY THE DATA OF THE KOLYMA WATER BALANCE STATION)****O.M. Makarieva^{1,2}, L.S. Lebedeva¹, T.A. Vinogradova²**¹ *Melnikov Permafrost Institute, SB RAS,
36, Merzlotnaya str., Yakutsk, 677010, Russia; omakarieva@gmail.com*² *St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences,
7-9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russia*

Based on analysis of the observation data on the active layer characteristics, the distribution of the snow cover, the streamflow and the evaporation processes in the small watersheds of the Kolyma water-balance station, five main types of landscapes representative of the mountainous areas of the North-East of Russia were identified: rocky talus at surface watersheds; mountain tundra and Siberian dwarf pine brushwood at south-facing slopes; moss and lichenous sparse forests at north-facing slopes; larch forest in the river valleys; larch forest in the river talik zone. For each type of the landscape, the vegetation-soil cover was developed, and the parameters of the deterministic hydrological model "Hydrograph" were estimated. Modelling of the water balance elements and of the runoff hydrographs were carried out for the Kontaktovy Creek basin (Nizhny gauge, area 21.3 km²) and three microwatersheds representing the main types of landscapes (the Morozova, Severny and Yuzhny Creeks). Calculations were carried out with the daily time interval for the period of 1951–1997. Based on comparison with the observational data, the simulation results were assessed as satisfactory. The novelty of the research consists in the proposed approach of a priori estimation of the hydrological model without using calibration methods. Such an approach is promising for assessing future changes in runoff formation processes and the evolution of frozen ground under conditions of climate change.

The Kolyma water-balance station, hydrological model "Hydrograph", runoff, permafrost zone, active layer, landscapes, water balance

ВВЕДЕНИЕ

Изменения климата и деградация многолетнемерзлых пород приводят к трансформации гидрологического цикла, в том числе динамике влажности почвогрунтов [Quinton *et al.*, 2011], интенсификации связи подземных и поверхностных вод [Walvoord, Kurylyk, 2016], сезонному перераспределению элементов водного баланса [Глотов, Глотова, 2018; Tananaev *et al.*, 2016; Makarieva *et al.*, 2019]. Количественные оценки влияния динамики сезонноталого слоя (СТС) мерзлых пород на формирование речного стока в будущем остаются неопределенными. Это связано с нелинейным характером взаимодействий между климатом и мерзлотными ландшафтами [Федоров, Константинов, 2009; Bring *et al.*, 2016]. Вследствие ограниченности полевых наблюдений за характеристиками тепло- и водообмена ландшафтов на обширных территориях криолитозоны математическое моделирование является одним из методов исследования механизмов взаимодействия мерзлых пород и процессов формирования стока воды и прогноза их изменений в будущем [Макарьева и др., 2018]. Однако необходимо не только развитие моделей, которые бы учитывали условия динамики СТС и процессов формирования стока воды в различных ландшафтах, но и методов априорной (взамен калибровки) оценки параметров таких моделей [Pomeroy *et al.*, 2007].

Целью исследования является применение и верификация метода последовательной оценки параметров детерминированной гидрологической модели “Гидрограф” [Виноградов, Виноградова, 2010] для условий горных водосборов Северо-Востока России с учетом динамики характеристик деятельного слоя, различий ландшафтов и закономерностей процессов формирования стока на основе данных наблюдений Колымской водно-балансовой станции (КВБС). Сначала в качестве объекта моделирования рассматривается единичная почвенная колонка, потом делается последовательный перенос параметров модели на элементарный водосбор (состоящий из элементарных склонов), малый водосбор, средние и крупные бассейны. На каждом этапе результаты моделирования верифицируются относительно данных наблюдений. Такой подход позволяет более обоснованно использовать метод моделирования и верифицированные наборы параметров разработанной модели при расчетах на неизученных водосборах, а также в условиях изменений климата. Настоящее исследование является продолжением работ [Виноградов и др., 2015; Лебедева и др., 2015], в которых выполнена оценка параметров гидрологической модели “Гидрограф” и показана ее применимость для расчета динамики мощности СТС в масштабе профиля почвогрунтов в различных ландшафтах КВБС.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Колымская водно-балансовая станция – первый в мире гидрологический стационар в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Станция была основана в 1948 г. и прекратила свое существование в конце 1997 г. КВБС занимала территорию горного водосбора руч. Контактный площадью 21.3 км² в верхней части бассейна р. Колымы (Магаданская область). Сочетание ландшафтов в пределах КВБС является репрезентативным для условий горной криолитозоны Северо-Востока России [Насыбуллин, 1976]. Это позволяет использовать ряды данных совместных гидрометеорологических и специальных наблюдений продолжительностью 30–50 лет для разработки и верификации моделей природных процессов на огромных слабоизученных в гидрологическом плане территориях. В настоящей работе использованы материалы обзорной и опубликованной базы данных КВБС [Makariev *et al.*, 2017, 2018]. Подробный анализ гидрометеорологических условий формирования стока на КВБС, проведенный с использованием максимально полных рядов наблюдений, содержится в работах [Лебедева и др., 2017; Makarieva *et al.*, 2018], поэтому здесь приводятся лишь краткие сведения о физико-географических характеристиках станции.

Абсолютные отметки высот территории КВБС изменяются от 823 до 1690 м. Основными ландшафтами являются гольцы, горная тундра и заросли кедрового стланика, а также листовничное редколесье и листовничный лес, заболоченные в долинах ручьев (рис. 1, 2). Среднегодовая температура воздуха на метеорологической станции Нижняя (850 м) за период наблюдения 1949–1997 гг. составила –11.3 °С, среднее годовое количество осадков – 342 мм.

В качестве объектов моделирования выбраны три микроводосбора ручьев Южный, Северный и Морозова, представляющие типичные ландшафты КВБС, а также вся территория станции – руч. Контактный в створе Нижний.

Ручей Морозова является правым притоком руч. Контактный. Водосбор площадью 0.63 км² полностью покрыт глыбово-щебнистыми осыпями (см. рис. 1, 2, а). Диапазон высот составляет 1200–1690 м, максимальный уклон склонов достигает 50°. Среднегодовое количество стока за период 1969–1997 гг. составил 453 мм, а годовой коэффициент стока (R), рассчитываемый как отношение толщины слоев стока и осадков, достигает 95 %.

Ручей Северный – левый приток руч. Встреча, который впадает в руч. Контактный. Водосбор площадью 0.33 км² покрыт почти исключительно кедровым стлаником средней и высокой сомкнутости (см. рис. 1, 2, б). Почвенный покров фраг-

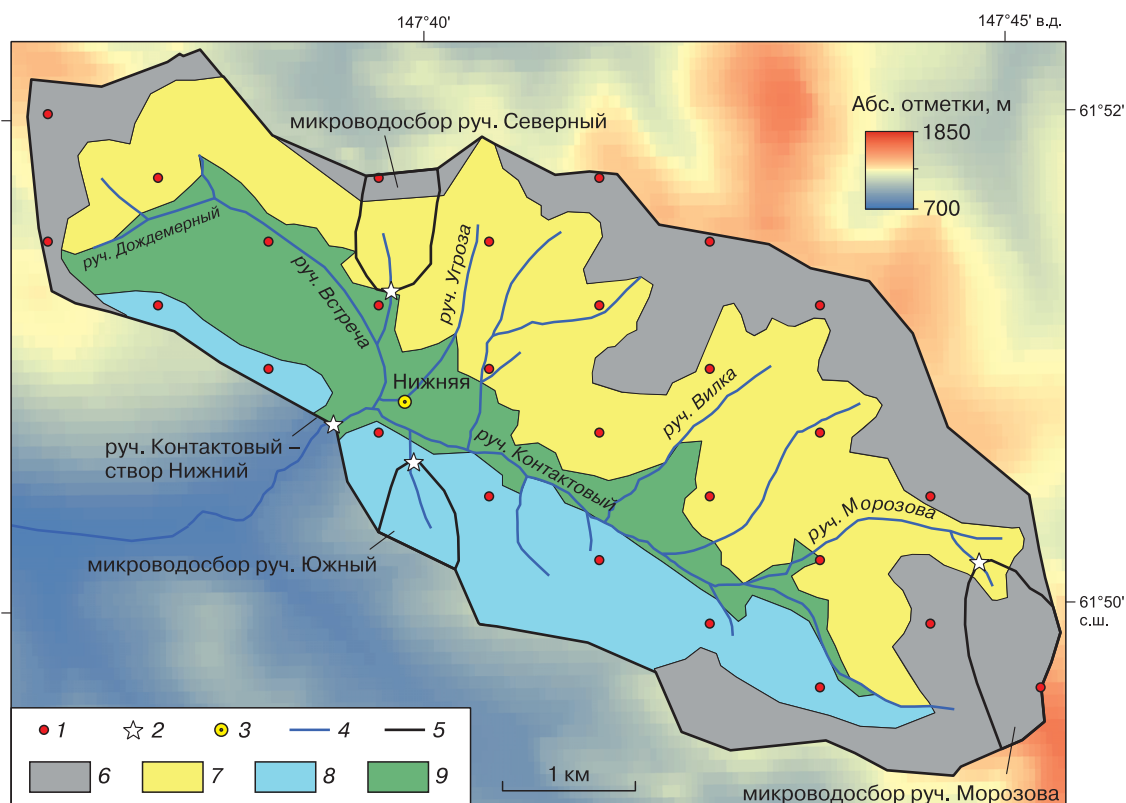


Рис. 1. Схема Колымской водно-балансовой станции.

1 – репрезентативные точки (РТ); 2 – гидрологические посты; 3 – метеорологическая станция; 4 – русловая сеть; 5 – границы водосборов; 6–9 – стокоформирующие комплексы (СФК): 6 – гольцы, 7 – горная тундра, заросли кедрового стланика на склонах южной экспозиции, 8 – лиственничное редколесье на склонах северной экспозиции, 9 – лиственничный лес в долинах рек, в том числе в зоне надмерзлотных таликов.

ментарен. Большая часть склонов (70 %) имеет южную экспозицию, 30 % – юго-восточную и юго-западную. Средний уклон составляет 21° , его максимальное значение достигает 40° . Максимальная и минимальная отметки высот водосбора составляют 1300 и 880 м.

Ручей Южный – левый приток руч. Контактный. Водосбор площадью 0.27 км^2 покрыт лиственничным редколесьем с разреженным кустарниковым покровом, ольховником и кедровым стлаником, ступающим вдоль тальвега (см. рис. 1, 2, в). Сплошной напочвенный покров представлен сфагновыми мхами с участием лишайников [Бояринцев и др., 2006]. Максимальная и минимальная отметки высот водосбора руч. Южный составляют 1110 и 917 м. Склоны долины преимущественно северо-восточной и северо-западной экспозиции. Средняя крутизна составляет 17° .

Водный баланс водосборов ручьев Северный и Южный значительно отличается от руч. Морозова. Среднегодовое значение слоя годового стока составило всего 227 мм ($R = 56\%$) и 193 мм ($R = 51\%$) для ручьев Северный и Южный

за периоды 1958–1997 и 1960–1997 гг. соответственно.

Разнообразие сочетаний характеристик рельефа, микроклимата и почвенно-растительного покрова определяют динамику характеристик СТС (мощность, влажность/льדיстость, температура) и процессов формирования стока. Например, во влажном лиственничном лесу в долинах ручьев при снеготаянии, когда почвогрунты находятся в мерзлом состоянии, формируется поверхностный сток, а в летний период при протаивающей почве происходят значительные потери стока на увлажнение мощного мохово-лишайникового покрова и транспирацию и формируется подповерхностный сток. Глубина протаивания в заболоченных низинах составляет 20–50 см. В гольцовой зоне профиль почвогрунтов состоит из обломков глинистого сланца разной крупности и характеризуется низкими значениями максимальной водоудерживающей способности и льдиности. В результате отложения каменной осыпи сохраняют высокую проницаемость даже при отрицательных температурах. Талая или дождевая вода быстро фильтру-

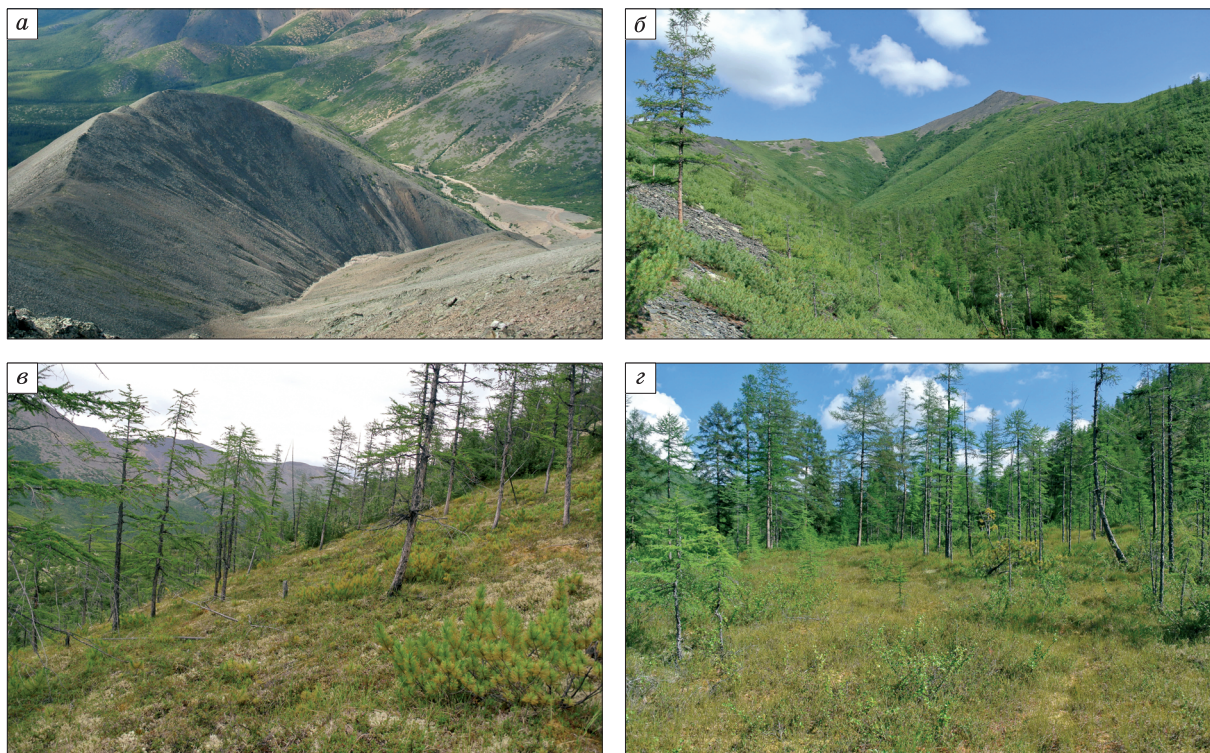


Рис. 2. Ландшафты Колымской водно-балансовой станции:

a – голцы, руч. Морозова; *б* – горная тундра, заросли кедрового стланика, руч. Северный; *в* – мохово-лишайниковое лиственничное редколесье, руч. Южный; *з* – лиственничный лес, долина руч. Контактный. Фото О.М. Макарьевой, август 2016 г.

ется до мерзлотного водоупора и стекает подповерхностным путем. Мощность деятельного слоя на южных каменистых склонах достигает к концу лета 3 м [Makarjeva et al., 2017, 2018].

Существенные различия гидрологических режимов водотоков (рис. 3) на территории водосбора руч. Контактный определяют необходимость использования гидрологических моделей, способ-

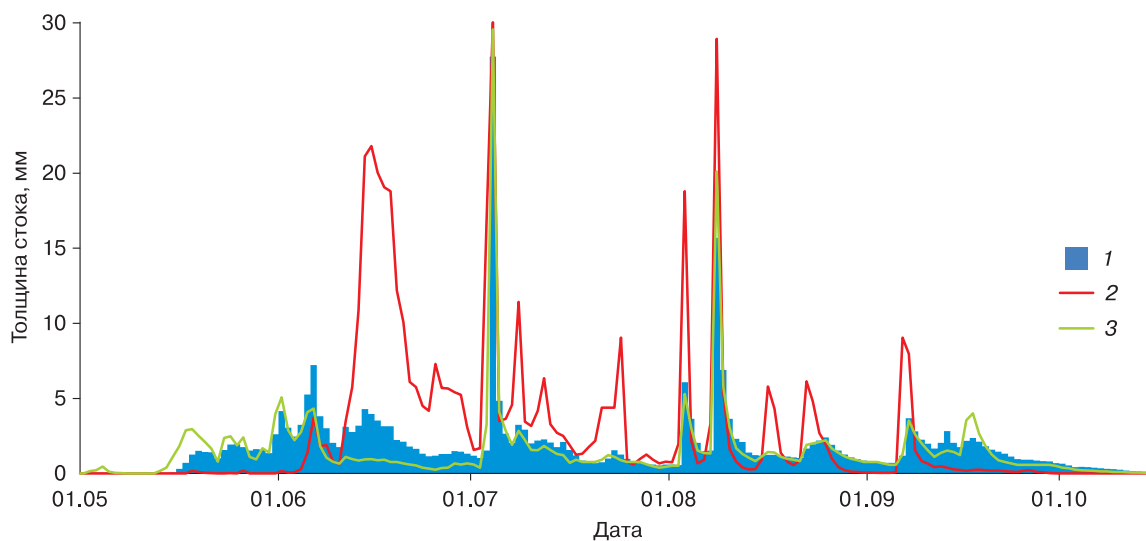


Рис. 3. Гидрографы стока ручьев Колымской водно-балансовой станции, 1970 г.

1 – руч. Контактный – Нижний; 2 – руч. Морозова; 3 – руч. Северный.

ных учитывать влияние динамики характеристик СТС на гидрологические процессы через параметры рельефа и почвенно-растительного покрова.

ДЕТЕРМИНИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА “ГИДРОГРАФ”

Распределенная детерминированная модель формирования стока “Гидрограф” сочетает физически обоснованные и концептуальные подходы в описании процессов наземной фазы гидрологического цикла, что позволяет сохранить баланс между сложностью расчетных схем и возможностью использовать ограниченную входную метеорологическую информацию (температура и влажность воздуха, осадки) [Виноградов, Виноградова, 2010].

В модели “Гидрограф” применяется метод расчета динамики теплового потока в верхнем слое почвогрунтов, позволяющий привести систему дифференциальных уравнений теплопроводности в почвенном профиле к системе линейных алгебраических уравнений без заметной потери точности результатов расчета. Разработаны также методы расчета коэффициентов теплопроводности и теплообмена расчетных слоев почвы и снежного покрова, находящихся в различных переменных состояниях [Виноградов и др., 2015]. Эффективность предложенного метода для условий КВБС подтверждена результатами моделирования температуры почвы [Виноградов и др., 2015] и глубин протаивания и промерзания в различных ландшафтах [Лебедева и др., 2015].

В качестве узлов расчета используется регулярная гексагональная сетка репрезентативных точек (РТ), представляющих расчетный элемент единичной площади, репрезентативный для территории правильного шестиугольника, в центре которого находится РТ (см. рис. 1). Для каждой РТ определяются следующие характеристики: широта, высота, уклон и экспозиция склона, время добегания воды от РТ до замыкающего створа по русловой сети, а также тип стокоформирующих комплексов (СФК). В системе модели “Гидрограф” каждая РТ характеризует элементарный склон, а их набор представляет собой репрезентативную выборку из всего множества элементарных склонов в пределах моделируемого водосбора.

СФК – преобладающие типы ландшафтов, характеризующиеся условно однородными процессами формирования стока. Разделение водосбора на СФК производится на основе описания и карт ландшафтов, почвенно-растительного покрова, характеристик СТС. В отличие от РТ, СФК распределены на водосборе неравномерно (см. рис. 1).

Входные метеорологические данные и климатические параметры. Входные метеорологические данные (суточные или часовые значения температуры и влажности воздуха, количества осад-

ков) интерполируются в РТ из метеорологических станций и пунктов наблюдений за осадками, в горных условиях – с учетом их высотного градиента.

Процессы теплообмена суши с атмосферой определяют многие особенности протекания наземной части гидрологического цикла. Однако для обширных территорий Северо-Востока информация, необходимая для решения уравнения теплового баланса, чаще всего недоступна. В модели “Гидрограф” в качестве показателя энергетического воздействия на земную поверхность со стороны Солнца и атмосферы используется эффективная температура воздуха:

$$\eta_{ef} = \eta + jS.$$

Здесь η – среднесуточная температура воздуха, °С; S – приход прямой солнечной радиации [Дж/м²] с поправками на климатические параметры (альбедо, орографическая затененность, облачность и другие местные условия); j – эмпирический коэффициент, м²·°С/Дж. Величина S вычисляется для каждого расчетного интервала в зависимости от характеристик РТ с внесением необходимых поправок [Виноградов, Виноградова, 2010].

Параметры модели, описывающие СФК, делаются на три группы: параметры растительного покрова, профиля почвогрунтов (расчетных слоев почвы – РСП) и поверхности склона.

Для каждого типа СФК разрабатывается схема вертикального профиля растительного покрова и верхнего слоя почвогрунтов, а также соответствующий набор параметров модели [Лебедева и др., 2015; Нестерова и др., 2018; Semenova et al., 2013].

Параметры растительного покрова. К ним относятся сезонная затененность поверхности почвы растительностью, альбедо, слой перехвата жидких осадков растительным покровом, коэффициенты испаряемости. Для каждого из этих параметров оцениваются два значения, соответствующие минимальному и максимальному уровню развития растительного покрова. Ход развития растительности аппроксимируется фенологической трапецией, для которой задаются четыре фенологические даты, определяющие моменты начала развития растительного покрова, достижения им максимального уровня, начала и окончания периода увядания [Виноградов, Виноградова, 2010].

К параметрам растительного покрова относится коэффициент испарения СФК (k , м/(ГПа·с)), который определяет толщину слоя испарения из почвогрунтов (E , м) согласно формуле

$$E = h_0 \left(1 - \exp \left[- \frac{k \Delta t d}{h_m \cos \alpha} \right] \right),$$

где d – дефицит влажности воздуха, ГПа; Δt – расчетный период времени, с; α – угол наклона пло-

щадя, град; h_m, h_0 – максимальная водоудерживающая способность почвогрунтов и начальное значение количества воды в них, м.

Параметры почвенного профиля. Почвенный профиль каждого СФК разбивается на РСП. Толщина РСП может быть любой, но обычно принимается равной 10 см, а общая глубина расчетного профиля почвогрунтов должна превышать максимальную толщину СТС, если модель применяется в зоне распространения многолетнемерзлых пород.

Основные физические параметры модели, описывающие свойства РСП, следующие: плотность, пористость, максимальная водоудерживающая способность (МВС), коэффициент фильтрации в условиях достижения МВС, удельная массовая теплоемкость и теплопроводность сухого вещества. Подробная информация о почвенных параметрах для СФК в пределах КВБС приведена в работе [Лебедева и др., 2015].

К концептуальным параметрам относится параметр влияния льдистости (n) на коэффициент фильтрации. Коэффициент фильтрации промерзшей почвы рассчитывается как

$$f^* = f(1 - V)^n,$$

где f – коэффициент фильтрации талой почвы, мм/мин; V – заполненность пор почвогрунтов льдом, д.е.; n – параметр влияния льдистости на коэффициент фильтрации. Параметр n определяется на основании рекомендаций [Виноградов, Виноградова, 2010] и численных экспериментов. В каменных осыпях льдистость практически не влияет на скорость фильтрации и параметр n принят равным 1, для торфяных горизонтов почвенного профиля $n = 5$, для остальных типов почвогрунтов, слагающих вертикальный профиль слоев, $n = 2$.

Этот набор параметров позволяет описать динамику теплового потока и вертикальное движение воды в разрезе почвенной колонки.

Параметры склона. Пространственная неоднородность распределения снежного покрова по территории водосбора описывается статистически: к каждой РТ назначаются 3 или 5 дополнительных расчетных квантильных точек, которые отличаются только величиной запаса снега. Они соответствуют центрам одинаковых отрезков на шкале вероятностей нормального закона распределения: 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9. Перераспределение снега, которое происходит в основном уже после снегопада, имитируется одновременно с его выпадением: при интерполяции твердых осадков в РТ их величины распределяются по квантильным точкам.

Параметры стоковых элементов. Для описания движения воды в пределах СФК используется концепция стоковых элементов [Виноградов, Виноградова, 2010]. Согласно этой концепции, водо-

сбор реки состоит из стоковых элементов разных уровней – поверхностных, почвенных и подземных. Стоковые элементы – это природные образования, участки поверхностных и подземных элементарных склонов и водосборов, обращенные своей открытой частью к склоновой неруслевой или подземной дренажной сети. Стоковые элементы различных типов характеризуются показателями интенсивности истечения (Q , м³/с) в зависимости от находящихся в них запасов воды (W , м³) и времени разгрузки (T , с):

$$Q = \beta [\exp(\alpha W) - 1], \quad T = \frac{1}{\alpha \beta},$$

где α [м⁻¹] и β [м/с] – гидравлические параметры.

Гидравлические параметры истечения стоковых элементов РСП определяются методом ручного подбора с использованием наблюдаемых гидрографов стока на малых водосборах и исходя из общих представлений о происходящих процессах. Например, время разгрузки поверхностных стоковых элементов, а также стоковых элементов в верхнем горизонте почвогрунтов, сформированном из мохового покрова, на крутых склонах водосборов описывается минутами и часами и происходит быстрее, чем в льдистом торфяном слое заболоченных низин в долинах ручьев.

Гидрограф стока, сформированный в пределах площади РТ, является суммой гидрографов стоковых элементов различных типов. Гидрографы стока всех РТ транслируются в замыкающий створ водосбора с учетом времени добега.

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ “ГИДРОГРАФ” ДЛЯ УСЛОВИЙ КВБС

На основе результатов совместного анализа динамики характеристик деятельного слоя в ландшафтах КВБС, представленных микроводосборами ручьев Морозова, Северный и Южный [Лебедева и др., 2015], и условий формирования стока воды и водного баланса ручьев КВБС [Лебедева и др., 2017], водосбор руч. Контактный был разделен на пять СФК: 1) гольцы, 2) горная тундра и заросли кедрового стланика, 3) мохово-лишайниковое редколесье, 4) лиственный лес, 5) лиственный лес в зоне надмерзлотных таликов (см. рис. 1, табл. 1). Необходимо отметить, что ранее применение ландшафтно-гидрологического подхода для бассейна Верхней Колымы было представлено в работе [Королев, 1984]. В качестве основы для выделения СФК авторами использована карта растительного покрова, разработанная Ю.Б. Королевым [1984].

Выделенные СФК существенно различаются по режиму деятельного слоя и доминирующих гидрологических процессов. Для каждого выделенного СФК была разработана схематизация профилей почвогрунтов и оценены параметры

Таблица 1. Стокоформирующие комплексы и их гидрологическая роль

№	СФК, тип растительности	Тип почвогрунтов	Особенности формирования стока, максимальная глубина протаивания
1	Гольцы, каменная осыпь на водоразделах, без растительности	Обломки глинистого сланца разной крупности	Процесс быстрого и глубокого протаивания (до 3 м), беспрепятственная фильтрация талой и дождевой воды до мерзлого водоупора. Образование внутригрунтового льда при снеготаянии и последующее его таяние в теплый период года [Банцкекина, 2003]. При снеготаянии и выпадении дождей формируется быстрый надмерзлотный сток
2	Горная тундра, заросли кедрового стланика на склонах южной экспозиции, фрагментарный мохово-лишайниковый покров	Обломки глинистого сланца разной крупности	Меньшая по сравнению с каменной осыпью, максимальная глубина протаивания (до 1.5 м). При снеготаянии и выпадении дождей формируется быстрый надмерзлотный сток
3	Мохово-лишайниковое листовенничное редколесье на склонах северной экспозиции	Обломочный материал глинистых сланцев под оторфованным горизонтом	Во время снеготаяния при мерзлом состоянии грунта образуется как поверхностный, так и надмерзлотный сток (по предпочтительным каналам фильтрации). Глубина протаивания до 0.6 м
4	Влажный листовенничный лес в долинах рек	Обломочный материал глинистых сланцев под оторфованным горизонтом	Во время снеготаяния и интенсивных дождей формируется поверхностный сток. В остальное время уровень грунтовых вод наблюдается близко к поверхности. Глубина протаивания до 0.5 м
5	Влажный листовенничный лес в долинах рек в зоне надмерзлотных таликов	Обломочный материал глинистых сланцев. Надмерзлотный талик мощностью 5–9 м [Глотова, Глотов, 2012; Михайлов, 2013]	Сезонное промерзание грунта в зимний период. В течение большей части года происходит подземный сток

гидрологической модели “Гидрограф”, описывающие почвенный и растительный покров [Лебедева и др., 2015]. Принятая к расчету глубина профиля почвогрунтов для всех СФК составила 3 м. Расчетный профиль почвогрунта делился на 30 РСП толщиной по 10 см, для каждого из которых определялись значения почвенных параметров.

Наличие или отсутствие талика в СФК при моделировании задавалось параметрами нижнего граничного условия для расчета динамики теплового потока в почвогрунтах. В СФК 1–4 (без талика) в качестве нижнего граничного условия принимался среднесезонный ход месячной температуры породы на глубине 3.2 м на метеорологической станции Нижняя. За период наблюдений 1974–1980 гг. среднесезонная температура породы на станции Нижняя в среднем составила $-3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, а ее среднемесячные значения поднимались до $-1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ в октябре и опускались до $-6.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ в апреле. В СФК 5 (с таликом) в качестве граничного условия задавалась положительная температура породы ниже слоя сезонного промерзания ($+2\text{ }^{\circ}\text{C}$) при допущении, что талик содержит пресную воду.

В работе [Лебедева и др., 2015] представлены результаты применения модели “Гидрограф” для расчета глубин протаивания–промерзания на семи характерных участках в пределах КВБС, где измерялись глубины сезонноталого слоя. Отклонения между среднесезонной максимальной измеренной и рассчитанной глубинами протаивания изменялись в диапазоне от -0.04 до 0.13 м

(т. е. не более 12 % от наблюдаемых величин). Среднее абсолютное отклонение суточных величин глубины протаивания для тех же объектов не превышало 0.16 м. Таким образом, согласие рассчитанных и наблюдаемых значений можно считать удовлетворительным. Это позволяет предполагать, что разработанная схематизация профилей почвогрунтов и набор значений параметров модели, описывающих их свойства, могут быть использованы для расчета динамики характеристик деятельного слоя в различных условиях КВБС.

При моделировании стока воды микроводосборы ручьев Морозова, Северный и Южный принимались условно однородными и относились к одному из выделенных СФК. Такой подход представляется обоснованным, поскольку территория каждого из них имеет явно преобладающий тип ландшафта и характеризуется выраженным режимом стока [Бояринцев, 1988]. Так, водосбор руч. Морозова был отнесен к СФК 1 (голец), руч. Северный – СФК 2 (горная тундра и заросли кедрового стланика), руч. Южный – СФК 3 (мохово-лишайниковое листовенничное редколесье). Водосбор руч. Контактный представляет сочетание всех пяти СФК.

Параметры модели “Гидрограф”, описывающие свойства почвенно-растительного покрова, оцененные в работе [Лебедева и др., 2015] на этапе моделирования динамики теплового потока в почве и уточненные на основе справочника [Агрогидрологические свойства..., 1974], оставались неизменными в ходе расчета стока воды. Дополнитель-

Таблица 2. Гидравлические параметры α (м^{-1}) и β (м/с) поверхностных и почвенных стоковых элементов для малых водосборов и соответствующих СФК

Номер СФК	Поверхность			Почва			Подземные емкости		
	α	β	T	α	β	T	α	β	T
1, 2	1000	10^{-6}	~17 мин	100	$2.5 \cdot 10^{-5}$	~8 ч	–	–	–
3, 4	100	10^{-6}	~3 ч	10	10^{-6}	~1 сут	–	–	–
5	100	10^{-6}	~3 ч	10	10^{-6}	~1 сут	1	10^{-6}	~12 сут

Пр и м е ч а н и е. T – характерное время разгрузки поверхностных и почвенных стоковых элементов.

но для моделирования стока воды были оценены параметры, отвечающие за пространственную неоднородность снежного покрова, формирование поверхностного, почвенного и подземного стока и испарение.

На основе обобщенных данных снегомерных съемок в различных ландшафтах КВБС [Makarievva et al., 2018] коэффициент вариации запасов воды в снежном покрове был принят равным 0.85 для зоны гольцов, 0.70 для горной тундры и зарослей кедрового стланика, 0.50 для лиственничного редколесья и 0.40 для лиственничного леса. В целом эти значения близки к оценкам С.Е. Маккартни [McCartney et al., 2006] для водосбора Грейнджер Крик и Дж.В. Помероя [Pomeroy et al., 2004] для бассейна Вулф Крик в горных условиях верховьев р. Юкон (Канада).

Параметры испаряемости были оценены обратным путем на основе данных КВБС об испарении в различных ландшафтах: использовались материалы наблюдений на испарителях ГГИ-500-30 [Лебедева и др., 2017], а также экспериментальных приборах, сконструированных Е.Л. Бояринцевым [Сущанский, 2002]. Значения коэффициентов испарения (k , $10^8 \text{ м}/(\text{ГПа}\cdot\text{с})$) для каменных осыпей в зоне гольцов составили 0.09, для зарослей кедрового стланика – 0.11, для мохово-лишайникового редколесья и лиственничного леса – 0.22 и 0.25 в период максимального развития растительного покрова соответственно. Принятые значения согласуются со сведениями Е.Л. Бояринцева и др. [2006] о том, что испарение с каменных осыпей со-

ставляет около 30 % от величины испарения с торфянисто-суглинистых грунтов.

Гидравлические параметры (α , β) и характерное время разгрузки (T) поверхностных и почвенных стоковых элементов, откорректированные для всех СФК, представлены в табл. 2. Для СФК 5 введен один ярус подземных вод (см. табл. 2).

Входными метеорологическими данными служили суточные значения температуры и влажности воздуха, а также количества осадков на метеорологической станции Нижняя (см. рис. 1), с учетом их высотных градиентов при интерполяции в РТ.

Стандартное значение эмпирического коэффициента $j = 0.08$ в формуле расчета эффективной температуры воздуха [Vinogradov et al., 2011] было принято для водосбора руч. Северный и всех РТ, расположенных на южных склонах КВБС. Для ручьев Южный и Морозова, а также для склонов северной экспозиции руч. Контактный $j = 0.04$.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА

Для расчетов использована комплексная программа распределенной гидрологической модели “Гидрограф” [Свидетельство..., 2018].

Непрерывное моделирование стока воды с суточным расчетным интервалом было проведено для микроводосборов ручьев Северный и Южный за период 1960–1997 гг., руч. Морозова – 1969–1996 гг. и в бассейне руч. Контактный – створ Нижний за период 1951–1997 гг. В табл. 3 пред-

Таблица 3. Рассчитанные и наблюдаемые величины годового водного баланса и средняя и медианная величина критерия Нэша–Сатклиффа для водосборов КВБС

Параметр	Южный (1960–1997 гг.)	Северный (1959–1997 гг.)	Морозова (1969–1996 гг.)	Контактный – Нижний (1951–1997 гг.)
Рассчитанный слой стока, мм	218	250	454	302
Наблюденный слой стока, мм	195	259	448	280
Рассчитанный слой осадков, мм	356	401	523	420
Рассчитанный слой испарения, мм	143	153	69	121
Оценка слоя испарения по наблюдениям*, мм	132	120	73	114
Критерий эффективности Нэша–Сатклиффа	0.28/0.38	0.50/0.62	0.52/0.52	0.66/0.69

* По данным [Лебедева и др., 2017].

ставлены рассчитанные и наблюдаемые значения элементов водного баланса и критерия эффективности Нэша–Сатклиффа (NS) [Nash, Sutcliffe, 1970].

Ручьи Морозова, Северный и Южный

На рис. 4, А, Б приведены примеры графиков наблюдаемых и рассчитанных суточных величин, отражающих переменные состояния и гидрографы стока водосборов руч. Южный за 1972 г. и руч. Морозова за 1980 г. соответственно.

В лиственничном редколесье (руч. Южный) до начала оттаивания почвы преобладает сток, который формируется на поверхности и в верхнем слое напочвенного покрова. В дальнейшем, в течение летнего сезона, поверхностный сток наблюдается только при выпадении интенсивных дождей. Большая часть воды, попадающей на поверхность, просачивается в грунт и формирует почвенный надмерзлотный сток. В данном СФК почва оттаивает всего на 0.6 м в течение четырех теплых месяцев (июнь–сентябрь) и значительную часть времени СТС переувлажнен.

В каменной осыпи (руч. Морозова) талая вода свободно проникает в грунт и частично намерзает на каменных обломках, образуя гольцовый лед. Увеличение льдистости в верхних 2 метрах грунта по мере снеготаяния учитывается при моделировании (см. рис. 4, Б). По результатам полевых наблюдений Т.В. Банцекиной [2003], в 1997–2001 гг. от 40 до 60 мм льда формировалось каждую весну в толще СТС каменной осыпи, по результатам моделирования за период 1969–1997 гг. – от 21 до 48 мм. Лед тает в течение всего теплого сезона, поэтому в сухие периоды отмечается зависимость стока воды от температуры воздуха.

Рассчитанный и наблюдаемый средний годовой слой стока за рассматриваемый период составил 454 и 448 мм в каменной осыпи и 218 и 195 мм в лиственничном редколесье.

На рис. 5 представлены примеры сравнения рассчитанных и наблюдаемых гидрографов стока на водосборе руч. Северный (СФК 2) для трех выборочных лет с хорошим, удовлетворительным и неудовлетворительным качеством расчета. Рас-

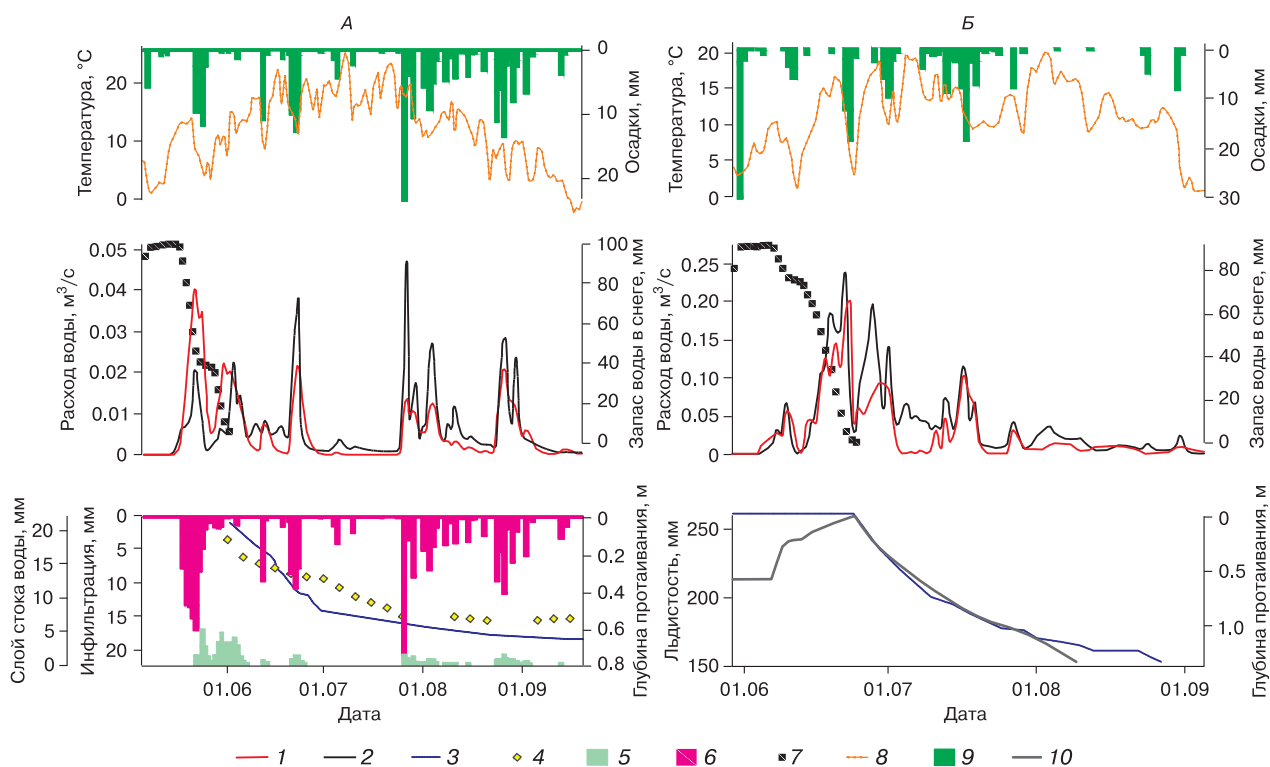


Рис. 4. Совмещенные графики рассчитанных и наблюдаемых параметров водного и теплового режимов в лиственничном редколесье (А – руч. Южный, 1972 г.) и гольцовой зоне (Б – руч. Морозова, 1980 г.) [Makarieva et al., 2017, 2018]:

1 – рассчитанный гидрограф стока, м³/с; 2 – наблюдаемый гидрограф стока, м³/с; 3 – рассчитанная глубина протаивания, м; 4 – наблюдаемая глубина протаивания, м; 5 – рассчитанный слой поверхностного стока, мм; 6 – рассчитанный слой воды, просочившейся в почвогрунт, мм; 7 – запас воды в снеге, мм; 8 – рассчитанная эффективная температура воздуха (с учетом прихода прямой солнечной радиации), °С; 9 – слой жидких осадков, достигающих поверхности почвогрунтов, мм; 10 – рассчитанная льдистость верхнего двухметрового слоя почвогрунтов, мм.

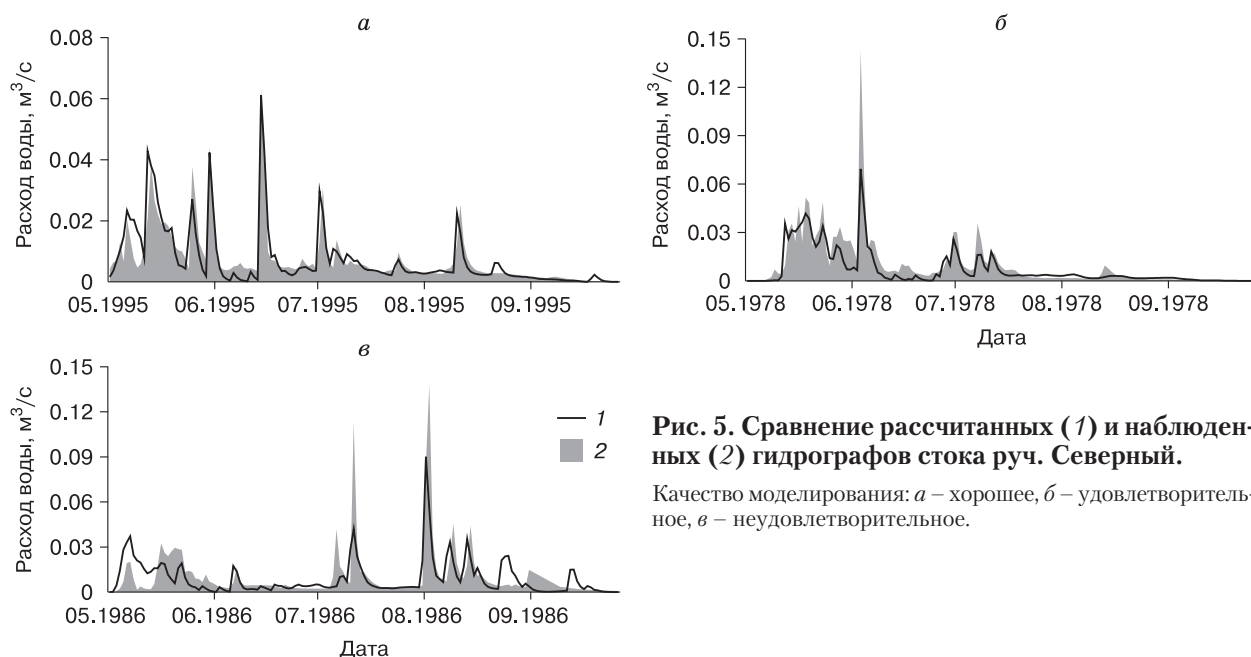


Рис. 5. Сравнение рассчитанных (1) и наблюдаемых (2) гидрографов стока руч. Северный.

Качество моделирования: а – хорошее, б – удовлетворительное, в – неудовлетворительное.

считанный и наблюдаемый среднемноголетние слою стока для руч. Северный за весь период составили 250 и 259 мм.

Средние и медианные значения критерия эффективности NS составляют 0.50/0.62 и 0.52/0.52 для ручьев Северный и Морозова, для руч. Южный значения гораздо ниже – 0.28/0.38. Таким же образом среди микроводосборов распределяется и невязка среднемноголетних слоев стока: +(1–3) % для ручьев Морозова и Северный, +12 % для руч. Южный.

Расчетные значения средних многолетних величин испарения выше на 6, 8 и 28 % на ручьях Южный, Морозова и Северный по сравнению с данными наблюдений [Лебедева и др., 2017]. Однако, учитывая значительную неопределенность оценок испарения по данным испарителей, отмеченную в [Гусев, Насонова, 2004], полученные результаты моделирования можно считать приемлемыми.

Наибольшие расхождения между рассчитанными и измеренными значениями стока воды на всех микроводосборах приходятся на периоды половодья, когда рассчитанный сток обычно превышает измеренный. Можно предположить, что на ручьях Северный и Морозова это происходит из-за недооценки параметрами модели процесса фильтрации воды в мерзлые грунты. Для водосбора руч. Южный необходим более точный учет динамики влажности в моховом покрове и верхнем органическом слое почвогрунтов и ее влияния на формирование стока.

Л.П. Глотова и В.Е. Глотов [2012] отмечают, что на ручьях КВБС первые порции воды при сне-

готаянии поступают не в русловую сеть, а в осушенные аллювиальные отложения, что на несколько суток (до недели) задерживает начало половодья. Малые горные водотоки даже в начале теплого сезона могут иметь в качестве источника не быстрый сток по поверхности промерзших почвогрунтов, а подповерхностные емкости, которые обеспечивают менее интенсивную, но более продолжительную разгрузку. Следовательно, талая вода может продолжать попадать в русло реки и после окончания половодья. В течение остального теплого периода аллювиальные отложения находятся в состоянии водонасыщения [Михайлов, 2013], что, вероятно, влияет и на формирование максимальных расходов воды дождевых паводков, которые не всегда удовлетворительно воспроизводятся с помощью гидрологической модели. Эти процессы не учитывались при моделировании.

В целом рассчитанный сток на ручьях Морозова и Северный показывает хорошую сходимость с данными наблюдений, а модель “Гидрограф” удовлетворительно описывает водно-термический режим каменной осыпи и горной тундры. Рассчитанные характеристики стока руч. Южный имеют более низкую сходимость с наблюдаемыми величинами, что указывает на необходимость дальнейшего развития алгоритмов модели “Гидрограф” для описания процессов формирования стока в переувлажненных ландшафтах КВБС.

Ручей Контактный

В целях моделирования весь водосбор руч. Контактный (створ Нижний, площадь 21.3 км²) был представлен 28 репрезентативными

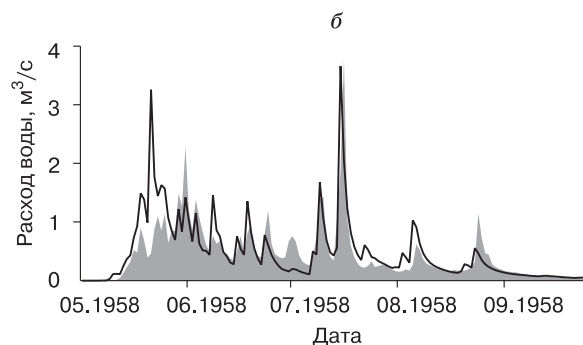
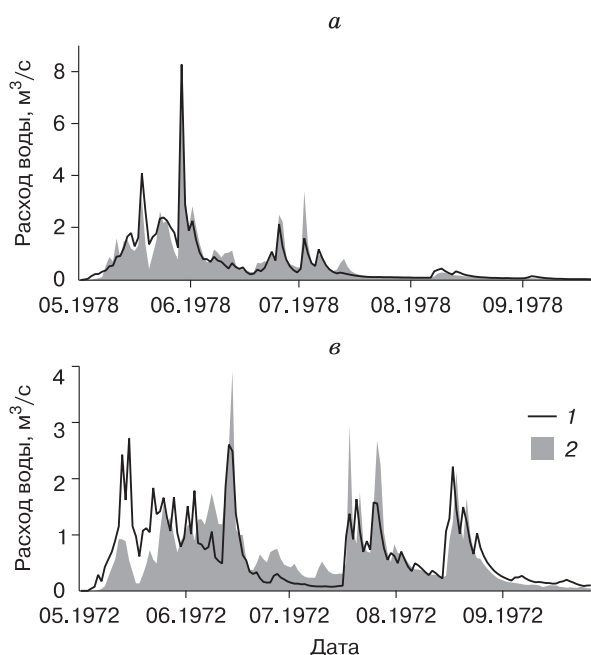


Рис. 6. Сравнение рассчитанных (1) и наблюдаемых (2) гидрографов стока руч. Контактный – Нижний.

Качество моделирования: а – хорошее, б – удовлетворительное, в – неудовлетворительное.

точками, каждая из которых относилась к одному типу СФК (каменная осыпь составила 32 % от общей площади водосбора, тундра с зарослями кедрового стланика – 29 %, лиственничное редколесье – 21 % и влажный лиственничный лес – 18 %). Для каждого СФК использовались наборы параметров, полученные при моделировании микроводосборов. Одна расчетная точка, по параметрам почвы и растительности относящаяся к лиственничному лесу, путем задания начальных условий о температуре почвогрунтов на глубине 4 м была “лишена мерзлоты” и имитировала зону надмерзлотных таликов.

На рис. 6 представлены примеры сравнения рассчитанных и наблюдаемых гидрографов стока на руч. Контактный для трех лет с хорошим, удовлетворительным и неудовлетворительным качеством расчета. Рассчитанный и наблюдаемый слой стока за период 1951–1997 гг. составил 302 и 280 мм, их невязка – 7 %. Среднее и медиана критерия NS для суточных расходов воды равны 0.66 и 0.69. Согласно результатам моделирования, основным источником питания руч. Контактный являются воды СТС. Величина подземного стока (за счет таликов) оценена в среднем в 1.3 мм (<1 %). Поверхностный сток по результатам моделирования составил 9 мм (или 3 %).

На рис. 7 представлено сравнение кривых обеспеченности рассчитанных и наблюдаемых максимальных расходов воды. Можно отметить некоторое занижение рассчитанных максимальных расходов в диапазоне вероятностей 5–60 %. Оно связано не только с необходимостью включения в гидрологическую модель некоторых процессов на водосборах, рассмотренных выше, но и с не-

доучетом неравномерности выпадения ливневых осадков по территории КВБС и их внутрисуточной интенсивности.

Несмотря на все выявленные недостатки, проведенные расчеты подтверждают принципиальную возможность использования метода последовательной оценки параметров в условно однородных ландшафтах, их применения в масштабах “почвенная колонка – микроводосбор – малый водосбор”. В [Лебедева, 2018; Макарьева и др., 2019a,б; Vinogradov et al., 2011] тот же подход использован для бассейнов рек больших размеров и более сложной структуры.

В работах [Гусев, Насонова, 2004; Гусев и др., 2006] представлены результаты моделирования переменных состояний и процессов формирования стока на объектах КВБС на основе физико-математической модели тепло- и влагообмена суши с атмосферой SWAP (Soil Water – Atmo-

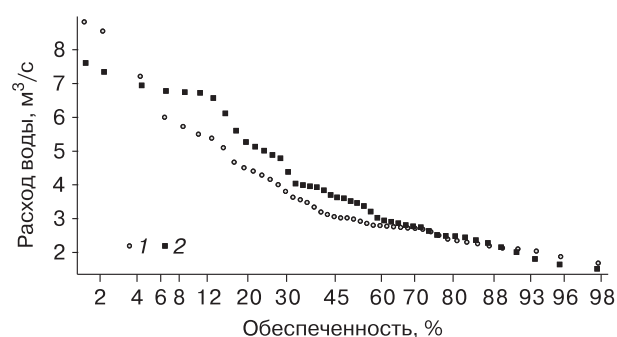


Рис. 7. Кривые обеспеченности рассчитанных (1) и наблюдаемых (2) максимальных расходов воды руч. Контактный – Нижний, 1951–1997 гг.

sphere – Plants). В целом качество моделирования температуры почвы, глубин протаивания и промерзания, а также гидрографов стока ручьев КВБС на основе моделей SWAP и “Гидрограф” сопоставимо. Однако методы параметризации, а именно, автоматическая калибровка параметров модели SWAP на основе данных наблюдений [Гусев, Насонова, 2004; Гусев и др., 2006], кардинально отличаются от подходов, используемых авторами настоящей работы. В данном исследовании авторы развивают представления Ю.Б. Виноградова и Т.А. Виноградовой [2010] и ориентируются на априорную оценку параметров гидрологических моделей. В условиях изменений климата и сокращения наблюдательной сети методы априорной оценки параметров имеют значительное преимущество [Макарьева и др., 2018].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа режима деятельного слоя и условий формирования стока воды на водосборах КВБС выделены пять типов стокоформирующих комплексов, репрезентативных для горных территорий Северо-Востока России: гольцы; горная тундра и заросли кедрового стланика; мохово-лишайниковое редколесье; лиственничный лес; лиственничный лес в условиях надмерзлотного талика.

Для каждого типа СФК разработана схематизация почвенно-растительного покрова. На основе данных полевых исследований без применения методов калибровки определены параметры гидрологической модели “Гидрограф” и создана база их значений.

Проведено моделирование элементов водного баланса и гидрографов стока воды для водосбора руч. Контактный (створ Нижний) и трех входящих в него микроводосборов (ручьи Морозова, Северный и Южный), однородных по типу СФК. Расчет проводился с суточным шагом за период наблюдений 1951–1997 гг. Сравнение рассчитанных величин с данными наблюдений позволило оценить результаты моделирования как удовлетворительные.

Новизна исследования состоит в реализованном подходе априорной параметризации гидрологической модели, которая позволяет использовать единые наборы значений параметров в масштабах от единичной почвенной колонки до целых водосборов. Такой подход является перспективным для анализа будущих изменений процессов формирования стока и эволюции мерзлых пород в условиях изменений климата. Результаты выполненного исследования также подтверждают крайнюю необходимость возобновления и развития сети наблюдений на малых водосборах в криолиотозоне России.

Авторы выражают благодарность рецензенту В.М. Михайлову и редакторам журнала Н.В. Арутюнян и В.Е. Тумскому за замечания и комментарии.

Исследование завершено при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета (проект № 38376534).

Литература

- Агрогидрологические** свойства почвы. Справочник. Чукотский национальный округ и Магаданская область. Магадан, 1974, 74 с.
- Банцеккина Т.В.** Особенности гидротермического режима слоя сезонного протаивания крупнообломочных склоновых отложений в весенне-летний период (на примере Верхнеколымского нагорья): Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Якутск, 2003, 23 с.
- Бояринцев Е.Л.** Азональные факторы формирования дождевого стока на территории Колымской ВБС // Тр. ДВНИГМИ, 1988, вып. 135, с. 67–93.
- Бояринцев Е.Л., Сербов Н.Г., Попова Н.И.** Формирование водного баланса весеннего половодья малых горных водосборов Верхней Колымы (по материалам Колымской водно-балансовой станции) // Вестн. Северо-Вост. науч. центра ДВО РАН, 2006, № 4, с. 12–19.
- Виноградов Ю.Б.** Математическое моделирование в гидрологии / Ю.Б. Виноградов, Т.А. Виноградова. М., Академия, 2010, 366 с.
- Виноградов Ю.Б., Семенова О.М., Виноградова Т.А.** Гидрологическое моделирование: метод расчета динамики тепловой энергии в почвенном профиле (Часть 1) // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 1, с. 11–21.
- Глотов В.Е., Глотова Л.П.** Особенности современных изменений общего и подземного водного стока на Северо-Востоке России // Вестн. Северо-Вост. науч. центра ДВО РАН, 2018, № 1, с. 39–48.
- Глотова Л.П., Глотов В.Е.** Роль подземных вод в общем стоке малых горных рек бассейна реки Колыма // Изв. Самар. науч. центра РАН, 2012, т. 14, № 1 (9), с. 2321–2324.
- Гусев Е.М., Насонова О.Н.** Моделирование процессов тепло- и влагообмена суши с атмосферой в локальном масштабе для территорий с многолетней мерзлотой // Почвоведение, 2004, № 9, с. 1077–1092.
- Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я.** Моделирование стока на малых водосборах в зоне многолетней мерзлоты на основе модели SWAP // Водн. ресурсы, 2006, т. 33, № 2, с. 133–145.
- Королев Ю.Б.** Картографирование растительного покрова в связи с оценкой его гидрологической роли (на примере Верхней Колымы): Дис. ... канд. биол. наук. Магадан, 1984, 231 с.
- Лебедева Л.С.** Формирование речного стока в зоне многолетней мерзлоты Восточной Сибири: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Якутск, 2018, 24 с.
- Лебедева Л.С., Семенова О.М., Виноградова Т.А.** Расчет глубины сезонноталого слоя в условиях различных ландшафтов Колымской водно-балансовой станции на основе гидрологической модели “Гидрограф” (Часть 2) // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 2, с. 35–44.
- Лебедева Л.С., Макарьева О.М., Виноградова Т.А.** Пространственная неоднородность элементов водного баланса в горных водосборах Северо-Востока России (на примере Колымской водно-балансовой станции) // Метеорология и гидрология, 2017, № 4, с. 90–101.

- Макарьева О.М., Нестерова Н.В., Бельдиман И.Н., Лебедева Л.С.** Актуальные проблемы гидрологических расчетов в арктической зоне Российской Федерации и сопредельных территориях распространения многолетней мерзлоты // Пробл. Арктики и Антарктики, 2018, т. 64, № 1 (115), с. 101–118.
- Макарьева О.М., Нестерова Н.В., Лебедева Л.С., Виноградова Т.А.** Моделирование процессов формирования стока рек высокогорной криолитозоны Восточной Сибири (на примере хребта Сунтар-Хаята) // География и природ. ресурсы, 2019а, № 1, с. 178–186.
- Макарьева О.М., Нестерова Н.В., Ямпольский Г.П. и др.** Оценка максимальных расходов воды различной обеспеченности неизученной горной реки Хемчик (Республика Тыва) на основе методов математического моделирования // Инж. изыскания, 2019б, № 2, с. 36–51.
- Михайлов В.М.** Пойменные талики Северо-Востока России. Новосибирск, Акад. изд-во "Гео", 2013, 176 с.
- Насыбулин П.С.** Репрезентативность характеристик стока Колымской водно-балансовой станции для территории верхней Колымы // Природные ресурсы Северо-Востока СССР. Владивосток, АН ДВИС ИБПС, 1976, с. 32–41.
- Нестерова Н.В., Макарьева О.М., Виноградова Т.А., Лебедева Л.С.** Моделирование процессов формирования стока зоны Байкало-Амурской магистрали на основе данных полигона "Могот" // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление, 2018, № 1, с. 18–36.
- Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018619084 «Комплексная программа распределенной гидрологической модели "Гидрограф"»; правообладатель О.М. Макарьева; дата регистрации 30.07.2018.
- Сущанский С.И.** История создания, методы, объекты и некоторые результаты исследований Колымской водно-балансовой станции // Факторы формирования общего стока малых горных рек в Субарктике (по материалам Колымской водно-балансовой станции). Магадан, СВКНИИ ДВО РАН, 2002, с. 18–35.
- Федоров А.Н., Константинов П.Я.** Реакция мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии на современные изменения климата и антропогенные воздействия // География и природ. ресурсы, 2009, № 2, с. 56–62.
- Bring A., Fedorova I., Dibike Y. et al.** Arctic terrestrial hydrology: A synthesis of processes, regional effects, and research challenges // J. Geophys. Research: Biogeosciences, 2016, vol. 121, No. 3, p. 621–649.
- Makarieva O., Nesterova N., Lebedeva L., Sushansky S.** Water-balance and hydrology database for a mountainous permafrost watershed in the up-streams of the Kolyma River, Russia – the Kolyma Water-Balance Station, 1948–1997. PANGAEA, 2017, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.881731>.
- Makarieva 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 Syst. Sci. Data, 2018, vol. 10, p. 689–710.
- Makarieva O., Nesterova N., Post D.A. et al.** Warming temperatures are impacting the hydrometeorological regime of Russian rivers in the zone of continuous permafrost // The Cryosphere, 2019, vol. 13, p. 1635–1659.
- McCartney S.E., Carey S.K., Pomeroy J.W.** Intra-basin variability of snowmelt water balance calculations in a subarctic catchment // Hydrol. Processes, 2006, vol. 20, No. 4, p. 1001–1016.
- Nash J.E., Sutcliffe J.V.** River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles // J. Hydrology, 1970, vol. 10, No. 3, p. 282–290.
- Pomeroy J., Gray D., Brown T. et al.** The cold regions hydrological model: a platform for basing process representation and model structure on physical evidence // Hydrol. Processes, 2007, vol. 21, p. 2650–2667.
- Pomeroy J.W., Essery R.H., Toth B.** Implications of spatial distributions of snow mass and melt rate for snow-cover depletion: observations in a subarctic mountain catchment // Ann. Glaciol., 2004, No. 38, p. 195–201.
- Quinton W.L., Hayashi M., Chasmer L.E.** Permafrost-thaw-induced land-cover change in the Canadian subarctic: implications for water resources // Hydrol. Processes, 2011, vol. 25, No. 1, p. 152–158.
- Semenova O., Lebedeva L., Vinogradov Yu.** Simulation of subsurface heat and water dynamics, and runoff generation in mountainous permafrost conditions, in the Upper Kolyma River basin, Russia // Hydrogeol. J., 2013, vol. 21, No. 1, p. 107–119.
- 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, vol. 43, p. 10,764–10,772.
- Vinogradov Yu.B., Semenova O.M., Vinogradova T.A.** An approach to the scaling problem in hydrological modelling: the deterministic modelling hydrological system // Hydrol. Processes, 2011, vol. 25, p. 1055–1073.
- Walvoord M.A., Kurylyk B.L.** Hydrologic impacts of thawing permafrost – a review // Vadose Zone J., 2016, vol. 15, 20 p., doi.org/10.2136/vzj2016.01.0010.

References

- Agrohydrological properties of the soil. Catalog. Chukotka National District and Magadan Region. Magadan, 1974, 74 p. (in Russian).
- Bantsekina T.V. Peculiarities of hydrothermal regime of seasonal thawing layer in coarsely clastic rocks during the spring-summer period (with an example of Upper Kolyma highland). PhD Thesis. Yakutsk, 2003, 20 p. (in Russian).
- Boyarintsev E.L. Azonal factors of rainfall runoff formation in the territory of Kolyma WBS. In: Proceedings DVNIGMI, Far-East Institute of Hydrometeorology, Vladivostok, 1988, vol. 135, p. 67–93 (in Russian).
- Boyarintsev E.L., Serbov N.G., Popova N.I. Formation of the spring high-water balance in small catchments of the Upper Kolyma River mountainous areas (by the Kolyma water-balance station records). Bulletin SVNC DVO RAN, 2006, No. 4, p. 12–19.
- Vinogradov Yu.B., Vinogradova T.A. Matematicheskoe modelirovanie v gidrologii [Mathematical Modelling in Hydrology]. Moscow, Academia, 2010, 366 p. (in Russian).
- Vinogradov Yu.B., Semenova O.M., Vinogradova T.A. Hydrological modelling: heat dynamics in a soil profile (Part 1). Earth's Cryosphere, 2015, vol. XIX, No. 1, p. 11–19.
- Glotov V.E., Glotova L.P. Peculiarities of modern changes of the total and underground runoff in North-East Russia. Bulletin of the North-East Science Center, 2018, vol. 1, p. 39–48.
- Glotova L.P., Glotov V.E. The role of underground waters in total streamflow of small mountain rivers in the Kolyma River basin. Bulletin of the Samara Science Center of Russian Academy of Sciences, 2012, vol. 14, No. 1 (9), p. 2321–2324.
- Gusev E.M., Nasonova O.N. Simulation of heat and water exchange at the land-atmosphere interface on a local scale for permafrost territories. Pochvovedenie [Eurasia Soil Science], 2004, No. 9, p. 1077–1092.
- Gusev E.M., Nasonova O.N., Dzhogan L.Ya. The simulation of runoff from small catchments in the permafrost zone by the

- SWAP model. *Vodnye Resursy* [Water Resources], 2006, vol. 33, No. 2, p. 115–126.
- Korolev Yu.B. Mapping of vegetation in connection with assessment of its hydrological role (by the example of the Upper Kolyma region). PhD Thesis. Magadan, 1984, 231 p. (in Russian).
- Lebedeva L.S. Runoff formation in the permafrost zone of Eastern Siberia. PhD Thesis. Yakutsk, 2018, 24 p. (in Russian).
- Lebedeva L.S., Semenova O.M., Vinogradova T.A. Hydrological modeling: Seasonal thaw depths in different landscapes of the Kolyma water balance station (Part 2). *Earth's Cryosphere*, 2015, vol. XIX, No. 2, p. 32–39.
- Lebedeva L.S., Makarieva O.M., Vinogradova T.A. Peculiarities of water balance formation in mountain catchments of North-eastern Russia (a case study for the Kolyma water balance station). *Meteorologiya i Gidrologiya* [Meteorology and Hydrology], 2017, No. 4, p. 90–101.
- Makarieva O.M., Nesterova N.V., Beldiman I.N., Lebedeva L.S. 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, No. 64 (1), p. 101–118.
- Makarieva O.M., Nesterova N.V., Lebedeva L.S., Vinogradova T.A. Modelling runoff formation processes in the high mountain permafrost zone of Eastern Siberia (a case study of Suntar-Khayata range). *Geografia i Prirodnye Resursy* [Geography and Natural Resources], 2019a, No. 1, p. 178–186.
- Makarieva O.M., Nesterova N.V., Yamolsky G.P. et al. Assessment of maximum instant discharge of various frequency at ungauged mountainous river Khemchik (Tuva Republic) based on mathematical modeling. *Inzhinernye Izyskaniya* [Engineering Survey], 2019b, No. 2 (13), p. 36–51.
- Mikhaylov V.M. Taliki Severo-Vostoka Rossii [Floodplain taliks of the North-East of Russia]. Novosibirsk, Acad. Publ. House "Geo", 2013, 176 p. (in Russian).
- Nasybulin P.S. The representativity of runoff characteristics at the Kolyma water-balance station for the upper Kolyma area. In: *Natural resources of the USSR North-East*. Vladivostok, AN DVIS IBPS, 1976, p. 32–41 (in Russian).
- Nesterova N.V., Makarieva O.M., Vinogradova T.A., Lebedeva L.S. Modelling runoff formation processes at the BAM zone based on the data of the Mogot research site. *Vodnoe Khozyaistvo Rossii* [Water Sector of Russia: problems, technologies, management], 2018, vol. 1, p. 18–36.
- Certificate of state registration of computer program No. 2018619084 «Comprehensive program of the distributed hydrological model "Hydrograph"». Right holder Makarieva O.M.; the date of registration 30.07.2018 (in Russian).
- Sushansky S.I. History of creation, methods, objects and some results of studies in the Kolyma water balance station. In: *Glotov V., Ukhov N. (Eds.) Factors affecting the formation of a general drainage system of minor mountain rivers in sub-arctic areas*. Magadan, SVKNII DVO RAN, 2002, p. 18–35 (in Russian).
- Fedorov A.N., Konstantinov P.Y. Response of permafrost landscapes of Central Yakutia to current changes of climate and anthropogenic impacts. *Geografia i Prirodnye Resursy* [Geography and Natural Resources], 2009, No. 2, p. 146–150.
- Bring A., Fedorova I., Dibike Y. et al. Arctic terrestrial hydrology: A synthesis of processes, regional effects, and research challenges. *J. Geophys. Research: Biogeosciences*, 2016, vol. 121, No. 3, p. 621–649.
- Makarieva O., Nesterova N., Lebedeva L., Sushansky S. Water-balance and hydrology database for a mountainous permafrost watershed in the up-streams of the Kolyma River, Russia – the Kolyma Water-Balance Station, 1948–1997. PANGAEA, 2017, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.881731>.
- Makarieva 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 Syst. Sci. Data*, 2018, vol. 10, p. 689–710.
- Makarieva O., Nesterova N., Post D.A. et al. Warming temperatures are impacting the hydrometeorological regime of Russian rivers in the zone of continuous permafrost. *The Cryosphere*, 2019, vol. 13, p. 1635–1659.
- McCartney S.E., Carey S.K., Pomeroy J.W. Intra-basin variability of snowmelt water balance calculations in a subarctic catchment. *Hydrol. Processes*, 2006, vol. 20, No. 4, p. 1001–1016.
- Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. *J. Hydrology*, 1970, vol. 10, No. 3, p. 282–290.
- Pomeroy J., Gray D., Brown T. et al. The cold regions hydrological model: a platform for basing process representation and model structure on physical evidence. *Hydrol. Processes*, 2007, vol. 21, p. 2650–2667.
- Pomeroy J.W., Essery R.H., Toth B. Implications of spatial distributions of snow mass and melt rate for snow-cover depletion: observations in a subarctic mountain catchment. *Ann. Glaciol.*, 2004, No. 38, p. 195–201.
- Quinton W.L., Hayashi M., Chasmer L.E. Permafrost-thaw-induced land-cover change in the Canadian subarctic: Implications for water resources. *Hydrol. Processes*, 2011, vol. 25, No. 1, p. 152–158.
- Semenova O., Lebedeva L., Vinogradov Yu. Simulation of subsurface heat and water dynamics, and runoff generation in mountainous permafrost conditions, in the Upper Kolyma River basin, Russia. *Hydrogeol. J.*, 2013, vol. 21, No. 1, p. 107–119.
- 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, vol. 43, p. 10,764–10,772.
- Vinogradov Yu.B., Semenova O.M., Vinogradova T.A. An approach to the scaling problem in hydrological modelling: the deterministic modelling hydrological system. *Hydrol. Processes*, 2011, vol. 25, p. 1055–1073.
- Walvoord M.A., Kurylyk B.L. Hydrologic impacts of thawing permafrost – a review. *Vadose Zone J.*, 2016, vol. 15, 20 p., doi.org/10.2136/vzj2016.01.0010.

*Поступила в редакцию 2 марта 2017 г.,
после доработки – 4 октября 2019 г.,
принята к публикации 24 октября 2019 г.*