

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА ЗОНЫ БАЙКАЛО-АМУРСКОЙ МАГИСТРАЛИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ПОЛИГОНА «МОГОТ»*

© 2018 г. Н.В. Нестерова^{1,2}, О.М. Макарьева^{1,3,4}, Т.А. Виноградова¹,
Л.С. Лебедева⁴

¹ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»,
г. Санкт-Петербург, Россия

² ФБГУ «Государственный гидрологический институт», г. Санкт-Петербург,
Россия

³ ООО «НПО «Гидротехпроект», г. Санкт-Петербург, Россия

⁴ ФГБУН «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН»,
г. Якутск, Россия

Ключевые слова: Байкало-Амурская магистраль, полигон Могот, моделирование процессов формирования стока, мерзлота, детерминированная гидрологическая модель «Гидрограф», оценка параметров, сезонно-талый слой, водно- и теплофизические свойства почвогрунтов, гидрографы стока, испарение, снежный покров, водный баланс.

В статье дана оценка возможности использования данных наблюдений научно-исследовательского полигона «Могот», расположенного на южной границе распространения многолетней мерзлоты зоны Байкало-Амурской магистрали в верховьях бассейна р. Зеи, для определения параметров детерминированной гидрологической модели «Гидрограф» в целях ее применения в задаче моделирования водного баланса и характеристик стока неизученных рек.

Разработаны наборы параметров гидрологической модели, описывающие характерные ландшафты исследуемого региона. Их верификация произведена на основе наблюдаемых данных полигона «Могот» об испарении со снега и почвенно-растительного покрова в различных ландшафтах, запасах воды в снежном покрове, температурах почвы на различных глубинах, величин протаивания и промерзания почвогрунтов и наблюдаемых суточных гидрографах стока воды малых рек. Получены удовлетворительные результаты моделирования процессов формирования стока на малых водосборах полигона, в т. ч. переменных состояний, водного баланса и гидрографов стока малых рек полигона «Могот» (3–30,8 км²) за период 1976–1985 гг.

Репрезентативность полученного набора параметров оценена для неизученных водосборов средних рек Тында и Унаха (4060 и 1950 км²). Результаты непрерывного моделирования за период 1966–2012 гг. для рек Унаха и Тында свидетельствуют о принципиальной возможности дальнейшего использования комплекса разработанных параметров и гидрологической модели «Гидрограф» для моделирования стока рек исследуемого региона.

* Проект выполнен при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований РФФИ, проект №15-05-08144

Байкало-Амурская магистраль (БАМ) – крупнейшая железная дорога в мире протяженностью более 4000 км. В условиях ширококомасштабного хозяйственного освоения Дальнего Востока, увеличения транспортного и других видов строительства, создания связей с зарубежными партнерами трасса является важным экономическим и стратегическим объектом [1]. Магистраль пересекает 11 крупных и огромное множество малых рек. Гидрологический режим рек в зоне БАМ характеризуется слабой изученностью, обусловленной редкой сетью гидрометеорологических наблюдений, что затрудняет проектирование строительных и проведение восстановительных работ на данном участке.

БАМ расположена в зоне распространения многолетней мерзлоты. Особенности процессов формирования стока в зоне мерзлоты являются зависимость фильтрации воды в почву от глубины сезонного протаивания, затрудненный водообмен между подземными и поверхностными водами, внутригодовое и межгодовое перераспределение стока за счет замерзания осадков и талых вод в порах грунта. Гидрологические процессы в зоне многолетней мерзлоты чувствительны как к изменениям осадков, так и температуре воздуха, т. к. регулярно происходящие фазовые переходы воды в почве определяют соотношение жидкой подвижной и твердой неподвижной составляющих водного баланса [2].

Среднегодовая температура воздуха за период 1951–2009 гг., по данным метеостанции Тында, в районе исследования увеличились на 2,6 °С [3]. В связи с этим понимание процессов, происходящих на водосборе в условиях изменения климата, наиболее актуально. В наибольшей степени потепление затронуло зимние и весенние месяцы года, в результате чего изменяются условия формирования весеннего половодья и режим деятельного слоя почвогрунтов. Оценки изменения осадков в районах Восточной Сибири с 1945 г. показали незначительный тренд в сторону снижения количества годовых осадков на фоне положительного векового тренда [4]. По данным многолетних наблюдений за осадками на метеостанции Тында (1941–2001 гг.), отмечен рост годовых сумм осадков, который в конце 1990-х составил в среднем около 20–40 мм (до 15 % от годовой суммы) по сравнению с 1940–1950 гг. [3].

В последние годы произошло значительное сокращение гидрометеорологической сети в районе исследования. Так, по данным Шикломанова и др. [5] с 1986 по 1999 гг. количество гидрологических постов на Северо-Востоке России уменьшилось приблизительно на 73 %. Дефицит наблюдений за стоком в современных условиях изменений климата является острой проблемой, решение которой позволит повысить надежность проектирования и строительства в зоне хозяйственного освоения БАМ [3]. Для изучения процессов

формирования стока и других элементов водного и теплового баланса зоны БАМ в 1976–1985 гг. Государственным гидрологическим институтом (ГГИ) организован экспериментальный гидрологический полигон «Могот» [3].

Основной целью исследования является оценка возможности использования данных наблюдений полигона «Могот» при определении параметров детерминированной гидрологической модели для типичных ландшафтных условий зоны БАМ и моделировании процессов формирования стока на малых водосборах полигона, а также оценка репрезентативности полученного набора параметров для моделирования стока средних рек исследуемого региона.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Гидрологический полигон «Могот» Байкало-Амурской экспедиции ГГИ расположен в средней части южного склона средневысоких хребтов Станового и Тукурингра примерно в 60 км к северу от г. Тынды на водоразделе рек Амур и Алдан и занимает водосбор р. Нелки ($S = 30,8 \text{ км}^2$) и трех ее притоков – ручьев Захаренок, Филипер и Оникс. Дополнительные наблюдения проводили также на близлежащем водосборе р. Цыганки (табл. 1).

Таблица 1. Основные результаты моделирования

Река-створ	S	H	Период	Y_0	Y_s	P	E	Q_0	Q_s	NS (m/av)	NS (max, год)	NS (min, год)
р. Оникс	3	780	1976–1985	243	342	607	259	0,66	1,20	0,65/ 0,64	0,79 (1979)	0,31 (1985)
р. Филипер	4.5	710	1976–1985	255	346	634	285	1,37	3,02	0,55/ 0,40	0,77 (1981)	-0,12 (1984)
р. Захаренок	5.8	700	1976–1985	216	363	628	260	1,51	2,88	0,35/ 0,26	0,76 (1978)	-0,14 (1977)
р. Нелка	30.8	850	1976–1985	295	323	658	327	9,73	15,2	0,71/ 0,70	0,87 (1981)	0,58 (1985)
р. Цыганка	150	720	1976–1985	–	308	617	306	–	–	–	–	–
р. Унаха – с. Унаха	1950	635	1966–1994	327	342	640	300	875	456	0,46/ 0,40	0,69 (1991)	-0,41 (1974)
р. Тынды – г. Тынды	4060	752	1966–2012	286	293	645	354	1450	2500	0,52/ 0,31	0,73 (1972)	-2,3 (2005)

S – площадь водосбора, км^2 ; H – средняя высота водосбора, м; Y_0 и Y_s – наблюдаемый и рассчитанный среднемноголетний годовой слой стока, мм; P – осадки, мм; E – испарение, мм; Q_0 и Q_s – максимальный наблюдаемый и рассчитанный расход, $\text{м}^3/\text{с}$; m и av – медиана и среднее значение NS; \max и \min – максимальное и минимальное значение NS.

Природные условия территории типичны для низкогорных среднетаежных ландшафтов южного склона Станового хребта. Эти ландшафты харак-

теризуются сочетанием низкогорий и избыточно увлажненных межгорных понижений [3]. Рельеф полигона представлен округлыми и плоскими водоразделами, крутыми склонами теневой экспозиции и более выположенными склонами световой экспозиции.

Исследуемая территория занята преимущественно лиственничным редколесьем, залесенность водосбора р. Нелки составляет 80 %, а водосборов притоков – до 90 %. Главными представителями растительности являются лиственница даурская и береза белая. В покрове прослеживаются багульник, голубика, брусника, зеленые мхи и ягель. В пределах дна долин широко развиты болота (мари), покрытые мощным (до 40 см) моховым покровом.

Полигон расположен в зоне распространения сплошной многолетней мерзлоты мощностью 100–250 м с температурами 1–3 °С.

Почвы представлены различными сочетаниями мерзлотных горнотаежных почв с укороченным профилем, обилием гравелистых включений всех горизонтов и малой мощностью гумусового горизонта. Почвенно-грунтовый слой находится в мерзлом состоянии 7–8 месяцев в году, поэтому происходит сильное выхолаживание верхних горизонтов зимой.

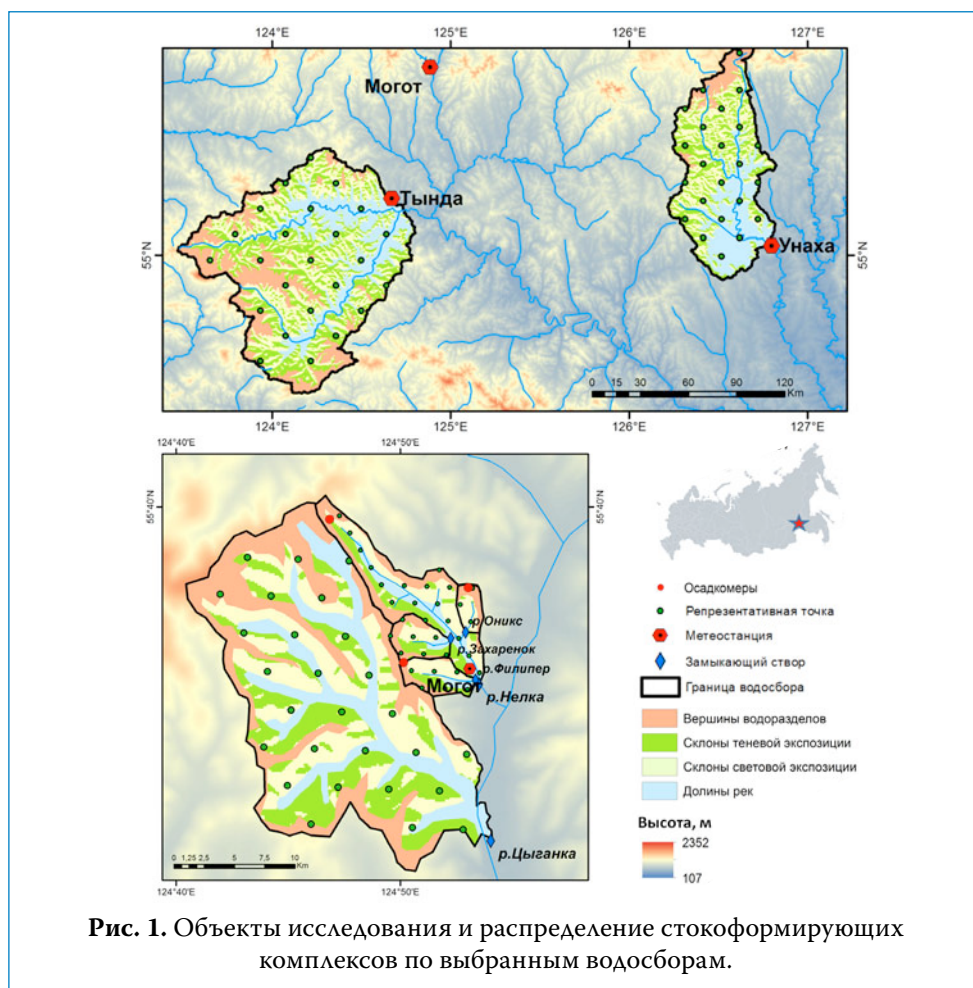
Продолжительность периода с отрицательными температурами воздуха достигает 195–220 дней в году. Значение среднегодовой температуры воздуха составляет 7,5 °С. В теплый период (апрель–сентябрь) выпадает более 80 % годовой суммы осадков при норме около 560 мм. Снежный покров появляется в конце сентября – начале октября и сохраняется до начала мая. Максимальный запас воды в снеге отмечается, как правило, в марте-апреле и сильно изменяется от года к году (от 42 до 160 мм за период 1976–1985 гг.).

На полигоне в разные периоды проводились наблюдения за метеорологическими элементами, тепловым и радиационным балансом, испарением с почвы, запасом влаги в почвогрунтах, запасом воды в снеге, протаиванием и промерзанием деятельного слоя почвы, расходами воды на пяти створах.

Для верификации результатов оценки параметров гидрологической модели в качестве объектов исследования дополнительно выбраны бассейны более крупных рек Тынды и Унахи, имеющие площади 4060 и 1950 км² соответственно (табл. 2, рис. 1).

ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ «ГИДРОГРАФ»

В работе используется гидрологическая модель «Гидрограф» [6]. Модель процессов формирования стока «Гидрограф» содержит алгоритмы, описывающие динамику тепла и влаги в почвенном профиле в явном виде [7]. Нетребовательность к входной информации (температура и влажность воздуха, осадки) делает ее пригодной к использованию на малоизученных бассейнах. Модель может применяться в различных масштабах – от единич-



ной почвенной колонки [8] до бассейнов больших рек [9] – без изменения структуры и набора параметров для идентичных ландшафтов. Таким образом, появляется возможность использовать «точечные» данные наблюдений для оценки параметров, которые в дальнейшем могут быть перенесены на водосборы со сходными условиями и использованы для моделирования процессов формирования стока [10]. Результатами моделирования является сток воды в замыкающем створе, а также распределенные переменные состояния ландшафтов – характеристики снежного покрова, температура и влажность почвы на разных горизонтах, глубина протаивания и промерзания и др., что позволяет проводить многокритериальную оценку результатов расчетов на их соответствие наблюдаемым процессам и явлениям.

Параметризация модели «Гидрограф» с использованием данных наблюдений на малых водосборах

Для оценки параметров модели в пределах исследуемых бассейнов выделяются стокоформирующие комплексы (СФК), по которым производится систематизация параметров модели. СФК – часть территории речного бассейна, условно однородная по свойствам ландшафта и единообразно функционирующая в гидрологическом плане. Все параметры модели характеризуют СФК в целом, неизменны в его пределах и скачкообразно изменяются на его границах [6]. Разнообразие почвенно-растительного покрова в сочетании с рельефом создают условия формирования стока воды. Для выделения СФК производится анализ сочетаний различных типов почвы, растительности и топографических условий. Все водосборы были разбиты на четыре СФК, описанных ниже. На неисследованных крупных водосборах рек Унахи и Тынды СФК выделялись согласно высотному положению и экспозиции склонов.

Вершины водоразделов расположены на высотах более 850 м и характеризуются хорошо дренируемыми почвогрунтами. Растительность представлена разреженным лиственничником. Слой почвогрунтов имеет мощность 100–120 см. Верхний слой представлен сухим слоем лишайников, переходящими в суглинок и супесь.

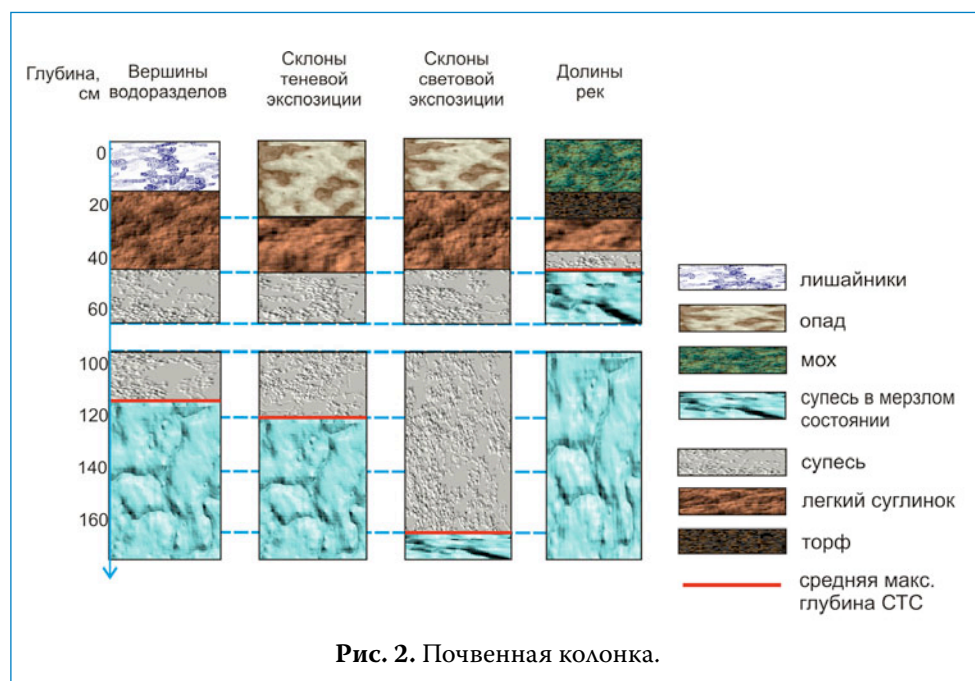
Склоны теневой экспозиции, находящиеся в пределах высотных отметок 650–850 м, имеют в составе почвенного профиля выраженный слой, сформированный лесным опадом. На данном СФК из-за достаточной увлажненности почвы произрастает наиболее густая растительность, представленная багульно-брусничниковыми лиственничниками. Толщина органического слоя почво-грунтов составляет более 20 см, глубина сезонно-талого слоя (СТС) достигает 120 см. Более крутые склоны теневой экспозиции, на которых потери осадков не столь высоки, как на других СФК, являются основным ландшафтом, формирующим сток [3].

Склоны световой экспозиции, также лежащие в диапазонах высот от 650 до 850 м, характеризуются приходом большего количества солнечной радиации, из-за чего данный СФК имеет наибольшую глубину протаивания, достигающую 160 см, а также наименее развитую растительность, состоящую из багульно-брусничковых лиственничников и вторичных березняков. Мощность органического слоя составляет 15–20 см, большую часть почвенной колонки представляют супеси, распространенные на глубинах 40–160 см.

Долины рек распространены на высотах менее 650 м. Они заняты переувлажненными голубичными лиственничниками, сфагновыми мхами и местами голубично-осоковым растительным сообществом. Глубины СТС

достигают наименьших величин по сравнению с остальными СФК, а именно 30–40 см. Отличительной чертой данного комплекса является наличие торфяного горизонта и толстого мохового покрова.

Согласно [8], для каждого выделенного СФК был разработан типичный профиль подстилающей поверхности (рис. 2), свойства которого изменяются по глубине от поверхности растительного покрова до глубины 1–3 м. Каждой колонке задавался уникальный набор параметров, описывающий водно- и теплофизические свойства разных горизонтов, составляющих профиль (например, лесной опад, мох, легкий суглинок, супесь, торф).



В число параметров входят (табл. 2): 1 – плотность почвы или ее удельная масса; 2 – пористость, находящаяся в зависимости от удельной и объемной масс почвенных частиц; 3 – максимальная водоудерживающая способность, под которой понимается максимальное количество влаги, которая может содержаться в почве после гравитационного стекания, за вычетом 4 – неподвижной влаги, описываемой параметром влажности завядания; 5 – коэффициент фильтрации, являющийся мерой водопроницаемости системы почвогрунтов; 6 – удельная массовая теплоемкость; 7 – удельная массовая теплопроводность пород, необходимых для теплофизических расчетов и зависящих от плотности, пористости и влажности/льдистости почвенного

горизонта. Этот набор физических параметров позволяет описать динамику тепла и вертикальное движение влаги в разрезе почвенной колонки.

Для описания движения воды в пределах СФК в модели «Гидрограф» используется концепция стоковых элементов [6]. Она подразумевает, что водосбор реки состоит из стоковых элементов разных уровней – поверхностных, почвенных и подземных – и включает разработанную систему их характеристик, к которым относятся показатели времени и интенсивности истечения из стоковых элементов в зависимости от находящихся в них запасов воды. Наиболее быстрыми по времени истечения являются поверхностные стоковые элементы, время разгрузки которых описывается минутами и часами. Для более глубоких горизонтов характерно более длительное время истечения и более значительные запасы воды. При расчете используются два параметра – гидравлический параметр и заданная гидравлическая константа для каждого типа стоковых элементов.

Параметризация модели производилась с использованием данных о распределении и физических свойствах почвогрунтов на различных глубинах и подстилающей поверхности на основе описаний Н.Г. Василенко [3]. При задании величин почвенных параметров модели (табл. 1) использованы результаты исследований водно-физических свойств почвы: плотность и гранулометрический состав почвенных слоев, наименьшая и наибольшая влагоемкости почвогрунтов, коэффициенты фильтрации, а также запасы воды в СТС. Определения свойств почвы проводились на каждом из выделенных ландшафтов, что позволило установить различия между процессами стокоформирования в различных комплексах. Гидравлические параметры истечения стоковых элементов определились методом ручной калибровки с использованием наблюдаемых гидрографов стока на малых водосборах и на основе общих представлений о происходящих процессах. Например, сток в верхнем горизонте почвогрунтов, сформированном из мохового покрова, происходит значительно быстрее, чем в минеральном слое.

Метеорологическая информация для моделирования

В качестве входной метеорологической информации для моделирования задаются суточные данные по температуре и влажности воздуха, количеству осадков для метеорологических станций в пределах или вблизи каждого водосбора. Это позволяет учитывать современные климатические изменения при задании метеоусловий, их интерполяции и экстраполяции в расчетные точки. При расчетах в горных районах учитывается градиент температуры воздуха и количества осадков с высотой. Распределение осадков рассчитывалось для летнего и зимнего периодов отдельно по девяти метеостанциям и метеопостам исследуемого района. Для теплого периода устойчивой зависимости количества осадков от высоты построить не уда-

лось, а для зимнего периода градиент увеличения количества осадков на 100 м высоты составил 5 мм в диапазоне высот 600–1000 м.

Для моделирования водосборов полигона «Могот» за 1976–1985 гг. в летнее время использовались данные метеорологической станции Могот и трех осадкомеров, находящихся в бассейне р. Нелки, а в зимнее время – данные метеорологической станции Тында, находящейся на расстоянии 60 км от полигона. При расчетах для крупных бассейнов рек Тында и Унаха за 1966–2012 гг. использованы данные двух станций стандартной метеорологической сети, расположенных в замыкающих створах рек (Тында – 528 м, Унаха – 543 м).

Таблица 2. Почвенные параметры

Параметры	Метод определения параметра	Лишайники	Опад	Мох	Легкий суглинок	Супесь	Торф
Плотность, кг/м ³	полевой	1680	1300	520	2600	2600	1700
Пористость, м ³ /м ³	полевой	0,87	0,92	0,90	0,60	0,35	0,83
Максимальная водоудерживающая способность, м ³ /м ³	полевой	0,25	0,30	0,35	0,25	0,15	0,40
Коэффициент фильтрации, мм/мин	полевой	24	12	1,8	0,1	0,01	0,1
Теплоемкость, Дж/(кг °С)	оценка по типу грунтов	780	840	1930	830	830	1930
Теплопроводность, Вт/(м °С)	оценка по типу грунтов	1,5	1,3	0,8	1,7	1,7	0,8
Гидравлический параметр, м ³ /с	экспертная оценка, калибровка	<u>Активный слой</u> Верхний органический слой: 10 Нижний минеральный слой: 0,005					

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА

Данные по испарению с почвы и снежного покрова, снегомерным съемкам, температуре почвы на различных глубинах, а также глубинам протаивания и промерзания почвогрунтов использованы для оценки и уточнения параметров модели. В этом разделе приводятся значения уточненных параметров модели, играющие важную роль при моделировании процессов формирования стока в данном районе, и результаты сравнения рассчитанных и наблюдаемых величин.

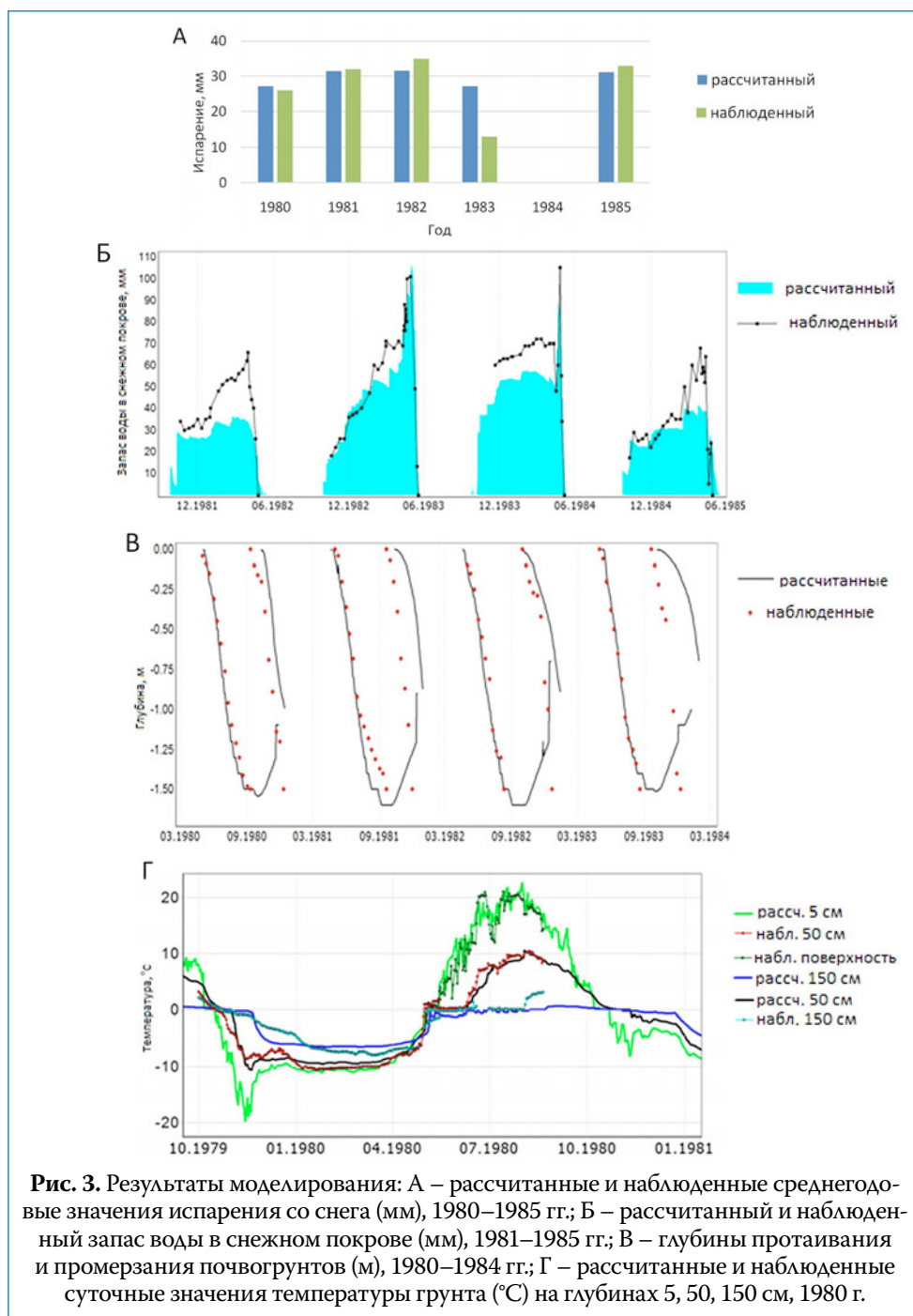
Снежный покров

Испарение со снежного покрова в период начала формирования снежного покрова и снеготаяния играет значительную роль в водном балансе исследуемой территории. В среднем за период 1977–1985 гг. годовая величина испарения со снежного покрова, по данным [3], составила 25 мм, достигая 19 мм в апреле. На основе данных наблюдений коэффициент испарения со снега был принят равным 23 и $17 \cdot 10^{-11} \text{ м (гПа}^* \text{с)}^{-1}$ при положительной и отрицательной температуре воздуха соответственно, что позволило получить расчетные величины, близкие к наблюдаемым. Результаты сравнения рассчитанного и наблюдаемого испарения со снежного покрова за гидрологический год, по данным [3], за период 1980–1985 гг. приведены на рис. 3А. В среднем за 1980–1983 гг., по данным [3], испарение со снежного покрова за апрель составляет 17 мм, однако [11] дает оценку в 6,4 мм. По работам [12], величина испарения со снега на полигоне «Могот» с 13 марта по 22 апреля 2002 г. составляла суммарно 15,7 и 10,4 мм на вершинах водоразделов и залесенных склонах соответственно. В данном исследовании при оценке параметров модели авторы ориентировались на результаты, полученные [3].

Для оценки адекватности моделирования запасов снежного покрова использованы средние запасы воды в снеге по водосбору р. Нелки, рассчитанные в [3] на основе результатов маршрутных снегомерных съемок общей длиной маршрутов до 50 км. Наблюдаемые величины сравнивались с аналогичными рассчитанными значениями (Рис. 3Б). Результаты показывают, что при удовлетворительном моделировании сроков снеготаяния рассчитанная величина максимальных запасов снежного покрова в некоторые годы (1981–1982, 1983–1984 гг.) значительно ниже наблюдаемой. Авторы связывают такое расхождение с недостаточной точностью входной информации о зимних осадках из-за значительной удаленности метеорологической станции.

Глубина протаивания и промерзания и температура почвогрунтов

Режим промерзания и протаивания СТС определяет формирование стока воды и, в свою очередь, зависит от экспозиции склонов, влажности/льдистости почвогрунтов, растительного покрова и промывного режима участков. Оттаивание начинается в мае, когда его интенсивность на всех ландшафтных комплексах составляет от 1 до 1,5 см/сут, к июню снижаясь до 0,8–0,9 см/сут, а к концу июля составляя всего 0,5–0,1 см/сут [3]. Полное промерзание деятельного слоя почв на полигоне «Могот» происходит к концу декабря, в некоторые годы к концу ноября. Максимальные глубины оттаивания достигают 160 см на склонах световой ориентации и наблюдаются в начале сентября [13].



Для оценки результатов моделирования динамики тепла (и, косвенно, динамики влаги) в почве сравнили величины средневзвешенных по водосбору р. Нелки глубин протаивания и промерзания почвогрунтов на даты съемки с 1980 по 1984 гг. с аналогичными модельными данными (рис. 3В). Максимальные «наблюденные» значения СТС не превышают 150 см [3], в то время как рассчитанные величины достигают 160 см, также рассчитанные сроки промерзания в некоторые годы запаздывают по сравнению с наблюдаемыми, однако в целом динамика процесса описывается моделью адекватно.

Дополнительно проведено сравнение рассчитанной и наблюдаемой температуры почвы на глубинах 50, 100, 150 см от поверхности для площадки, расположенной на склоне теневой экспозиции за период 1979–1981 гг. (рис. 3Г). Годовая амплитуда температур на поверхности почвы составила 40 °С, снижаясь на глубине 150 см до 5 °С. Несмотря на неполный ряд наблюдаемых данных, результаты сравнения этих значений с рассчитанными следует признать удовлетворительными. Наибольшие расхождения характерны для величин на глубине 150 см в начале августа, когда, судя по наблюдаемой температуре почвы, данный горизонт почвенного профиля уже оттаял, а по результатам моделирования тот же горизонт находится в состоянии 0 °С.

Испарение с поверхности ландшафтов

Учет испарения с поверхности водосборов полигона «Могот» производился весовым методом при помощи испарителей ГГИ-500. Также для определения суммарного испарения за годовые и месячные интервалы использован метод водного баланса, по которому среднемноголетний годовой слой испарения с бассейна р. Нелки за период 1977–1985 гг. составил около 325 мм [3]. Оцененные величины параметра максимальной испаряемости с почвенно-растительного покрова составили 8, 20 и 24 10^{-10} м (гПа*с)⁻¹ для вершин водоразделов, склонов и долин соответственно. Это позволило получить расчетное значение среднемноголетнего слоя испарения с поверхности водосбора 327 мм, соответствующее наблюдаемым величинам [3].

В целом, результаты моделирования переменных состояний на водосборе р. Нелки показывают, что модель и набор параметров удовлетворительно воспроизводят процессы, происходящие на водосборе.

Моделирование гидрографов стока воды малых и средних рек

Непрерывное моделирование стока произведено за период работы полигона «Могот» (1976–1985 гг.) для бассейнов р. Нелки с ее притоками и р. Цыганки. Моделирование стока на средних реках Унаха и Тында проводилось за 1966–2012 гг. Основные компоненты водного баланса, а также рассчитанные значения критерия эффективности Нэша–Сатклиффа (NS) [14] представлены в табл. 1., а гидрографы стока воды с высоким и низким значением NS на исследуемых водосборах на рис. 4-6.

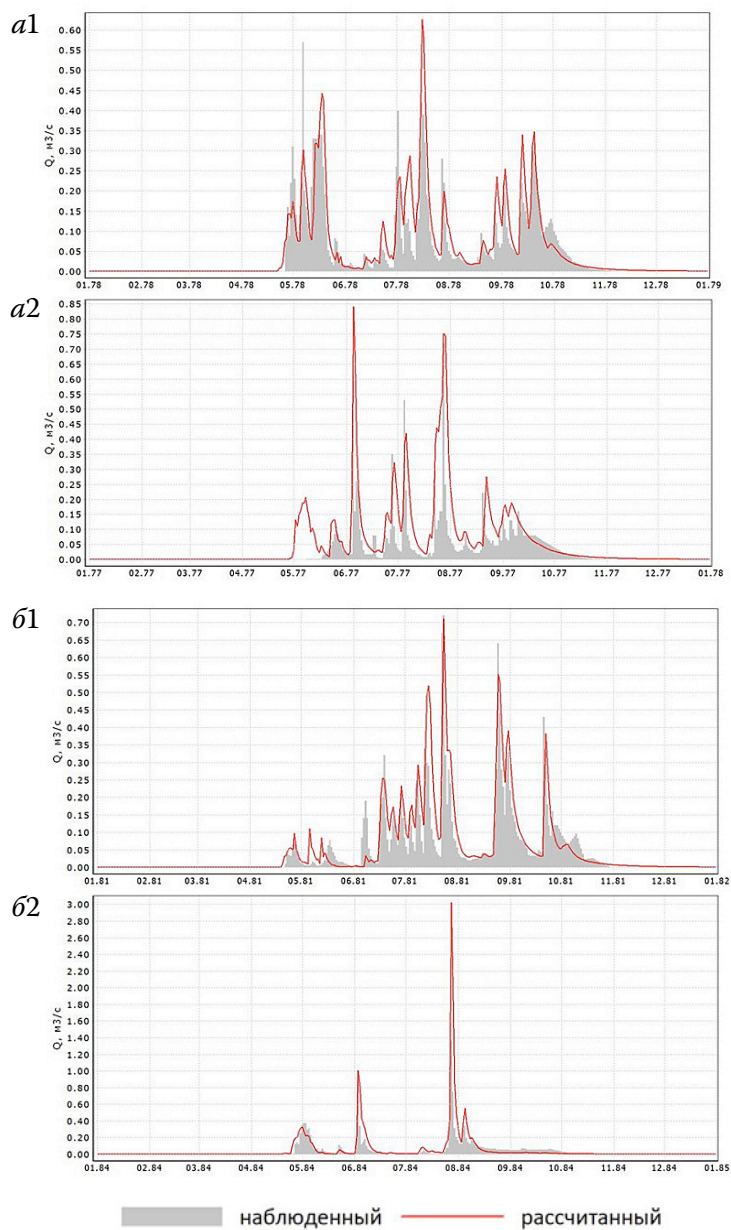
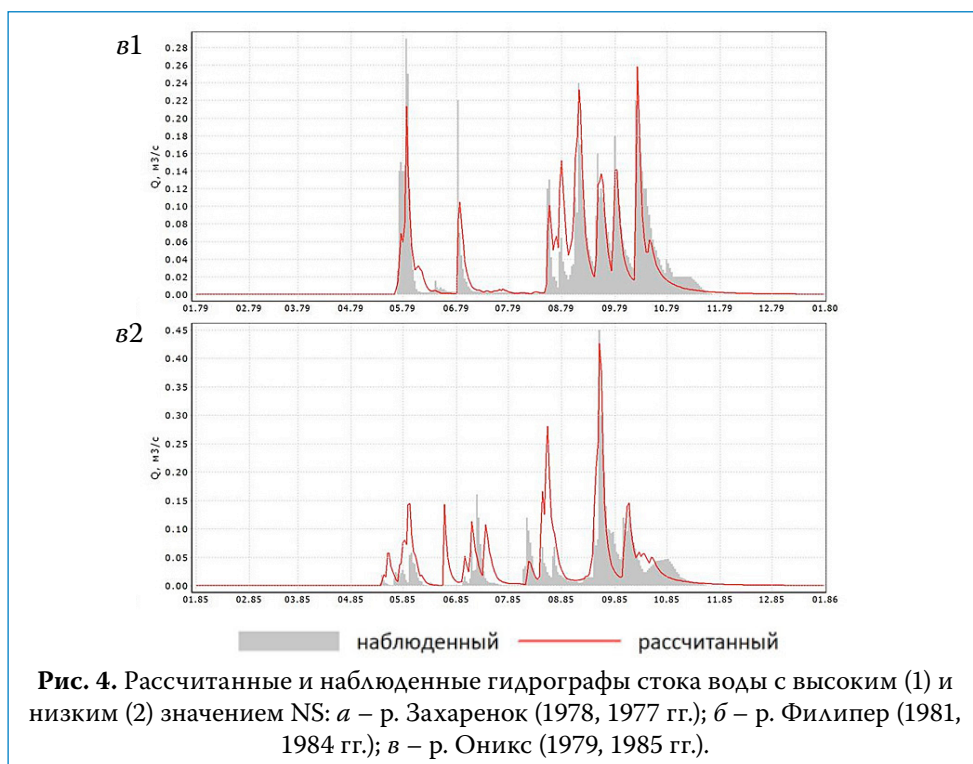


Рис. 4. Рассчитанные и наблюдаемые гидрографы стока воды с высоким (1) и низким (2) значением NS: *а* – р. Захаренок (1978, 1977 гг.); *б* – р. Филипер (1981, 1984 гг.); *в* – р. Оникс (1979, 1985 гг.).



Разница между годовыми рассчитанными и наблюдаемыми слоями стока на больших по площади водосборах колеблется от 7 мм (р. Тында) до 28 мм (р. Нелка), составляя менее 10 %. Для малых водосборов данное значение может превышать 100 мм (например, р. Захаренок). Авторы связывают это с низким качеством учета стока на малых ручьях. В среднем годовой слой стока на ручьях составляет 238 мм, а их площадь – 46 % от площади водосбора р. Нелки. Таким образом, с учетом стока р. Нелки в 295 мм на оставшуюся часть (56 %) должно приходиться около 340 мм слоя стока. При условии, что данная территория характеризуется схожим распределением стокоформирующих комплексов, такая разница (более 100 мм) выглядит недостоверной.

Медианные значения годового критерия эффективности NS для водосборов малых и средних рек варьируют от 0,35 до 0,71 (табл. 1). Удовлетворительные значения NS и значительная невязка баланса на ручьях указывают на то, что данный критерий не характеризует в точности результат моделирования и может являться только одним из критериев достоверности.

Наилучшее совпадение рассчитанных и наблюдаемых гидрографов стока характерно для бассейна р. Нелки. Максимальное значение критерия

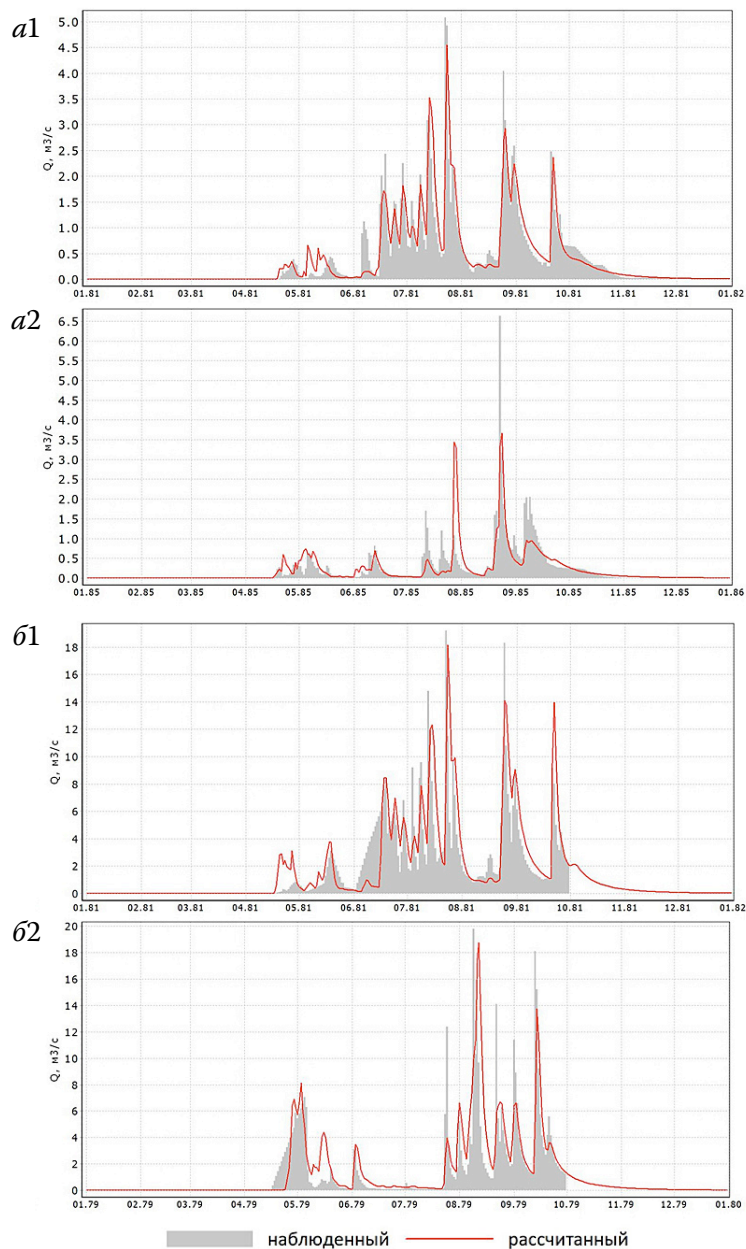


Рис. 5. Рассчитанные и наблюдаемые гидрографы стока воды с высоким (1) и низким (2) значением NS: *a* – р. Нелка (1981, 1985 гг.); *б* – р. Цыганка (1981, 1979 гг.)

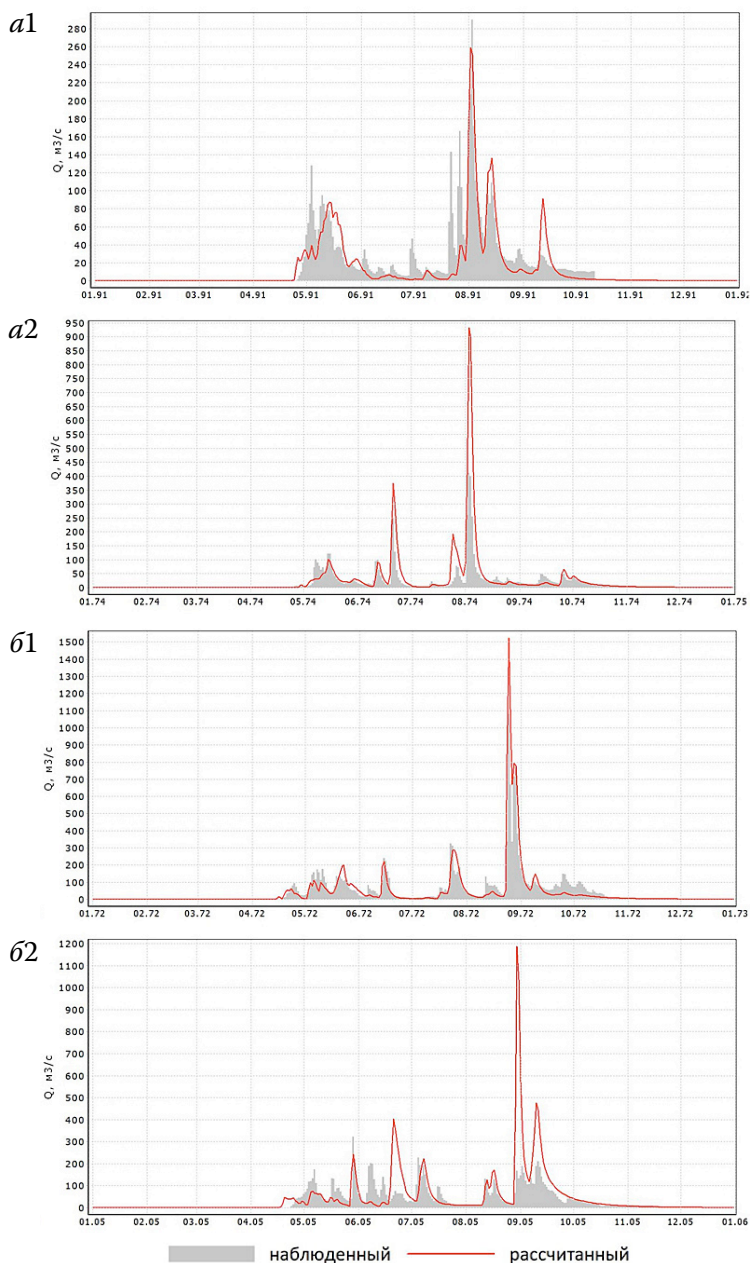


Рис. 6. Рассчитанные и наблюдаемые гидрографы стока воды с высоким (1) и низким (2) значением NS: а – р. Унаха (1991, 1974 гг); б – р. Тында (1972, 2005 гг.)

NS достигает здесь 0,87 в 1981 г. Несмотря на крайнюю недостаточность метеорологической информации в бассейнах более крупных рек Унаха и Тында, результаты моделирования на них можно также признать удовлетворительными. Максимальные значения NS для данных водосборов составляют 0,73 и 0,69 для рек Тында и Унаха соответственно.

Одной из основных задач моделирования стока на неизученных реках является расчет и прогноз максимальных расходов половодья и паводков. Для получения этих характеристик моделирование может выполняться с расчетным шагом меньше суток. В данной работе не была поставлена цель таких расчетов из-за отсутствия проверочных данных (расходов воды), поэтому вычисления производились с суточным шагом. Сравнение рассчитанных и наблюдаемых значений максимальных суточных расходов р. Нелки показывает, что наибольшие расхождения в среднем не превышают 1 м³/с (или 17 %). Максимальная разница наблюдается в 1984 г., когда данное значение превысило 5 м³/с (56 %).

Согласно результатам моделирования основную роль в формировании стока играет почвенный и глубокий почвенный сток. Его доля в общем стоке составляет 99 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе данных наблюдений гидрологического полигона «Могот», находящегося в верховьях р. Зеи в районе БАМ, были количественно (без калибровки) определены параметры детерминированной гидрологической модели «Гидрограф», описывающие основные ландшафты исследуемого района. Наблюденные данные об испарении со снега, температуре почвы на различных глубинах, а также величине протаивания и промерзания почвогрунтов использовались для верификации параметров модели «Гидрограф» в масштабе единичной колонки. Информация о запасах воды в снежном покрове на водосборе р. Нелки, данные об испарении с почвенно-растительного покрова в различных ландшафтах и наблюдаемые суточные гидрографы стока воды р. Нелки позволили верифицировать модель в масштабе малых водосборов. Средний критерий Нэша–Сатклиффа для бассейна р. Нелки составил 0,70, разница годовых рассчитанных и наблюдаемых величин годового водного баланса не превысила 10 %. Таким образом, результаты моделирования переменных состояний, водного баланса и гидрографов стока р. Нелки за период 1976–1985 гг. являются удовлетворительными.

Разработанный набор параметров без изменений перенесен на водосборы средних рек Тында (4060 км²) и Унаха (1950 км²), для них было проведено непрерывное моделирование процессов формирования стока с суточным расчетным интервалом за период 1966–2012 гг. Несмотря на ограничен-

ность входной метеорологической информации, наличие всего одной метеорологической станции для каждого крупного бассейна, удовлетворительные результаты моделирования для непрерывного периода длиной почти 50 лет свидетельствует о принципиальной возможности дальнейшего использования этих параметров для моделирования стока рек, находящихся в зоне южной границы распространения многолетней мерзлоты БАМ.

Выраженные изменения гидрологического режима и речного стока зафиксированы на обширных территориях Сибири и Дальнего Востока под воздействием потепления климата и деградации мерзлоты, в т. ч. динамики влажности почвогрунтов, усиления связи подземных и поверхностных вод, сезонного перераспределения элементов водного баланса. Закономерности этих изменений до сих пор не выяснены. В то же время сокращение системы регулярного и научного гидрологического мониторинга в зоне распространения мерзлоты приобрело катастрофический характер, а проблема обеспечения населения и объектов экономики качественной гидрометеорологической информацией усугубляется. Для научно обоснованных прогнозов будущих изменений и заблаговременной разработки стратегий и способов адаптации к таким изменениям всех сфер жизнедеятельности человека необходимы скоординированные междисциплинарные усилия в области мониторинга, изучения гидрологических процессов и развития методов моделирования на малых экспериментальных речных водосборах. Результаты данного исследования являются одним из первых шагов в данном направлении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козловский Е., Грабчак Л., Алексеев С. БАМ – ошибка или стратегия освоения восточных районов России? // Экономические стратегии. 2000. № 1. С. 57–68.
2. Bring, A., I. Fedorova, Y. Dibike, L. Hinzman, J. Mård, S. H. Mernild, T. Prowse, O. Semanova, S. L. Stuefer, and Woo M.-K. Arctic terrestrial hydrology: A synthesis of processes, regional effects, and research challenges, *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 121, 2016, 621–649, doi:10.1002/2015JG003131.
3. Василенко Н.Г. Гидрология рек зоны БАМ: экспедиционные исследования. СПб.: Нестор-История, 2013. 672 с.
4. Climate Change. The Scientific Basis / Eds. J. T. Houghton et al. Cambridge University Press, 2001. 881 p.
5. Shiklomanov A.I., Lammers R.B., and Vörösmarty C.J. Widespread decline in hydrological monitoring threatens Pan-Arctic Research, *Eos Trans. AGU*, 83(2), 2002, 13–17, doi:10.1029/2002EO000007.
6. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Математическое моделирование в гидрологии. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 298 с.
7. Виноградов Ю.Б., Семенова О.М., Виноградова Т.А. Гидрологическое моделирование: метод расчета динамики тепловой энергии в почвенном профиле (Часть 1). Кriosфера Земли, 2015. Т. XIX. № 1. С. 11–21.

8. Лебедева Л.С., Семенова О.М., Виноградова Т.А. Расчет глубины сезонно-талого слоя в условиях различных ландшафтов Колымской водно-балансовой станции в задаче гидрологического моделирования // Криосфера Земли. Т. XIX. № 2. 2015. С. 35–44.
9. Vinogradov Y.B., Semenova O.M. and Vinogradova T.A. An approach to the scaling problem in hydrological modelling: the deterministic modelling hydrological system // Hydrological Processes, 25: 1055–1073, 2011 doi: 10.1002/hyp.7901.
10. 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 // Hydrogeology Journal. 21 (1). 2013. P. 107–119. DOI:10.1007/s10040-012-0936-1.
11. Suzuki K. Estimation of Snowmelt Infiltration into Frozen Ground and Snowmelt Runoff in the Mogot Experimental Watershed in East Siberia, International Journal of Geosciences. 2013. Vol. 4. No.10. Pp. 1346–1354. doi: 10.4236/ijg.2013.41013110.4236/ijg.2013.410131.
12. Zhang Y., Suzuki K., Kadota T. and Ohata T. Sublimation from Snow Surface in Southern Mountain Taiga of Eastern Siberia // Journal of Geophysical Research. 2004. Vol. 109. Article ID: D21103. doi: 10.1029/2003JD003779.
13. Yamazaki Y., Kubota J., Ohata T., Vuglinsky V. and Mizuyama T. Seasonal Changes in Runoff Characteristics on a Permafrost Watershed in the Southern Mountainous Region of Eastern Siberia // Hydrological Processes. 2006. Vol. 20. No. 3. Pp. 453–467. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.5914>
14. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models: 1 A discussion of principles // J. Hydrol. 1970. Vol. 10. No 3. P. 282–290.

Сведения об авторах:

Нестерова Наталия Вадимовна, магистрант, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9; Государственный гидрологический институт, Россия, 199034, Санкт-Петербург, 2-я лин. В. О., 23; e-mail: nnesterova1994@gmail.com

Макарьева Ольга Михайловна, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, НПО «Гидротехпроект», Россия, 199178, Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., д. 97, лит. А; старший научный сотрудник, ФГБУН «Институт Мерзлотоведения им. М.П. Мельникова СО РАН», Россия, 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36; доцент, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9; e-mail: omakarjieva@gmail.com

Виноградова Татьяна Александровна, канд. геогр. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9; e-mail: vinograd1950@mail.ru

Лебедева Людмила Сергеевна, младший научный сотрудник, ФГБУН «Институт Мерзлотоведения им. М.П. Мельникова СО РАН», Россия, 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36; e-mail: lyudmilaslebedeva@gmail.com