

Ю. Б. Виноградов¹, Т. А. Виноградова¹, С. А. Журавлев¹, А. Д. Журавлева²

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОГРАФОВ СТОКА С НЕИЗУЧЕННЫХ БАССЕЙНОВ РЕК ПОЛУОСТРОВА ЯМАЛ

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

² ФГБУ «Государственный Гидрологический Институт», Российская Федерация, 199053, Санкт-Петербург, 2-я линия В. О., 23

Современные гидрологические модели позволяют получать различные характеристики стока, в том числе и на неизученных водосборах. В статье представлены результаты адаптации и реализации модели «Гидрограф», разработанной в Государственном Гидрологическом Институте под руководством Ю.Б. Виноградова, для бассейнов рек полуострова Ямал. Были рассмотрены некоторые аспекты моделирования стока в специфических условиях тундровых ландшафтов Ямала. Моделирование процессов формирования стока на нескольких изученных бассейнах позволило проверить и уточнить величины ряда определяющих параметров модели. Величины уточненных параметров использовались для расчетов гидрографов стока с неизученных бассейнов. Библиогр. 6 назв. Ил. 7. Табл. 1.

Ключевые слова: неизученные речные бассейны, моделирования процессов формирования стока, определяющие параметры, тундровые ландшафты полуострова Ямал.

RUNOFF MODELING FOR UNGAUGED CATCHMENTS: A CASE STUDY IN YAMAL PENINSULA, RUSSIA

Yu. B. Vinogradov¹, T. A. Vinogradova¹, S. A. Zhuravlev¹, A. D. Zhuravleva²

¹ St. Petersburg State University, 7/9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

² Federal State Institution «State Hydrological Institute», 23, 2 liniya V. O., St. Petersburg, 199053, Russian Federation

Modern hydrological models provide an opportunity for obtaining the flow characteristics in complex hydrological conditions, including the scarce data areas. The report presents the results of adaptation and realization of the *Hydrograph* model developed at the State Hydrological Institute under the direction of Vinogradov Yu. B. for Yamal river basins. Some runoff modeling aspects of specific conditions of Yamal tundra landscapes were considered. Runoff formation processes simulation at several basins allowed to test and refine a number of values defining parameters of the *Hydrograph* model. The values of the refined parameters were used later in the runoff hydrograph simulation for ungauged river basins. Refs 6. Figs 7. Table 1.

Keywords: ungauged river basins, runoff modeling, defining parameters, Yamal tundra landscapes.

Введение

Детерминированные модели формирования стока все чаще используются в мировой гидрологии для решения различных задач. Применение методологии современного математического моделирования особенно целесообразно в условиях, где использование традиционных подходов гидрологических расчетов (СП-33-101-2003 и т. п.) крайне затруднено из-за невозможности отыскания истинных аналогов изучаемых водных объектов, где необходимая гидрометеорологическая информация имела бы место [1, 2]. Зона многолетней мерзлоты является слабо изученной в гидрологическом отношении территорией. В частности, гидрологические и метеорологические ряды наблюдений на малых реках п-ова Ямал кратковременны и носят отрывочный характер. В настоящее время — в период активного освоения природных

ресурсов Севера — растет потребность в надежных расчетах и прогнозах стока на этих территориях.

Авторами решалась задача получения гидрографов стока по неизученным рекам полуострова Ямал (реки Морды-Яха, Се-Яха, Надуй-Яха) с помощью модели «Гидрограф» (МГС), разработанной в Государственном Гидрологическом Институте под руководством Виноградова Ю.Б. Модель представляет собой математическую систему с распределенными параметрами, описывающую процессы формирования стока в бассейнах с различными физико-географическими характеристиками. Модель ориентирована на простейшую сетевую метеорологическую информацию (с точными значениями температуры воздуха, дефицита влажности воздуха, слоя осадков и продолжительности их выпадения), которая служит входом в неё.

Основные отличия МГС касаются поверхностного и подземного стокообразования, динамики почвенных вод, фазовых переходов, дорусловой и русловой трансформации стока. В модели представлены климатические и ландшафтные параметры бассейна. Для оценки параметров исследуемого бассейна на его территории выделяются однородные природные зоны, так называемые стокоформирующие комплексы (СФК).

Вся площадь бассейна покрывается гексагональной сеткой, узлы которой есть репрезентативные точки (РТ) определенной единичной площади. Метеорологическая информация интерполируется в РТ. Бассейн в модели представляет собой не набор поверхностей, по которым осуществляется стекание воды, а систему стоковых элементов, определяемых гидравлическими параметрами. Стоковые элементы — ограниченные микроводоразделами участки поверхностных или подземных водосборов, обращенные своей открытой «водосливной» частью к склоновой нерусловой или подземной дренажной сети. Размеры поверхностных стоковых элементов колеблются в обратной зависимости от уклона от 10^{-2} до 10^4 м². Подземные элементы крупнее поверхностных. Для стокового элемента отток из него нелинейно связан с объёмом воды, аккумулированной его ёмкостью. Стоковые элементы не просто являются удобной для расчетов идеализацией, а легко отождествляются с естественными природными образованиями.

В модели решается задача динамики тепла и влаги в почвенной колонке, представляющей единичную площадь. По глубине почва делится на десять расчётных слоев (РСЛ), обычно (но не обязательно) одинаковых и равных 0,1 м. Параметры в модели распределены в вертикальном (почвенная колонка) и горизонтальном (система РТ) планах.

Модель учитывает неоднородное распределение снежного покрова на территории бассейна. Все расчеты для каждой РТ могут повторяться в нескольких вариантах в соответствии с пространственной неоднородностью запаса воды в снежном покрове.

Выход модели — непрерывный гидрограф стока в замыкающем створе в течение необходимого ряда лет. Попутно вычисляются такие показатели, как температура и влажность почвы, запас воды и плотность снежного покрова в любой РТ.

Для моделирования также требуются сведения о почвенно-растительном покрове, пространственном распределении снежного покрова, о протаивании деятельного слоя и особенностях формирования стока. Получение этой информации достигается использованием почвенных, ландшафтных карт и карт растительности, а также моделированием стока рек со схожими условиями формирования стока [3, 4].

Объекты исследования

Учитывая полное отсутствие данных гидрометеорологических наблюдений на реках Морды-Яха, Се-Яха, Надуй-Яха, апробация МГС была проведена и на ряде изученных речных бассейнов, находящихся в пределах п-ва Ямала. Для этой цели были выбраны бассейн реки Пяседей-Яха и ее притоки.

Бассейн реки Пяседей-Яха

Бассейн р. Пяседей-Яха находится в южной части п-ва Ямал. Река Пяседей-Яха течет в направлении с северо-запада на юго-восток, впадает в Обскую губу. Реки Ярапензя и Файн-Яха впадают в Пяседей-Яха слева, а ручей Осоковый — справа.

Река Пяседей-Яха берет начало из мелких внутриводотных озерков, чередующихся друг с другом. Истоки рек Ярапензя и Файн-Яха расположены непосредственно на болоте. Ручей Осоковый вытекает из довольно крупного озера.

Поверхность бассейна в целом плоская, участками полого-холмистая с небольшими абсолютными отметками и с общим уклоном к югу в сторону Обской губы. Средний уклон поверхности от 0,5 до 4%.

Глубина залегания надмерзлотного водоносного горизонта, связанного со слоем сезонного протаивания, составляет 0,5–1,8 м, реже больше. Максимальные глубины протаивания характерны для песчаных отложений. Они приурочены к дренированным участкам или участкам, лишенным растительного покрова, и могут достигать 1,8–2,0 м. Наименьшие их значения (до 0,3–0,5 м) характерны для торфяных грунтов с мощным моховым покровом. Глубина сезонного протаивания суглинистых пород достигает 1,3–1,6 м на пятнах-медальонах, а на участках с моховым покровом 0,5–1,0 м.

В области расположения бассейна интенсивно протекают процессы морозобойного растрескивания грунтов, которые развиты на всех геоморфологических уровнях.

От 0,06 до 0,14 долей площади рассматриваемых бассейнов занимают овраги. Как правило, овраги, являющиеся долинами ручьев, имеют небольшую (до 1,5 км) длину, склоны их крутые, часто заросшие карликовой березкой и ивой. Глубина оврагов 5–7 м, увеличиваясь к выходу в долины рек до 10–15 м.

Долины рек относятся к ящикообразному типу. Склоны долин высотой 15–20 м, часто с зарослями карликовой березы и ивы. Дно долины, как правило, имеет 1–2 террасы, ширина её в районе гидрологического поста составляет: на р. Пяседей-Яха — 300–400 м, на р. Ярапензя — 100–150 м, на р. Файн-Яха и руч. Осоковый — 70–100 м. Дно русел рек и долины песчаные, на склонах долин встречаются супеси и суглинки. Озера площадью более 0,5 км² приурочены обычно к водораздельным пространствам, на их долю приходится не более 0,08 доли площади водосбора.

Территория, на которой находится бассейн р. Пяседей-Яха, по геоботаническому районированию относится к подзоне южной тундры. В бассейне выделено два стокоформирующих комплекса (СФК):

1) тундры кустарниковые с преобладанием моховых поверхностей. На их долю на водосборах р. Пяседей-Яха приходится от 0,62 до 0,66 доли площади. Располагаются они на водоразделах, пологих склонах долин, на надпойменных террасах. Тундры представлены ерниками с кустарничково-моховым покровом и мелкобугристой

поверхностью (высота моховых бугорков 5–15 см) или кустарничково-мохово-лишайниковым покровом с пятнами-медальонами; в прирусловых частях пойм, по берегам крупных озер встречаются ивняки и травяная растительность. Тундры обычно достаточно увлажнены и часто имеют торфяной горизонт 0,05–0,10 м толщиной. Почвенный покров тундр развивается преимущественно на пылеватых песках и пылеватых супесях с прослоями суглинков. По генетическим признакам преобладающим типом являются тундровые глеевые иллювиально-гумусовые почвы.

2) тундровые болота, занимающие от 0,34 до 0,38 доли площади водосборов р. Пяседей-Яха, представлены несколькими типами: тальми травяными и травяно-моховыми и плоскобугристыми. Полигональные болота — наиболее распространенный, зональный тип болот, занимает около 0,80 доли общей площади болот. Массивы полигональных болот встречаются в депрессиях водораздельных пространств, в долинах рек, на террасах, в днищах спущенных озер. Господствующая растительность: ерники, осока, пушица, кустарнички, сфагновые и гипновые мхи, лишайники. На южном Ямале полигональные болота имеют мощность торфяной залежи 1–1,3 м, но в отдельных местах и свыше 3 м. Торфяная залежь полигональных болот практически всегда находится в мерзлом состоянии; в течение лета-осени оттаивает лишь верхний 0,30–0,50-метровый слой залежи [5, 6].

Бассейн р. Надуй-Яха

Река Надуй-Яха, площадь бассейна для створа около 69°40' в. д. — 1463 км²; число РТ — 5; «подкомандная площадь» одной РТ — 292,6 км².

Бассейн р. Се-Яха

Река Се-Яха, площадь бассейна для створа около 69° в. д., выше устья р. Ханадуй-Яха — 2831 км²; число РТ — 7; «подкомандная площадь» одной РТ — 404,4 км².

Бассейн р. Морды-Яха

Река Морды-Яха, площадь бассейна для створа около 70°15' с. ш., ниже устья р. Лымбад-Яха (нижняя) — 3436 км²; число РТ — 8, «подкомандная площадь» одной РТ — 429,5 км².

Адаптация МГС для условий п-ва Ямал

В целях моделирования гидрографов стока в специфических условиях ландшафтов тундры п-ова Ямал потребовалось решение некоторых дополнительных задач для адаптации модели путем модернизации некоторых блоков и элементов.

1. Для речных бассейнов полуострова Ямал отмечено существенное влияние прихода солнечной радиации в процессах теплообмена атмосферы и стокообразующих комплексов (СФК), в частности в период снеготаяния.

В результате модернизации заменены условные константы выражения «эффективной температуры» воздуха, где в качестве слагаемого присутствует приход прямой солнечной радиации, рассчитываемой для данной широты и данной высоты местности:

$$h = \alpha(\eta + jS), \quad (1)$$

где h — слой стаивания, мм; S — рассчитываемый приход прямой солнечной радиации на горизонтальную площадку (для Ямала условие приемлемое), Вт/м²; $\alpha = 1,5 \times 10^{-8}$ м/(град × с); $j = 1, 2-1, 3$ (м² × град/Вт) η — эффективная температура воздуха, град. Цельсия.

2. На исследуемой территории сочетание низких температур воздуха и сильных ветров в зимнее время приводит к необходимости введения существенных поправок на выдувание к данным о твердых осадках на метеорологических станциях.

Решение этой задачи выполняется введением постоянных поправок к твердым осадкам, одинаковых для всех метеорологических станций района. Предполагается, что предварительные корректирующие коэффициенты будут лежать в диапазоне 1,2–1,25.

3. В условиях ландшафтов тундры существенное перераспределение снежного покрова на территории и повышение скопления снега в отрицательных формах рельефа (озерные котловины, прирусловые участки, овраги, различные понижения).

Для учета неравномерного распределения снега вводятся дополнительные точки (овражные и квантильные). В овражных точках моделируется многократно увеличенное количество снега, «сдуваемого» с окружающей территории, а на последней оставшийся снег распределяется по одной, трем или пяти «квантильным» точкам в соответствии с пространственным коэффициентом вариации распределения запасов воды в снежном покрове. В условиях действия нелинейных соотношений осреднение результатов не может быть подменено осреднением параметров, что и приводит, в конечном счете, к повышению точности расчетов.

4. Зона многолетней мерзлоты характеризуется высокой льдистостью горных пород и почвенных образований, что приводит к почти полному превалированию поверхностного и верхнего «почвенного» стока и практическому отсутствию грунтового.

Учет указанного обстоятельства начинается с задания начальных условий полного заполнения пористости верхнего почвенно-грунтового слоя льдом. Дальнейшая ситуация должна отслеживаться в плане сохранения подобных условий в зимний период последующих лет.

5. Слабая мощность сезонно-талого (деятельного) слоя почвенно-грунтовой толщи в условиях многолетней мерзлоты, бугры и замкнутые понижения, многочисленные озера и лужи, сложность структуры верхнего приповерхностного яруса, заполненного обломками породы, фрагментами почвенных и торфяных образований, приводят к существенному скоплению вод на поверхности водосборов и замедленному их движению к русловой сети.

В связи с данными обстоятельствами постоянные коэффициенты уравнения истечения из поверхностного стокового элемента были заменены параметрами, учитывающими замедление поверхностного и «почвенного» (приповерхностного) стекания воды в русловую сеть.

6. В ходе исследования было выявлено, что плотность и структура снежного покрова в рассматриваемом районе приводят к повышенному значению максимальной водоудерживающей способности снега, что может послужить причиной задержки сроков прохождения половодья по сравнению с обычной ситуацией.

В результате предварительного программирования и численных экспериментов предполагается увеличение условной константы ($UK17$) в выражении для максимальной водоудерживающей способности снежного покрова:

$$(SS9) = (UK17)[(S2)/(K2)]^{(UK37)} \cdot \exp[-(UK38)(S2)/(K2)] - (UK17)\exp[-(UK38)], \quad (2)$$

где ($UK17$), ($UK37$) и ($UK38$) — постоянные величины, ($S2$) — плотность снежного покрова и ($K2$) = 920 кг/м³ — плотность льда.

С помощью вышеперечисленных действий МГС была подготовлена для конкретного моделирования формирования стока на территории п-ва Ямал, хотя уточнение параметров МГС будет продолжаться и в дальнейшем при любой дополнительной возможности.

Реализация модели

Моделирование гидрографов стока на реках-аналогах

Для испытания модели «Гидрограф» были подготовлены материалы по бассейну р. Пяседей-Яха и трем ее притокам: по рекам Ярапензя и Файн-Яха, по ручью Осоковому.

Как указывалось выше, в бассейне реки Пяседей-Яха выделено два стокоформирующих комплекса (СФК): кустарниковые тундры и тундровые болота. На водосборах рек Ярапензя и Файн-Яха и ручья Осоковый выделен лишь один СФК — кустарниковые тундры с преобладанием моховых поверхностей (рис. 1).

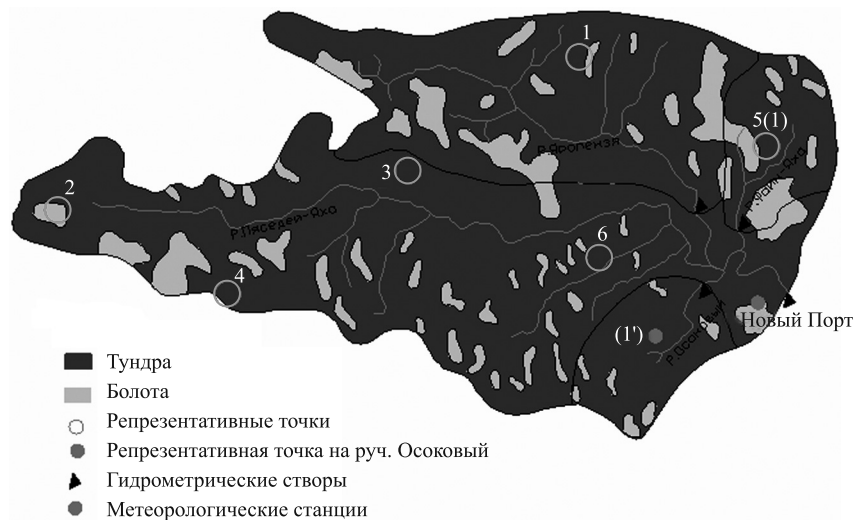


Рис. 1. Стокоформирующие комплексы (СФК) бассейнов рек Пяседей-Яха, Ярапензя, Файн-Яха, руч. Осоковый

Сведения о моделируемых бассейнах приведены в таблице 1.

Расчеты проводились для бассейнов рек Пяседей-Яха, Ярапензя, Файн-Яха, руч. Осокового с суточным шагом. Для расчетов по модели принят период 1981–1985 гг. В качестве входной метеорологической информации были использованы данные

Таблица 1. Общие сведения о бассейнах

Река	р. Пяседей-Яха — 27 км от устья	р. Файн-Яха — 0,5 км от устья	р. Ярапензя — 1 км от устья	руч. Осоковый — 0,3 км от устья
Площадь бассейна (км ²)	113,6	8,31	36,7	8,33
Порядок главного водотока	4	2	3	2
Максимальная высота над уровнем моря (м)	50,3	44,9	46,0	41,4
Высота створа (м)	7,0	10	10	10
Густота гидрографической сети (км/км ²)	0,45	0,45	0,45	0,45
Количество СФК	2	1	1	1
Количество РТ	6	1	1	1

наблюдений на метеостанции Новый Порт. Контрольная гидрометрическая информация на четырех водосборах р. Пяседей-Яха, полученная лабораторией гидрологии болот по наблюдениям в течение весенне-летне-осеннего периода, имеется за 1982–1985 гг.

На рис. 2 и 3 приведены рассчитанные гидрографы стока, сопоставленные с данными измерений.

Результаты моделирования гидрографов стока по р. Пяседей-Яха показывают в целом удовлетворительное совпадение с наблюдаемыми значениями по фазе и амплитуде.

Проведение моделирования на нескольких изученных водосборах полуострова Ямал позволило также проверить и уточнить величины ряда определяющих па-

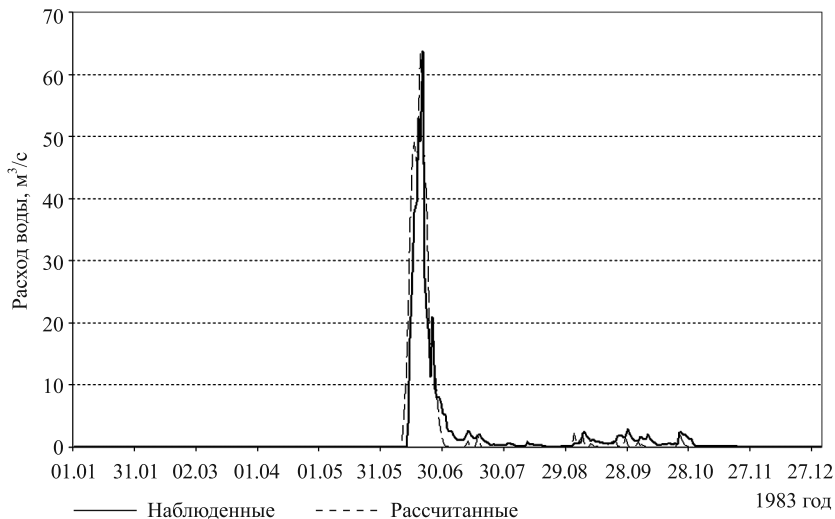


Рис. 2. Рассчитанные и наблюдаемые гидрографы стока р. Пяседей-Яха — 27 км от устья (1983 г.)

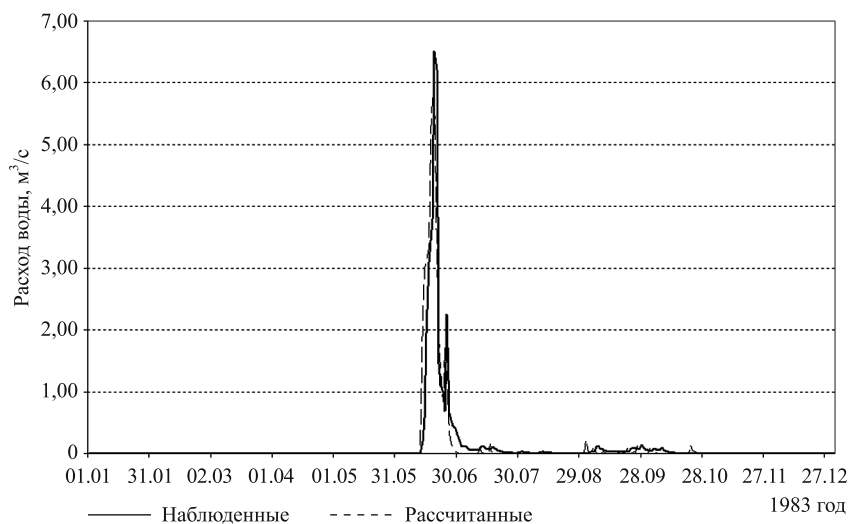


Рис. 3. Рассчитанные и наблюдаемые гидрографы стока р. Файн-Яха — 0,5 км от устья (1983 г.)

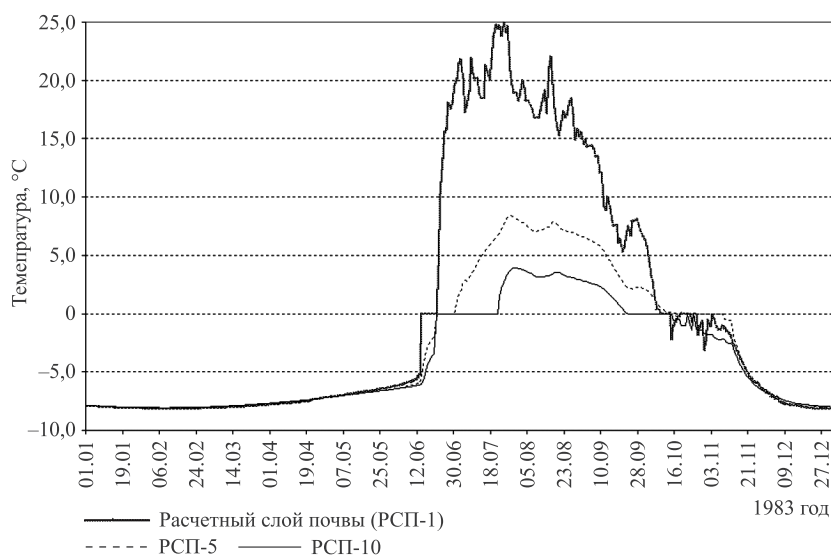


Рис. 4. Ход температуры в расчетных слоях почвы в бассейне реки Пяседей-Яха

раметров МГС в условиях, максимально приближающихся к объектам исследования (неизученным водосборам). Величины уточненных параметров использованы в дальнейшем при моделировании гидрографов стока для рек Морды-Яха, Се-Яха и Надуй-Яха.

В результате моделирования могут быть дополнительно получены расчетные данные о переменных состояниях бассейна. На рис. 4 представлена рассчитанная температура в расчетных слоях почвы в бассейне реки Пяседей-Яха.

Моделирование гидрографов стока на неизученных реках

После проведения расчетов гидрографов стока на изученных водосборах и получения удовлетворяющих нас результатов были выполнены работы по моделированию формирования стока неизученных рек (реки Морды-Яха, Се-Яха и Надуй-Яха). Метеорологические данные (суточные осадки, температура и дефицит влажности воздуха) интерполированы в репрезентативные (расчетные) точки (РТ) по данным трех метеорологических станций — Харасавэй, Марресале и Се-Яха. Таким образом, бассейны трех рек лежат внутри пространственного треугольника, в вершинах которого находятся три названных метеостанции.

Отсутствие информации по количественным характеристикам ландшафтов тундры (параметрам МГС) не позволяет выделить все разнообразие стокоформирующих комплексов (СФК) на данной территории. Имеются в виду также такие свойства почвы и горных пород, как пористость, максимальная водоудерживающая способность, условно неподвижная влага, коэффициенты фильтрации, теплоемкость и коэффициенты теплопроводности, величины емкостей перехвата осадков растительным покровом и другие.

В качестве примера моделирования стока для трех выше названных рек представлены рассчитанные гидрографы стока за 1984 г. Результаты моделирования гидрографов стока на реках Морды-Яха, Се-Яха, Надуй-Яха представлены на рис. 5–7.

В результате моделирования стока для неизученных бассейнов рек Морды-Яха, Се-Яха, Надуй-Яха (п-ов Ямал) получено следующее:

1. Проведена адаптация модели для специфических условий центрального Ямала в плане модернизации МГС «Гидрограф».
2. Продемонстрирована работоспособность МГС при моделировании гидрографов стока объектов, находящихся в сходных географических условиях, в том числе и на самом п-ове Ямал.

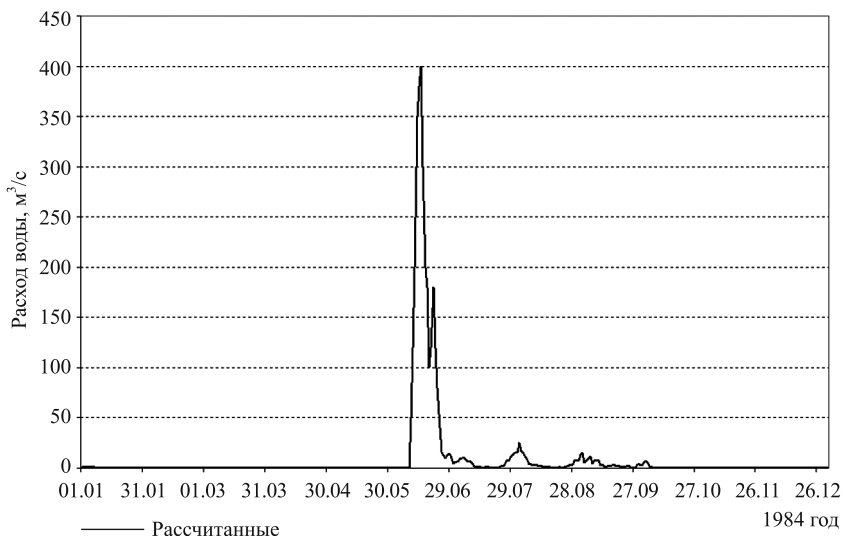


Рис. 5. Рассчитанные гидрографы стока р. Надуй-Яха (1984 г.)

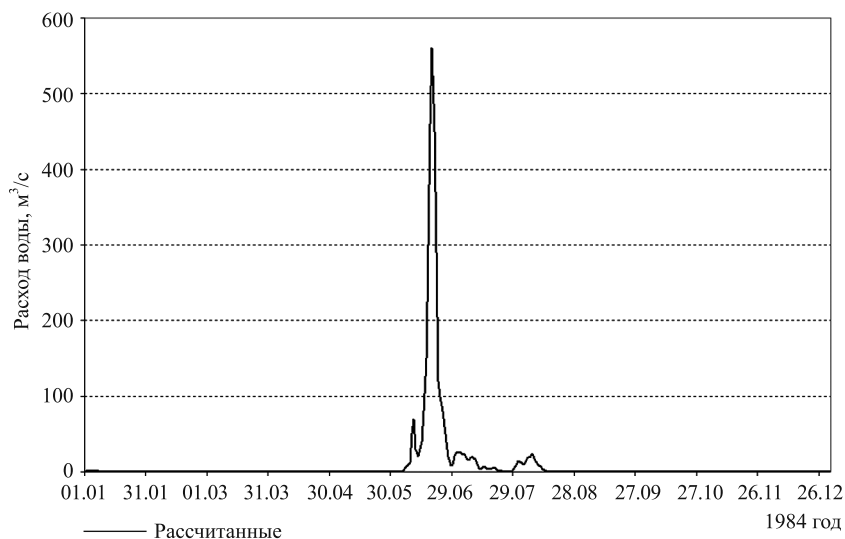


Рис. 6. Рассчитанные гидрографы стока р. Се-Яха (1984 г.)

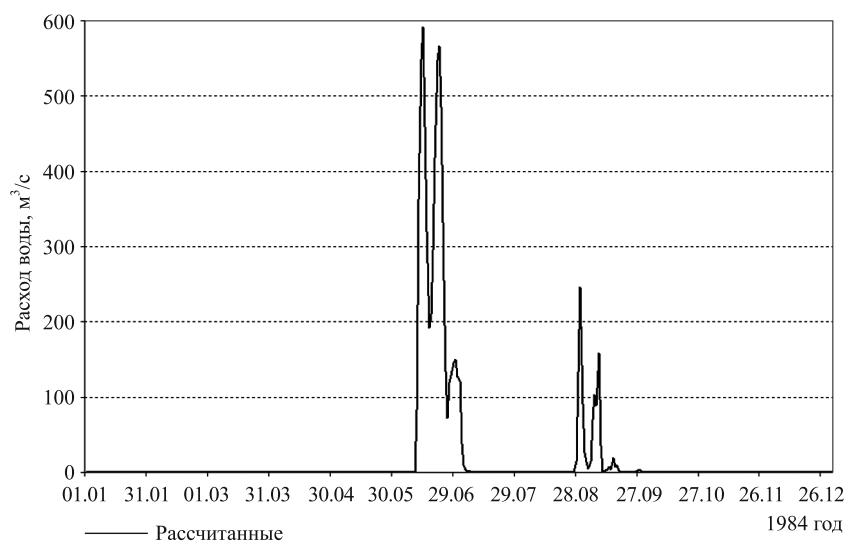


Рис. 7. Рассчитанные гидрографы стока р. Морды-Яха (1984 г.)

3. Оценены параметры МГС (и проверены на аналогах), значения которых в некотором приближении следует ожидать на названных выше реках.

4. Продемонстрированы результаты моделирования гидрографов стока за конкретный год непосредственно для интересующих нас объектов.

Заключение

Полученные результаты представляется возможным использовать в рамках методологии динамико-стохастического моделирования, которая позволяет рассчитать и построить кривые распределения характеристик стока по сгенерированным

рядам метеорологических величин. Таким образом, математическое моделирование даже при отсутствии данных дает возможность представить последовательности смоделированных суточных расходов воды (круглогодичные или за любые внутри-годовые отрезки времени, например, за период половодья) любой продолжительности.

Литература

1. Свод правил по проектированию и строительству СП 33–101–2004 «Определение основных расчетных гидрологических характеристик». М.: Госстрой России, 2004. 74 с.
2. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. СПб.: Нестор-История, 2009. 194 с.
3. *Виноградов Ю. Б.* Математическое моделирование процессов формирования стока. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 312 с.
4. *Виноградов Ю. Б., Виноградова Т. А.* Математическое моделирование в гидрологии. М.: Академия, 2010. 304 с.
5. *Боч М. С.* Болота тундровой зоны Сибири (принципы типологии) // Типы болот СССР и принципы их классификации. Л.: Наука, 1974. С. 146–154.
6. Ямало-Гыданская область (физико-географическая характеристика). Л.: Гидрометеоздат, 1977. 308 с.

Статья поступила в редакцию 1 апреля 2014 г.

Контактная информация

Виноградов Юрий Борисович — доктор технических наук, профессор; vinograd1950@mail.ru
Виноградова Татьяна Александровна — кандидат географических наук, доцент; vinograd1950@mail.ru
Журавлев Сергей Александрович — кандидат географических наук, доцент; hydromod@gmail.com
Журавлева Александра Дмитриевна — магистр, ведущий инженер-программист; a.d.zhuravleva@gmail.com

Vinogradov Yu. B. — Doctor of Engineering Sciences, Professor
Vinogradova T. A. — Candidate of Geographic Sciences, Associate professor; vinograd1950@mail.ru
Zhuravlev S. A. — Candidate of Geographic Sciences, Associate professor; hydromod@gmail.com
Zhuravleva A. D. — master, leading software engineer; a.d.zhuravleva@gmail.com