

УДК 556.5.072, 556.16.01

О. М. Семенова

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА НА МАЛОИЗУЧЕННЫХ ВОДОСБОРАХ (НА ПРИМЕРЕ БАССЕЙНА р. ЛЕНА)

В настоящее время в сфере наук о Земле, в том числе в гидрологии, активно развивается методология математического моделирования. Исследование процессов формирования стока является одной из важнейших проблем в гидрологии, полноценное решение которой представляется возможным только с использованием методов математического моделирования.

Одним из возможных подходов к моделированию, доказавшим свою плодотворность в ходе модельных расчетов и экспериментальной проверки, является использование в качестве инструмента исследования детерминированной моделирующей гидрологической системы «Гидрограф» с распределенным метеорологическим входом, характеристиками и параметрами, учитывающими особенности ландшафтов, растительности, почвенного покрова и климатических условий [1].

Целью настоящей работы является оценка, систематизация и уточнение параметров модели и на этой основе исследование и моделирование процессов формирования стока на малоисследованных бассейнах в информационной и алгоритмической среде «Гидрограф» [1].

Поставленная в исследовании задача предполагает, что модель «Гидрограф» удовлетворяет требованию универсальности, то есть возможности в рамках единой системы и унифицированного информационного подхода моделировать процессы формирования стока в самых различных типах бассейнов вне зависимости от их размера, типа подстилающей поверхности и климатических характеристик [1, 2].

Объектом моделирования является совокупность процессов формирования стока в бассейне р. Лена. Бассейн этой одной из крупнейших рек мира до сих пор относительно мало изучен в физико-географическом и, в частности, в гидрологическом плане. В рамках исследования выбраны десять водосборов в бассейне р. Лены с площадью от десятков до миллионов квадратных километров, находящихся в различных физико-географических условиях формирования стока (рис. 1, табл. 1 — номера створов на рисунке соответствуют таковым в таблице).

Таблица 1

Список объектов моделирования

№	Река; створ	Площадь бассейна, км ²	Среднегодовой расход, м ³ /с	Характеристика бассейна
1	Катырк; гмст. Токо	40,2	0,50	Малый горный водосбор
2	Тимптон; Нагорный	613	1,03	Северный склон Станового хребта, горнолиственничная тайга

3	Эбитизм; Эбэтем	1 000	25,8	Горная тундра в верховьях бассейна, низовья — северная тайга
4	Амга; Терюль	65 000	208	Горные тундры, заболоченные пойменные леса
5	Учур; Чюльбю	108 000	1 252	Средняя горная тайга
6	Виллой; Чернышевский	136 000	685	Северная тайга
7	Лена; Змеиново	140 000	1 144	Южная тайга — кедровые и лиственничные леса, островная мерзлота
8	Витим; Бодайбо	186 000	1 660	Горная страна; гольцы и горная тундра, кедровый стланик и горная тайга
9	Алдан; Верхоянский перевоз	696 000	5 590	Горные тундры, каменные осыпи, редколесья с лишайниковым покровом, горная тайга
10	Лена; Кюсюр	2 430 000	16 660	Один из самых крупных бассейнов, находящийся в различных климатических и ландшафтных зонах

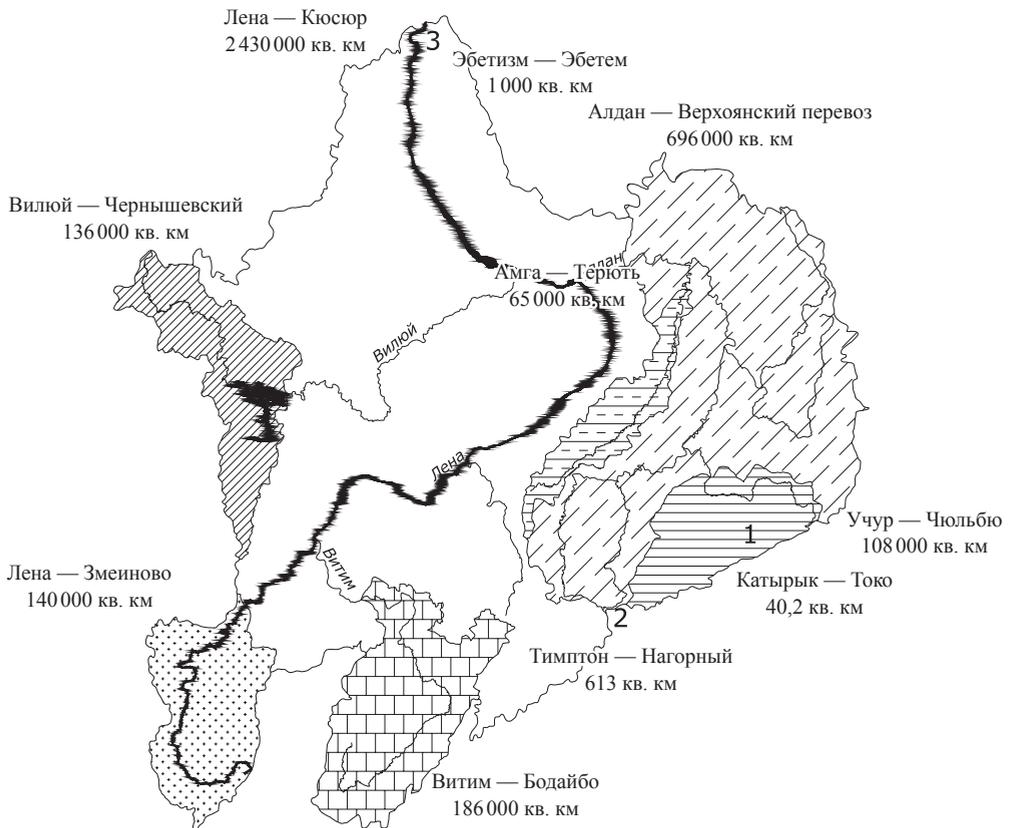


Рис 1. Объекты моделирования в бассейне р. Лена

Физико-географические условия формирования стока в бассейне р. Лена

Бассейн р. Лена имеет сложное геологическое строение и разнообразный рельеф. В основном это страна гор, плоскогорий и плато, которые занимают большую часть его территории.

Климат на исследуемой территории суровый, отличается ярко выраженной континентальностью. При отрицательной средней годовой температуре воздуха абсолютная амплитуда температур превышает 100° . Для горных условий характерны температурные инверсии, связанные с застоем холодного воздуха в горных котловинах в зимние месяцы.

Распределение осадков в году крайне неравномерно. Наибольшее их количество выпадает в теплое время года. В горных районах наблюдается зависимость осадков от высоты места, причем плювиометрические градиенты для разных районов неодинаковы как по величине, так и по знаку [3].

Зима продолжительная, с сильными морозами. Длительность зимнего сезона колеблется по территории бассейна и составляет от шести до восьми месяцев. Снежный покров устанавливается одновременно с наступлением устойчивых морозов в начале октября.

Для процесса формирования стока в период половодья существенно, что из-за интенсивного испарения снега значительное количество снежного покрова исчезает еще до перехода суточной температуры воздуха через 0° . Интенсивное снеготаяние наступает после перехода суточной температуры воздуха через 0° , то есть в начале теплой фазы весны. В долине р. Лены это происходит в конце апреля, в горах — в начале июня, а на остальной территории — в мае.

Лето в бассейне р. Лена — короткое и теплое. Расход тепла на таяние замерзшей в почве воды происходит в течение всего теплого периода, но обычно даже в центральной части бассейна почвы оттаивают только до глубины, не превышающей 2 м. Глубина оттаивания колеблется в значительных пределах. Так, торфяно-болотные почвы, сильно насыщенные льдом, оттаивают на глубину всего 15–20 см, а почвы под моховым покровом на северных склонах — на 25–40 см. На большую глубину (нередко до 2–3 и даже 4–5 м) оттаивают лишь скелетные почвы. Наибольшая глубина оттаивания почвы наблюдается в конце августа или начале сентября.

Осень на территории бассейна начинается с первыми заморозками в воздухе, которые возобновляются на большей части территории во второй половине августа. Промерзание почвы начинается в начале сентября на севере и в конце сентября на юге.

Климатические условия способствуют почти повсеместному развитию толщ многолетнемерзлых пород. Их верхняя граница располагается в зависимости от местных природных условий на разной, но в целом, небольшой глубине, а нижняя граница — на глубине 100–600 м.

Наличие многолетнемерзлых пород и своеобразные климатические условия существенно влияют на гидрологический режим рек. Большая часть рек имеет смешанное снеговое и дождевое питание.

Реки равнин и плато относятся к восточно-сибирскому, а реки горных районов восточной и южной частей бассейна — к дальневосточному типу питания [4]. Зимний режим рек отличается маловодьем, продолжительным устойчивым мощным ледоставом, промерзанием до дна и широким развитием наледей.

Основные типы почв, выделяемые в бассейне, — это таежные палевые мерзлотные, таежные оподзоленные мерзлотные, перегнойно-карбонатные мерзлотные почвы, почвы северной тайги, лугово-черноземные мерзлотные.

Территория бассейна в большей своей части входит в пределы ландшафтной зоны тайги. В горных районах для растительного покрова характерна вертикальная поясность. Основной лесообразующей породой является даурская лиственница, которая занимает большую часть покрытой лесом площади. Встречаются также сосна, ель сибирская, кедр сибирский и береза.

Информационное обеспечение модели формирования стока

Одним из важнейших принципов проектирования модели является ее ориентация на реально имеющиеся данные (метеорологическая информация, параметрическое сопровождение). Важным этапом моделирования стока является систематизация параметров модели, которые имеют конкретный физический смысл и для оценки которых существует возможность априорной оценки их значений [5]. Обобщенные параметры модели, характеристики бассейнов, а также входные метеорологические и контрольные гидрологические величины составляют информационную базу данных для моделирования стока.

Начальным этапом моделирования является предложенное в [1] выделение на территории водосбора областей, однородных по типу формирования стока; следуя терминологии Ю. Б. Виноградова, будем называть их далее стокоформирующими комплексами (СФК). На основании изучения комплекса параметров, влияющих на процессы формирования стока, в качестве системообразующего, основного критерия разбиения водосбора на СФК выбран тип растительности и почвы. При использовании указанного критерия в рамках модели автоматически к разным СФК оказались отнесены районы с существенно различным рельефом и абсолютной высотой.

Для каждого из 11 выделенных в бассейне р. Лена СФК (табл. 2) описаны, систематизированы и назначены количественные значения параметров.

Параметры почвенного профиля включают в себя: плотность, пористость, максимальную водоудерживающую способность, коэффициент фильтрации, удельную теплопроводность и теплоемкость. Растительный покров характеризуется параметрами затененности, альbedo, испаряемости, перехвата осадков растительностью, фенологическими датами. Для описания поверхности склонов выбраны показатели снегонакопления в оврагах, лужистости, коэффициента кольматации, толщины слоя поверхностного задержания.

Таблица 2

Характеристика стокоформирующих комплексов бассейна р. Лена.

№	Наименование СФК	Район распространения
1	2	3
1	Горнотундровая и разреженная растительность гольцов	Верхоянский хребет; Алданское нагорье; Становое нагорье
2	Лиственничные горные редины и стланик	Верхоянский хребет; Алданское нагорье; горы Забайкалья
3	Лиственничные северо-таежные редкостойные горные леса	Вилуйское плато; хребты Верхоянский и Сетте-Дабан
4	Лиственничные мари	Алданское нагорье; Становое нагорье
5	Лиственничные северо-таежные редкостойные равнинные леса	Низменность Нижней Лены; Оленекско-Вилуйское плато; западные предгорья Верхоянского хребта
6	Сосновые и сосново-лиственничные среднетаежные леса	Центральная Якутия; межгорные котловины Станового и Алданского нагорья

1	2	3
7	Лиственничные среднетаёжные леса; травяно-кустарничковые	Центральная Якутия
8	Растительность пойм и болот	Бассейн реки Лена
9	Горные лиственничные леса	Алданское нагорье; Юдомо-Майское нагорье; Становое нагорье; Становой хребет; Витимское плоскогорье
10	Сосновые и лиственнично-сосновые южно-таежные горные леса	Лено-Ангарское плато; хребты Байкальской горной системы
11	Горнотаежные темнохвойные леса	Лено-Ангарское плато; хребты Байкальской горной системы

В ходе численных экспериментов выявлен круг существенных характеристик расчетных бассейнов, вариация которых оказывает наибольшее влияние на итоговые результаты: ориентация, высота, угол наклона, орографическая затененность для каждой из репрезентативных точек (РТ).

В результате анализа влияния климатических параметров установлена неприемлемость простой пространственной интерполяции суточных данных метеостанций (слой осадков и температура) в расчетные точки в горных условиях. Приемлемой альтернативой здесь оказалось нормирование суточных значений метеорологических величин по их годовой среднегодовой величине.

Выявлены и описаны в терминах плювиометрических градиентов основные закономерности выпадения осадков в зависимости от особенностей воздействия рельефа. При этом для каждого горного района и отдельных моделируемых бассейнов построены кривые для этих зависимостей в координатах: высота местности — норма осадков. В качестве примера приведены указанные кривые для бассейна р. Учур (рис. 2).

В условиях значительных температурных инверсий, характерных для районов Восточной Сибири, приемлемым методом интерполяции данных о температуре равнинных метеостанций в горные районы оказалось нормирование суточной температуры по средней месячной температуре за четыре характерных месяца — январь, апрель, июль и октябрь с последующим распространением нормирующих множителей каждого месяца на четыре времени года.

Среди параметров модели, оказывающих лимитирующее влияние на моделирование процессов формирования стока для данной территории, выделены следующие:

- водно-физические свойства почвы: максимальная водоудерживающая способность расчетных слоев почвы (РСП), коэффициент фильтрации РСП;
- коэффициенты испаряемости с поверхности почвы;
- параметры, описывающие ход температуры почвы на стандартной глубине 1,6 м; коэффициент влияния солнечной радиации на эффективную температуру и дефицит влажности воздуха;
- доля участия в питании рек различных ярусов подземных вод.

Основные результаты моделирования

Расчеты по модели «Гидрограф», адаптированной к условиям Восточной Сибири, проводились для больших, средних, малых водосборов и для всего бассейна р. Лена

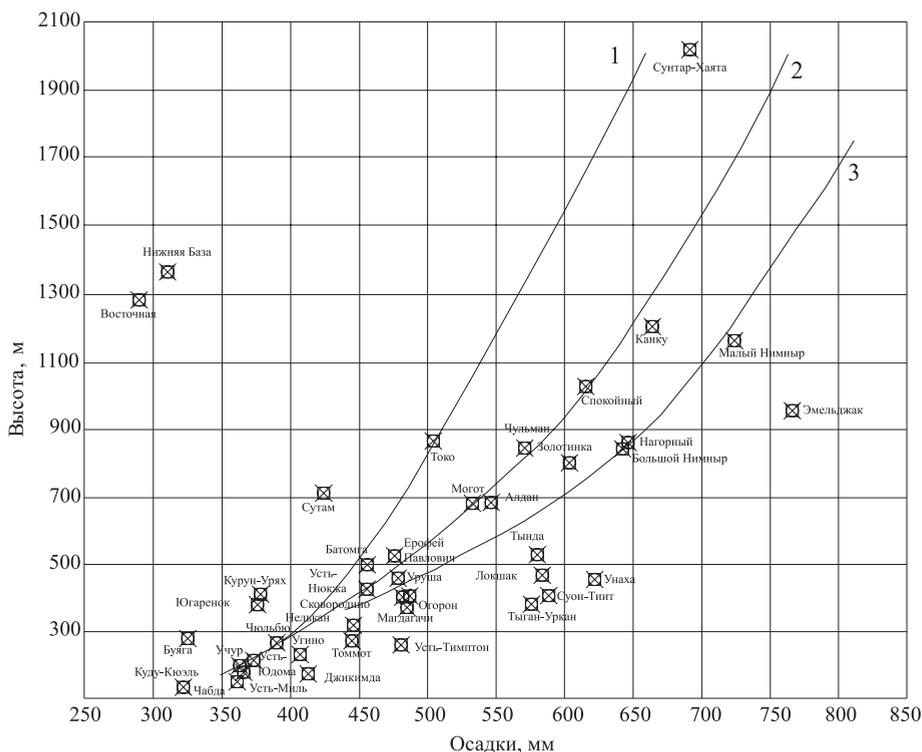


Рис 2. Кривые распределения годовых норм осадков по высоте для бассейна р. Учур
 1 — главная долина р. Учур (Чагда — Чюльбю — Токо) и восточная часть его бассейна; 2 — долина Гыныма, южный склон восточной части Алдано-Учурского хребта, бассейн р. Алгама; 3 — долина Гонама

(створ Кюсюр) с суточным шагом за период от восьми до пятнадцати лет (в зависимости от наличия метеорологической и контрольной гидрологической информации).

На рис. 3–5 приведены графические результаты сопоставления рассчитанных значений с данными измерений (гидрографы стока в замыкающем створе), а в табл. 3 — их статистические характеристики (суточные и годовые). Наряду со средними значениями наблюдаемого $\bar{H}_{изм}$ и смоделированного $\bar{H}_{расч}$ слоя стока приводятся средние систематические Δ и средние квадратические $RMSD$ отклонения рассчитанных величин от измеренных, коэффициенты корреляции r и значения эффективности расчета Ef . Последняя определяется в соответствии с [6] следующим образом:

$$Ef = 1 - \frac{\sum_{\Omega} (H_{расч} - H_{изм})^2}{\sum_{\Omega} (H_{изм} - \bar{H}_{изм})^2};$$

здесь $H_{изм}$ и $H_{расч}$ — рассчитанные и измеренные значения некоторой величины H , Ω — дискретное множество выборки величины H . Исходя из предложенной в [6] оценки приемлемости модельных расчетов ($Ef > 0,5$), можно сделать вывод об обоснованности предложенного модельного описания динамики показателя H .

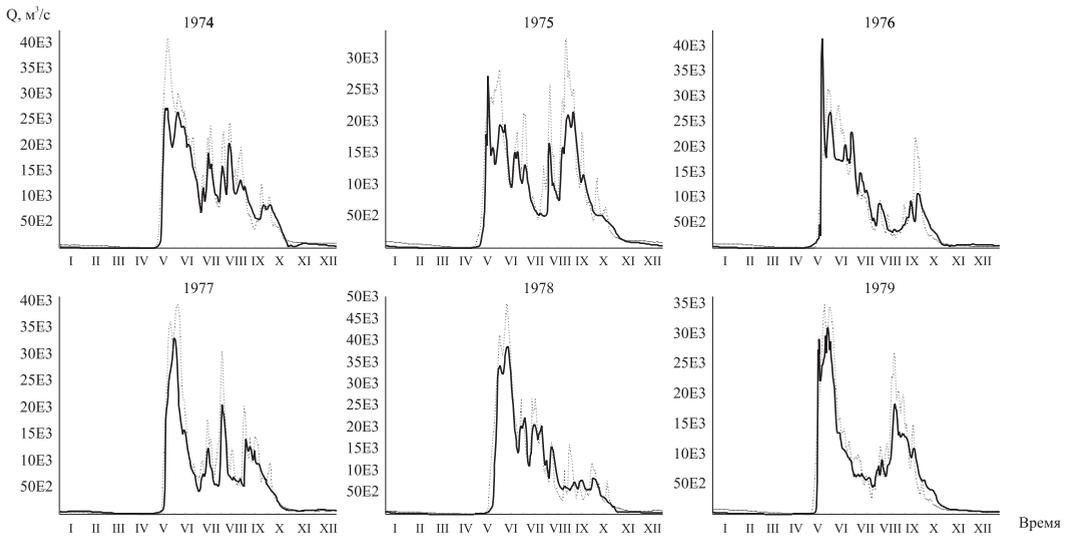


Рис 3. Рассчитанные (пунктир) и наблюдаемые (сплошная) гидрографы стока в бассейне р. Алдан-Верхоянский Перевоз

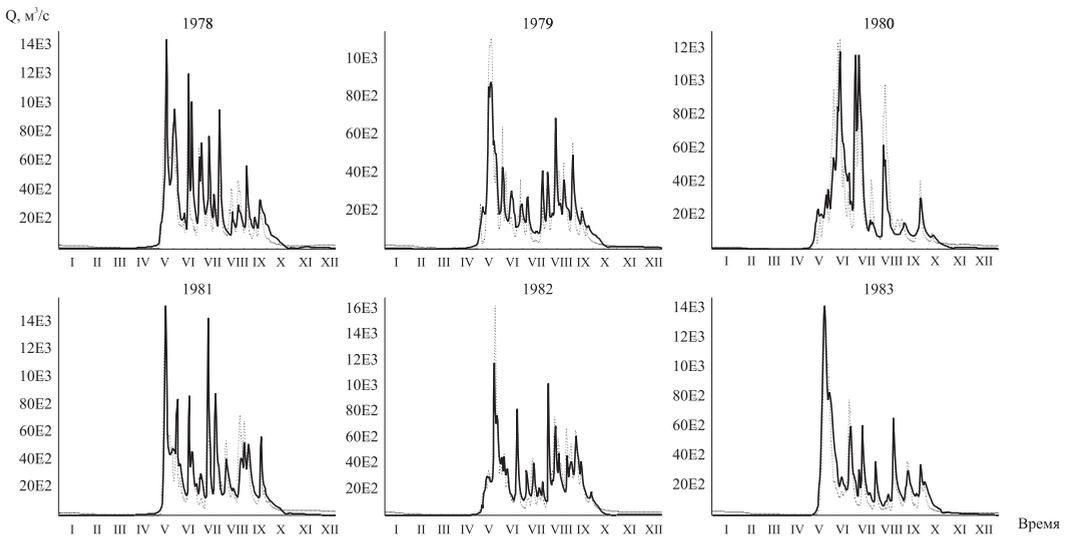


Рис 4. Рассчитанные (пунктир) и наблюдаемые (сплошная) гидрографы стока в бассейне р. Учур-Чольбю

В табл. 3 представлены значения относительного критерия качества расчетов по водосборам Ленского бассейн, оцененные по формуле:

$$KK = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|H_1 - H_2|}{H_1}}{n},$$

где H_1 — фактический, H_2 — рассчитанный слой стока в замыкающем створе, n — количество суточных наблюдений [1].

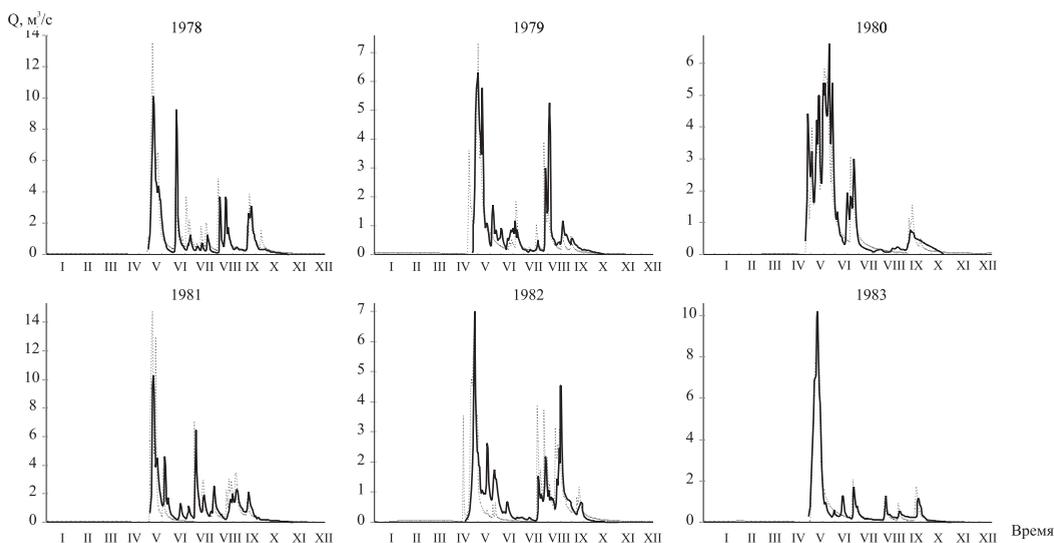


Рис 5. Рассчитанные (пунктир) и наблюдаемые (сплошная) гидрографы стока в бассейне р. Катырык-Токо

Таблица 3

Статистические характеристики сопоставления рассчитанных и наблюдаемых суточных (числитель) и годовых (знаменатель) значений слоев стока с различных водосборов бассейна р. Лена (в мм)

Река; створ	Период расчета, гг.	$H_{изм}$	$H_{расч}$	Δ	$RMSD$	Ef	r	КК		
								Ср.	Min	Max
Лена; Кюсюр	1978–1984	$\frac{0,68}{248}$	$\frac{0,67}{243}$	$\frac{0,01}{5}$	$\frac{0,02}{6,1}$	$\frac{0,89}{0,88}$	$\frac{0,94}{0,99}$	$\frac{0,21}{0,02}$	$\frac{0,17}{0,02}$	$\frac{0,25}{0,03}$
Алдан; Верхоянский перевоз	1971–1984	$\frac{0,70}{255}$	$\frac{0,81}{294}$	$\frac{-0,11}{-39}$	$\frac{0,02}{14,6}$	$\frac{0,85}{0,56}$	$\frac{0,95}{0,89}$	$\frac{0,24}{0,14}$	$\frac{0,20}{0,04}$	$\frac{0,28}{0,26}$
Витим; Бодайбо	1969–1984	$\frac{0,78}{285}$	$\frac{0,78}{286}$	$\frac{0}{-1}$	$\frac{0,02}{18,0}$	$\frac{0,84}{0,89}$	$\frac{0,93}{0,96}$	$\frac{0,29}{0,06}$	$\frac{0,20}{0,02}$	$\frac{0,35}{0,18}$
Учур; Чюльбю	1978–1984	$\frac{1,0}{365}$	$\frac{1,04}{378}$	$\frac{-0,4}{-13}$	$\frac{0,03}{18,3}$	$\frac{0,84}{0,38}$	$\frac{0,92}{0,74}$	$\frac{0,34}{0,08}$	$\frac{0,27}{0,05}$	$\frac{0,39}{0,15}$
Тимптон; Нагорный	1971–1980	$\frac{1,39}{507}$	$\frac{1,41}{516}$	$\frac{-0,02}{-9}$	$\frac{0,05}{22,3}$	$\frac{0,61}{0,52}$	$\frac{0,83}{0,84}$	$\frac{0,58}{0,10}$	$\frac{0,51}{0,06}$	$\frac{0,65}{0,26}$
Катырык; гмст. Токо	1974–1983	$\frac{1,07}{392}$	$\frac{1,12}{407}$	$\frac{-0,05}{-15}$	$\frac{0,05}{28,3}$	$\frac{0,72}{0,65}$	$\frac{0,87}{0,93}$	$\frac{0,40}{0,07}$	$\frac{0,27}{0,02}$	$\frac{0,52}{0,23}$

Выводы

Сравнение результатов модельных расчетов характеристик стока с наблюдаемыми показало удовлетворительную степень их совпадения.

В ходе расчетов выявлены основные проблемы моделирования стока для рассматриваемой территории и направления совершенствования информационной базы и алгоритмов моделирования:

1. Недостаточность метеорологических данных, в первую очередь осадков и температуры, в условиях большой разреженности сети метеонаблюдений.

2. Скудность сведений о теплофизических и воднофизических свойствах почв и горных пород.

3. В рамках дальнейшего развития информационной базы моделирования значительный научный интерес представляет детальный анализ влияния степени дискретности шкал параметров, учитываемых при задании СФК, на точность моделирования.

С учетом решения указанных проблем представляется плодотворным дальнейшее использование модели «Гидрограф» для исследования процессов формирования стока на малоизученных территориях в бассейнах р.р. Енисей, Хатанги, Оленька, Яны, Индигирки и Колымы, также характеризующихся значительным разнообразием физико-географических условий формирования стока.

Summary

Semenova O. M. The studies of runoff formation processes in poorly explored basins (using the example of the river Lena basin)

The main objective of this study consists in systemization, estimation and correction of model parameters and on this basis in investigation and modeling of runoff formation processes for poorly explored basins within the deterministic modeling system with distributed parameters "Hydrograph". Ten watersheds within r. Lena basin have been chosen as objects of investigation. Based upon comparison of calculated and observed runoff hydrographs, a conclusion was drawn on good possibilities of "Hydrograph" model use for studying the processes of runoff formation on East Siberia regions.

Литература

1. *Виноградов Ю. Б.* Математическое моделирование процессов формирования стока. Критический анализ. Л., 1988. 2. *Семенова О. М.* Информационные и математические аспекты задачи моделирования процессов формирования стока речных бассейнов. // Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2007, № 3. 3. *Васильев И. С., Торговкин Я. И.* Пространственное распределение осадков в Якутии. // Метеорология и гидрология, 2002, № 6. 4. *Соколов А. А.* Гидрография СССР. Л., 1952. 5. *Vinogradov Yu. B.* River Runoff Modeling in Hydrological Cycle. // Edited by I. A. Shiklomanov, in Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Developed under the auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Oxford, UK, [<http://www.eolss.net>], 2003. 6. *Nash J. E., Sutcliffe J. V.* River flow forecasting through conceptual models: 1 A discussion of principles // J. Hydrol. 1970. V. 10. № 3.