

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОЛЕТНЕЙ ДИНАМИКИ РЕЧНОГО СТОКА В БАССЕЙНЕ р. ЛЕНЫ НА ОСНОВЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ СТОКА¹

© 2024 г. А. И. Крылова^{а, *}, Н. А. Лаптева^б

^аИнститут вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
Новосибирск, 630090 Россия

^бГосударственный научный центр вирусологии и биотехнологии “Вектор” Роспотребнадзора, Новосибирская обл.,
Кольцово, 630559 Россия

*e-mail: alla@climate.sccc.ru

Поступила в редакцию 10.12.2023 г.

После доработки 01.06.2023 г.

Принята к публикации 22.01.2024 г.

На основе новой версии концептуальной климатической модели речного стока проведены расчеты суточных и месячных гидрографов для бассейна р. Лены с использованием данных реанализа MERRA и данных о стоке из архива R-ArcticNet за 32-летний период (1980–2011 гг.). Оптимизация параметров модели и поправки к осадкам позволила получить хорошее качество рассчитанных гидрографов стока и выявить наличие тренда в многолетней динамике стока за исторический период с 1985 по 2011 г. Период 1985–2011 гг. характеризуется резким увеличением приземной температуры воздуха, увеличением осадков в Арктическом регионе, начиная с середины 1980-х гг., в частности на территории бассейна Лены. Следствием изменения климата является изменение гидрологического режима речного бассейна, и вопрос об оценках многолетней динамики расходов воды за данный период, в том числе и по концептуальной модели, становится важным.

Ключевые слова: концептуальная климатическая модель, гидрограф речного стока, бассейн Лены, реанализ, схематизация бассейна.

DOI: 10.31857/S0321059624040041 EDN: APRUKO

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия в связи с климатическими изменениями в Арктическом регионе и, в частности, в Северном Ледовитом океане (СЛО) значительно возрос интерес к гидрологическим процессам в Арктике. Проявление наблюдаемых глобальных изменений в климатической системе, включающих повышение температуры приземного слоя атмосферы, уменьшение площади и толщины морского льда, таяние Гренландского ледяного щита, вызвало изменения гидрологического режима поверхностных вод в средних и высоких широтах Северного полушария. Эти изменения связаны с процессами пресной воды на суше, например с увеличением стока крупных сибирских рек [34, 38, 39, 42], с продолжающимся таянием многолетней мерзлоты [18, 20].

Повышение температуры приземного воздуха и изменение количества и времени выпадения осадков явились причинами уменьшения площади и периода залегания снежного покрова [17, 19, 26]. Все это повлияло на изменение баланса пресной воды в СЛО [16, 22].

Крупнейшие реки Арктики поддерживают речной сток круглый год, в том числе под сезонным ледовым покровом. Наибольшую величину стока дают самые крупные реки Сибири: Обь, Енисей, Лена. Эта величина составляет 45% притока всей пресной воды в СЛО [41]. По данным многолетних наблюдений [6, 21], суммарный годовой расход крупнейших рек Сибири претерпевает существенные межгодовые вариации за период с 1936 по 2000 г. Как следует из работ [44–47], значительную роль в этом играет межгодовая климатическая изменчивость атмосферной циркуляции. Кроме межгодовой изменчивости в годовом расходе наблюдаются устойчивые тренды как отражение трендов в климатической

¹ Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 20-05-00241) и в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН (проект 0215-2022-003).

системе [34, 39, 50]. В работах [40, 47] показано, что десятилетние тренды в осадках и речных стоках могут оказывать широкомасштабное воздействие на ледовый режим в Арктике.

Влияние изменения пресноводного баланса СЛО на климатическую систему требует изучения на основе климатических моделей, включающих модели речного стока [5, 10, 25]. Для того чтобы замкнуть гидрологический цикл в модели климатической системы, требуется моделирование в глобальном масштабе расхода воды для расчета глобально распределенного притока пресной воды в океан.

В работе [9] представлена концептуальная климатическая модель стока, предназначенная для описания и расчета потока пресной речной воды с крупнейших речных водосборов в океан. Основу модели составляет карта пространственной маршрутизации или карта направлений движения потоков, построенная на основе цифровой модели рельефа поверхности водосбора. Модель формирует поверхностный сток и подповерхностный дренаж и переносит эти потоки к речным устьям, не влияя на процессы на суше. При условии, что осадки и другие атмосферные переменные из реанализов или из моделей общей циркуляции атмосферы и океана реалистичны, оценки речного стока, полученные на основе модели речного стока, могут быть использованы для оценки адекватности схемы параметризации поверхности суши, а также для оценки влияния изменений климата на гидрологию крупных речных бассейнов.

В последнее время особый интерес уделяется региональным характеристикам гидрологического цикла в средних и высоких широтах северного полушария. Моделированию процессов формирования стока на водосборе и в речной сети р. Лены посвящены работы, связанные с макромасштабной гидрологической моделью [32, 43] и физико-математическими моделями, описывающими детальное взаимодействие стокообразующих факторов на водосборе [4, 13]. Цель настоящей статьи — показать возможности воспроизведения новой версией концептуальной климатической модели стока суточной, месячной, многолетней динамики речного потока

с бассейна Лены на основе данных реанализа и сравнить с наблюдаемыми гидрографами.

Основное отличие новой версии концептуальной модели от старой состоит в следующем:

- 1) замена модели формирования речного стока — линейной двухпараметрической резервуарной модели — линейной моделью формирования водного баланса в русловой сети (это проявилось в синхронизации гидрографа модельного стока с наблюдаемым);
- 2) построение новой схематизации бассейна на основе гидрологически-корректной модели рельефа;
- 3) разделение территории бассейна на четыре ландшафтно-гидрологических района;
- 4) калибровка параметров с использованием данных о расходе на 21-й стокосовой станции бассейна р. Лены, представленные на рис. 1 и в табл. 1 (в старой версии рассматривалась одна стокосовая станция — замыкающий створ бассейна).

ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ И ЕГО МОДЕЛЬНАЯ СХЕМАТИЗАЦИЯ

Водосборный бассейн Лены, крупнейшей реки Восточной Сибири, образует в ландшафтном плане сложную природную систему площадью 2.49 млн км², протяженностью с 53°

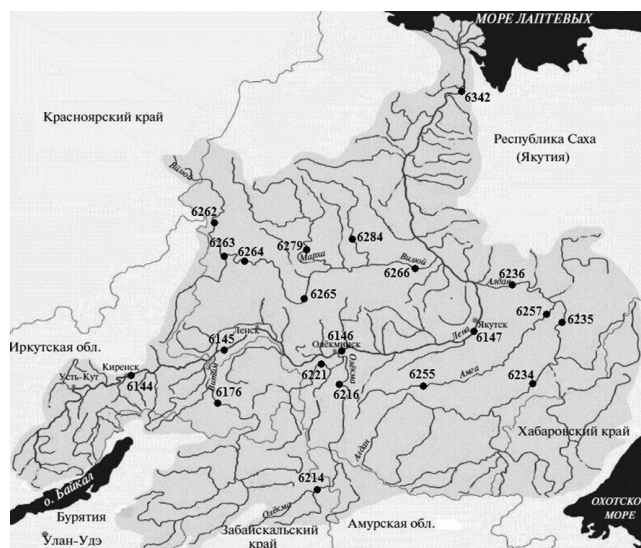


Рис. 1. Карта территории бассейна р. Лены с 21 стокосовыми станциями из R-ArcticNet [30].

Таблица 1. Идентификаторы стоковых станций в бассейне р. Лены

Река и ее основные притоки	Стоковые станции
Лена	6144 – Змеиново; 6145 – Крестовский; 6146 – Солянка; 6147 – Табага; 6342 – Кюсюр
Витим	6176 – Бодайбо
Олёкма	6214 – Средняя Олекма; 6216 – Куду-Кель; 6221 – Токко (р. Чара)
Алдан	6234 – Усть-Миль; 6235 – Охотский Перевоз; 6236 – Верхоянский Перевоз; 6255 – Буяга (р. Амга); 6257 – Терут (р. Амга)
Вилуй	6262 – Усть-Амбардаах; 6263 – Чернышевский; 6264 – Сюльдюкар; 6265 – Сунтар; 6266 – Хатырык-Хомо; 6279 – Чумпурук (р. Марха); 6284 – Угуляцы (р. Тюнг)

с.ш. до 72° с.ш. (с юга на север) и с 103° в.д. до 140° в.д. (с запада на восток). Лена берет начало на северо-западном склоне Байкальского хребта и впадает в окраинное море СЛО, море Лаптевых, образуя уникальную, самую большую дельту России площадью ~ 30 тыс. км². Длина Лены с учетом длины самой глубокой и судоходной ее протоки Быковской равна 4400 км. Основные притоки Лены по величине площади их бассейнов – Алдан (729 тыс. км²), Вилуй (450 тыс. км²), Витим (225 тыс. км²), Олекма (210 тыс. км²), Мая (171 тыс. км²), Марха (99 тыс. км²), Амга (69.3 тыс. км²), Тюнг (49.8 тыс. км²) [14].

Почти вся территория бассейна (80–93%) расположена в зоне многолетней мерзлоты, мощность которой колеблется от нескольких десятков метров на юге до нескольких сотен метров севернее 60° с.ш. Климат бассейна резко континентальный и формируется, главным образом, под влиянием холодных масс воздуха сибирского антициклона. На территории бассейна осадков выпадает мало, в среднем 250 мм в год. Наибольшее количество осадков (до 500–600 мм) отмечается в южной части бассейна, наименьшее (<100 мм) в дельте Лены. Основное питание Лены, как и всех ее притоков, составляют талые снеговые и дождевые воды. Распространение многолетней мерзлоты в пределах всего бассейна ограничивает питание реки и ее притоков грунтовыми водами. Общий режим осадков в бассейне Лены определяет годовой режим речного стока с высоким весенним половодьем, несколькими значительными летними паводками и низкой осенне-зимней меженью [14].

Основу концептуальной модели речного стока составляет карта маршрутизации, которая

определяет для каждой пространственной ячейки сетки разрешением $(1/3)^\circ \times (1/3)^\circ$, в какую соседнюю ячейку передается речной сток. Качество расчета гидрографов стока в замыкающем створе русла крупного речного бассейна зависит не только от математической формулировки модели, но и от хорошей согласованности площади модельного водосбора с реальной площадью. В противном случае могут возникать систематические ошибки в представлении объема воды и времени движения потока.

Схематизация бассейна Лены и построение ее дренажной сети выполнены на основе цифровой модели рельефа, полученной по глобальным данным радарной интерферометрической съемки SRTM30 [27], дополненной данными о топографии GTOPO30. Фрагмент данных, включающий бассейн Лены, был преобразован с помощью геостатистического метода интерполяции кригинг (тип точечный) в массив топографических данных на регулярной сетке разрешением $(1/3)^\circ \times (1/3)^\circ$ со значениями высот в центрах ячеек. Для этого использовалась геоинформационная система Surfer 8, в которой для интерполяции был выбран тип кригинга (“Kriging Type”) – точечный (опция “Point”), а для выбора формы кригинга и отсутствия пространственного тренда в данных в списке “Drift Type” был выбран метод ординарного кригинга (опция “None”).

Ввиду отсутствия специализированного ГИС-комплекса процедура построения такой гидрологически-корректной цифровой модели, в которой форма и направления смоделированных водотоков были бы близки к реальным, выполнялась с помощью программ вычисления

файлов направлений и кумулятивного стока для каждой ячейки сетки. После преобразования данных по методу кригинг необходима была ручная доработка. Для этой цели использовались топографические карты масштабов 1 : 200000, 1 : 1 000 000 для определения и уточнения высот рельефа речных ячеек, представляющих основной путь потока, и поверхностных ячеек, окружающих речные ячейки. При построении гидрологически корректной цифровой модели рельефа использовалась методика из работы [12]. Основу для построения гидрологически корректной модели составляют четыре взаимосвязанных между собой процедуры: 1) определение направления стока; 2) определение суммарного стока; 3) выделение главных линий водотоков; 4) выделение звеньев водотоков. Направления стока формируются с помощью метода D8 (“Deterministic Eight-Neighbor”). Определение суммарного стока – это вычисление числа всех ячеек, чей сток попадает в ячейку, лежащую вниз по склону. Ячейки с самым большим числом суммарного стока образуют линии, выделяющиеся на фоне всех остальных ячеек. Эти линии – главные для создания сети водотоков. Ячейки, суммарный сток которых принимает нулевое значение, относятся к границе водораздела. Далее необходимо задать значение суммарного стока, при котором ячейка будет считаться водотоком. Экспериментальным путем установлено, что оптимальный порог величины суммарного стока равен 20. При такой пороговой величине получилась сеть водотоков, представленная на рис. 2. Отношение площади схематизированного бассейна к реальной площади бассейна составило немного >1%.

В табл. 2 приведено сравнение длин русел Лены и ее основных притоков [14] и их модельных аналогов. В работах [36, 37] коэффициент извилистости как отношение реальной длины к модельной для самых больших рек земного шара на сетке разрешением 1°×1° близок к 1.6, а для

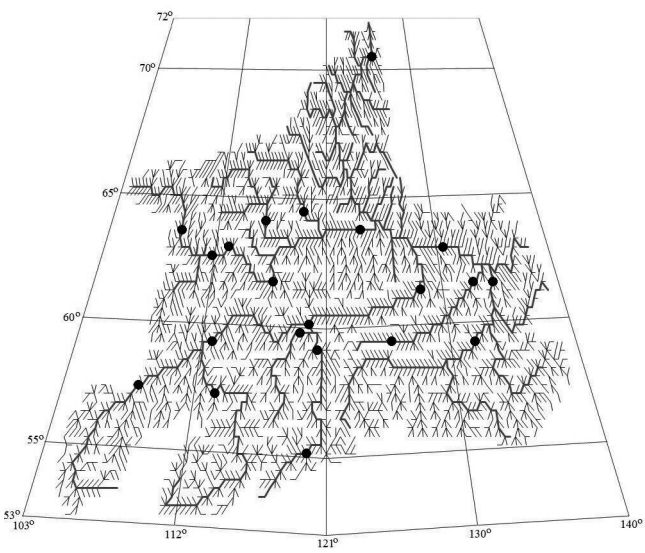


Рис. 2. Модельная гидрографическая сеть бассейна р. Лены со стокowymi станциями (черные кружки).

размеров бассейнов <500 000 км² и длин рек короче 1500 км коэффициент извилистости имеет большую изменчивость.

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ РЕЧНОГО СТОКА

Цель модели – рассчитать стоки пресной речной воды, поступающей в океаны с больших водосборных бассейнов. Модель формирует поверхностный, грунтовый и речной сток, не влияя на процессы на суше и переносит эти потоки к устью реки согласно схематизированной гидрографической сети, связывающей расчетные ячейки водосбора.

Как представлено ранее в работе [9], концептуальная модель речного стока основана на динамике линейных резервуаров. Предполагается, что в каждый момент времени t :

$$Q(t) = \frac{W(t)}{k}, \tag{1}$$

Таблица 2. Сравнение длин русел р. Лены и ее главных притоков

Название реки	Коэффициент извилистости	Длина реки, км	Модельная длина, км
Лена (до Кюсюра)	1.01	3716	3676
Вилуй	1.20	2450	2041
Алдан	1.28	2273	1775
Олёкма	1.39	1436	1035
Витим	1.35	1837	1363

$Q(t)$ — выходящий поток из резервуара (ячейки), $W(t)$ — содержание или запас воды в ячейке на момент t , k — коэффициент задержки или среднее время пребывания воды в резервуаре. При входном потоке $I(t)$ уравнение баланса массы в линейном резервуаре (ячейке сетки) имеет следующий вид:

$$\frac{dW(t)}{dt} = I(t) - Q(t). \quad (2)$$

Подставляя (1) в (2), получим линейное дифференциальное уравнение для $Q(t)$ с одним параметром k (k — постоянная по времени, но географически изменяющаяся величина):

$$k \frac{dQ(t)}{dt} = I(t) - Q(t). \quad (3)$$

Линейная модель (3) позволяет описать трансформацию притока в сток с помощью линейного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами, для решения которой существует хорошо разработанный математический аппарат [2, 7, 11].

Общее решение линейного обыкновенного дифференциального уравнения (3) при нулевых начальных условиях — интеграл свертки (Дюамеля) [7, 11]:

$$Q(t) = \int_0^t I(\tau) h(t - \tau) d\tau$$

с “кривой добегания” для одной ячейки

$$h(t) = \frac{1}{k} \exp\left(-\frac{t}{k}\right).$$

Согласно работе [23] используется разделение потока в ячейке на три потока, относящиеся к трем разным физическим процессам: поверхностный, базовый (грунтовый) и речной сток. На основе исследований двух водосборов в Швеции в работе [23] сформулирована параметризация коэффициентов задержки, основанная на эмпирических соотношениях: для поверхност-

ного стока $k = k_s = 17.87 \times 10^{-2} \frac{\Delta x}{\phi^{0.1}}$ (Δx — длина

ячейки, ϕ — максимальный уклон ячейки; для

грунтового стока $k = k_g = \tau \frac{\Delta x}{d_0}$ (d_0 — типичный

диаметр ячейки сетки $(1/3)^\circ \times (1/3)^\circ$, $\tau \approx 300$ сут для любого района земного шара) [24]. Коэффициент задержки для грунтового стока зависит только от длины ячейки, поскольку для грунтового стока зависимость от рельефа слабая. Для моделирования гравитационного бокового стока рельеф — наиболее важная характеристика, и он непосредственно вводится в формулировки динамичного запаса воды в ячейке. Коэффициент задержки связан с геометрическими величинами, такими как рельеф, уклон, длина расчетной ячейки. Явная зависимость от характеристик поверхности, таких как глубина почвенного слоя, тип почвы, растительность, водоемкость, не учитывается.

Модель включает в себя формирование и таяние снежного покрова в ячейке расчетной сетки.

Разделение на жидкие (дождь) и твердые (снег) осадки проводилось в зависимости от температуры воздуха согласно работе [49]. Осадки накапливаются в виде снега, когда температура воздуха опускается ниже порогового значения. В модели эта температура — калибруемый параметр.

Осадки P разделяются на дождь или снег на основе температуры воздуха T :

$P_s = P$, если $T \leq T_{\min}$ (P_s — водный эквивалент глубины снега, $T_{\min}$ — пороговая температура, ниже которой все осадки рассматриваются в виде снега);

$$P_s = \frac{T_{\max} - T}{T_{\max} - T_{\min}}, \text{ если } T_{\min} < T < T_{\max},$$

$P_s = 0$, если $T \geq T_{\max}$, $P_r = P - P_s$, $T_{\max}$ — пороговая температура, выше которой все осадки выпадают в виде дождя, P_r — глубина слоя дождя. Предполагается, что при температуре между пороговыми значениями (обычно -1.1°C и 3.3°C) осадки представляют собой смесь дождя и снега.

Расчет снеготаяния в ячейке выполняется по суточной температуре воздуха и коэффициенту снеготаяния [33].

Поверхностный R_s и грунтовый R_g виды стока формируются в ячейке сетки на основе дан-

ных об осадках, талой воде и испарении. В качестве данных об осадках и испарении в работе используются данные реанализа MERRA. Водоотдача в ячейке, сформированная приходящей дождевой (талой) водой и испарением, связана с разделением эффективных осадков ($P-E$) на поверхностный R_s и грунтовый R_g сток: $P-E = R_s + R_g$ (P – дождевая (талая) вода, E – испарение). Если принять, что поверхностный сток $R_s = k(P-E)$ (k – калибруемый параметр), то $R_g = (1-k)(P-E)$.

Для расчета речного стока в ячейке рассматривается линейная модель формирования водного баланса в русловой сети [31, 36]:

$$\frac{dW}{dt} = Q_{in} - Q_{out},$$

$$Q_{out} = \frac{u_e}{d} W,$$

d – расстояние между расчетными ячейками; u_e – эффективная скорость движения воды в русле реки; W – запас воды в русловой ячейке; Q_{in} – расход воды, поступающей в ячейку как в виде боковой приточности, так и от соседних речных ячеек; Q_{out} – расход воды, выходящей из ячейки. С использованием параметризации для выходящего потока решение данного уравнения определяется на основе рекуррентного соотношения [3].

Основу модели составляет карта маршрутизации (карта направления речных потоков), которая определяет для каждого сеточного бокса, в какой соседний сеточный бокс передается сток.

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

В работе для модельных расчетов гидрографа стока в бассейне Лены использованы данные реанализа MERRA (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications): приземные значения температуры воздуха, осадков, испарения за период с 01.01.1980 по 31.12.2011 с шестичасовым разрешением по времени [28]. Использование глобальной базы данных позволило по данным об осадках, испарению и температуре приземного воздуха определить распределенные мгновенные поля поверхностного стока и дренажа по простым балансовым соотношениям

[25]. Для этого данные из реанализа MERRA были проинтерполированы с сетки $(1/2)^\circ \times (2/3)^\circ$ на сетку $(1/3)^\circ \times (1/3)^\circ$. Результаты расчета гидрографов стока сравнивались с данными суточных и месячных наблюдений речного стока из архива R-ArcticNET [30].

КАЛИБРОВКА МОДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Оптимизировались следующие модельные параметры: температура воздуха у поверхности, при которой начинается таяние снега; коэффициент стока, определяющий разделение влагонаполнения ячейки (осадки минус испарение плюс таяние снега) между поверхностным и грунтовым стоком; эффективная скорость движения воды в русле и корректирующий множитель к осадкам. Калибровка параметров модели проводилась по данным месячных расходов воды в 21 створе речной сети Лены и ее притоков, приведенных на рис. 1. В новой версии модели для территории бассейна выделены четыре ландшафтно-гидрологических района, представляющие территориальное многообразие водного режима: Верхняя и Средняя Лена до стоковой ст. Табага, бассейн р. Алдан до Верхоянского Перевоза, бассейн р. Вилюй до стоковой ст. Хатырык-Хомо и Нижняя Лена до замыкающего створа Кюсюр. Для каждого района определялся свой оптимальный набор параметров в целях максимальной эффективности расчета стока по Нэшю–Сатклифу [35] за исследуемый период.

Ввиду наличия систематических ошибок в данных об осадках из реанализа MERRA введен корректирующий множитель к данным по жидким осадкам, который калибровался наряду с параметрами модели.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ГИДРОГРАФОВ СТОКА

Выделение четырех гидрологических районов в бассейне Лены и определение для каждого из них оптимального набора параметров позволили смоделировать зимний сток, который не воспроизводился, когда рассматривался единственный набор параметров для всего бассейна. На рис. 3 представлены среднемесячные гидрографы стока для двух вариантов расчета: с одним оптимальным набором модельных параметров для

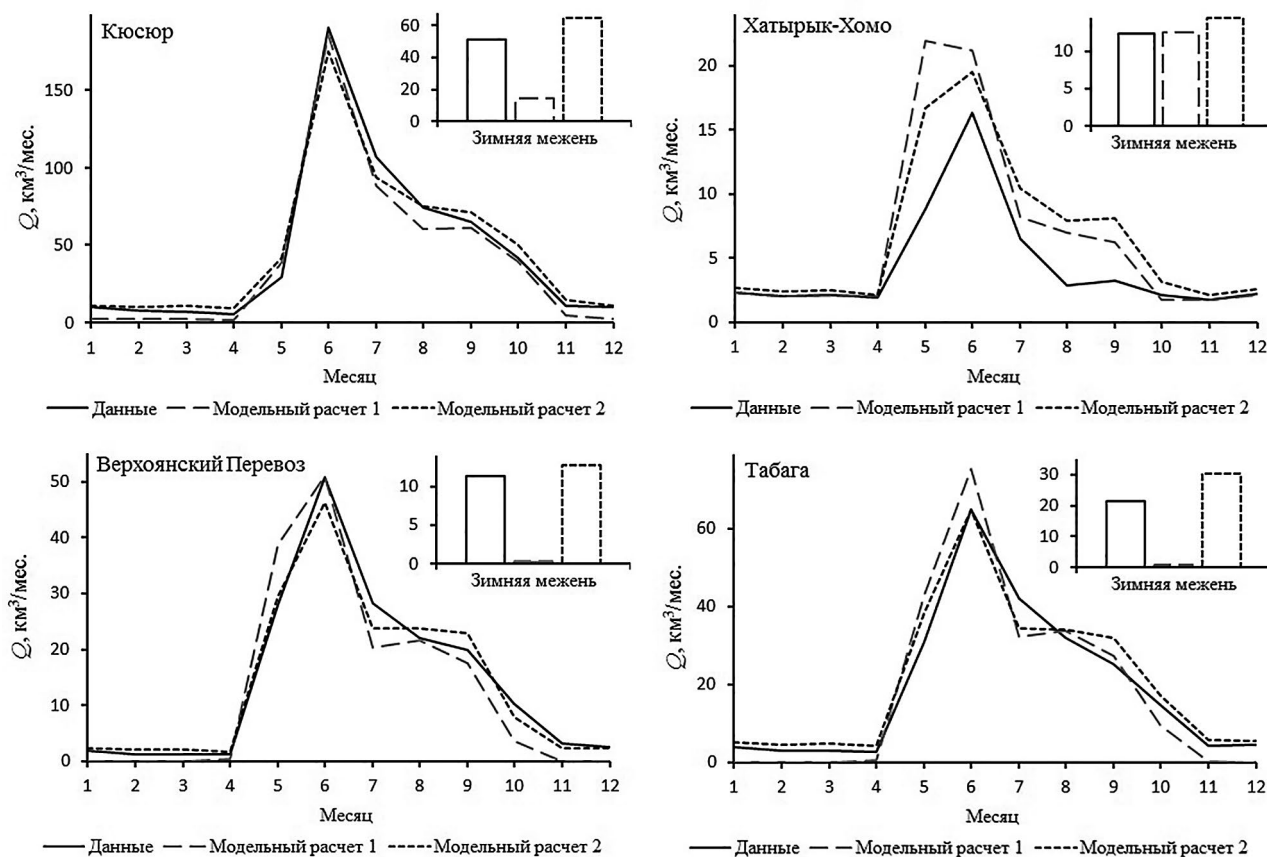


Рис. 3. Сравнение среднемесячных расходов для двух модельных расчетов с данными наблюдений на г/п Кюсюр (за период с 1980 по 2011 г.), на стокowych станциях Хатырык-Хомо (с 1980 по 2005 г.), Верхоянский Перевоз и Табага (с 1980 по 1999 г.).

всего бассейна и оптимальными наборами для каждого из четырех выделенных гидрологических районов. Калибровка параметров проводилась по данным о месячном расходе на 21-й стокowej ст. р. Лены (рис. 1) с целевой функцией эффективности Нэша–Сатклиффа. Наличие суточных данных о расходе воды на стокowej ст. Чернышевский (створ Вилюйских ГЭС–I, II) в архиве R-ArcticNET позволило смоделировать зарегулированный сток и оценить влияние водохранилища на сток вниз по течению р. Вилюй [8]. В зимний период с декабря по апрель сток увеличился за счет регулирования водохранилищем (сброс запасов воды из водохранилища) сразу для двух вариантов расчета: модельный расчет 1, когда используется единственный оптимальный набор параметров для всего бассейна р. Лены; модельный расчет 2, когда используются четыре оптимальных набора параметров для каждого из выделенных районов. Результаты модельного

расчета 2 показывают, что зимний сток воспроизводится и для других частей р. Лены, если более аккуратно подобрать модельные параметры. Если для других районов р. Лены результаты моделирования расхода находятся в неплохом согласии с данными, то для бассейна р. Вилюй модель значительно завышает расход с мая по сентябрь. Одна из причин этого – отсутствие в модели параметризации болот и озер, расположенных на территории бассейна р. Вилюй.

Оценка полученных при моделировании гидрографов стока проводилась на основе сравнения рассчитанных и наблюдаемых месячных гидрографов по трем статистическим критериям: эффективности расчета Нэша–Сатклиффа Eff [35]:

$$\text{Eff} = 1 - \frac{\sum_i (Q_{i \text{ mod}} - Q_{i \text{ obs}})^2}{\sum_i (Q_{i \text{ obs}} - \bar{Q}_{i \text{ obs}})^2};$$

систематической ошибке расчета:

$$\text{Bias} = \frac{\sum_i (Q_{i \text{ mod}} - Q_{i \text{ obs}})}{\sum_i Q_{i \text{ obs}}} 100\%;$$

$Q_{i \text{ mod}}$ и $Q_{i \text{ obs}}$ – смоделированные и наблюдаемые величины гидрографов стока, индекс i – дискретная переменная временного периода расчета; коэффициенту корреляции R как мере линейной зависимости между смоделированными и наблюдаемыми величинами расхода. Согласно работе [1], при $\text{Eff} \geq 0.9$ точность расчета указывает на хорошие характеристики модели, при $0.8 \leq \text{Eff} < 0.9$ – на удовлетворительные, < 0.8 – на неудовлетворительные соответствия модельных результатов данным наблюдений. Для систематической ошибки расчета принято: если $\text{Bias} > 0$, то рассчитанные значения завышают наблюдаемые, если $\text{Bias} < 0$, то рассчитанные значения занижают данные. Для гидрологических прогнозов обычно принято, что $|\text{Bias}| \leq 5\%$ – как хорошее качество расчетов. Для коэффициента корреляции R : чем ближе его значение к единице, тем теснее связь между рассматриваемыми характеристиками.

Для сопоставления полученных результатов расчета месячного стока по концептуальной модели с аналогичными расчетами по известной макромасштабной гидрологической модели Variable Infiltration Capacity (VIC) [32, 43] и по модели тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой SWAP (Soil–Water–Atmosphere–Plants) Института водных проблем РАН [3, 4] в табл. 3 приведены статистические критерии Eff и Bias для трех стоковых станций Лены.

Согласно табл. 3, результаты расчета месячного стока для трех стоковых станций Табага, Верхоянский Перевоз и Кюсюр оказались близкими по трем моделям. Значения критерия эффективности указывают на хорошее и удовлетворительное соответствие модельных результатов данным наблюдений.

На рис. 4 приведены модельные месячные расходы в сравнении с наблюдаемыми гидрографами для трех стоковых станций. В целом на каждой из станций модельные расходы хорошо выражают наблюдаемый сезонный цикл: низкий сток с ноября по апрель, резкий пик в июне, связанный с таянием снега, и постепенное снижение стока с августа по апрель. Дождевой сток летом намного меньше, чем весенний паводок при таянии снега. Следует отметить, что в модели недооценивается максимальный сток в некоторые годы в июне в замыкающем створе Кюсюр. Это можно связывать как с ошибками в самой модели маршрутизации реки, так и с ошибками во входных данных формирования стока.

Суточное моделирование расходов проводилось за весь исследуемый период. Ввиду отсутствия в архиве R-ArcticNET суточных данных по речному стоку на стоковых станциях Табага и Верхоянский Перевоз сравнение результатов было возможным с данными с сайта АИС ГМВО (Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов) за период с 2008 по 2011 г. [29]. Приведенные на рис. 5 суточные расходы на трех стоковых станциях, полученные по модели, находятся в хорошем согласии (с учетом неопределенности в наблюдениях) с суточными данными.

Таблица 3. Эффективность Eff и систематическая ошибка Bias (%) расчета месячных величин стока для трех стоковых станций бассейна р. Лены, полученных по моделям VIC, SWAP и концептуальной модели

Стоковая станция	Используемая модель	Расчетный период, годы	Eff	Bias
Кюсюр	VIC	1979–1999	0.92	0.5
	SWAP	1986–1999	0.93	-7.9
	Концептуальная	1980–2011	0.95	2.6
Табага	VIC	1979–1999	0.88	-9.1
	SWAP	1986–1992	0.89	2.2
	Концептуальная	1980–1999	0.93	9.8
Верхоянский Перевоз	VIC	1979–1999	0.88	0.4
	SWAP	1967–1999	0.91	-2.6
	Концептуальная	1980–1999	0.95	-3.6

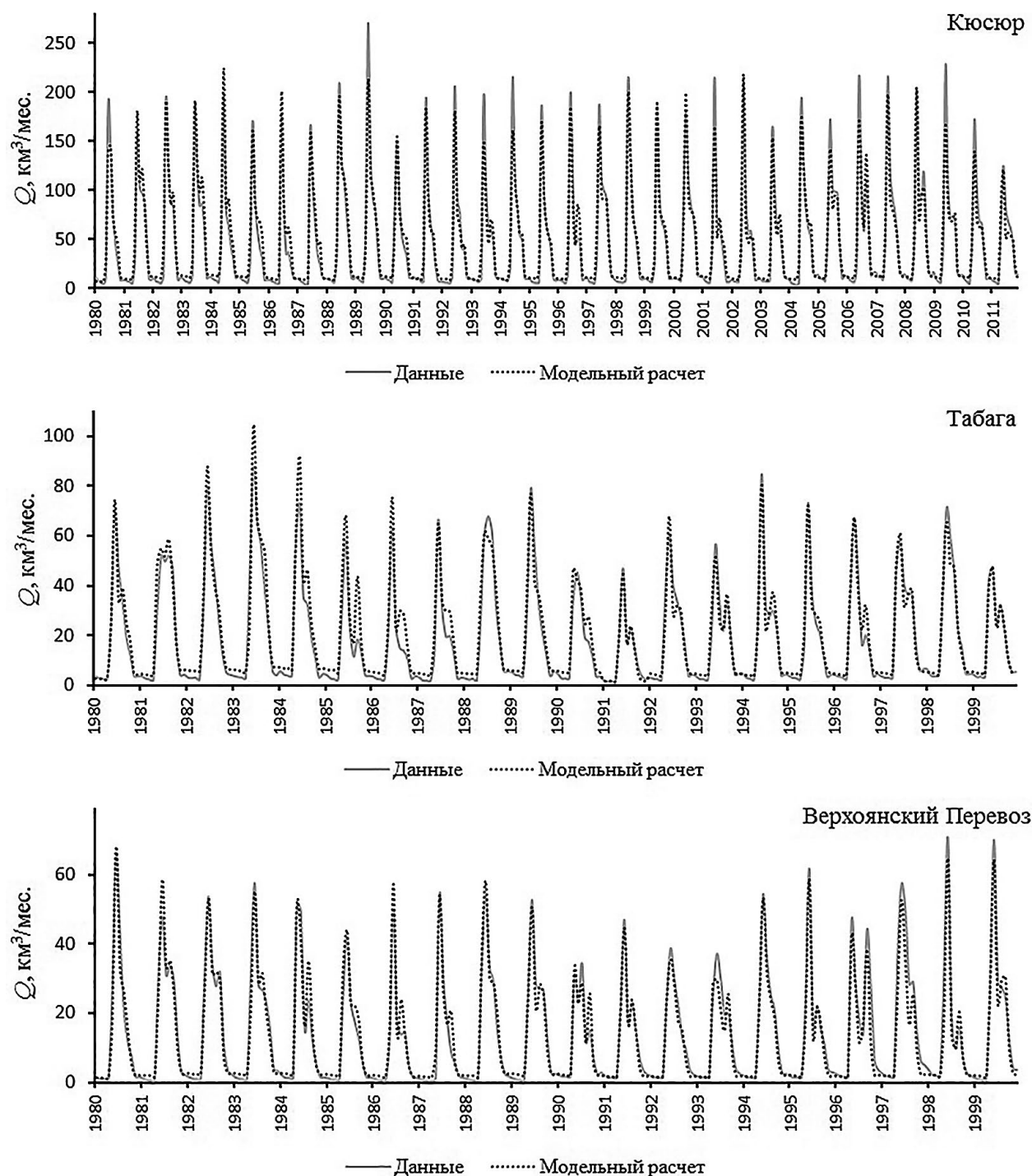


Рис. 4. Динамика наблюдаемых и рассчитанных месячных величин стока на г/п Кюсюр, Табага и Верхоянский Перевоз.

Визуальный анализ полученных результатов, а также статистических характеристик, представленных в табл. 4, показывает, что модель сравнительно хорошо воспроизводит речной сток с бассейна Лены.

На рис. 6 представлена динамика смоделированного и наблюдаемого годового стока в замыкающем створе Кюсюр за период с 1980 по 2011 г. На рисунке пунктиром обозначены линейные тренды увеличения годового объема стока для

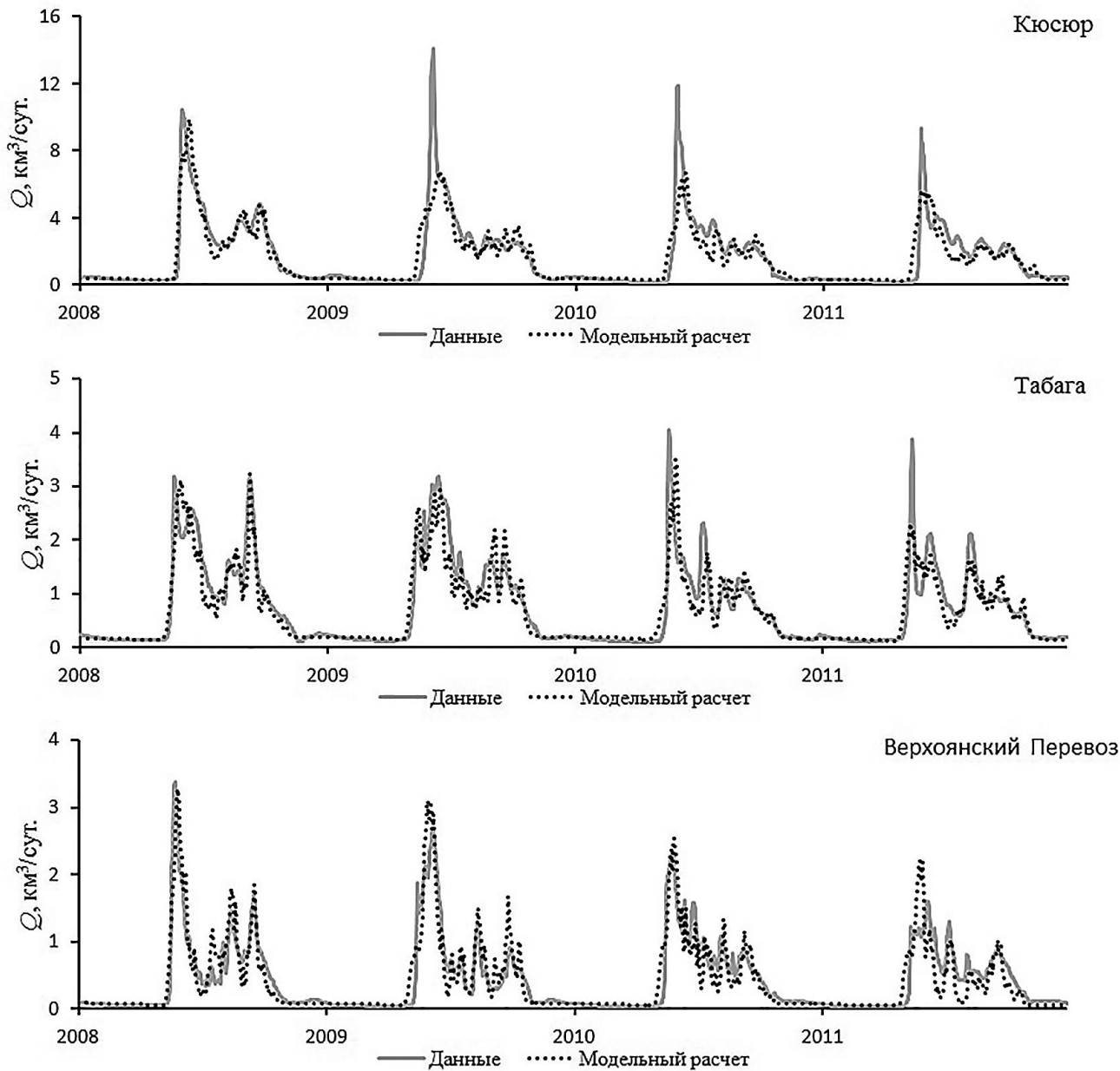


Рис. 5. Динамика наблюдаемых и рассчитанных суточных величин стока на г/п Кюсюр, Табага и Верхоянский Перевоз.

Таблица 4. Статистика (эффективность, коэффициент корреляции, систематическая ошибка) соответствия рассчитанных и наблюдаемых гидрографов стока в бассейне р. Лены

Стоковая станция	Площадь водосбора, тыс. км ²	Расчетный период	Eff	R	Bias, %
Кюсюр	2430	1980–2011	0.95	0.98	2.58
Табага	897	1980–1999	0.93	0.97	9.78
Солянка	770	1980–1999	0.92	0.96	2.45
Крестовский	440	1980–1999	0.83	0.92	3.18
Верхоянский Перевоз	696	1980–1999	0.95	0.97	-3.64
Охотский Перевоз	514	1980–1999	0.92	0.96	-0.84
Бодайбо	186	1980–1999	0.86	0.7	-3.66
Куду-Кель	115	1980–1999	0.86	0.94	14.9
Усть-Амбардаах	57.3	1980–1999	0.89	0.94	9.48

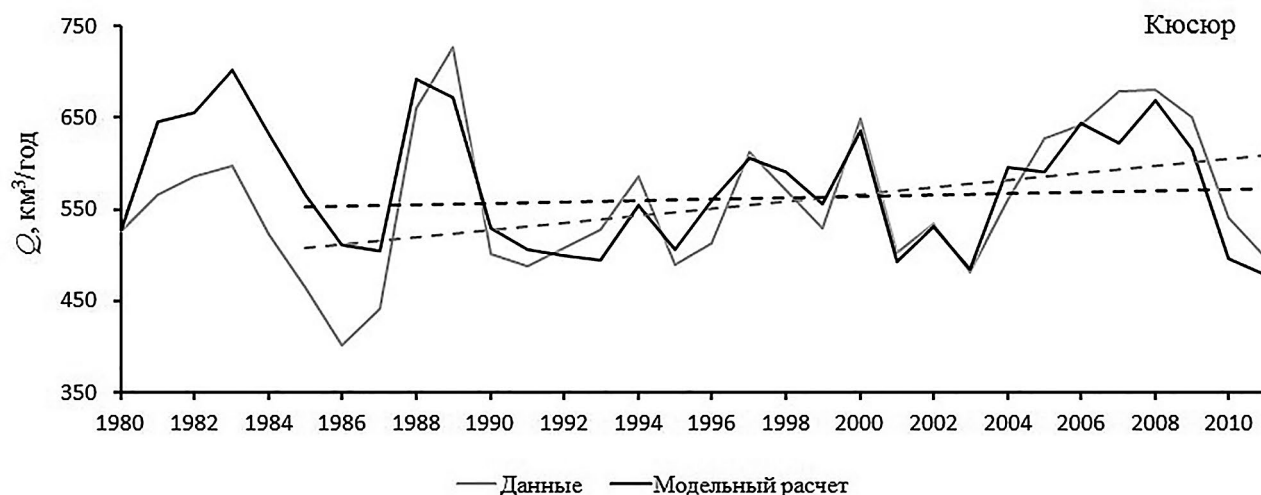


Рис. 6. Динамика наблюдаемого и модельного годового стока в замыкающем створе Кюсюр за период 1980–2011 г. Пунктирные линии – линейные тренды.

периода исследования – с 1985 по 2011 г. Было возможно получить модельный тренд только начиная с 1985 г. По данным Росгидромета, со второй половины 1980-х гг. на территории бассейна произошло резкое повышение приземной температуры воздуха и увеличения количества осадков [15], что было одной из причин увеличения речного стока.

ВЫВОДЫ

На основе новой версии концептуальной модели речного стока проведены численные эксперименты по моделированию годового сезонного цикла и межгодовой динамики речного стока с бассейна р. Лены, которые позволяют сделать следующие выводы.

Полученные результаты свидетельствуют о хорошей эффективности расчета речного стока с бассейна р. Лены по концептуальной модели гидрологического расхода. Достаточная точность определения границ и системы водотоков модельного водосбора, полученных на основе гидрологически корректной модели рельефа, способствовала воспроизведению гидрографов речного стока в бассейне Лены хорошего качества.

Более тщательная калибровка набора модельных параметров для каждого из четырех выделенных ландшафтно-гидрологических районов

повысила эффективность моделирования стока по сравнению с использованием одного оптимального набора модельных параметров без районирования территории бассейна.

Несмотря на неопределенности во входных данных о формировании стока и в данных наблюдений за расходом воды, концептуальная модель достаточно хорошо воспроизводит речной сток с использованием данных реанализа MERRA.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс гидрологических прогнозов. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 419 с.
2. Бураков Д.А. Кривые добегаания и расчет гидрографа весеннего половодья. Томск: Изд-во ТГУ, 1978. 130 с.
3. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука, 2010. 328 с.
4. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я. Физико-математическое моделирование многолетней динамики суточных значений речного стока и снегозапасов в бассейне р. Лены // Вод. ресурсы. 2016. Т. 43. № 1. С. 24–36.
DOI: 10.31857/S0321-0596464347-358
5. Дымников В.П., Лысков В.Н., Володин Е.М. Проблемы моделирования климата и его изменений // Изв. АН. ФАО. 2006. Т. 42. № 5. С. 618–636.

6. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши 1981–1990. Ч. 1. Т. 1. Новосибирск. Вып. 10; Красноярск. Вып. 12; Якутск. Вып. 16.
7. Калинин Г.П., Милоков П.И. Приближенный расчет неустановившегося движения водных масс // Тр. ЦИП. 1958. Вып. 66. 72 с.
8. Крылова А.И., Лаптева Н.А. Моделирование речного стока в бассейне реки Лена на основе гидрологически-корректной цифровой модели рельефа // Проблемы информатики. 2020. № 4. С. 75–88.
9. Кузин В.И., Лаптева Н.А. Математическое моделирование климатического речного стока из Обь-Иртышского бассейна // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 6. С. 539–543.
10. Кузин В.И., Платов Г.А., Голубева Е.Н. Влияние межгодовой изменчивости стока сибирских рек на перераспределение потоков пресной воды в Северном Ледовитом океане и в Северной Атлантике // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2010. Т. 46. № 6. С. 831–845.
11. Кучмент Л.С. Математическое моделирование речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 190 с.
12. Минеев А.Л., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Полякова Е.В. Подготовка цифровой модели рельефа для исследования экзогенных процессов северных территорий Российской Федерации // Пространство и Время. 2015. Вып. №3 (21). С. 278–291.
13. Мотовилов Ю.Г. Моделирование полей речного стока (на примере бассейна р. Лены) // Метеорология и гидрология. 2017. № 2. С. 78–88.
14. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 17. Лено-Индигирский район. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 651 с.
15. Федорова И.В., Большиханов Д.Ю., Макаров А.С., Третьяков М.В., Четверова А.А. Современное гидрологическое состояние дельты р. Лены // Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития. М.: Изд-во Московского ун-та, 2009. С. 278–291.
16. Broecker W.S. The great ocean conveyor // Oceanography. 1991. V. 4/2. P. 79–89. DOI: 10.5670/OCEANOGRAPHY.1991.07
17. Brown R.D., Robinson D.A. Northern Hemisphere spring snow cover variability and change over 1922–2010 including an assessment of uncertainty // Cryosphere. 2011. V. 5 (1). P. 219–229. DOI: 10.5194/tc-5-219-2011
18. Brutsaert W., Hiyama T. The determination of permafrost thawing trends from long-term streamflow measurements with an application in eastern Siberia // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. D22110. DOI:10.1029/2012JD018344
19. Callaghan T.V., Johansson M., Brown R.D., Groisman P.Ya., Labba N., Radionov V., Barry R.G., Bulygina O.N., Essery R.L.H., Frolov D.M., Golubev V.N., Grenfell T.C., Petrushina M.N., Razuvaev V.N., Robinson D.A., Romanov P., Shindell D., Shmakin A.B., Sokratov S.A., Warren S., Yang D. The changing face of Arctic snow cover: A synthesis of observed and projected changes // Ambio. 2011. V. 40 (1). P. 17–31. DOI:10.1007/s13280-011-0212-y
20. Church J.A., Clark P.U., Cazenave A., Gregory J.M., Jevrejeva S., Levermann A., Merrifield M.A., Milne G.A., Nerem R.S., Nunn P.D., Payne A.J., Pfeffer W.T., Stammer D., Unnikrishnan A.S. Sea Level Change // Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley. Cambridge, United Kingdom; N. Y.: Cambridge Univ. Press, 2013. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.026
21. Dai A., Trenberth K. Estimates of freshwater discharge from continents: Latitudinal and seasonal variations // J. Hydrometeorol. 2002. V. 3. P. 660–685. DOI: 10.1175/1525-7541(2002)003<0660:EOFDFC>2.0.CO;2
22. Doscher R., Vihma T., Maksimovich E. Recent advances in understanding the Arctic climate system state and change from a sea ice perspective: A review // Atmos. Chem. Phys. 2014. V. 14 (7). P. 10929–10999. DOI: 10.5194/acpd-14-10929-2014
23. Hagemann S., Dumenil L. A parametrization of the lateral waterflow for the global scale // Clim. Dyn. 1998. № 14. P. 17–31. DOI: 10.1007/S003820050205
24. Hagemann S., Dumenil L. Hydrological discharge model. Tech. Rep. 17. MPI. Hamburg, 1998. 42 p.
25. Hagemann S., Dumenil L. Validation of the hydrological cycle of ECMWF and NCEP reanalyses using the MPI hydrological discharge model // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. P. 1503–1510. DOI: 10.1029/2000JD900568
26. Hartmann D.L., Klein Tank A.M.G., Rusticucci M., Alexander L.V., Brönnimann S., Charabi Y., Dentener F.J., Dlugokencky E.J., Easterling D.R., Kaplan A., Soden B.J., Thorne P.W., Wild M., Zhai P.M. 2013: Observations: Atmosphere and Surface. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Rep. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014. P. 159–254.
27. http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/
28. <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA>

29. <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=505>
30. <http://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/index.html>
31. Kanae S., Nishio K., Oki T., Musiake K. Hydrograph estimations by flow routing modeling from AGCM output in major basins of the world // *Ann. J. Hydraulic Eng.* 1995. V. 39. P. 97–102.
32. Liang X., Lettenmaier D.P., Wood E.F., Burges S.J. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for GCMs // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99 (D7). P. 14415–14428. DOI: 10.1029/94JD00483
33. Martinec J., Rango A., Roberts R. Snowmelt Runoff Model (SRM). User's Manual / Ed. E. Comez-Landassa, M.P. Bleiweiss. 2008. 180 p.
34. McClelland J.W., Holmes R.M., Peterson B.J., Stieglitz M. Increasing river discharge in the Eurasian Arctic: Consideration of dams, permafrost thaw, and fires as potential agents of change // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. D18102. DOI: 10.1029/2004JD004583
35. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models Pt 1. A discussion of principles // *J. Hydrology*. 1970. V.10. № 3. P. 282–290.
36. Oki T., Nishimura T., Dirmeyer P. Assessment of annual runoff from land surface models using Total Runoff Integrating Pathways (TRIP) // *J. Meteorol. Soc. of Japan*. 1999. V. 77. № 1B. P. 235–255. DOI: 10.2151/jmsj1965.77.1B_235
37. Oki T., Sud Y.C. Design of total runoff integrating pathways (TRIP)—a global river channel network // *Earth Interactions*. 1998. V. 2. P. 1–36. DOI: 10.1175/1087-3562(1998)0022.3.CO;2
38. Overeem I., Syvitski J.P.M. Shifting discharge peaks in Arctic rivers, 1977–2007 // *Geogr. Ann. Ser. Phys. Geogr.* 2010. V. 92 (2). P. 285–296. DOI: 10.1111/j.1468-0459.2010.00395.x
39. Peterson B.J., Holmes R.M., McClelland J.W., Vorosmarty C.J., Shiklomanov I.A., Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Rahmstorf S. Increasing river discharge to the Arctic Ocean // *Sci.* 2002. V. 298. P. 2171–2173. DOI: 10.1126/science.1077445
40. Schiller A., Mikolajewicz U., Voss R. The stability of the North Atlantic thermohaline circulation in a coupled ocean-atmosphere general circulation model // *Climate Dynamics*. 1997. V. 13. P. 325–347.
41. Serreze M.C., Barrett A.P., Slater A.G., Woodgate R.A., Aagaard K., Lammers R.B., Steele M., Moritz R., Meredith M., Lee C.M. The large-scale freshwater cycle of the Arctic // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111: C11010. DOI: 10.1029/2005JC003424
42. Shiklomanov A.I., Lamers R.B. Record Russian river discharge in 2007 and the limits of analysis // *Environ. Res. Lett.* 2009. V.4. DOI:10.1088/1748-9326/4/4/045015
43. Su F., Adam J.C., Bowling L.C., Lettenmaier D.P. Streamflow simulations of the terrestrial Arctic domain // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. № D08112. DOI: 10.1029/2004JD005518
44. Thompson D.W.J., Wallace J.M. Annular modes in extratropical circulation. Pt I: Month-to-month variability // *J. Climate*. 2000. V. 13 (5). P. 1000–1016. DOI: 10.1175/1520-0442(2000)013<1000:AMITEC>2.0.CO;2
45. Thompson D.W.J., Wallace J.M., Hegerl G.C. Annular modes in extratropical circulation. Part II: Trends // *J. Climate*. 2000. V. 13 (5). P. 1018–1036. DOI: 10.1175/1520-0442(2000)013<1018:AMITEC>2.0.CO;2
46. Walsh J.E. Global atmospheric circulation patterns and relationships to Arctic freshwater fluxes, in *The Freshwater Budget of the Arctic Ocean* / Ed. Lewis E.L. // Kluwer, Norwell, Mass. 2000. P. 21–41.
47. Weatherly J.W., Walsh J.E. The effects of precipitation and river runoff in a coupled ice-ocean model of the Arctic // *Clim. Dyn.* 1996. № 12. P. 785–798.
48. Vihma T., Screen J., Tjernström M., Newton B., Zhang X., Popova V., Deser C., Holland M., Prowse T.D. The atmospheric role in the Arctic water cycle: Processes, past and future changes, and their impacts // *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 2016. V. 121. DOI: 10.1002/2015JG003132
49. Wigmosta M.S., Vail L., Lettenmaier D.P. A distributed hydrology–vegetation model for complex terrain // *Water Resour. Res.* 1994. V. 30. P. 1665–1679. DOI: 10.1029/94WR00436
50. Yang D., Kane D.L., Hinzman L.D., Zhang X., Zhang T., Ye H. Siberian Lena River hydrologic regime and recent change // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. № D23, 4694. DOI: 10.1029/2002JD002542