

СОПОСТАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МАЛОИЗУЧЕННОГО БАСЕЙНА РЕКИ (НА ПРИМЕРЕ КЛИМАТИЧЕСКОГО РЕГИОНА ЭРИТРЕИ)

Д.В. Козлов¹, А.А. Гебрехивот^{1,2}

E-mail: kozlovdv@mail.ru

¹ ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва, Россия

² Национальный институт высшего образования и научных исследований, Асмэра, Эритрея

АННОТАЦИЯ: Физико-математические модели бассейна реки позволяют моделировать гидрологические и биогеохимические процессы на водосборах, количественно оценивать влияние антропогенной деятельности на эти процессы. Для описания гидрологических процессов на недостаточно изученных с гидрологической точки зрения водосборах широко применяются модели дождевого стока, использующие в качестве входных параметров массивы данных реанализа.

В данном исследовании моделирование речного стока на малом водосборе, расположенном в зоне полусухого климата Эритреи, выполнялось с помощью модели количественной оценки почвенных и водных ресурсов и модели типа «осадки–сток». Задача исследования состояла в оценке эффективности моделей, обеспечивающих надежные прогнозы речного стока. Сравнение основных характеристик моделей показало, что модель количественной оценки почвенных и водных ресурсов имеет ряд преимуществ перед моделью дождевых осадков. Несмотря на то что большинство статистических оценок подтвердило достаточно высокую эффективность модели оценки почвенных и водных ресурсов, отмечены и существенные неопределенности этой модели во время процедур калибровки и валидации. Для минимизирования неопределенности модели и повышения ее эффективности необходимо интенсифицировать сбор исходной информации с пунктов наблюдений. Исследование также показало необходимость дальнейшего изучения возможных механизмов применения массивов данных реанализа в регионах с полусухим климатом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: массив данных реанализа, модель водосбора, модель дождевых осадков, бассейн реки, оценка водных ресурсов.

© Козлов Д.В., Гебрехивот А.А., 2021

ВВЕДЕНИЕ

Физико-математические гидрологические модели применяются для анализа и прогнозирования гидрологических и биогеохимических процессов в пределах речных водосборов, включая формирование стока, наносов, химических веществ, миграцию питательных веществ и поведение гидробиоты, а также позволяют количественно оценить антропогенное влияние на эти процессы [1–11]. Такие модели оказались исключительно полезными в понимании процессов динамического взаимодействия климатических и гидрологических характеристик речного бассейна [1–3, 6–9] и в получении недостающей исходной информации для решения задач, связанных с использованием и управлением водными и земельными ресурсами [9, 10, 12]. Одним из широко применяемых расчетных инструментов является модель «осадки–сток» [4, 5] с сосредоточенными или распределенными параметрами. Однако какая бы модель формирования дождевого стока не была выбрана для решения той или иной задачи, она остается лишь приближенным представлением реальных гидрологических процессов [11].

Результативность моделей в значительной степени зависит от доступности и достоверности данных о речном стоке [3, 8, 9]. Эффективность моделей обычно ниже и неопределеннее в регионах, недостаточно обеспеченных данными натурных наблюдений. Речные бассейны в мире не только не охвачены наблюдениями или плохо изучены, на многих из них происходит существенное сокращение действующей наземной гидрометрической сети [9, 13–15].

Исследования, проведенные в Восточной Африке [16, 17], показали, что политическая и социально-экономическая обстановка в этой части африканского континента не способствует активному сбору натурной гидрологической информации. Более того, эти проблемы усугубляются последствиями антропогенных и климатических изменений на территории речных бассейнов [18]. В последние десятилетия для разных регионов, характеризующихся отсутствием гидрометрических данных, были проведены исследования, определившие возможности использования спутниковых измерений для гидрологических и экологических исследований [13, 19–21]. В большинстве из них широко использовались физически обоснованные математические модели с распределенными и полураспределенными параметрами, такие как SWAT и MIKE 11-NAM [20, 22–27].

Применение массивов данных глобального реанализа климата для моделирования речного стока показало, что результативность модели зависит от источника и разрешения входных массивов данных, а также географического положения территории. Например, массивы данных системы климатических прогнозов (CFSR) Национального центра прогнозирования

окружающей среды США и ERA-Interim применялись для моделирования суточных и месячных расходов с использованием SWAT-модели речного бассейна, расположенного в Центральном Судано-Сахельском регионе [22]. Исследования показали, что массив данных ERA-Interim дал лучшие результаты по сравнению с CFSR. Аналогично использование SWAT и MIKE 11-NAM в условиях Южной Африки и Эритреи [23–25] показало низкую статистическую репрезентативность между данными об осадках из массива CFSR и наземными измерениями интенсивности дождя, а также общий дисбаланс воды. В [20] проведена оценка применимости данных CFSR для моделирования гидрологических процессов в границах пяти речных бассейнов с различными гидролого-климатическими условиями в Эфиопии и США, обнаружившая, что использование входных переменных из массива данных CFSR обеспечивает моделирование речного стока не хуже, чем использование входной информации с наземных метеостанций.

Таким образом, несмотря на то что традиционные гидрометеорологические исходные данные наземных наблюдений остаются наиболее точными и надежными источниками входной информации, для моделирования стока в условиях неизученных или малоизученных речных бассейнов предлагается применять в качестве альтернативных исходных данных массивы реанализа.

В моделях с распределенными параметрами используются данные, которые напрямую связаны с физическими характеристиками речного водосбора и действуют в рамках распределенной структуры для учета пространственной изменчивости как физических характеристик, так и метеорологических условий. Такие модели описывают гидрологические процессы и их взаимодействие в том месте, где они происходят на речном водосборе и, следовательно, предполагают устранение недостатков традиционных моделей дождевого стока [7]. Пожалуй, самой широко используемой моделью является SWAT (Soil & Water Assessment Tool) модель – «концептуальная масштабируемая модель речного бассейна с непрерывной функцией времени» [28], работающая с суточным временным шагом и получившая мировое признание [29–38].

С помощью SWAT и глобальных моделей климата изучались вопросы формирования речного стока на территориях России [4, 27], США [31], Украины [38], гидрологическая обстановка в странах Африки [32], в т. ч. влияние изменения климата на наличие пресной воды на африканском континенте [33]. Тем не менее, в некоторых исследованиях [30] отмечались определенные недостатки SWAT-моделирования, особенно в части сравнения результатов моделирования с многолетними натурными данными суточного стока и/или сброса загрязняющих веществ.

Модель SWAT является комплексной с полураспределенными параметрами, она требует большого объема входных данных, что затрудняет ее параметризацию и калибровку. Для SWAT-модели созданы специальные расчетные алгоритмы, в основе которых используется метод многомерной математической оптимизации, в т. ч. программный модуль SWAT-CUP [29, 34]. SWAT-CUP разработан с целью автокалибровки и анализа неопределенности для модели SWAT и объединяет пять разных алгоритмов оптимизации: последовательный анализ всех возможных источников неопределенностей SUFI-2 [38], генетический алгоритм роевого интеллекта PSO [36], а также методы общей вероятностной оценки неопределенностей GLUE [37], параметрического решения (ParaSol) [38] и Монте-Карло с марковскими цепями (MCMC), что позволяет использовать для калибровки, валидации и оценки чувствительности модели различные целевые функции и критерии. Преимущество SWAT-CUP заключается в том, что он объединил несколько процедур калибровки и анализа неопределенностей в один интерфейс, сделав процедуру калибровки модели более понятной и высокоскоростной [35, 38]. Несмотря на то что алгоритм SUFI-2 оказался достаточно эффективным для крупномасштабных моделей, проблема эквивалентности, по-прежнему, остается одной из наиболее острых для калибровки параметров гидрологической модели [39].

ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ, МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Пространственно-временная изменчивость климатических и физико-географических характеристик речных бассейнов Эритреи значительна. Водосборы характеризуются интенсивным землепользованием и существенными изменениями климата. Большинство речных бассейнов не имеют регулярной сети наблюдений или характеризуются дефицитом высококачественных наземных данных. При таких обстоятельствах разработка моделей и схем планирования управлением водными ресурсами остается сложной задачей [40, 41]. Недавнее исследование вопросов управления сбором и обработкой гидрометеорологических данных [41] показало, что текущая водохозяйственная практика на общегосударственном уровне не вселяет оптимизма, скорее, ситуация ухудшается. Несмотря на проблемы с мониторингом водных объектов, государство продолжает реализацию национальных мероприятий по развитию водного хозяйства Эритреи, включая строительство новых водохранилищ, водозаборных сооружений, расширение сельскохозяйственного производства и инфраструктурное развитие населенных пунктов [40, 42]. Учитывая отсутствие качественных наземных данных натурных наблюдений, с одной стороны, и продолжающуюся интенсивную водохозяйственную деятельность, с другой, применимость спутниковых климатических данных становится своевременной

и актуальной задачей. Поэтому в работе [25] была оценена применимость сосредоточенной концептуальной модели «осадки–сток» (на основе MIKE 11-NAM) для моделирования речного стока в бассейне р. Мереп-Гаш с использованием данных реанализа CFSR. Выводы показали необходимость проведения дальнейших исследований по преобразованию CFSR-информации в более реалистичную, оценки данных реанализа из других источников для различных временных масштабов в контексте той же модели «осадки–сток» и эффективности иных программных комплексов в сравнении с MIKE 11-NAM.

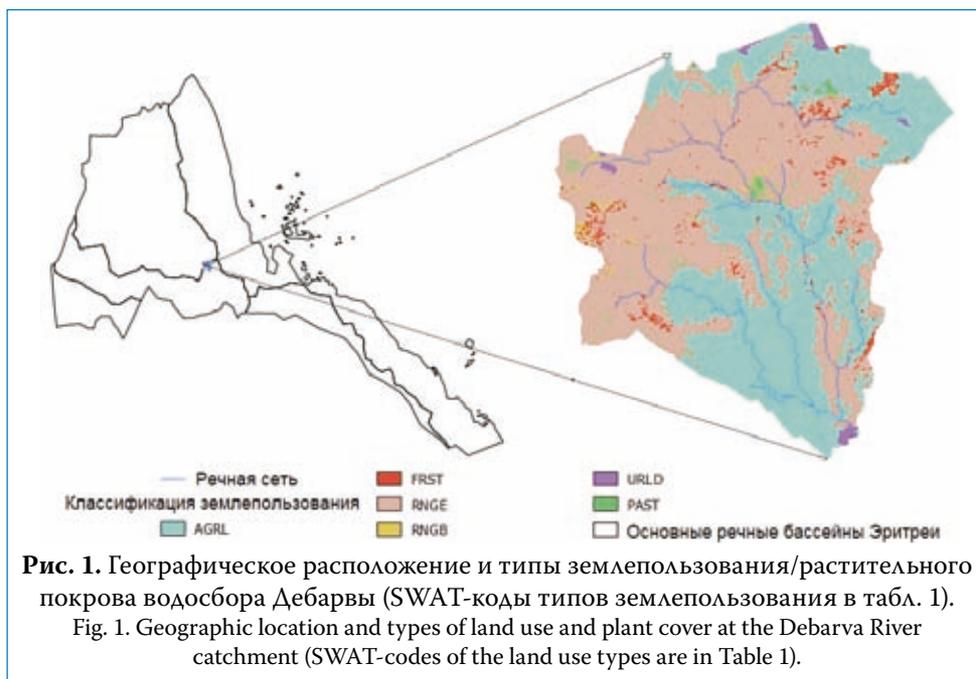
В рамках данного исследования использован программный комплекс SWAT для создания гидрологической модели суббассейна Дебарва – верховья бассейна р. Мереп-Гаш с месячным расчетным временным интервалом (проект «Дебарва SWAT»), а также оценена эффективность программного комплекса SWAT в сравнении с MIKE 11-NAM для целей моделирования речного стока в условиях рассматриваемого суббассейна.

Исследование гидрологических процессов в вышеуказанных условиях потребовало запуска моделей SWAT и MIKE 11-NAM. Построение модели MIKE 11-NAM, детали выполненных процедур и основные принципы ее работы изложены в [25]. Ниже обсуждаются, в основном, положения и особенности реализации модели SWAT. Оценки результатов моделирования как с помощью SWAT, так и MIKE 11-NAM, выполнялись с использованием различных методов математической статистики.

Объект моделирования – водосбор Дебарвы, устье которой находится недалеко от г. Дебарва в южном регионе Эритреи. Это суббассейн, откуда берет свое начало главная река бассейна Мереп-Гаш (рис. 1). Общая площадь водосбора составляет примерно 200 км² с диапазоном высот от 1905 м до 2550 м над средним уровнем моря. Половина водосбора имеет уклон менее 10 %, тогда как остальная водосборная площадь – более 10 %. Среди типов почвы преобладают глинистые (Eutric Nitosols, 75 %) и суглинистые (Humic Cambisols, 25 %), подпадающие под третью гидрологическую группу (C), т. е. почвы, характеризующиеся медленной инфильтрацией и малой скоростью инфильтрации при сильном увлажнении, а также наличием слоя водоупора, имеющего умеренно мелкую или мелкозернистую текстуру. Преимущественные типы землепользования – пастбища (54 %), пашни и сады (41 %) (табл. 1).

Водосбор Дебарвы находится во влажной высокогорной зоне, где температура воздуха колеблется от 0 °С до 32 °С, а среднее годовое количество осадков составляет 547 мм. Климат на водосборе характеризуется как умеренный, наиболее холодным является период декабрь–январь, а наиболее жарким – март–апрель. Максимальное количество осадков выпадает в

летний сезон, особенно в июле и августе, при среднемесечном количестве осадков 185 мм и 175 мм соответственно. На водосборе имеется одна глобальная метеостанция и одна устьевая гидрометрическая станция для измерения расхода воды.



Модель исследуемого водосбора создана с использованием свободно доступных данных (табл. 2), включающих цифровую карту рельефа (DEM), информацию о землепользовании и растительном покрове, свойствах почвы и сведений о погоде (осадках, максимальной и минимальной температуре воздуха, относительной влажности, скорости ветра и солнечной радиации), а также дополнительной информации, предоставленной Департаментом водных ресурсов Министерства земельных, водных ресурсов и окружающей среды Эритреи.

SWAT модель делит исследуемую территорию на суббассейны, которые подразделяются на элементарные вычислительные гидрологические единицы реагирования HRU – основную вычислительную единицу модели, характеризующуюся внутренней однородностью почвенного покрова, элементов рельефа, видов землепользования и растительного покрова [34]. Расчет водного баланса на водосборе выполнен в каждой HRU. Для оценки дождевого стока в условиях малоизученных с гидрологической точки зрения речных бассейнов использован метод «числа кривой стока SCS».

Таблица 1. Типы землепользования / растительного покрова на водосборе р. Дебарвы

Table 1. Types of land use/ plant cover at the Debarva River catchment

Цифровые коды	Типы	SWAT – коды	Описание	Площадь, га	% от площади водосбора
10	Пашня и сады (сельхозугодья)	AGRL	Земли, используемые для сельского хозяйства	8170	40,85
20	Леса	FRST	Земли, покрытые деревьями, с растительным покровом более 30%	516	2,58
30	Пастбища	RNGE	Земли, покрытые естественной травой с покровом более 10 %	10 804	54,02
40	Кустарник	RNGB	Земли, покрытые кустарником с покровом более 30 % (степи)	178	0,89
80	Урбанизированные территории с низкой плотностью населения	URLD	Земли, измененные в результате антропогенной деятельности, включая водные объекты	120	0,60
90	Неиспользуемые территории	PAST	Земли с растительным покровом менее 10 %, в т. ч. пустыни, голые скалы, солонцы	212	1,06

Таблица 2. Описание входных данных, использованных в проекте «Дебарва SWAT»

Table 2. Description of input data used in the «Debarva SWAT» project

Типы данных	Разрешение	Источник данных
Цифровая карта рельефа (DEM)	Пространственное разрешение 1 угловая сек (~30 м)	Спутниковая (радарная) интерферометрия - съемка по проекту «Топографической миссии Shuttle Radar» (SRTM)
Почвы	5 км	Почвенная карта мира в масштабе 1:5000000 ФАО-ЮНЕСКО (FAO-UNESCO)
Землепользование	30 м	КНР для ООН: Глобальный общедоступный геоинформационный продукт (GlobeLand30)
Климат	38 км	Национальный центр прогноза окружающей среды (NCEP, США), реанализ CFSR
Речной сток	наблюдения	Департамент водных ресурсов Эритреи

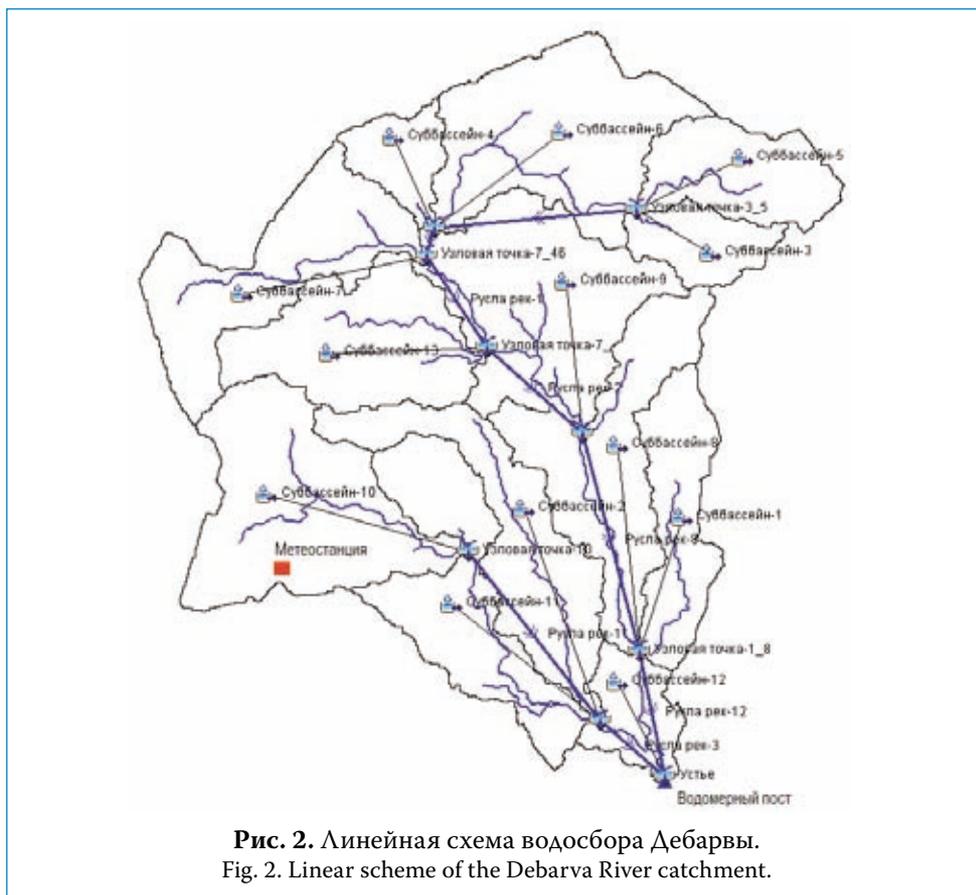
Потенциальная эвапотранспирация оценена с помощью уравнения Пенмана-Монтейта, а распределение воды в речном русле моделируется с помощью подпрограммы маршрутизации переменных хранилищ. Интерфейс QSWAT 2012 используется для настройки и параметризации модели.

На основе цифровой карты рельефа и имеющейся сети водотоков выбрана изогелия (единичная пороговая площадь) водосбора в 3 км²: весь речной бассейн был поделен на 13 суббассейнов, которые в дальнейшем разделены на 61 HRU. Схематическое изображение линейной модели бассейна показано на рис. 2.

В модель в качестве входной информации введены все необходимые климатические переменные на основе CFSR – количество осадков, минимальная и максимальная температуры, относительная влажность, средняя скорость ветра и информация о солнечной радиации, а также данные о суточных и месячных расходах воды на водосборе. За расчетный временной период моделирования принят интервал с 1994 по 2010 гг. Примерно две трети данных использовались для калибровки, остальные – для валидации (проверки). Начальный и конечный прогоны выполнены с помощью SUFI-2. В расчетах не рассматривались точечные и распределенные источники загрязнения, донные отложения, азотные и фосфорные нагрузки, регулирование водохранилищами, а также пространственная изменчивость некоторых других параметров.

Успешное применение гидрологических моделей во многом зависит от калибровки и анализа чувствительности параметров [29, 43]. Процессы калибровки и валидации эффективно задействуются только с данными натурных наблюдений. Особенно важна для этих процедур информация об измеренном речном стоке – доступных суточных и месячных данных о расходах в устьевом створе Дебарвы. Эти процедуры выполнены с помощью SUFI-2 в модуле SWAT-CUP [44].

Алгоритм SUFI-2 в начале вычислений охватывает широкий диапазон неопределенностей параметров, в результате чего данные наблюдений изначально попадают в 95 % прогноз неопределенностей (95PPU доверительной вероятности). 95PPU – это интервал между 2,5 % и 97,5 % суммарного распределения выходной моделируемой переменной (расхода воды), полученной с помощью эффективного алгоритма выборки по методу латинского гиперкуба, исключая 5 % наихудших симуляций [38]. Затем с каждым итерационным шагом интервал неопределенностей сужается и одновременно проверяются два индекса, определяющие степень согласия и неопределенность модели: R-фактор (процент результатов измерений, попавших в 95PPU), колеблющийся в диапазоне от 0 до 1, и R-фактор (отношение средней ширины интервала 95PPU к стандартному отклонению соответствующей измеряемой величины) [38, 44].



В идеальной ситуации, когда результаты моделирования на 100 % соответствуют данным наблюдений, R-фактор = 1. Значение R-фактора от 0,70–0,75 и выше считается достаточным для результатов моделирования речного стока. R-фактор = 1 и R-фактор = 0 – это итерация, точно совпадающая с результатами измерений. Желательным значением R-фактора, определяемым по уравнению (1), были бы величины меньше 1,50 [44].

$$R - factor_j = \frac{\frac{1}{n_j} \sum_{t_i=1}^{n_j} (x_s^{t_i, 97.5\%} - x_s^{t_i, 2.5\%})}{\sigma_{oj}}, \quad (1)$$

где $x_s^{t_i, 97.5\%}$ и $x_s^{t_i, 2.5\%}$ – верхняя и нижняя границы 95PPU доверительного интервала на временном шаге t и моделировании i ;

n_j – количество точек данных;

σ_{oj} – стандартное отклонение j -й наблюдаемой переменной.

Эти два фактора позволяют судить о надежности калибровки и валидации модели. Только после достижения в последней итерации приемлемых значений R-фактора и P-фактора диапазоны параметров могут рассматриваться как калиброванные.

Алгоритм оптимизации SUFI-2 позволяет использовать различные целевые функции [29, 35, 39], из которых для процессов калибровки и валидации применялась эффективность расчета стока по Нэшу и Сатклиффу NS: NS=1 – оптимальное значение показателя; при $0,75 < NS \leq 1$ – качество показателя очень хорошее; $0,65 < NS \leq 0,75$ – хорошее; $NS \leq 0,4$ – неудовлетворительное. В качестве дополнительных критериев для статистических оценок модели [45, 46] использованы коэффициент детерминации R^2 (если $0,7 < R^2 < 1$ – качество критерия очень хорошее, $0,6 < R^2 < 0,7$ – хорошее; $0,5 < R^2 < 0,6$ – удовлетворительное, $R^2 < 0,5$ – неудовлетворительное), модифицированный коэффициент детерминации (bR^2), систематическая ошибка расчета стока – процентное отклонение PBIAS ($PBIAS < \pm 10$ – очень хорошее, $PBIAS \geq \pm 25$ – неудовлетворительное) и отношение среднеквадратичной ошибки к стандартному отклонению измеренных данных RSR ($0 \leq RSR \leq 0,5$ – очень хорошее, $0,5 < RSR \leq 0,6$ – хорошее, $RSR > 0,7$ – неудовлетворительное), соответствующие уравнения которых представлены формулами (2–6).

$$R^2 = \frac{\left[\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m) (Q_{s,i} - \bar{Q}_s) \right]^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2 \sum_i (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2}, \quad (2)$$

$$bR^2 = \begin{cases} |b|R^2 & \text{if } |b| \leq 1 \\ |b|^{-1}R^2 & \text{if } |b| > 1 \end{cases}, \quad (3)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_i (Q_m - Q_s)_i^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2}, \quad (4)$$

$$PBIAS = 100 \times \frac{\sum_i (Q_m - Q_s)_i}{\sum_i Q_{m,i}}, \quad (5)$$

$$RSR = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_s)_i^2} / \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2}, \quad (6)$$

где Q – переменная (расход воды);

m, s – наблюдаемые (реальные) и моделируемые переменные;

b – наклон линии регрессии между наблюдаемыми и моделируемыми переменными;

i – i -е наблюдаемые или смоделированные значения.

Процедура SUFI-2 допускает до 1000 итераций (запусков) за один полный итерационный прогон и использует P -значение и t -статистику для анализа чувствительности выбранных параметров с целью определения их приоритетности: большой t -stat и более низкое P -значение указывают на более высокую чувствительность параметра и наоборот. Выбор из большого множества параметров тех, которые наиболее сильно влияют на гидрологические процессы в рассматриваемом речном бассейне, был непростой задачей, поскольку процедуры параметризации зависят от многих факторов, таких как топография, почвенный покров, типы землепользования/растительности, размеры водосбора, местоположение.

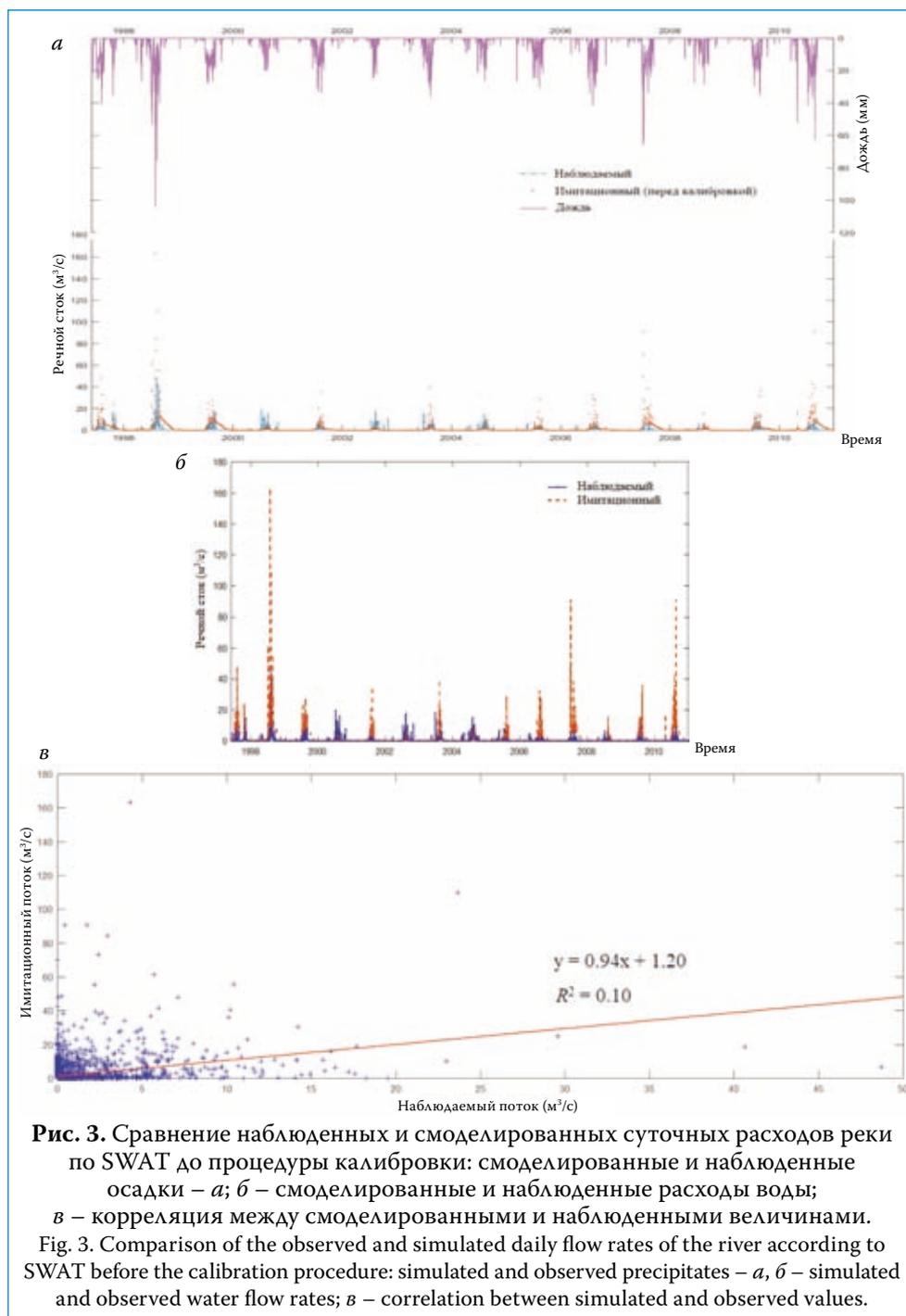
Исследуемый водосбор представляет собой малоизученный речной бассейн с ограниченным объемом данных натуральных наблюдений. SWAT содержит большое число переменных параметров, задействованных в процессе калибровки. В таких условиях одновременная калибровка всех параметров вызывает большие трудности. Поэтому вначале требуется выделение наиболее значимых параметров. Для этого в рамках процедуры SUFI-2 проведен анализ чувствительности 15 параметров (табл. 3), в результате чего выделены те из них, что оказывают наибольшее влияние на формирование речного стока на исследуемом водосборе. После ряда испытаний с использованием SWAT-CUP установлено, что к таким чувствительным параметрам относятся CN, SHALLST и RCHRG_DP.

В результате настройки модели SWAT до калибровки в SWAT-CUP получено графическое представление картины осадков из массива CFSR и соответствующий смоделированный гидрограф суточного стока, а также гидрограф наблюдаемого стока в устьевом створе рассматриваемого водосбора (рис. 3). График выпавших осадков и смоделированный сток качественно совпадают, т. е. большее количество осадков приводит к формированию больших расходов речного стока и наоборот (рис. 3 а). С другой стороны, очевидно и значительное несоответствие между смоделированным и наблюдаемым стоком (рис. 3 б, в), что может негативно повлиять на результаты калибровки модели.

Калибровка и валидация модели ограничивались месячными значениями расходов. Результаты вычислений с использованием модуля SUFI-2 для этих процессов графически представлены «зеленой областью» 95 % (95PPU) прогноза неопределенности (рис. 4, рис. 5). Далее определяли индексы P -фактора и R -фактора. Расчетные значения P -фактора составили 0,34 и 0,43 для калибровки и валидации соответственно. Другими словами, только 34 % и 43 % наблюдаемых расходов охвачены диапазоном доверительной вероятности 95 PPU в периоды калибровки (1997–2001 и 2007–2010 гг.) и валидации (2002–2006 гг.).

Таблица 3. Перечень и анализ калибровочных параметров SWAT
Table 3. List and analysis of the SWAT calibration parameters

Параметр	Описание	Общая чувствительность		Расчетные диапазоны		
		t-stat	P-значение	Установленный	мин.	макс.
CN2	Номер зависимости «осадки–поверхностный сток» для типов земель	-32,53	0,00	-0,29	-0,30	0,10
SHALLST	Начальный уровень воды в неглубоком водоносном горизонте, мм	-7,69	0,00	3308	1000	5000
RCHRG_DP	Коэффициент перколяции в нижний водоносный горизонт	-5,62	0,00	0,06	0,00	0,80
ALPHA_BF	Фактор меженного стока, 1/сут	-3,44	0,00	0,30	0,00	0,50
EPSO	Коэффициент биопоглощения растением	-1,83	0,07	0,90	0,30	1,00
CH_N2	Коэффициент Маннинга «n» для основного русла	-1,30	0,20	0,24	-0,01	0,30
SURLAG	Фактор запаздывания поверхностного стока	-0,21	0,84	21,46	6,00	24,00
REVPMPN	Пороговый уровень залегания воды в неглубоком водоносном горизонте, необходимый для просачивания в глубокий водоносный горизонт, мм	0,69	0,49	355,6	0,00	400
OV_N	Коэффициент Маннинга «n» (по суше) для поверхностного стока	0,82	0,41	0,54	0,10	1,00
GW_DELAY	Время запаздывания грунтовых вод, сут	1,49	0,14	468,85	150	500
CH_K2	Эффективная гидравлическая проводимость в аллювии основного русла, мм/ч	1,55	0,12	190,30	100	400
FFCB	Начальные запасы влаги в почве (в долях от влагоемкости поля)	2,22	0,03	0,38	0,20	1,00
ESCO	Почвенный компенсационный фактор испарения	2,40	0,02	0,25	0,20	1,00
GW_REVAP	Коэффициент «revap» подземных вод	4,73	0,00	0,09	0,02	0,20
GWQMN	Пороговый уровень воды в неглубоком водоносном горизонте, необходимый для возникновения обратного тока воды, мм	6,58	0,00	4982,50	1500	5000



С другой стороны, R-фактор оказался равным 2,56 и 3,48 для периодов калибровки и валидации, т. е. откалиброванные и проверенные значения R-фактора и R-фактора намного меньше (или больше) рекомендованных значений [45] ($>0,70$ или 70% и $<1,50$) соответственно, что говорит о неточном совпадении расчетной итерации с результатами натуральных измерений.

Оценка эффективности (качества) модели SWAT выполнялась с помощью пяти целевых функций (табл. 4), из которых эффективность Нэша-Сатклиффа (NS) принималась в качестве основной. Остальными критериями были R^2 , bR^2 , PBIAS и RSR. Результаты расчетов показали, что значения почти всех критериев за период калибровки (R^2 , bR^2 и $NS > 0,7$ и $RSR < 0,6$) находились в приемлемых оценочных диапазонах [29]. Другими словами, статистические критерии указывают на хорошее соответствие наблюдаемого и смоделированного стока. Напротив, соответствующие значения указанных критериев для периода валидации (R^2 и $bR^2 < 0,40$, $NS < 0,5$ и $RSR > 0,7$) оказались неудовлетворительными с точки зрения оценки качества.

Процентное отклонение PBIAS характеризует среднюю тенденцию смоделированных результатов быть большими или меньшими, чем реальные (наблюдаемые) данные. В идеале значение PBIAS равно 0. Положительные значения PBIAS показывают занижение смоделированных данных, отрицательные – их переоценку [38, 47]. Вычисленные значения PBIAS в целом подтвердили неудовлетворительную оценку модели в период калибровки и приемлемый результат в период валидации, показав переоценку модельных данных на 42% и $9,8\%$ в периоды калибровки и валидации соответственно.

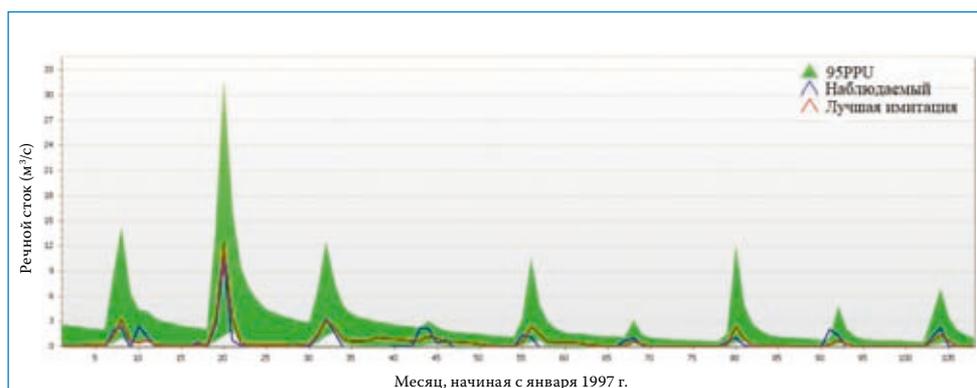


Рис. 4. Сравнение наблюдаемого и смоделированного ежемесячного расхода речного стока за период калибровки, 1997–2001 гг., 2007–2010 гг.

Fig. 4. Comparison of the observed and simulated monthly river water runoff during the calibration period, 1997–2001; 2007–2010.

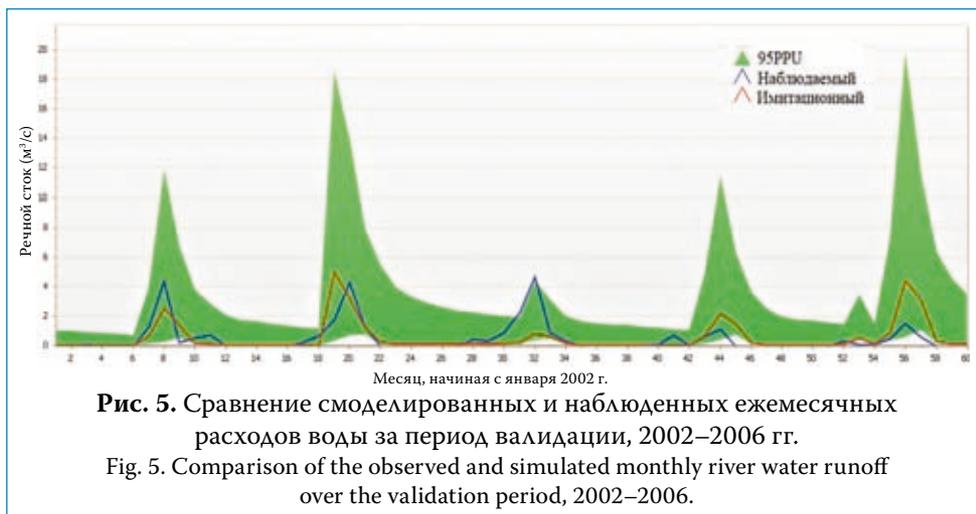


Рис. 5. Сравнение смоделированных и наблюдаемых ежемесячных расходов воды за период валидации, 2002–2006 гг.

Fig. 5. Comparison of the observed and simulated monthly river water runoff over the validation period, 2002–2006.

Таблица 4. Сводка значений критериев оценки качества калибровки и валидации модели для процедуры SUFI-2 в устьевом створе водосбора Дебарва
Table 4. Summary of the criteria of the calibration/validation quality assessment for the SUFI-2 procedure at the Dearva River mouth range

Процесс	Критерий неопределенности		Целевая функция				
	P -фактор	R -фактор	R^2	bR^2	NS	$PBIAS$	RSR
Калибровка	0,34	2,56	0,80	0,79	0,73	-42,0	0,52
Валидация	0,43	3,48	0,32	0,18	0,12	-9,8	0,94

Далее выполнялась оценка выбора целевой функции на эффективность модели путем запуска модуля SUFI-2. Для этого были протестированы три целевые функции: NS , $PBIAS$ и R^2 (рис. 6). Графическое представление и вычисленные значения критериев (табл. 5) показывают, как выбор целевой функции повлиял на калибровочное решение. Каждая целевая функция дала свои уникальные решения (это подтверждается другими исследованиями [29, 34, 35, 39]), из которых видна переоценка (завышение) смоделированных расходов, особенно пиковых и межженных значений.

Таким образом, эффективность модели SWAT для водосбора Дебарва оказалась не в полной мере удовлетворительной, что подтверждено статистическими оценками (табл. 4). Основной причиной неудовлетворительных результатов, вероятно, являются ошибки в входной информации, в первую очередь, в данных о климатических характеристиках (например, осадках). Ранее, в работах [17, 25], отмечалось значительное превышение значений атмосферных осадков, полученных на основе массива данных CFSR, в сравнении с результатами наземных измерений.

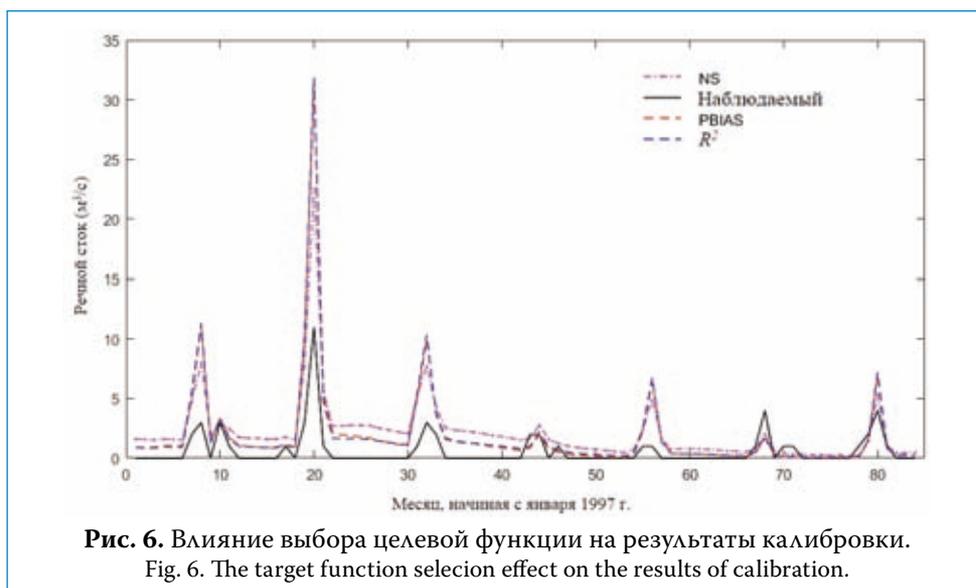


Рис. 6. Влияние выбора целевой функции на результаты калибровки.
Fig. 6. The target function selection effect on the results of calibration.

Таблица 5. Влияние выбора целевой функции на результаты калибровки
Table 5. The target function selection effect on the results of calibration

Тип функции	Критерий неопределенности		Целевая функция				
	<i>P</i> -фактор	<i>R</i> -фактор	R^2	<i>NS</i>	bR^2	<i>PBIAS</i>	<i>RSR</i>
<i>NS</i>	0,21	2,03	0,71	-1,41	0,44	-225,4	1,55
<i>PBIAS</i>	0,05	0,48	0,76	-3,14	0,33	-185,39	-0,58
R^2	0,05	0,35	0,76	-3,31	0,32	-193,37	-0,61

Далее обсудим результаты моделирования речного стока в бассейне Дебарва с использованием модели MIKE 11-NAM с полураспределенными параметрами. MIKE 11-NAM имеет меньшее количество (девять) основных параметров, чем модель SWAT, описание которых для процессов калибровки и валидации приведено в табл. 6.

Полученные с использованием MIKE 11-NAM результаты указывают на нелогичность значений некоторых из параметров (например, коэффициента стока CQOF). Рассматриваемый водосбор характеризуется гористой местностью с низкой скоростью инфильтрации из-за плохих почвенных условий и наличия растительного покрова. На водоразделах наблюдаются внезапные наводнения с меньшими ординатами гидрографа и небольшими или почти нулевыми меженными расходами [40]. В этой ситуации значение коэффициента стока, равное 0,10, представляется нелогичным.

Таблица 6. Параметры модели MIKE 11-NAM

для процедур калибровки и валидации

Table 6. Parameters of MIKE 11-NAM model for calibration and validation procedures

Параметр	Описание	Установ- ленное значение	Нижний предел	Верхний предел
U_{max}	Верхний предел количества воды в суммарном запасе поверхностных вод, представляющий сумму перехваченной воды растительностью, объема воды в понижениях и в поверхностных водных объектах на водосборе, мм	20	10	20
L_{max}	Максимальное содержание воды в под-поверхностной зоне аккумулярования, представляющее влажность почвы, откуда растения забирают воду на транспирацию, мм	300	100	300
$CQOF$	Коэффициент стока показывает разделение осадков на поверхностный сток и инфильтрацию	0,10	0,10	1,00
CK_{IF}	Постоянная времени для опорожнения поверхностных водных объектов, ч	967,46	500	1000
CK_{I2}	Постоянная времени для расчета поверхностного стока и трансформации паводка, проходящего последовательно через два линейных резервуара, ч	44,13	10	50
TOF	Пороговые значения для поверхностного стока	0	0	0,99
TIF	Пороговые значения для опорожнения	0	0	0,99
TG	Пороговые значения подпитки подземных вод	0,98	0	0,99
CK_{BF}	Постоянная времени для расчета трансформации базисного (меженного) стока, ч	4000	1000	4000

Сопоставление смоделированных месячных расходов воды по SWAT и MIKE 11-NAM, а также наблюдаемых расходов для периодов калибровки и валидации, представлено на рис. 7, рис. 8 и рис. 9. Полученные результаты оценены с использованием статистического соответствия критериев оценки эффективности (целевых функций), значения которых для

калибровки и валидации приведены в табл. 7 и табл. 8. Основываясь на статистических оценках, можно заключить, что в процессе калибровки и валидации модель SWAT по своей эффективности значительно превзошла модель MIKE 11-NAM.

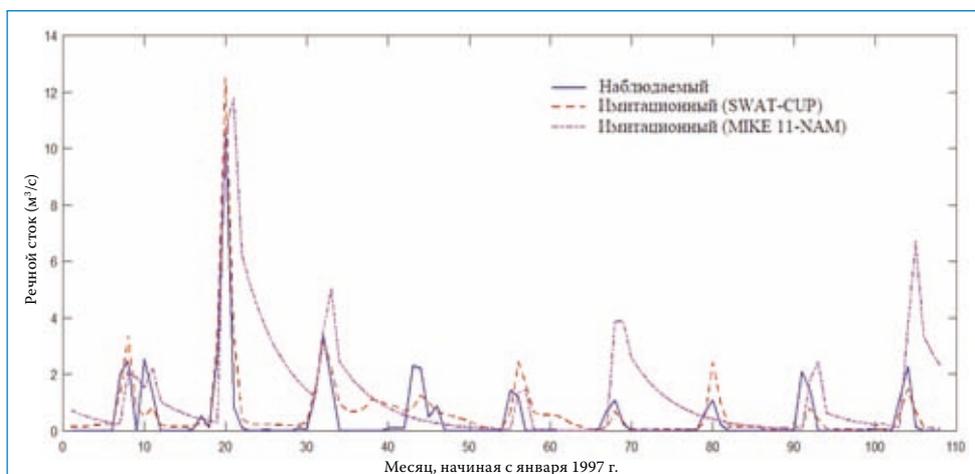


Рис. 7. Сравнение откалиброванных ежемесячных значений расхода воды с помощью моделей SWAT-CUP и MIKE 11-NAM с наблюдаемыми значениями расходов.

Fig. 7. Comparison of the calibrated monthly values of water flow rate with SWAT-CUP and MIKE 11-NAM models with the observed values of water flow rate.

Таблица 7. Значения критериев оценки эффективности калибровки для различных типов модели

Table 7. Values of criteria of calibration effectivity for various types of models

Тип модели	Целевая функция				
	R^2	bR^2	NS	RSR	$PBIAS$
SWAT	0,80	0,77	0,73	0,52	-42
MIKE 11-NAM	0,20	0,19	-1,62	1,61	188

Таблица 8. Значения критериев оценки эффективности валидации для различных типов модели

Table 8. Values of criteria of validation effectivity for various types of models

Тип модели	Целевая функция				
	R^2	bR^2	NS	RSR	$PBIAS$
SWAT	0,32	0,22	0,12	0,93	9,80
MIKE 11-NAM	0,17	0,05	-0,01	1,00	-64,10

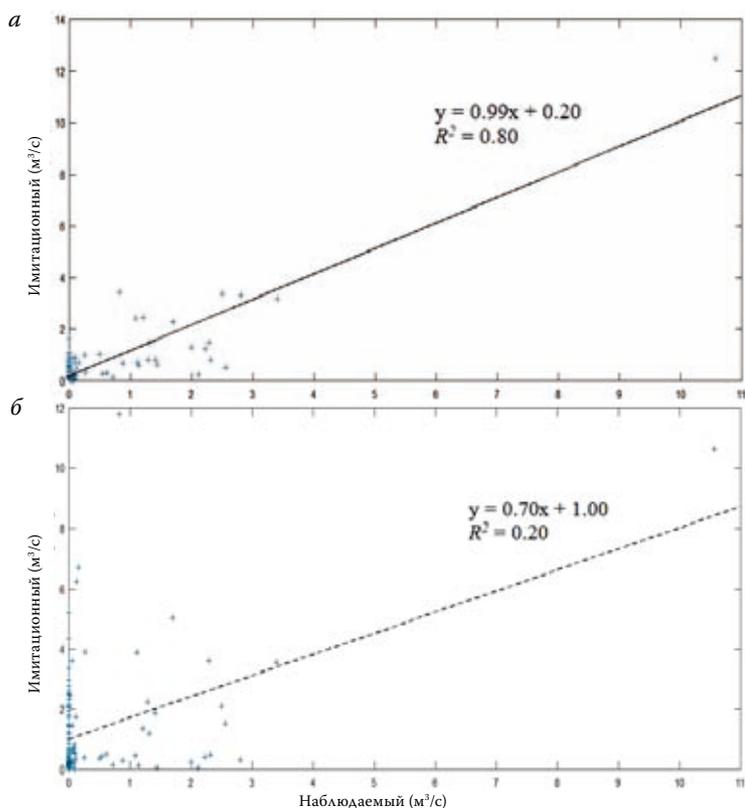


Рис. 8. Корреляция наблюдаемых ежемесячных значений расхода воды и смоделированных с помощью SWAT (а) и MIKE 11-NAM (б) за период калибровки.
Fig. 8. Correlation of the observed monthly values of water flow rate and those simulated with SWAT (a) and MIKE 11-NAM (b) over the calibration period.

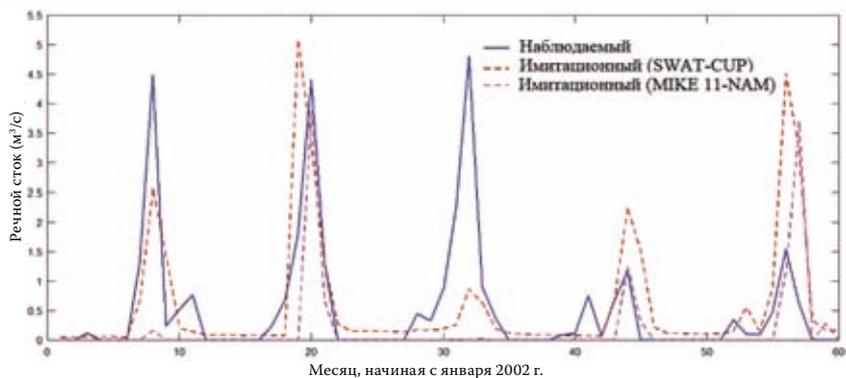


Рис. 9. Сравнение наблюдаемых расходов и смоделированных в SWAT и MIKE 11-NAM ежемесячных расходов воды.
Fig. 9. Comparison of the observed flow rates and simulated in SWAT and MIKE 11-NAM monthly water flow rates.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Модели речных бассейнов играют важную роль в получении гидролого-биогеохимической информации на водосборах, недостаточно изученных с гидрологической точки зрения. В то время как некоторые модели являются сложными и требуют значительных объемов исходной информации с большим количеством параметров, другие достаточно просты и работают с меньшим объемом исходной информации и параметров. Пока не существует единой и наилучшей модели [3]: каждая модель, независимо от ее сложности, имеет свои сильные и слабые стороны.

Из сложных моделей, требующих значительных объемов исходной информации, были исследованы гидрологические модели с распределенными (SWAT) и полураспределенными параметрами (MIKE 11-NAM), которые обычно применяются в условиях полузасушливых регионов. В настоящее время в гидрологическом моделировании все большее распространение получает технология использования массивов данных спутникового реанализа климата (например, CFSR). Однако в специальной литературе [6, 11, 12] подчеркивается, что этот способ связан в основном с отсутствием данных наземных измерений, необходимых для процедур калибровки и валидации, а также значительной неопределенностью параметров модели, использовать массивы данных реанализа следует с некоторой осторожностью. В представленной работе для моделирования речного стока применялась программа SWAT, которая использует массивы данных реанализа, а также другие справочные базы, имеющиеся в открытом доступе, в качестве входной исходной информации. Для оценки эффективности моделей и их идентификации с приемлемой неопределенностью было выполнено сравнение SWAT с MIKE 11-NAM. При этом, основываясь на оценках эффективности обеих моделей, в исследовании применялись передовые расчетные алгоритмы оптимизации (в данном случае – SUFI-2).

Анализ чувствительности параметров модели к различным целевым функциям и алгоритму оптимизации показал их влияние на результаты моделирования. Более чувствительные параметры модели имеют более высокую степень неопределенности, чем менее чувствительные, если эти параметры не были калиброваны. Следовательно, анализ чувствительности – это первое, что необходимо учитывать при калибровке модели. Однако не все чувствительные параметры могут быть калиброваны в речных бассейнах без учета качества.

В данном исследовании все параметры, характеризующие почвенные особенности и некоторые погодные условия исследуемого региона (и полученные из доступных источников информации с метеостанций) были исключены из процессов калибровки и валидации. Наблюдаемые пара-

метры, как правило, вносят наименьший вклад в неопределенность гидрологической модели. Исходя из этого, рекомендовано использовать все доступные источники информации с водосборов-аналогов и исключать эти параметры из калибровки во избежание их ненужных и произвольных корректировок. Анализ неопределенностей для SWAT, выполненный проверкой значений Р-фактора и R-фактора [29], показал, что величина неопределенностей намного выше удовлетворительной для периодов калибровки и валидации. Поэтому в дальнейшем необходимо изучить и другие алгоритмы, подходящие для условий данного региона. При сравнении моделей SWAT и MIKE 11-NAM с использованием статистических оценок первая модель оказалась эффективнее.

ВЫВОДЫ

В проведенном исследовании моделирование речного стока в бассейне Дебарвы выполнялось с помощью моделей с распределенными и полураспределенными параметрами (SWAT и MIKE 11-NAM), в которых в качестве входных параметров использованы массивы данных реанализа CFSR. Выполнено сравнение и анализ смоделированных месячных расходов речного стока. В целом модель SWAT несколько превзошла по своей эффективности модель MIKE 11-NAM. Однако, несмотря на то что большинство критериев оценки (целевых функций) подтвердило приемлемую эффективность модели SWAT, в период валидации наблюдалась ее значительная неопределенность.

Полагаем, что среди множества ошибок моделирования, вероятнее всего, ключевыми являются ошибки, связанные с массивом исходных климатических данных (в первую очередь, об осадках) и выбором оптимального параметра. Чтобы свести к минимуму неопределенность модели и, как следствие, повысить ее эффективность, необходимо улучшить и расширить сбор исходных данных с пунктов наземных наблюдений. Следует также провести дальнейшее исследование применимости массивов данных реанализа CFSR для моделирования речного стока, например, при уменьшении или увеличении масштабируемых переменных. В противном случае, использование имеющихся немасштабированных массивов данных реанализа, может привести к ошибочным результатам расчетов речного стока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Singh V.P., Frevert D.K.* Watershed Models. Boca Raton, FL: CRC press, 2006. P. 3.
2. *Chowdhury K.R., Eslamian S.* Climate Change and Hydrologic Modeling, in Handbook of Engineering Hydrology Modeling, Climate Change, and Variability, Saeid Eslamian, Ed. London: CRS Press, 2014. Pp. 77–81.
3. *Ghebrehiwot A.A., Kozlov D.V.* Hydrological modelling for ungauged basins of arid and semi-arid regions: review // Vestn. MGSU, 2019. No. 8. Pp. 1023–1036.

4. *Бугаец А.Н., Гарцман Б.Е., Терешкина А.А. и др.* Опыт применения модели SWAT для изучения гидрологического режима малого речного бассейна (река Комаровка, Приморский край) // Метеорология и гидрология. 2018. № 5, С. 68–79.
5. *Singh V.P., Woolhiser D.A.* Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. Journal of Hydrologic Engineering, 2002. Vol. 7. No. 4. Pp. 270–292.
6. *Wheater H., Sorooshian S., Sharma K.D.* Hydrological Modelling in Arid and Semi-Arid Areas. New York: Cambridge University Press, 2008.
7. *Refsgaard J.C., Abbott M.B.* The role of distributed hydrological modelling in water resource management, in Distributed hydrological modelling. Vol. 22, Abbott M.B., Refsgaard J.C., Ed. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996. Pp. 1–16.
8. *Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А.* Математическое моделирование в гидрологии. М.: Академия, 2010, 304 с.
9. *Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н.* Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: Изд-во РАН, 2019. 300 с.
10. *Montanari A. et al.* Panta Rhei—Everything Flows: Change in hydrology and society – The IAHS Scientific Decade 2013–2022. Hydrol. Sci. J., 2013. Vol. 58. No. 6. Pp. 1256–1275.
11. *Beven K.J.* Rainfall-runoff Modeling: Introduction, in Encyclopedia of Hydrological Sciences, Anderson M.G., McDonnell J.J. Eds. John Wiley & Sons Ltd, 2005. Pp. 1857–2096.
12. *Beven K.J.* Rainfall-Runoff modelling: The primer. Chichester, UK: John Wiley and Sons Ltd., 2012.
13. *Fekete B.M., Vörösmarty C.J.* The current status of global river discharge monitoring and potential new technologies complementing traditional discharge measurements, Predict. Ungauged Basins PUB Kick-off (Proceedings PUB Kick-off Meet. held Bras. Novemb. 2002), IAHS Publ. 2007. No. 309. Pp. 129–136.
14. *Vörösmarty C. et al.* Global water data: A newly endangered species. Eos, 2001. Vol. 82. No. 5. Pp. 54–58.
15. *Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Vörösmarty C.J.* Widespread decline in hydrological monitoring threatens Pan-Arctic research. Eos (Washington. DC), 2002. Vol. 83. No. 2. Pp. 13–17.
16. WMO and GWP, Integrated Drought Management Programme Handbook of Drought Indicators and Indices, 2016. No. 1173. 45 p.
17. *Ghebrehiwot A.A., Kozlov D.V.* Statistical and spatial variability of climate data in the Mareb-Gash river basin in Eritrea // Vestn. MGSU. 2020. Vol. 15. No. 1. Pp. 85–99.
18. *Shiklomanov A.I., Lammers R.B.* Record Russian river discharge in 2007 and the limits of analysis. Environ. Res. Lett. 2009. Vol. 4. No. 4. P. 045015.
19. *Dile Y.T., Srinivasan R.* Evaluation of CFSR climate data for hydrologic prediction in data-scarce watersheds: An application in the blue Nile river basin. J. Am. Water Resour. Assoc. 2014. Vol. 50. No. 5. Pp. 1226–1241.
20. *Fuka D.R., Walter M.T., Macalister C., Degaetano A.T., Steenhuis T.S., Easton Z.M.* Using the Climate Forecast System Reanalysis as weather input data for watershed models // Hydrol. Process. 2014. Vol. 28. No. 22. Pp. 5613–5623.

21. *Auerbach D.A., Easton Z.M., Walter M.T., Flecker A.S., Fuka D.R.* Evaluating weather observations and the Climate Forecast System Reanalysis as inputs for hydrologic modelling in the tropics, *Hydrol. Process.* 2016. Vol. 30. No. 19. Pp. 3466–3477.
22. *Nkiaka E., Nawaz N.R., Lovett J.C.* Evaluating global reanalysis datasets as input for hydrologic modelling in the Sudano-Sahel region // *Hydrology.* 2017. Vol. 4. No. 1.
23. *Mararakanye N., Le Roux J.J., Franke A.C.* Using satellite-based weather data as input to SWAT in a data poor catchment. *Phys. Chem. Earth,* 2020. Vol. 117. Pp. 1–13.
24. *Grusson Y., Anctil F., Sauvage S., Pérez J.M.S.* Testing the SWAT model with gridded weather data of different spatial resolutions // *Water (Switzerland).* 2017. Vol. 9. No. 1:54. Pp. 2–16.
25. *Ghebrehiwot A.A., Kozlov D.V.* Assessment of applicability of MIKE 11-NAM hydrological module for rainfall runoff modelling in a poorly studied river basin // *Vestn. MGSU.* 2020. No. 7. Pp. 1030–1046.
26. *Refsgaard J.C., Knudsen J.* Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models // *Water Resour. Res.* 1996. Vol. 32. No. 7. Pp. 2189–2202.
27. *Терский П. Н., Кулешов А.А.* Исследование формирования речного стока в российской части бассейна Западной Двины с использованием гидрологической модели SWAT. Сборник материалов конференции «Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии». Санкт-Петербург, 2018. С. 234–239.
28. *Arnold J.G., Srinivasan R., Muttiah R.S., Williams J.R.* Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: Model development. *J. Am. Water Resour. Assoc.,* 1998. Vol. 34. No. 1. Pp. 73–89.
29. *Abbaspour K.C., Rouholahnejad E., Vaghefi S., Srinivasan R., Yang H., Kløve B.* A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model // *J. Hydrol.* 2015. Vol. 524. Pp. 733–752.
30. *Gassman P.W., Reyes M.R., Green C.H., Arnold J.G.* The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE,* 2007. Vol. 50. No. 4. Pp. 2–100.
31. *Arnold J.G., Srinivasan R., Muttiah R.S., Allen P.M.* Continental scale simulation of the hydrologic balance. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 1999. Vol. 35. No. 5. Pp. 47–75.
32. *Schuol J., Abbaspour K.C., Yang H., Srinivasan R., Zehnder A.J.* Modeling blue and green water availability in Africa // *Water Resour. Res.* 2008. Vol. 44. No. 7. Pp. 141–173.
33. *Schuol J., Abbaspour K.C., Srinivasan R., Yang H.* Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model // *J. Hydrol.* 2008. Vol. 352. No. 1–2. Pp. 30–49.
34. *Arnold J.G. et al.* SWAT: Model use, calibration, and validation. *Trans. ASABE,* 2012. Vol. 55. No. 4. Pp. 1491–1508.
35. *Abbaspour K.C.* SWAT-CUP 2012: SWAT Calibration and Uncertainty Programs – A User Manual, *Sci. Technol.,* 2014.
36. *Eberhart R., Kennedy J.* New optimizer using particle swarm theory, in *Proceedings of the International Symposium on Micro Machine and Human Science,* 1995. Pp. 39–43.

37. *Beven K., Binley A.* The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction // *Hydrol. Process.* 1992. Vol. 6. No. 3. Pp. 279–298.
38. Осипов В.В., Осадчая Н.Н. Автоматическая калибровка стока на малом речном водосборе в программном модуле SWAT-CUP // *Геоинформатика.* 2017. № 1 (61). С. 63–71.
39. *Yang D., Musiak K.* A continental scale hydrological model using the distributed approach and its application to Asia // *Hydrol. Process.* 2003. Vol. 17. No. 14. Pp. 59–74.
40. *Kozlov D.V., Ghebrehiwot A.A.* Efficacy of digital elevation and Nash models in runoff forecast. *Mag. Civ. Eng.,* 2019. Vol. 87. No. 3. Pp. 103–122.
41. *Ghebrehiwot A., Kozlov D.* GIUH-Nash based runoff prediction for Debarwa catchment in Eritrea, in *E3S Web of Conferences,* 2019. Vol. 97. p. 05001.
42. *Alemngus A., Amlsom S., Bovas J.J.* An Overview of Eritrea's Water Resources. *Int. J. Eng. Res.,* 2017. Vol. 13. No. 3. Pp. 74–84.
43. *Abbaspour K.C., Vaghefi S.A., Yang H., Srinivasan R.* Global soil, landuse, evapotranspiration, historical and future weather databases for SWAT Applications. *Sci. data,* 2019. Vol. 6. No. 1. 263 p.
44. *Abbaspour K.C., Johnson C.A., van Genuchten M.T.* Estimating Uncertain Flow and Transport Parameters Using a Sequential Uncertainty Fitting Procedure. *Vadose Zo. J.,* 2004. Vol. 3. No. 4. Pp. 1340–1352.
45. *Kouchi D.H., Esmaili K., Faridhosseini A., Sanaeinejad S.H., Khalili D., Abbaspour K.C.* Sensitivity of calibrated parameters and water resource estimates on different objective functions and optimization algorithms. *Water (Switzerland),* 2017. Vol. 9. No. 6.
46. *Ayele G.T., Teshale E.Z., Yu B., Rutherford I.D., Jeong J.* Streamflow and sediment yield prediction for watershed prioritization in the upper Blue Nile river basin, Ethiopia. *Water (Switzerland),* 2017. Vol. 9. No. 10.
47. *Gupta H.V., Sorooshian S., Yapo P.O.* Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. *J. Hydrol. Eng.,* 1999. Vol. 4. No. 2. Pp. 135–143.

Для цитирования: Козлов Д.В., Гебрехивот А.А. Сопоставление эффективности физико-математических моделей малоизученного бассейна реки (на примере климатического региона Эритрея) // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление.* 2021. № 1. С. 86–112.

Сведения об авторах:

Козлов Дмитрий Вячеславович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой гидравлики и гидротехнического строительства, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26; e-mail: kozlovdv@mail.ru

Гебрехивот Анхесом Алемнгус, аспирант, кафедра гидравлики и гидротехнического строительства, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26; преподаватель, Национальный институт высшего образования и научных исследований, Асмэра, Эритрея; e-mail: bahghi2012@gmail.com

INTERCOMPARISON OF PROCESS-BASED PHYSICAL AND MATHEMATICAL HYDROLOGICAL MODELS IN DATA-SCARCE SEMI-ARID REGION OF ERITREA

Dmitry V. Kozlov¹, Anghesom A. Ghebrehiwot^{1, 2}¹Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia²National Higher Education and Research Institute; teacher, Asmara – Keren, Eritrea

Abstract: Watershed models simulate natural hydrological and biogeochemical processes within watersheds as well as quantify the impact of human activities on these processes. Among them, rainfall-runoff models have been widely applied for generating hydrological responses using reanalysis datasets as forcing variables in data-scarce regions. In the present study, Soil and Water Assessment Tool model and rainfall-runoff model were employed to simulate streamflow from a small watershed with arid and semi-arid climate. As such, models that provide reliable streamflow predictions in the region as well as whose errors and uncertainties are within acceptable ranges could be identified. The intercomparison of the models' performances indicated that the Soil and Water Assessment Tool model relatively outperformed the rainfall-runoff model. However, while most of the statistical evaluations proved an acceptable performance of the Soil and Water Assessment Tool model, significant amounts of uncertainties during calibration and validation procedures were noticed. Among the possible sources of errors, errors due to forcing variables were highly likely to be responsible for unsatisfactory performances of the selected models. In this regard, to minimize model uncertainty and thereupon improve its performance, ground-based data collection need to be boosted up. Besides, the study highlighted the need for further investigation on the possible mechanisms of properly applying reanalysis datasets in arid and semi-arid regions.

Key words: reanalysis datasets, watershed models, physical and mathematical model, rainfall-runoff model, precipitation model, model efficiency, uncertainty, sensitivity analysis.

About the authors:

Dmitry V. Kozlov, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU) Head of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russia; e-mail: kozlovdv@mail.ru

Anghesom A. Ghebrehiwot, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU) Postgraduate student of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russia; National Higher Education and Research Institute; teacher, Asmara – Keren, Eritrea; e-mail: bahghi2012@gmail.com

For citation: Kozlov D.V., Ghebrehiwot A.A. *Intercomparison of Process-based Physical and Mathematicaall Models in data-scarce Semi-arid Region of Eritrea // Water Sector of Russia. 2021. No. 1. P. 86–112.*

REFERENCES

1. Singh V.P., Frevert D.K. Watershed Models. Boca Raton, FL: CRC press, 2006. P. 3.
2. Chowdhury K.R., Eslamian S. Climate Change and Hydrologic Modeling, in Handbook of Engineering Hydrology Modeling, Climate Change, and Variability, Saeid Eslamian, Ed. London: CRS Press, 2014. pp. 77–81.
3. Ghebrehiwot A.A., Kozlov D.V. Hydrological modelling for ungauged basins of arid and semi-arid regions: review // Vestn. MGSU, 2019. no. 8. Pp. 1023–1036.
4. Bugaev A.N., Garcmán B.E., Tereshkina A.A. *i dr.* Opyt primeneniya modeli SWAT dlya izucheniya gidrologicheskogo rezhima malogo rechnogo bassejna (reka Komarovka, Primorskiy kraj) [Experience in application of the SWAT model for studying of the hydrological regime of small river basin (the Komarovka River, Maritime Kray)] // Meteorologiya i gidrologiya. 2018. №5. P. 68–79.
5. Singh V.P., Woolhiser D.A. Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. Journal of Hydrologic Engineering, 2002. Vol. 7. No. 4. Pp. 270–292.

6. *Wheater H., Sorooshian S., Sharma K.D.* Hydrological Modelling in Arid and Semi-Arid Areas. New York: Cambridge University Press, 2008.
7. *Refsgaard J.C., Abbott M.B.* The role of distributed hydrological modelling in water resource management, in Distributed hydrological modelling, vol. 22, Abbott M.B., Refsgaard J.C., Ed. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996. Pp. 1–16.
8. *Vinogradov Ju.B., Vinogradova T.A.* Matematicheskoe modelirovanie v gidrologiyi. [Mathematical modelling in hydrology] M.: Akademiya, 2010. 304 p.
9. *Motovilov Ju.G., Gel'fan A.N.* Modeli formirovaniya stoka v zadachakh gidrologiyi rechnyh basseynov [The runoff formation models within tasks of the river basins hydrology]. M.: Izd-vo RAN, 2019. 300 p.
10. *Montanari A., et al.* Panta Rhei—Everything Flows: Change in hydrology and society—The IAHS Scientific Decade 2013–2022. *Hydrol. Sci. J.*, 2013. Vol. 58. No. 6. Pp. 1256–1275.
11. *Beven K.J.* Rainfall-runoff Modeling: Introduction, in *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, Anderson M.G., McDonnell J.J. Eds. John Wiley & Sons Ltd, 2005. Pp. 1857–2096.
12. *Beven K.J.* Rainfall-Runoff modelling: The primer. Chichester, UK: John Wiley and Sons Ltd., 2012.
13. *Fekete B.M., Vörösmarty C.J.* The current status of global river discharge monitoring and potential new technologies complementing traditional discharge measurements, Predict. Ungauged Basins PUB Kick-off (Proceedings PUB Kick-off Meet. held Bras. Novemb. 2002), IAHS Publ. No. 309, 2007.
14. *Vörösmarty C., et al.* Global water data: A newly endangered species. *Eos*, 2001. vol. 82. No. 5.
15. *Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Vörösmarty C.J.* Widespread decline in hydrological monitoring threatens Pan-Arctic research. *Eos (Washington. DC.)*, 2002. Vol. 83. No. 2.
16. WMO and GWP, Integrated Drought Management Programme Handbook of Drought Indicators and Indices, 2016. No. 1173. 45 p.
17. *Ghebrehiwot A.A., Kozlov D.V.* Statistical and spatial variability of climate data in the Mareb-Gash river basin in Eritrea. *Vestn. MGSU*, 2020. Vol. 15. No. 1. Pp. 85–99.
18. *Shiklomanov A.I., Lammers R.B.* Record Russian river discharge in 2007 and the limits of analysis. *Environ. Res. Lett.*, 2009. Vol. 4. No. 4.
19. *Dile Y.T., Srinivasan R.* Evaluation of CFSR climate data for hydrologic prediction in data-scarce watersheds: An application in the blue Nile river basin. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 2014. Vol. 50. No. 5. Pp. 1226–1241.
20. *Fuka D.R., Walter M.T., Macalister C., Degaetano A.T., Steenhuis T.S., Easton Z.M.* Using the Climate Forecast System Reanalysis as weather input data for watershed models. *Hydrol. Process.*, 2014. Vol. 28. No. 22. Pp. 5613–5623.
21. *Auerbach D.A., Easton Z.M., Walter M.T., Flecker A.S., Fuka D.R.* Evaluating weather observations and the Climate Forecast System Reanalysis as inputs for hydrologic modelling in the tropics, *Hydrol. Process.*, 2016. Vol. 30. No. 19. Pp. 3466–3477.
22. *Nkiaka E., Nawaz N.R., Lovett J.C.* Evaluating global reanalysis datasets as input for hydrological modelling in the Sudano-Sahel region. *Hydrology*, 2017. Vol. 4. No. 1.
23. *Mararakanye N., Le Roux J.J., Franke A.C.* Using satellite-based weather data as input to SWAT in a data poor catchment. *Phys. Chem. Earth*, 2020. Vol. 117.
24. *Grusson Y., Anctil F., Sauvage S., Pérez J.M.S.* Testing the SWAT model with gridded weather data of different spatial resolutions. *Water (Switzerland)*, 2017. Vol. 9. No. 1:54
25. *Ghebrehiwot A.A., Kozlov D.V.* Assessment of applicability of MIKE 11-NAM hydrological module for rainfall runoff modelling in a poorly studied river basin. *Vestn. MGSU*, 2020. No. 7. Pp. 1030–1046.
26. *Refsgaard J.C., Knudsen J.* Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. *Water Resour. Res.*, 1996. Vol. 32. No. 7. Pp. 2189–2202.
27. *Terskii P.N., Kuleshov A.A.* Issledovanie formirovaniia rechnogo stoka v rossiiskoi chasti basseina zapadnoi dviny s ispol'zovaniem gidrologicheskoi modeli SWAT, in tret'i vinogradovskie chteniia. grani gidrologii, 2018. Pp. 234–239.

28. *Arnold J.G., Srinivasan R., Muttiah R.S., Williams J.R.* Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: Model development. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 1998. Vol. 34. No. 1. Pp. 73–89.
29. *Abbaspour K.C., Rouholahnejad E., Vaghefi S., Srinivasan R., Yang H., Kløve B.* A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *J. Hydrol.*, 2015. Vol. 524. Pp. 733–752
30. *Gassman P.W., Reyes M.R., Green C.H., Arnold J.G.* The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE*, 2007. Vol. 50. No. 4.
31. *Arnold J.G., Srinivasan R., Muttiah R.S., Allen P.M.* Continental scale simulation of the hydrologic balance. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 1999. Vol. 35. No. 5.
32. *Schuol J., Abbaspour K.C., Yang H., Srinivasan R., Zehnder A.J.* Modeling blue and green water availability in Africa. *Water Resour. Res.*, 2008. Vol. 44. No. 7.
33. *Schuol J., Abbaspour K.C., Srinivasan R., Yang H.* Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model. *J. Hydrol.*, 2008. Vol. 352. No. 1–2.
34. *Arnold J.G. et al.* SWAT: Model use, calibration, and validation. *Trans. ASABE*, 2012. Vol. 55. No. 4. Pp. 1491–1508.
35. *Abbaspour K.C.* SWAT-CUP 2012: SWAT Calibration and Uncertainty Programs – A User Manual, *Sci. Technol.*, 2014.
36. *Eberhart R., Kennedy J.* New optimizer using particle swarm theory, in *Proceedings of the International Symposium on Micro Machine and Human Science*, 1995. Pp. 39–43.
37. *Beven K., Binley A.* The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction, *Hydrol. Process.*, 1992. Vol. 6. No. 3. Pp. 279–298.
38. *Osipov V.V., Osadchaia N.N.* Avtomaticheskaja kalibrovka stoka na malom rechnom vodosbore v programmnom module SWAT-CUP [Automatic runoff calibration at the small river catchment in SWAT-CUP program module], *Geoinformatika*, 2017. Vol. 1. No. 61. Pp. 63–71.
39. *Yang D., Musiake K.* A continental scale hydrological model using the distributed approach and its application to Asia. *Hydrol. Process.*, 2003. Vol. 17. No. 14.
40. *Kozlov D.V., Ghebrehiwot A.A.* Efficacy of digital elevation and Nash models in runoff forecast. *Mag. Civ. Eng.*, 2019. Vol. 87. No. 3. Pp. 103–122.
41. *Ghebrehiwot A., Kozlov D.* GIUH-Nash based runoff prediction for Debarwa catchment in Eritrea, in *E3S Web of Conferences*, 2019. Vol. 97. P. 05001.
42. *Alemngus A., Amllesom S., Bovas J.J.* An Overview of Eritrea's Water Resources. *Int. J. Eng. Res.*, 2017. Vol. 13. No. 3. Pp. 74–84.
43. *Abbaspour K.C., Vaghefi S.A., Yang H., Srinivasan R.* Global soil, landuse, evapotranspiration, historical and future weather databases for SWAT Applications. *Sci. data*, 2019. Vol. 6. No. 1. P. 263.
44. *Abbaspour K.C., Johnson C.A., van Genuchten M.T.* Estimating Uncertain Flow and Transport Parameters Using a Sequential Uncertainty Fitting Procedure. *Vadose Zo. J.*, 2004. Vol. 3. No. 4. Pp. 1340–1352.
45. *Kouchi D.H., Esmaili K., Faridhosseini A., Sanaeinejad S.H., Khalili D., Abbaspour K.C.* Sensitivity of calibrated parameters and water resource estimates on different objective functions and optimization algorithms. *Water (Switzerland)*, 2017. Vol. 9, No 6.
46. *Ayele G.T., Teshale E.Z., Yu B., Rutherford I.D., Jeong J.* Streamflow and sediment yield prediction for watershed prioritization in the upper Blue Nile river basin, Ethiopia. *Water (Switzerland)*, 2017. Vol. 9. No. 10.
47. *Gupta H.V., Sorooshian S., Yapo P.O.* Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. *J. Hydrol. Eng.*, 1999. Vol. 4. No. 2. Pp. 135–143.