

О.Н. Насонова, Е.М. Гусев, Е.Э. Ковалев
O.N. Nasonova, Ye.M. Gusev, E.E. Kovalev
Институт водных проблем, РАН
Institute of Water Problems, RAS

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТОКА СЕВЕРНЫХ РЕК
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛОБАЛЬНЫХ БАЗ ДАННЫХ**
INVESTIGATING THE ABILITY OF MODELING THE NORTHERN RIVER RUNOFF USING
GLOBAL DATA SETS

Аннотация. Проведены расчеты суточных гидрографов стока девяти российских северных рек по модели теплообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP. В качестве информационного обеспечения использовались три глобальные метеорологические базы данных (NCEP/DOE реанализ, ERA-40 реанализ и гибридный NCEP/DOE реанализ), а также глобальные базы данных по параметрам подстилающей поверхности. Показано, что высокое качество расчета стока северных рек на основе модели SWAP и глобальных баз данных возможно в случае одновременной оптимизации параметров модели и поправок к осадкам и приходящей радиации.

Abstract. Simulations of daily hydrographs of nine northern rivers situated within Russia were performed by the land surface model SWAP. Three global forcing data sets (NCEP/DOE reanalysis, ERA-40 reanalysis and hybrid of NCEP/DOE reanalysis with observations) and global land surface parameter data sets were used for model simulations. It is shown that a high quality of northern river runoff simulation by SWAP can be reached in the case of simultaneous optimization of model parameters and correction factors to precipitation and incoming radiation.

Введение

В связи с возможными изменениями климата актуальной становится проблема оценки влияния этих изменений на водные ресурсы, в частности, на ресурсы поверхностных и подземных вод суши, мерой которых является речной сток. Поскольку наибольшие климатические изменения ожидаются в высоких широтах северного полушария, важно уметь корректно воспроизводить гидрографы стока северных рек. Это особенно актуально для России, большая часть рек которой относится к пан-Арктическому бассейну.

Моделирование гидрографов речного стока – классическая гидрологическая задача. Для ее решения разработано немало гидрологических моделей, которые принято подразделять на концептуальные и физико-математические, а также на модели с сосредоточенными и распределенными параметрами. Каждый тип моделей имеет свои преимущества и недостатки и применение той или иной модели определяется конкретной решаемой задачей.

В последнее время появилось много публикаций, в которых расчет речного стока осуществляется с помощью моделей теплообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой [8, 10, 18, 24], развиваемых метеорологами, климатологами и физиками атмосферы и известных в англоязычной литературе как атмосферные Land Surface Models (LSMs). Изначально эти модели предназначались для сопряжения с моделями общей циркуляции атмосферы и представляли собой простейшие параметризационные схемы [17]. Впоследствии они эволюционировали в независимые, достаточно детальные модели, служащие мощным инструментом для решения самых различных задач в области климатологии, глобальной экологии и т.д. Одна из таких моделей, а именно модель SWAP (Soil Water – Atmosphere – Plants), разработанная в Лаборатории физики почвенных вод Института водных проблем РАН [2-4], и будет использоваться в данной работе.

Цель настоящей работы – исследование возможности воспроизводить сток северных рек с использованием LSM-модели SWAP и информационного обеспечения, основанного на глобальных базах данных по параметрам подстилающей поверхности и метеорологическим

характеристикам. Ориентация на существующие глобальные базы данных связана, во-первых, с трудоемкостью процесса подготовки информационного обеспечения модели, основанного на данных непосредственных измерений, а во-вторых с тем, что нередко бассейны северных рек бывают плохо обеспечены информацией, необходимой для модельных расчетов. Возможны даже ситуации, когда глобальные базы данных являются единственным источником подобной информации. В связи с этим необходимо исследовать, насколько адекватно можно воспроизводить гидрографы речного стока северных рек с использованием глобальных баз данных.

Методология

Модель SWAP

SWAP представляет собой физико-математическую модель, описывающую процессы тепло- и влагообмена в системе почва – растительный/снежный покров – приземный слой атмосферы (Soil–Vegetation/snow cover–Atmosphere system – SVAS). Различные версии модели SWAP детально описаны в целом ряде публикаций [например, 2-4, 12-14], поэтому здесь приведем лишь самые общие сведения о ней.

Модель воспроизводит следующие процессы: перехват жидких и твердых атмосферных осадков растительным покровом, их последующее испарение и возможное таяние или замерзание; формирование снежного покрова под пологом леса и на открытых участках в холодный период года; формирование поверхностного стока и впитывание воды (поступающей на поверхность почвы вследствие выпадения жидких осадков или таяния снежного покрова) в почву; формирование водного баланса зоны аэрации (включающего в себя транспирацию, физическое испарение воды почвой, влагообмен с грунтовыми водами и изменение почвенных влагозапасов); динамику уровня грунтовых вод; формирование теплового баланса системы SVAS и ее термического режима; промерзание и оттаивание почвы.

Модель может применяться для расчетов в различных масштабах – от локального до глобального. Переход от локальной версии к ее крупномасштабному аналогу основан на явном учете неоднородности подстилающей поверхности с помощью сеточной схематизации рассматриваемого объекта (водосбора, речного бассейна или региона), т.е. деления его на ячейки, соединенные речной сетью. Расчет по модели осуществляется для каждой ячейки сетки независимо от других ячеек. Затем рассчитанные характеристики (за исключением стока) осредняются по ячейкам. Для получения гидрографа стока на выходе из ячейки или в каком-либо створе речного русла рассчитанные для каждой ячейки значения поверхностного и подземного стоков (представляющие собой мгновенный сток в центре расчетной ячейки) трансформируются с учетом времени добега. Трансформация стока в пределах ячейки производится на основе уравнения двумерной кинематической волны, а в речной сети – с использованием простой линейной модели формирования водного баланса в русле [6].

В течение последних 15 лет модель SWAP прошла многочисленные проверки с использованием материалов многолетних наблюдений, полученных в различных природных условиях и на различных объектах – от “точечных” экспериментальных площадок до водосборов и речных бассейнов площадью от 10^{-1} до 10^5 км² [2-4, 8, 12-14, 24]. Результаты проверок показали, что модель SWAP способна адекватно воспроизводить (без калибровки) годовую и межгодовую динамику различных гидротермических характеристик SVAS при условии высокого качества используемой информации.

Модельные объекты и их схематизация

В качестве гидрологических объектов исследования были выбраны девять рек пан-Арктического бассейна, пять из которых (Поной, Онега, Северная Двина, Мезень и Печора) расположены на европейской части России (ЕЧР), остальные (Оленек, Яна, Индигирка и Колыма) на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока. Площади бассейнов указанных рек варьируют от 10200 до 526000 км² (табл. 1). На рис. 1 показана схематизация бассейнов для модельных расчетов в виде совокупности одноградусных ячеек сетки, соединенных речной сетью. Количество расчетных ячеек в пределах каждого бассейна

приведено в табл. 1. Здесь же приведены стокосые станции, для которых будут проводиться расчеты гидрографов стока.

Таблица 1

Речные бассейны					
Река	Стокосая станция			Площадь (км ²)	Число расчетных ячеек
	Название	Широта (°с.ш.)	Долгота (°в.д.)		
Мезень	Малонисогорская	65.00	45.62	56400	10
Печора	Оксино	67.63	52.18	312000	57
Северная Двина	Усть-Пинега	64.13	42.17	348000	62
Онега	Порог	63.83	38.48	55770	9
Поной	Каневка	67.13	39.67	10200	4
Оленек	7.5 км от устья р. Пур	72.12	123.22	198000	39
Яна	Юбилейная	70.75	136.08	224000	47
Индигирка	Воронцово	69.58	147.35	305000	55
Колыма	Колымская	68.73	158.72	526000	79

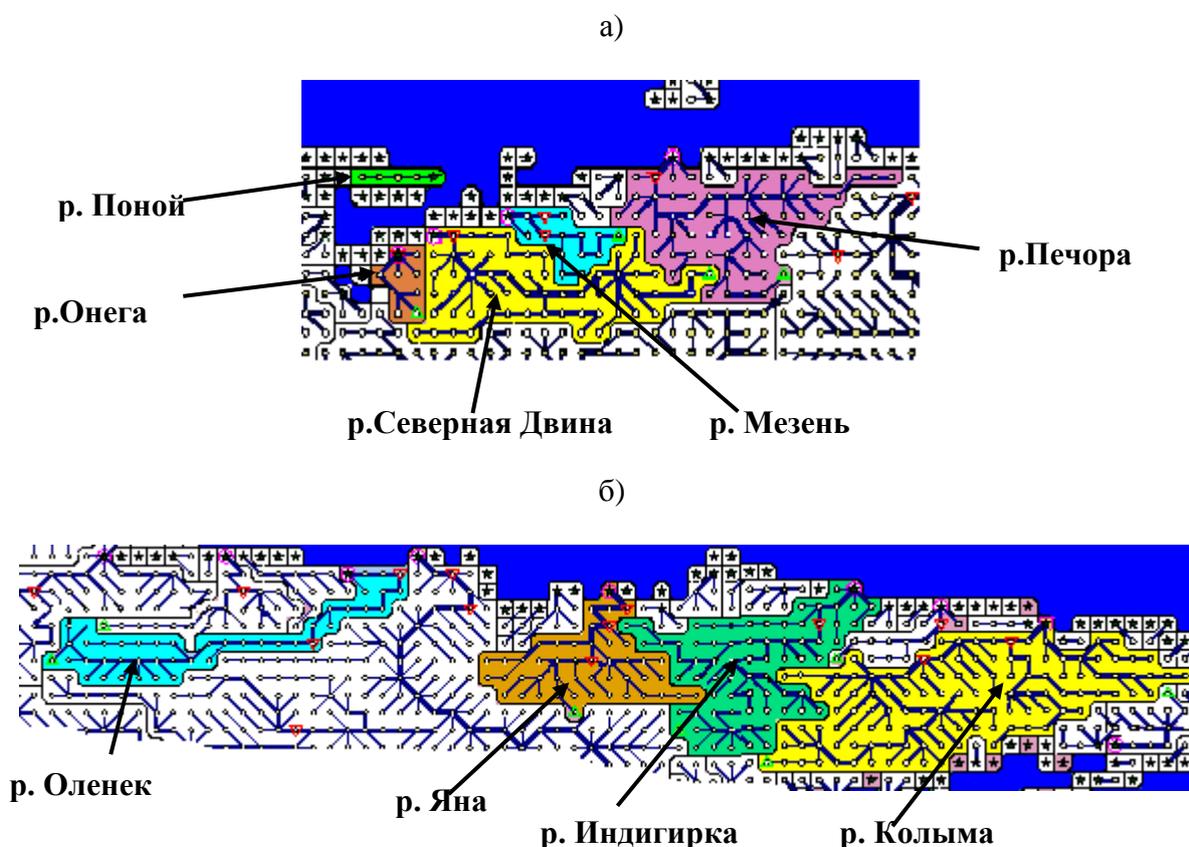


Рис. 1. Схематизация бассейнов северных рек: а) реки европейской части России, б) реки Восточной Сибири и Дальнего Востока. Цветом выделены речные бассейны, рассматриваемые в настоящей работе. Зелеными треугольниками отмечены истоки рек, красными – стокосые станции, малиновыми кружками – стокосые станции в замыкающем створе.

Речные бассейны, расположенные на территории ЕЧР (рис. 1а), в основном находятся в атлантико-арктической области умеренного климатического пояса с сезоннопромерзающими почвами, лишь большая часть бассейна Поной и северная часть бассейна Печоры попадают в атлантическую область субарктического пояса и характеризуются наличием сезоннооттаивающих почв. На большей части рассматриваемой территории преобладают хвойные леса, переходящие в тундру в северных районах.

Бассейны второй группы рек (рис. 1б) в основном расположены в сибирской области субарктического пояса. Здесь преобладают хвойные леса и редколесья. Северная часть

бассейнов, относящаяся к сибирской области арктического пояса, занята тундрой. Все четыре бассейна находятся в зоне многолетней мерзлоты.

Подготовка информационного обеспечения модели SWAP

Информационное обеспечение модели SWAP, использованное в данной работе, включало в себя приземные значения метеорологических элементов (приходящих потоков коротковолновой и длинноволновой радиации, температуры и влажности воздуха, осадков, скорости ветра и давления) с трехчасовым временным разрешением за период с 1 июля 1982 года по 31 декабря 1995 и параметры подстилающей поверхности (гидрофизические параметры почвы, характеристики растительности и топографические характеристики водосборов) для каждой расчетной ячейки речных бассейнов.

Были использованы три альтернативные базы данных по метеорологическим характеристикам. Две из них – продукты реанализа Национальных центров прогнозов окружающей среды Департамента энергии США – NCEP/DOE (National Centers for Environmental Prediction - Department of Energy) (база данных M1) и Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды - ERA-40 (ECMWF Re-analysis-40, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) (база данных M2), взятые из архива ISLSCP II (International Satellite Land-Surface Climatology Project Initiative II) [15]. Реанализ представляет собой процедуру расчета и распределения по ячейкам сетки метеорологических характеристик путем обработки значительной по объему синоптической информации, регулярно получаемой от большого числа спутниковых, авиационных, радиозондовых и наземных систем наблюдений. В основе процедуры реанализа – модель общей циркуляции атмосферы и система статистической интерполяции получаемых результатов по ячейкам сетки. Поэтому результаты реанализа, как правило, содержат систематические ошибки [25]. Для их устранения организаторами проекта GSWP-2 (Global Soil Wetness Project - 2) была предпринята, так называемая, гибридизация результатов реанализа с данными наблюдений. Базы данных последних также имеются в архиве ISLSCP II. Они основаны на результатах измерений, интерполированных в узлы ячеек сетки с пространственным разрешением от 0.5 до 2.5°, и имеют довольно грубое временное разрешение (чаще всего месячное), поэтому непригодны для непосредственного применения в LSM-моделях, требующих гораздо более высокого разрешения по времени (обычно от 30 минут до нескольких часов). В результате гибридизации была получена база данных B0, также использованная в настоящей работе.

При создании базы данных B0 наибольшие усилия были направлены на гибридизацию реанализных осадков. Для этого были использованы три базы данных наблюдений с месячными значениями измеренных осадков: база данных университета Восточной Англии CRU (Climate Research Unit) [20], а также базы данных GPCP (Global Precipitation Climatology Centre) [21] и GPCP (Global Precipitation Climatology Project) [16]. Первые две базы имеют 0.5° пространственное разрешение и основаны на данных наземных измерений осадков без учета поправок на ветер, причем в GPCP задействовано большее число осадкомеров. В основе базы данных GPCP – результаты наземных измерений осадков из GPCP (в которые введены поправки на ветер) и данные спутниковых измерений. Исходная база данных GPCP имеет более грубое (2.5°) пространственное разрешение. На ее основе для ISLSCP была подготовлена одноградусная версия.

На первом этапе гибридизации полученные в результате NCEP/DOE реанализа осадки были скомбинированы с данными из GPCP для основного расчетного периода (с 1 января 1986 г. по 31 декабря 1995 г.) и из базы данных CRU для периода раскрутки модели, для которого данные GPCP отсутствовали. В результате была получена база данных по осадкам, не содержащая поправок на ветер. Эти поправки были введены на следующем этапе. И наконец, для районов с низкой плотностью осадкомеров подключались данные спутниковых наблюдений из GPCP. В результате получились гибридизированные осадки, вошедшие в базу данных B0.

Кроме этого, в B0 были использованы гибридизированные базы данных по температуре и влажности воздуха (гибриды NCEP/DOE реанализа со среднемесячными результатами

соответствующих измерений из базы данных CRU), база данных по приходящей радиации SRB (Surface Radiation Budget), а также базы данных по приземному атмосферному давлению и скорости ветра (продукты реанализа NCEP/DOE).

Наряду с различными метеорологическими базами данных, для модельных расчетов использовались глобальные базы данных по параметрам подстилающей поверхности – гидрофизическим параметрам почвы (коэффициент фильтрации, наименьшая влагоемкость, влажность завядания, пористость, В-параметр и матричный потенциал при насыщении в параметризации Клэппа и Хорнбергера зависимостей матричного потенциала и коэффициента влагопроводности почвы от ее влажности [9]) и параметрам растительного покрова (высота растительности, глубина корнеобитаемого слоя, относительные площади листьев и стеблей/стволов, доля зеленых листьев, коэффициент экстинкции, параметр шероховатости, высота слоя вытеснения, альbedo, емкость перехвата атмосферных осадков, характерный размер листа и др.). При создании базы данных по параметрам подстилающей поверхности, адаптированной под модель SWAP, за основу была принята глобальная база данных, предложенная организаторами проекта GSWP-2, из которой были устранены грубые несоответствия и ошибки и которая была дополнена авторами рядом специфических параметров, необходимых при работе с моделью SWAP (детально этот процесс описан в [6]).

И наконец, несколько слов о последней группе данных, а именно, топографических характеристиках, включающих в себя среднюю высоту земной поверхности для ячейки расчетной сетки и средние углы наклона этой поверхности в меридиональном и широтном направлениях, необходимые для расчетов трансформации стока в пределах расчетной ячейки. Высоты были взяты из информационной базы Центра данных по системам наблюдений за ресурсами Земли EDC (Earth resources observation systems Data Center), углы наклона рассчитаны нами по данным о средних высотах соседних ячеек.

Процедура оптимизации модельных параметров

Поскольку значения параметров подстилающей поверхности, взятые из одноградусных глобальных баз данных, весьма приближенно идентифицируют модельные объекты, для повышения качества модельных расчетов часть параметров была оптимизирована. Цель оптимизации (калибровки) параметров модели – поиск таких значений параметров, при которых достигается оптимум целевой функции – меры различия выходных переменных модели (в данном случае – величины стока) и результатов их измерений. В данной работе использовались две целевые функции – эффективность расчета суточного стока по Нэшу и Сатклифу Eff и абсолютная систематическая ошибка |Bias|:

$$\text{Eff} = 1 - \frac{\sum_{\Omega} (x_{sim} - x_{obs})^2}{\sum_{\Omega} (x_{obs} - \bar{x}_{obs})^2}, \quad \text{Bias} = \frac{\sum_{\Omega} (x_{sim} - x_{obs})}{\sum_{\Omega} x_{obs}} 100\%,$$

где x_{sim} и x_{obs} – смоделированное и измеренное значения переменной x , а Ω – дискретное множество значений переменной x . Обоснование использования именно двух целевых функций приведено в [19].

Оптимизация проводилась автоматизировано с использованием алгоритма поиска глобального оптимума целевой функции SCE-UA [11]. Метод SCE-UA был разработан для оптимизации какой-либо одной целевой функции. Чтобы применить его для двух функций Eff и Bias, поиск максимального значения Eff осуществлялся при условии, что значения |Bias| не должны превышать 5%. Последнее связано с тем, что систематическая ошибка суточных, месячных и годовых значений измеренного речного стока составляет в среднем не менее 5% [23] (для периодов половодья ошибка измерения стока может быть существенно выше).

При проведении процедуры оптимизации калибровались 8 параметров подстилающей поверхности бассейна. К ним относятся, в частности, корректирующие множители (общие для всего бассейна) к значениям коэффициента фильтрации почвы K_0 , толщины корнеобитаемого слоя h_r , альbedo подстилающей поверхности в теплый (бесснежный) период alb_{sum} и альbedo растительного покрова в зимний период (при наличии снега на

элементах растительности) alb_{win} для каждой ячейки, обозначенные k_{K0} , k_{hr} , k_{albsum} и k_{albwin} соответственно. Кроме того, принималось, что для каждой ячейки расстояние от поверхности почвы до глубины практически водонепроницаемого слоя $h_0 = k_{h0} h_r$, где k_{h0} – множитель, общий для всего бассейна, который также калибровался. И, наконец, калибровались такие параметры как альbedo свежевыпавшего снега alb_{sn} , коэффициент шероховатости n в формуле Маннинга и эффективная скорость движения воды в русле u_e . Обоснование выбора этих параметров приведено в [6].

Кроме того, поскольку данные реанализа содержат систематические ошибки, для уменьшения их влияния на качество расчета были введены четыре корректирующих множителя: к жидким k_{lp} и твердым k_{sp} осадкам, к длинноволновой k_{lw} и коротковолновой k_{sw} радиации. В этом случае k_{albwin} был исключен из числа калибруемых параметров и общее их число достигло, как и в [6], 11.

Калибровка и проверка модели

Для калибровки модели и последующей ее проверки использовались суточные значения речного стока, измеренные в замыкающих створах, приведенных в табл. 1 и показанных на рис. 1. Калибровочный период составил пять лет с 1986 по 1990 г. Калибровка параметров осуществлялась для каждого речного бассейна и для каждой метеорологической базы данных. При этом калибровалось два вышеописанных набора параметров, не включающих и включающих в себя корректирующие множители к продуктам реанализа. В первом случае калибровалось 8 параметров, во втором – 11. Калибровка значений параметров осуществлялась в пределах физически обоснованных их значений.

Полученные наборы значений параметров были использованы для моделирования гидрографов речного стока за период 1986 – 1995 гг. Для удобства вариант расчета с априорными (неоптимизированными) параметрами назовем “Вар 1”, с восемью оптимизированными параметрами – “Вар 2”, с 11 – “Вар 3”. Оценка полученных при моделировании результатов осуществлялась на основе сопоставления рассчитанных и измеренных суточных гидрографов стока визуальным и по статистическим критериям: систематической ошибке Bias и эффективности Eff. При гидрологических расчетах обычно принимают следующую шкалу оценки точности расчета речного стока [1]: «хорошая» точность при $Eff \geq 0.75$ и «удовлетворительная» при $0.36 < Eff < 0.75$.

Результаты расчета речного стока с использованием различного информационного обеспечения

Рассмотрим наиболее интересные полученные результаты. Прежде всего остановимся на результатах расчета по пяти рекам ЕЧР, поскольку для них оптимизировались параметры с использованием всех трех метеорологических баз данных (B0, M1, M2), в то время как для сибирских рек – только двух (B0 и M1) (из-за больших затрат времени на калибровку).

На рис. 2 приведены медианы эффективностей расчета суточного речного стока Eff и абсолютных значений систематических ошибок расчета Bias, полученных для пяти рек ЕЧР с использованием трех баз данных по метеорологическим характеристикам и различных значений параметров (априорных – Вар 1, оптимизированных без введения корректирующих множителей к метеорологическим данным – Вар 2, оптимизированных значений параметров и корректирующих множителей к осадкам и радиации – Вар 3). Нетрудно заметить, что без калибровки параметров качество расчета гидрографов речного стока для всех метеорологических баз данных неудовлетворительное: медиана $Eff < 0$, а медиана $|Bias|$ варьирует от 28 до 65%. Калибровка 8 параметров позволила существенно улучшить результаты. Медиана Eff для пяти бассейнов повысилась до 0.58 – 0.6 в случае реанализных данных M1 и M2, причем в последнем случае удалось достичь довольно низкой систематической ошибки (4 – 12%). Гибридная база данных позволила получить более высокую медиану Eff, равную 0.7, однако медиана $|Bias|$ даже повысилась на 3-4% по сравнению с априорными значениями параметров, составив 33%.

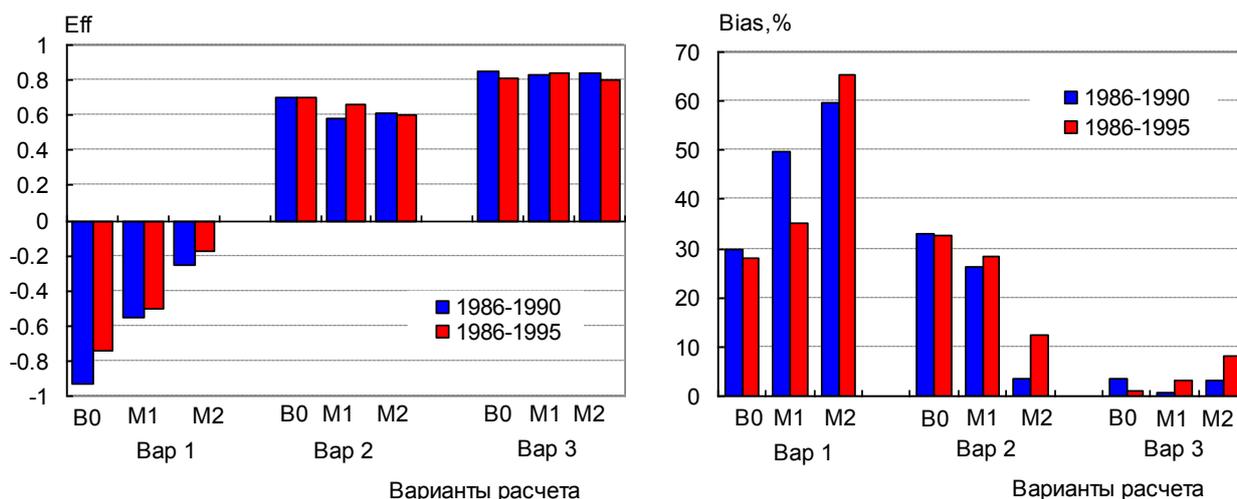


Рис.2. Медианы Eff и Bias для пяти рек ЕЧР, полученные по модели SWAP с использованием баз данных B0, M1 и M2 при различных вариантах значений параметров (Var1, Var2 и Var3).

Дальнейшего прогресса в качестве расчетов удалось добиться посредством одновременной калибровки параметров модели и корректирующих множителей к осадкам и приходящей радиации (Var 3). Медиана Eff во всех трех случаях ≥ 0.8 , а медиана |Bias| в основном не превышает 5% (только в случае M2 она составила 8% для проверочного периода 1986 – 1995 гг.). Таким образом “хорошей” точности расчета удалось добиться только лишь после корректировки метеорологических характеристик. При этом разброс между результатами расчета стока с использованием различных баз данных существенно уменьшился. Это хорошо видно на рис. 3, где приведены гидрографы стока р. Печоры, полученные в различных вариантах расчета. Так, на верхнем рисунке рассчитанные гидрографы с использованием априорных значений параметров не только существенно отличаются от измеренных, но и во многом расходятся между собой. На среднем рисунке эти расхождения уменьшаются и, наконец, на нижнем (где калибровались поправочные множители к осадкам и радиации) различия минимальны.

Отметим также, что калибровка поправок к реанализным метеоданным привела к тому, что полученные гидрографы речного стока стали близки к рассчитанным по модели SWAP с использованием “реальной метеорологии” (т.е. метеорологических характеристик, непосредственно измеренных на метеостанциях, расположенных в пределах рассматриваемых бассейнов). Так, для Северной Двины, Мезени и Печоры эффективности расчета суточного стока с использованием реальной метеорологии (без калибровки поправок к осадкам и радиации) составили соответственно 0.88, 0.82 и 0.83 для калибровочного периода (1986 – 1990 гг.) и 0.89, 0.84 и 0.76 для проверочного периода (1986 – 1995 гг.), абсолютная систематическая ошибка превысила 5% лишь в одном случае (составив 11% для р. Печоры в 1986-1995 гг.) [5 – 7].

Интересно также сопоставить полученные по модели SWAP результаты расчета речного стока с использованием различных глобальных баз данных с результатами расчета по всемирно известной американской модели VIC, приведенными в [22]. В таблице 2 и на рис.4 приведены эффективности и систематические ошибки расчета месячного стока по моделям SWAP (1986-1995 гг.) и VIC (1979-1999 гг.) для семи рек. На рис.4, где для большей наглядности эти статистики расположены в порядке возрастания, хорошо видно, что введение калибруемых поправок к метеоданным (B0, Var3 и M1, Var3) при расчете по модели SWAP позволило превзойти VIC, как по Eff, так и по Bias.

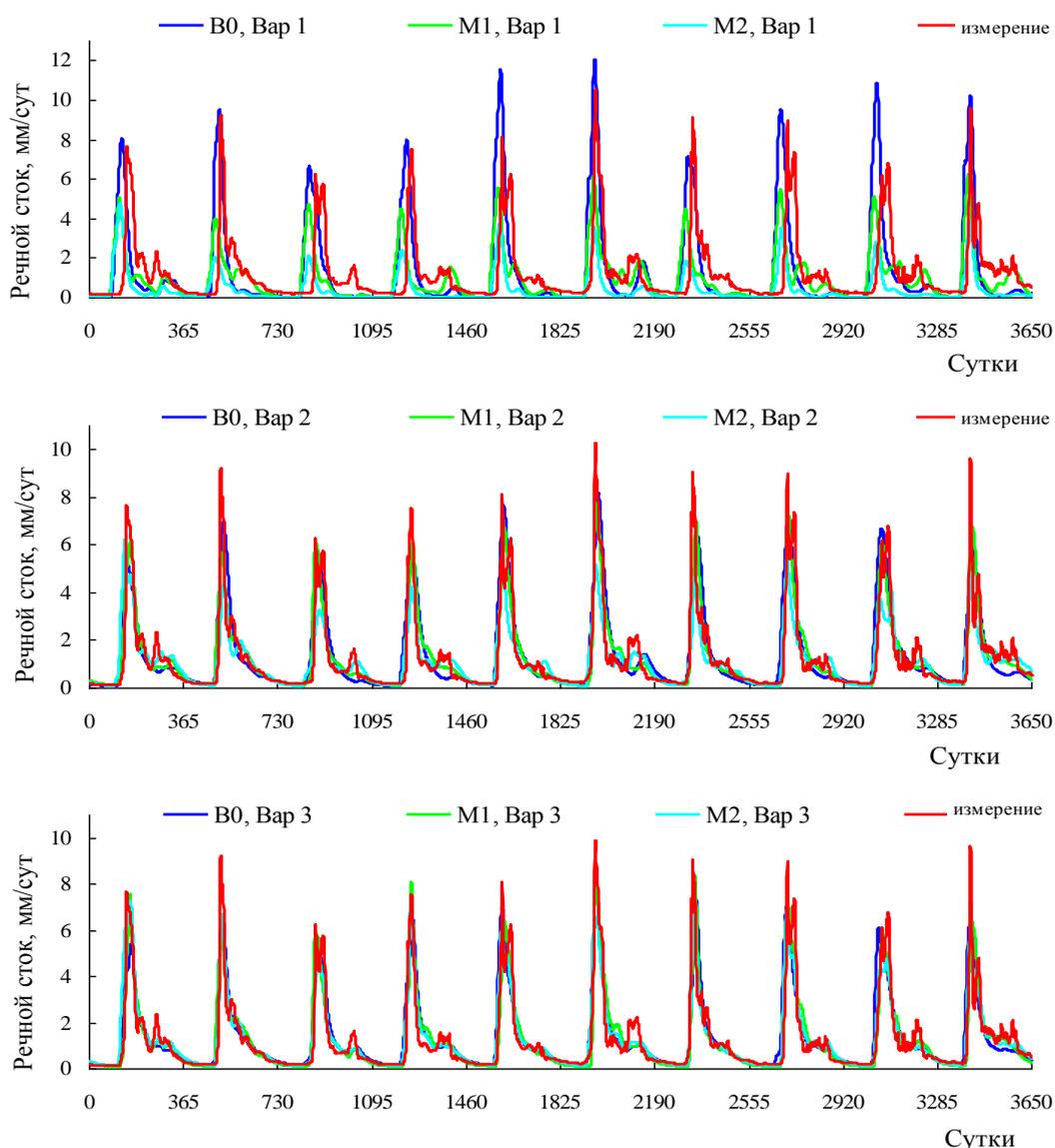


Рис.3. Измеренные и рассчитанные суточные стоки р. Печоры. Расчеты выполнены с использованием трех метеорологических баз данных (B0, M1, M2) и различных значений параметров: априорных (Var 1), оптимизированных без введения корректирующих множителей к метеорологическим характеристикам (Var 2), оптимизированных значений параметров и корректирующих множителей к осадкам и радиации (Var 3). Нумерация суток начинается с 1 января 1986 г.

Таблица 2

Систематические ошибки Bias и эффективности расчета месячных значений стока Eff_m для семи речных бассейнов, полученные по модели SWAP (с использованием баз данных M1 и B0 и двух вариантов оптимизированных значений параметров) и VIC

Река	SWAP								VIC	
	B0				M1				Eff_m	Bias,%
	Var 2		Var 3		Var 2		Var 3			
Eff_m	Bias,%	Eff_m	Bias,%	Eff_m	Bias,%	Eff_m	Bias,%			
Северная										
Двина	0.68	49.1	0.94	0.8	0.63	47.4	0.92	1.5	0.85	-0.5
Мезень	0.76	37.6	0.92	4.2	0.80	28.6	0.82	-1.4	0.83	-9.2
Печора	0.85	1.9	0.87	1.7	0.91	-2.6	0.93	-3.3	0.77	-15.4
Оленек	0.87	-1.4	0.89	0.5	0.89	12.9	0.89	-10.1	0.85	14.9
Яна	0.70	18.5	0.85	13.6	0.69	25.9	0.86	3.0	<0	80.8
Индибирка	0.78	12.2	0.90	7.9	0.72	32.9	0.89	3.2	0.83	6.2
Колыма	0.79	3.7	0.91	-0.9	0.44	61.3	0.89	4.6	0.62	25.3

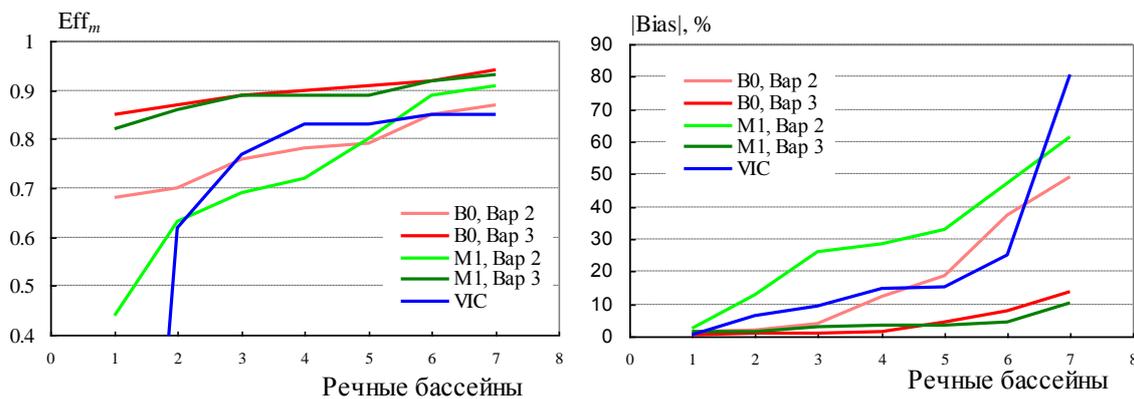


Рис.4. Эффективности расчета месячных значений стока Eff_m и абсолютные значения систематической ошибки $Bias$ для каждого из 7 речных бассейнов, полученные по модели SWAP (с использованием баз данных M1 и B0 и оптимизированных параметров Вар 2 и Вар 3) и VIC. Все статистики упорядочены в порядке возрастания.

Выводы

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Модель SWAP в сочетании с глобальными базами данных по метеорологическим характеристикам и параметрам подстилающей поверхности можно использовать для расчета суточных гидрографов стока северных рек как в районах с сезоннопромерзающими, так и с сезоннооттаивающими почвогрунтами, однако высокого качества расчета при этом можно добиться лишь в том случае, когда наряду с параметрами модели оптимизируются поправки к осадкам и приходящей радиации.

2. Введение калибруемых поправок к метеорологическим характеристикам из глобальных баз данных позволяет получить суточные гидрографы стока северных рек близкие по качеству к гидрографам, рассчитанным по данным непосредственных наблюдений на метеорологических станциях.

3. Не выявлено явных преимуществ какой-либо одной из трех метеорологических баз данных (NCEP/DOE реанализ, ERA-40 реанализ и гибридизированный NCEP/DOE реанализ) в отношении воспроизведения стока северных рек, поскольку введение калибруемых поправок к осадкам и радиации делает результаты расчетов с использованием этих баз данных близкими между собой.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 11-05-00015). Кроме того, авторы выражает благодарность организаторам международного проекта GSWP-2 за предоставленные базы данных для модельных расчетов и сотрудникам GRDC (The Global Runoff Data Centre, D - 56068 Koblenz, Germany) за данные измерений речного стока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Апполов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс гидрологических прогнозов. Л.: Гидрометеиздат, 1974. - 366 с.
2. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Параметризация тепло- и влагообмена на поверхности суши при сопряжении гидрологических и климатических моделей // Водные ресурсы, 1998, т.25, №4. - С. 421 – 431.
3. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Опыт моделирования процессов тепловлагообмена на поверхности суши в региональном масштабе // Водные ресурсы, 2000, т.27, №1. - С. 32 – 47.
4. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Параметризация процессов тепловлагообмена в бореальных лесных экосистемах // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2001, т.37, №2. - С. 182 – 200.
5. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я. Воспроизведение гидрографов стока р. Печоры на основе модели тепловлагообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой // Водные ресурсы, 2010, т.37, №2. - С. 186 – 198.

6. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я., Ковалев Е.Э. Использование модели взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP для расчетов речного стока в высоких широтах // *Водные ресурсы*, 2008, т.35, №1. - С. 1 – 15.
7. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я., Ковалев Е.Э. Моделирование стока р. Северной Двины с использованием модели взаимодействия поверхности суши с атмосферой SWAP и глобальных баз данных // *Водные ресурсы*, 2011, т.38, №4 (в печати)
8. Boone A., Habelts F., Noilhan J., Clark D., Dirmeyer P., Fox S., Gusev Y., Haddeland I., Koster R., Lohmann D., Mahanama S., Mitchell K., Nasonova O., Niu G.-Y., Pitman A., Polcher J., Shmakin A. B., Tanaka K., van den Hurk B., Verant S., Verseghy D., Viterbo P., Yang Z.-L. The Rhone-aggregation land surface scheme intercomparison project: An overview // *J. Climate*, 2004, V.17, №1. - P. 187 – 208.
9. Clapp R.B., Hornberger G.M. Empirical equations for some soil hydraulic properties // *Water Resour. Res.* 1978. V.14. №4. P. 601–604.
10. Duan Q., Schaake J., Andreassian V. et al. Model Parameter Estimation Experiment (MOPEX): An overview of science strategy and major results from the second and third workshops // *J. Hydrology*, 2006, V.320, №1–2. - P. 3 – 17.
11. Duan Q., Sorooshian S., Gupta V.K. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall runoff models // *Water Resources Research*, 1992, V.28, №4. - P. 1015 – 1031.
12. Gusev Ye.M., Nasonova O.N. The Land Surface Parameterization scheme SWAP: description and partial validation // *Global Planetary Change*, 1998, V.19, №1–4. - P. 63 – 86.
13. Gusev Ye.M., Nasonova O.N. An experience of modeling heat and water exchange at the land surface on a large river basin scale // *J. Hydrology*, 2000, V.233, №1–4. - P. 1 – 18.
14. Gusev Ye.M., Nasonova O.N. Modelling heat and water exchange in the boreal spruce forest by the land-surface model SWAP // *J. Hydrology*, 2003, V.280, №1–4. - P. 162–191.
15. Hall F., Collatz G., Los S., Brown de Colstoun E., Landis D. (eds.). ISLSCP Initiative II. NASA // DVD/CD-ROM, NASA, 2005.
16. Huffman G.J., Adler R.F., Arkin P. et al. The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) combined precipitation dataset // *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1997, V.78. - P. 5-20.
17. Manabe S. Climate and the ocean circulation: 1. The atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface // *Monthly Weather Review*, 1969, V.97, №11. - P. 739–805.
18. Mengelkamp H.-T., Warrach K., Ruhe C., Raschke E. Simulation of runoff and streamflow on local and regional scales // *Meteorol. Atmospheric Physics*, 2001, V.76, №1–4. - P. 107–117.
19. Nasonova O.N., Gusev Ye.M., Kovalev Ye.E. Investigating the Ability of a Land Surface Model to Simulate Streamflow with the Accuracy of Hydrological Models: A Case Study Using MOPEX Materials // *J. Hydrometeorology*, 2009, V.10, №5. - P. 1128 – 1150.
20. New M., Hulme M., Jones P. Representating twentieth-century space-time climate variability. Part II: Development of 1901-96 monthly grids of terrestrial surface climate // *J. Climate*, 2000, V.13. - P. 2217 – 2238.
21. Rudolf B., Hauschild H., Reuth W., Schneider U. Terrestrial precipitation analysis: Operational method and required density of point measurements // *NATO ASI Series I: Global Precipitation and Climate Change*. Berlin: Springer-Verlag, 1994, V. 26. - P. 173-186.
22. Su F., Adam J.C., Bowling L.C., Lettenmaier D.P. Streamflow simulations of the terrestrial Arctic domain // *J. Geophysical Research*, 2005, V110, D08112, doi:10.1029/2004JD005518.
23. WMO, 1994. Guide to hydrological practices. WMO-No.168. World Meteorological Organization.
24. Wood E.F., Lettenmaier D.P., Liang X. et al. The project for intercomparison of land-surface parameterization schemes (PILPS) phase-2(c) Red-Arkansas River basin experiment: 1. Experiment description and summary intercomparisons // *Global Planetary Change*, 1998, V.19, №1–4. P. - 115–135.
25. Zhao M., Dirmeyer P.A. Production and analysis of GSWP-2 near-surface meteorology data sets. Calverton: Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies, 2003. Techn. Rep. №159. - 36 p.