ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ, 2012, № 5, с. 61–70

## ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 556.048

# ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ГИДРОГРАФОВ СТОКА СЕВЕРНЫХ РЕК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛОБАЛЬНЫХ БАЗ ДАННЫХ[1]

© 2012 г. О.Н. Насонова, Е.М. Гусев, Е.Э. Ковалев

*Учреждение Российской академии наук Институт водных проблем РАН*

Поступила в редакцию 20.08.2011 г.

Проведены расчеты суточных гидрографов стока девяти российских северных рек по модели тепловлагообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP. В качестве информационного обеспечения использовались три глобальные метеорологические базы данных (реанализ NCEP/DOE, реанализ ERA-40 и гибридизированный 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.

**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 тепловлагообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой [14, 16, 25, 34], 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 [24]. 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 [2–7], и будет использоваться в настоящей работе.

Цель 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, во-вторых, с тем, что нередко бассейны северных рек 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.

[1]Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 11-05-00015).

На данный момент разработано немало глобальных баз данных по метеорологическим характеристикам и параметрам подстилающей поверхности, различающихся пространственным и временным разрешением, а также степенью надежности и достоверности. В работах [12, 13, 28] исследовалось, в какой степени неопределенности в задании значений исходных метеорологических характеристик и параметров подстилающей поверхности, связанные с выбором глобальных баз данных, могут повлиять на результаты моделирования составляющих водного баланса в глобальном масштабе. В частности, глобальные оценки стока могли различаться почти вдвое в зависимости от использованной базы данных по осадкам. В указанных статьях не представлялось возможным сделать вывод о том, какие же базы данных (из рассмотренных) более предпочтительны, поскольку на данный момент не существует надежных глобальных оценок составляющих водного баланса, основанных на данных измерений, с которыми можно было бы сопоставить результаты моделирования соответствующих характеристик. Однако это можно сделать при моделировании стока конкретных рек, сопоставляя воспроизведенные с использованием альтернативных баз данных гидрографы стока с измеренными, что и было проделано в настоящей работе на примере девяти северных рек и трех альтернативных глобальных баз данных по метеорологическим элементам.

**Модель SWAP SWAP** представляет собой физико-математическую модель, описывающую процессы тепло- и влагообмена в системе почва – растительный / снежный покров – приземный слой атмосферы (SVAS: Soil – Vegetation / snow cover– Atmosphere System). Различные версии модели SWAP детально описаны в целом ряде публикаций [например, 2 – 7, 18 – 21], 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 [7]. 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. разделения 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 добегания. 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 [7, 9].

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 $10^{5}$ км$^2$ [2–7, 14, 18–21, 34]. Результаты проверок показали, что модель SWAP способна адекватно воспроизводить (без калибровки модельных параметров) 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 10 200 до 526 000 км$^2$ (табл. 1). На рис. 1 показана схематизация бассейнов для модельных расчетов в виде совокупности одноградусных ячеек сетки, соединенных речной сетью [30]. Количество расчетных ячеек в пределах каждого бассейна приведено в табл. 1. Здесь же представлены стоковые

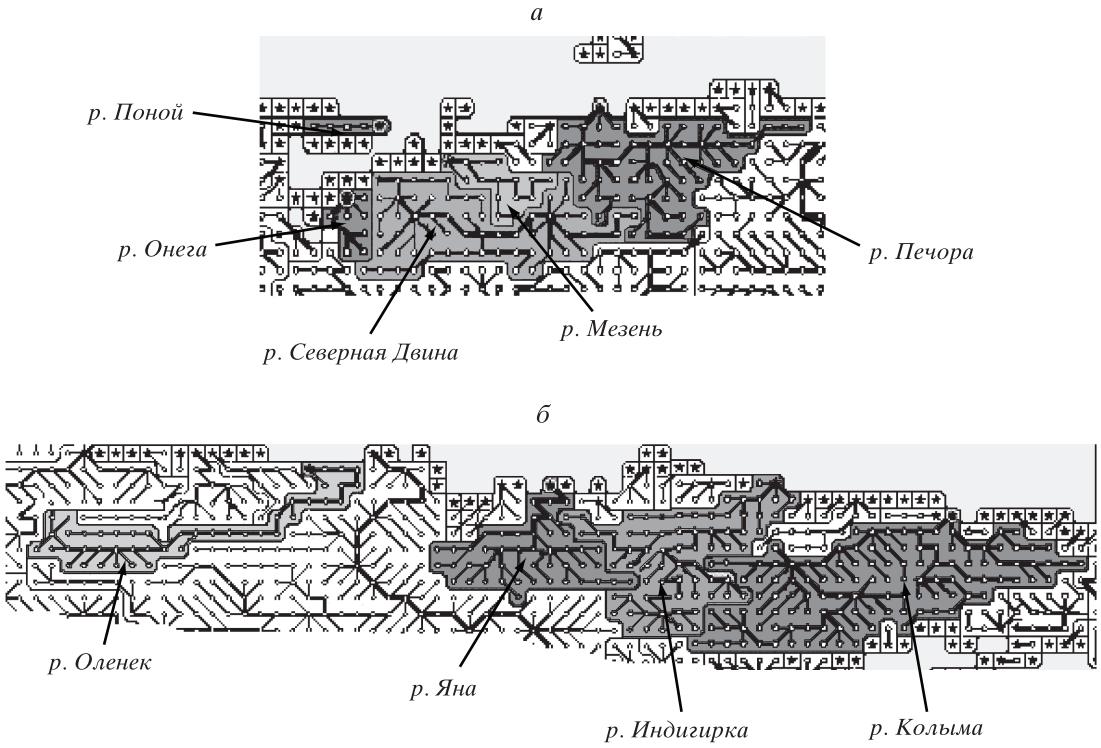


**Рис. 1.** Схематизация рассматриваемых в настоящей работе бассейнов северных рек: *а*) реки европейской части России, *б*) реки Восточной Сибири и Дальнего Востока.

**Таблица 1.** Речные бассейны и стоковые станции

| Река | Стоковая 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 | 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 | 101 |

станции, для которых будут проводиться расчеты гидрографов стока.

Возможность использования довольно грубого одноградусного пространственного разрешения для расчета стока с указанных речных бассейнов на основе модели SWAP была подтверждена экспериментально. Численные эксперименты показали, что годовые значения стока и суммарного испарения с бассейна р. Роны (имеющего площадь 86 000 км$^2$ и характеризующегося большим разнообразием природных условий) при переходе от расчетов с пространственным разрешением 8 км × 8 км к расчетам с разрешением 1° × 1° изменились не более чем на 3.5 и 1.0% соответственно [7, 9], то есть загрубление расчетной сетки в указанных пределах не привело к значительным погрешностям в результатах моделирования. Это можно объяснить учетом в модели подсеточных эффектов. В частности, в SWAP учитывается пространственная изменчивость коэффициента

фильтрации, контролирующего разделение поступающей на поверхность почвы воды между поверхностным стоком и инфильтрацией.

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

Бассейны второй группы рек (рис. 1*б*) в основном расположены в сибирской области субарктического климатического 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 г. по 31 декабря 1995 г. 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) [22]. 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 [35]. 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 мин. 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) [29], а также базы данных GPCC (Global Precipitation Climatology Centre) [31] и GPCP (Global Precipitation Climatology Project) [23]. Первые две базы имеют 0.5° пространственное разрешение и основаны на данных наземных измерений осадков без учета поправок на ветер, причем в GPCC задействовано большее число осадкомеров. В основе базы данных GPCP – результаты наземных измерений осадков из GPCC (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 GPCC 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 GPCC 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 (включающим в себя коэффициент фильтрации, наименьшую влагоемкость, влажность завядания, пористость, B-параметр и матричный потенциал при насыщении в параметризации Клэппа и Хорнбергера зависимостей матричного потенциала и коэффициента влагопроводности почвы от ее влажности [15]) и параметрам растительного покрова (таким как высота растительности, глубина корнеобитаемого слоя, относительные площади листьев и стеблей/стволов, доля зеленых листьев, коэффициент экстинкции, параметр шероховатости, высота слоя вытеснения, альбедо поверхности суши, 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 [11]).

И наконец, несколько слов о последней группе данных, а именно топографических характеристиках, включающих в себя среднюю высоту земной поверхности для каждой 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 Сатклиффу Eff [26] и абсолютное значение систематической ошибки |Bias|:

$$\mathrm{Eff} = 1 - \frac{\sum\limits_{\Omega}(x_{sim} - x_{obs})^2}{\sum\limits_{\Omega}(x_{obs} - \bar{x}_{obs})^2},$$

$$\mathrm{Bias} = \frac{\sum\limits_{\Omega}(x_{sim} - x_{obs})}{\sum\limits_{\Omega} x_{obs}} 100\%,$$

где $x_{sim}$ и $x_{obs}$ – смоделированное и измеренное значения переменной $x$, а $\Omega$ – дискретное множество значений переменной $x$. Обоснование использования именно двух целевых функций приведено в [27].

Оптимизация проводилась автоматизировано с использованием алгоритма поиска глобального оптимума целевой функции SCE-UA [17]. 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% [33] (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 $h_r$, альбедо подстилающей поверхности в теплый (бесснежный) период $alb_{sum}$ и альбедо 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 альбедо 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 [9].

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 [9], 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. 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 метеоэлементам. В первом случае, как было отмечено выше, калибровалось 8 параметров, во втором – 11. Калибровка осуществлялась в пределах физически обоснованных значений параметров.

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 визуально и по трем статистическим критериям: систематической ошибке расчета Bias, эффективности расчета Eff и коэффициенту корреляции $r$. При гидрологических расчетах обычно принимают следующую шкалу оценки точности расчета речного стока [1]: “хорошая” точность при Eff ≤ 0.75, “удовлетворительная” при 0.36 ≤ Eff < 0.75 и “неудовлетворительная” при Eff < 0.36.

**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 значений Eff, |Bias| и $r$, полученных на основе сопоставления измеренных суточных гидрографов стока для пяти рек ЕЧР с рассчитанными по модели SWAP с использованием трех баз данных по метеорологическим характеристикам и различных значений параметров. Нетрудно заметить, что без калибровки параметров качество расчета гидрографов

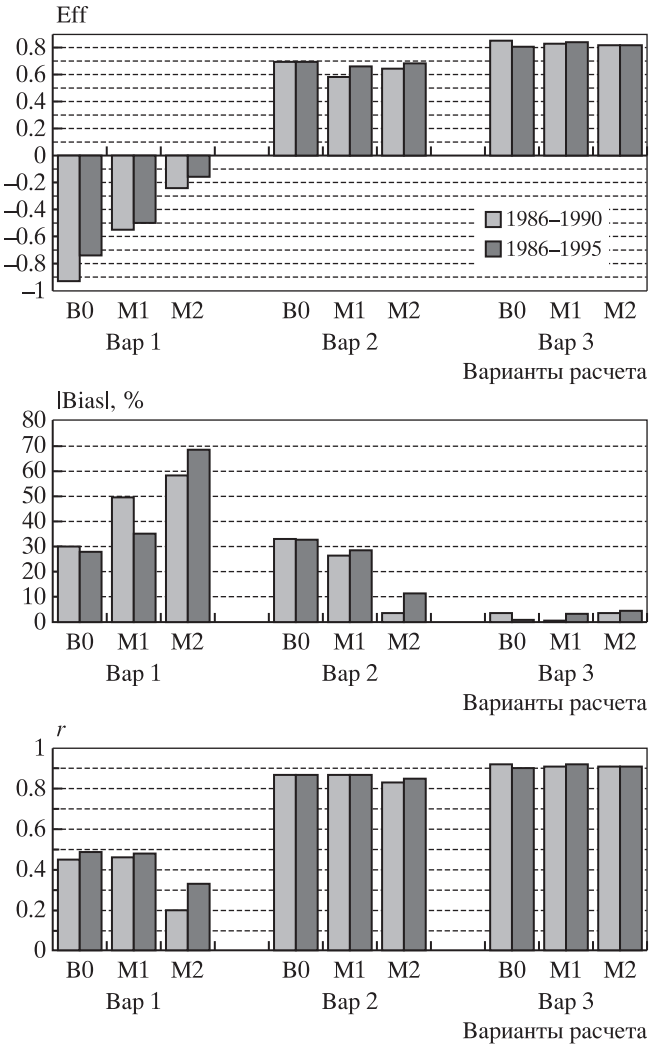


**Рис. 2.** Медианы эффективностей расчета суточных значений стока Eff, абсолютных значений систематической ошибки расчета |Bias| и коэффициентов корреляции $r$ для пяти рек ЕЧР, полученные по модели SWAP с использованием баз данных B0, M1 и M2 при различных вариантах значений параметров (Вар 1, Вар 2 и Вар 3).

речного стока для всех метеорологических баз данных неудовлетворительное: медиана Eff < 0, медиана |Bias| варьирует от 28 до 69%, а медиана *r* не превышает 0.5. Калибровка 8 параметров позволила существенно улучшить результаты. Для калибровочного периода медиана Eff для пяти бассейнов повысилась до 0.58 и 0.65 при использовании реанализных данных M1 и M2 соответственно, причем в последнем случае удалось достичь довольно низкой систематической ошибки расчета ≈ 4%, которая для M1 составила 26%. Гибридизированная база данных B0 позволила получить более высокую медиану Eff, равную 0.70, однако при этом медиана |Bias| даже повысилась на 3–4% по сравнению с априорными значениями параметров, составив 33%. Медианы коэффициентов корреляции существенно возросли (до 0.83–0.87). Для всего расчетного периода медианы Eff составили 0.66, 0.68 и 0.70 соответственно для M1, M2 и B0, а соответствующие медианы |Bias| – 29, 12 и 33%.

Дальнейшего прогресса в качестве расчетов удалось добиться посредством одновременной калибровки параметров модели и корректирующих множителей к осадкам и приходящей радиации (Вар 3). Медианы Eff во всех трех случаях и для обоих расчетных периодов варьировали от 0.81 до 0.85, медианы *r* достигли 0.90–0.92, а медианы |Bias| не превышали 4.3%. Таким образом, высокой точности расчета удалось добиться только лишь после вовлечения в процесс оптимизации корректирующих множителей к метеорологическим характеристикам. 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.

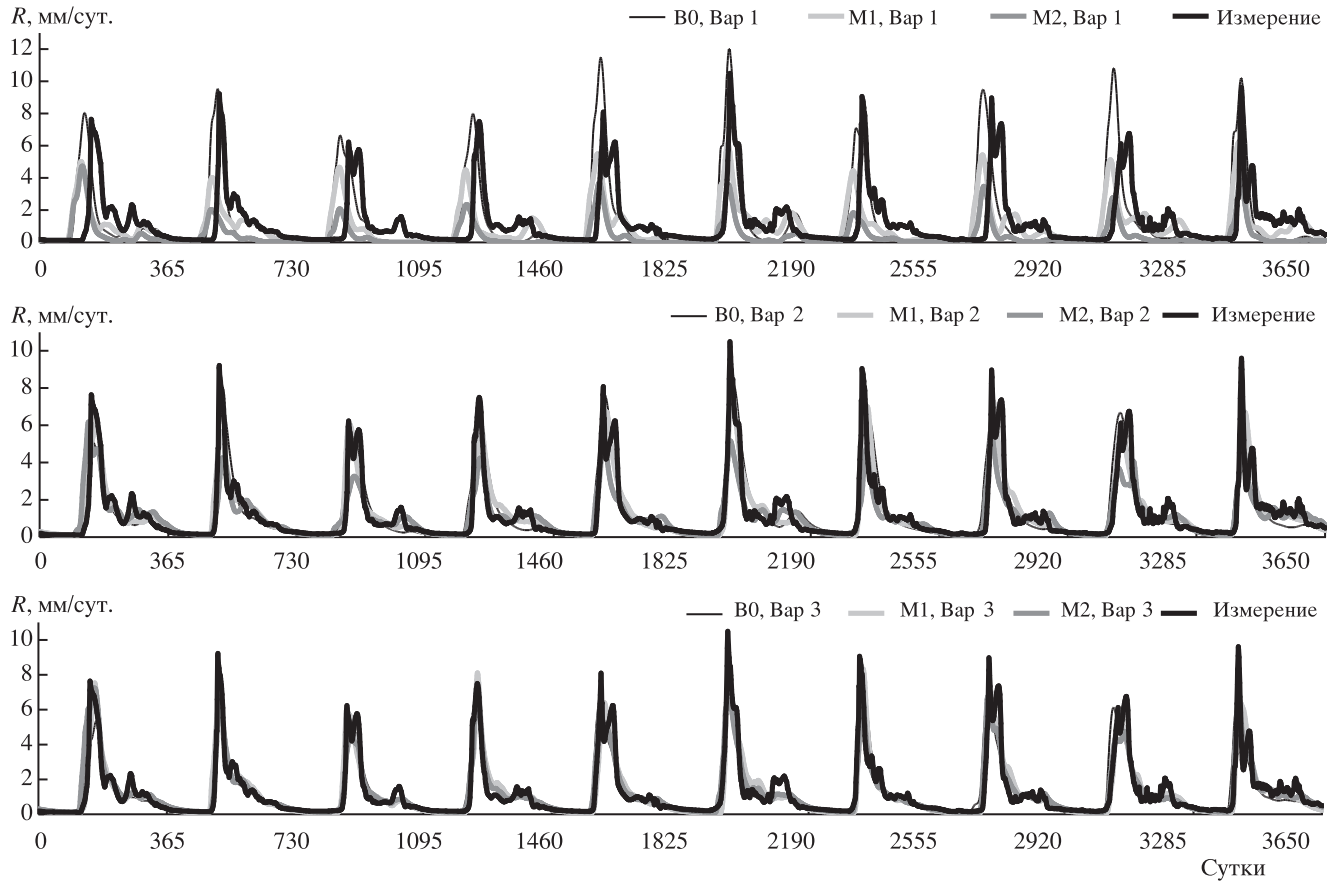


**Рис. 3.** Измеренные и рассчитанные суточные значения стока р. Печоры (*R*). Расчеты выполнены с использованием трех метеорологических баз данных (B0, M1, M2) и различных значений параметров (Вар 1, Вар 2 и Вар 3). Нумерация суток начинается с 1 января 1986 г.

**Таблица 2.** Систематические ошибки Bias (%) и эффективности Eff расчета месячных значений стока для семи речных бассейнов, полученные по модели SWAP (с использованием баз данных M1 и B0 и двух вариантов оптимизированных значений параметров Вар 2 и Вар 3) и VIC

| Река | SWAP | | | | | | | | VIC | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | B0 | | | | M1 | | | | | |
| | Вар 2 | | Вар 3 | | Вар 2 | | Вар 3 | | Eff | Bias |
| | Eff | Bias | Eff | Bias | Eff | Bias | Eff | 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 |
| Индигирка | 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 |

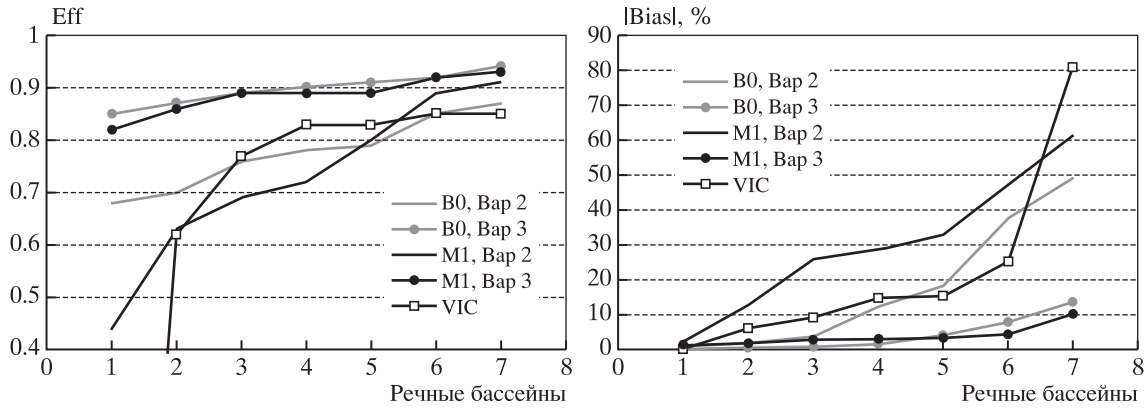


**Рис. 4.** Эффективности расчета месячных значений стока Eff и абсолютные значения систематической ошибки |Bias| для каждого из 7 речных бассейнов, полученные по модели SWAP (с использованием баз данных M1 и B0 и двух вариантов оптимизированных значений параметров – Вар 2 и Вар 3) и VIC. Все статистики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

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.) [8–10].

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 [32]. В табл. 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, Вар 3 и M1, Вар 3) при расчете по модели SWAP позволило превзойти VIC как по Eff, так и по Bias.

**Выводы.** Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Рассмотренные в работе глобальные базы 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 сезонноотаивающими 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 реанализных 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 использованных 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.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. *Апполов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д.* Курс гидрологических прогнозов. Л.: Гидрометеоиздат, 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.* Параметризация процессов тепловлагообмена в системе “грунтовые воды – почва – растительный / снежный покров – атмосфера” для территорий с четко выраженной сезонной изменчивостью климата // Почвоведение. 2000. № 6. С. 733–747.
4. *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.
5. *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.
6. *Гусев Е.М., Насонова О.Н.* Моделирование процессов тепловлагообмена суши с атмосферой в локальном масштабе для территорий с многолетней мерзлотой // Почвоведение. 2004. № 9. С. 1077–1092.
7. *Гусев Е.М., Насонова О.Н.* Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука, 2010. 327 с.
8. *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.
9. *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.
10. *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. С. 439–453.
11. *Гусев Е.М., Насонова О.Н., Ковалев Е.Э.* Моделирование составляющих теплового и водного балансов поверхности суши земного шара // Водные ресурсы. 2006. Т. 33. № 6. С. 664–676.
12. *Насонова О.Н.* Влияние неопределенностей в глобальных базах данных по осадкам на оценки составляющих водного баланса суши // Водные ресурсы. 2011 (в печати).
13. *Насонова О.Н., Гусев Е.М., Ковалев Е.Э.* Глобальные оценки составляющих теплового и водного балансов суши // Изв. РАН. Сер. геогр. 2008. № 1. С. 8–19.
14. *Boone A., Habets F., Noilhan J., Clark D. et al.* The Rhone-aggregation land surface scheme intercomparison project: An overview // J. Climate. 2004. V. 17. № 1. P. 187–208.
15. *Clapp R.B., Hornberger G.M.* Empirical equations for some soil hydraulic properties // Water Resources Research. 1978. V. 14. № 4. P. 601–604.
16. *Duan Q., Schaake J., Andreassian V., Franks S. 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.
17. *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.
18. *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.
19. *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.

20. *Gusev Ye.M., Nasonova O.N.* The simulation of heat and water exchange at the land-atmosphere interface for the boreal grassland by the land-surface model SWAP // Hydrolog. Proc. 2002. V. 16. № 10. P. 1893–1919.

21. *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.

22. *Hall F., Collatz G., Los S., Brown de Colstoun E., Landis D.* (eds.). ISLSCP Initiative II. NASA // DVD/CD-ROM, NASA, 2005.

23. *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.

24. *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.

25. *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.

26. *Nash J.E., Sutcliffe J.V.* River flow forecasting through conceptual models: 1 A discussion of principles // J. Hydrology. 1970. V. 10. № 3. P. 282–290.

27. *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.

28. *Nasonova O.N., Gusev Ye.M., Kovalev Ye.E.* Impact of uncertainties in meteorological forcing data and land surface parameters on global estimates of terrestrial water balance components // Hydrolog. Proc. 2011. V. 25. № 7. P. 1074–1090.

29. *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.

30. *Oki T., Sud Y.C.* Design of Total Runoff Integrating Pathways (TRIP) – A global river channel network // Earth Interactions. 1998. V. 2. № 1. P. 1 –36.

31. *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.

32. *Su F., Adam J.C., Bowling L.C., Lettenmaier D.P.* Streamflow simulations of the terrestrial Arctic domain // J. Geophysical Research. 2005. V. 110. D08112, doi:10.1029/2004JD005518.

33. WMO, 1994. Guide to hydrological practices. WMO-No.168. World Meteorological Organization.

34. *Wood E.F., Lettenmaier D.P., Liang X., Lohmann D. 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.

35. *Zhao M., Dirmeyer P.A.* Production and analysis of GSWP-2 near-surface meteorology data sets // COLA Technical Report. 2003. № 159. 36 p.

*Авторы выражают 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.*

# Run-off Hydrograph Reproduction of Northern Rivers with Use of Global Data Base

**O.N. Nasonova, E.M. Guseva, B.E. Kovalev**

*Institute of Water Problems, RAS*

Daily run-off hydrograph calculations of nine Russian rivers according to the model of heat-moisture exchange of the underlying surface with the atmosphere SWAP are made. As an informational support three global meteorological data base were used (reanalyses NCEP/DOE, reanalyses ERA-40 and hybridizes NCEP/DOE reanalyses), as well as global data base according tom parameters of the underlying surface. It is shown, that high quality of run-off calculation of the Nothjern rivers on the base of SWAP model and global data base is possible in case of simultaneous optimization of the model parameters and reductions toward the precipitation and incoming radiation.