

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОКА Р. СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТИ СУШИ С АТМОСФЕРОЙ SWAP И ГЛОБАЛЬНЫХ БАЗ ДАННЫХ<sup>1</sup>

© 2011 г. Е. М. Гусев, О. Н. Насонова, Л. Я. Джоган, Е. Э. Ковалев

*Институт водных проблем Российской академии наук*

*119333 Москва, ул. Губкина, 3*

Поступила в редакцию 13.04.2010 г.

Исследованы возможности методики расчета стока с бассейна р. Северной Двины, в основу которой положена модель тепловлагообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP в сочетании с информационным обеспечением, основанным на глобальных базах данных по параметрам подстилающей поверхности и на различных вариантах метеорологической информации (полученной из данных реанализа; данных реанализа с последующей их гибридизацией с данными наземных и спутниковых наблюдений; данных наблюдений метеорологических станций, расположенных в бассейне реки). Во всех трех случаях использовался метод оптимизации некоторых наиболее важных модельных параметров, включающих в себя как характеристики подстилающей поверхности, так и корректирующие множители для осадков и приходящей радиации.

*Ключевые слова:* гидрограф речного стока, взаимодействие атмосферы с подстилающей поверхностью суши, физико-математическое моделирование, глобальные базы данных, бассейн р. Северной Двины.

Точная оценка разгрузки рек в Северный Ледовитый океан весьма важна в связи с той ролью, которую играет сток северных рек в балансе поступления пресной воды в Арктический бассейн, и высокой чувствительностью полярного региона к глобальному потеплению, которое неизбежно приведет к изменению режима стока. В связи с этим возрастает роль моделей тепловлагообмена поверхности суши с атмосферой, которые могут быть использованы в качестве инструментария для оценки и прогноза стока северных рек – важной составляющей арктического гидрологического цикла [34]. Настоящая работа – логическое продолжение исследований, представленных в [10, 11] и посвященных изучению возможностей применения разработанной авторами модели взаимодействия поверхности суши с атмосферой Soil Water – Atmosphere – Plants (SWAP) для модельного воспроизведения стока северных рек Европейской территории России (ЕТР).

На этот раз в качестве объекта исследования выбрана р. Северная Двина – наиболее крупная (по площади бассейна) река северного склона ЕТР (отметим, что общая площадь бассейна Северной Двины и исследованных ранее бассейнов рек Мезени и Печоры составляет 60% всей площади северного склона ЕТР). Цель работы – исследование возможностей модели SWAP воспроизводить сток р. Север-

ной Двины, а также сравнительная оценка качества получаемых результатов при использовании различного информационного обеспечения модели по метеорологическим характеристикам, основанного, во-первых, на результатах реанализа [23, 24, 31]; во-вторых, на данных реанализа, но с последующей их гибридизацией (специально разработанного метода объединения разных типов информационного обеспечения [38]) с результатами наземных и спутниковых наблюдений; в-третьих, на данных наблюдений метеорологических станций, расположенных в бассейне указанной реки.

В рамках достижения указанной цели решался также ряд сопутствующих задач. Одна из них состояла в выявлении необходимости введения калибруемых одновременно с параметрами подстилающей поверхности поправочных коэффициентов к ряду метеорологических элементов (к осадкам и приходящей радиации) с целью улучшения качества расчетов стока. Другая задача была связана с разработкой метода графического сопоставления качества модельных расчетов стока, который позволял бы наиболее наглядно иллюстрировать разницу в качестве воспроизведения стока при использовании альтернативных вариантов информационного обеспечения модели SWAP. Наконец, еще одна задача заключалась в получении наряду с оценками стока р. Северной Двины оценок и других составляющих водного баланса ее бассейна.

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 11-05-00015) и Федерального агентства по науке и инновациям РФ (контракт 02.740.11.0336).

Методика моделирования гидрографа стока северных рек основана на использовании LSM-модели взаимодействия поверхности суши с атмосферой (Land Surface Model) SWAP и изложена в [10, 11], где читатель может легко с ней ознакомиться. Сама модель представлена в [5–8, 19–21]. В ее основу положено физико-математическое описание процессов тепло- и влагообмена, происходящих в системе грунтовые воды–почва–растительный/снежный покров–приземный слой атмосферы. Модель позволяет рассчитывать составляющие водного и теплового балансов наземных экосистем и речных бассейнов, имеющих разные пространственные масштабы и находящихся в различных природных условиях. Поскольку описание модели SWAP уже неоднократно приводилось в печати (в том числе и в указанных выше публикациях), в данной работе вряд ли целесообразно на нем останавливаться, поэтому перейдем сразу к характеристике исследуемого объекта.

#### ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЕГО СХЕМАТИЗАЦИЯ

Как уже отмечалось выше, Северная Двина (рис. 1а) – одна из крупных рек ЕТР, принадлежащих бассейну Северного Ледовитого океана. Площадь ее водосбора 357 тыс. км<sup>2</sup>, средний годовой слой стока в устье реки 309 мм, за год она выносит в море в среднем 110 км<sup>3</sup> воды, уступая в этом отношении из всех рек севера ЕТР только р. Печоре. Начинается р. Северная Двина от слияния р. Сухоны с р. Югом. Наиболее крупные ее правые притоки – реки Вычегда и Пинега, левые – реки Вага и Емца.

Климат в районе бассейна р. Северной Двины (59–65° с.ш., 38–56° в.д.) довольно суровый. Средняя температура воздуха в январе составляет –13...–15°С (понижаясь в отдельные дни до –45°С), в июле 14–17°С.

Для территории бассейна характерны избыточное увлажнение (средняя годовая сумма осадков изменяется от 650 мм на севере до 800 мм на юго-западе), малое количество солнечной радиации, воздействие северных морей и относительно однообразные природные условия. Воздушные массы с Атлантики, приносящие облачность и осадки, в целом смягчают климат. Совокупность перечисленных факторов обуславливает короткое (три–четыре месяца) прохладное лето и длинную (пять–шесть месяцев) холодную зиму с устойчивым снежным покровом, продолжительность залегания которого варьирует от полугода в южной части бассейна до семи месяцев в северной.

В теплый период года выпадает 65–70% годового количества осадков. Зимой осадков значительно меньше, но, накапливаясь в снежном покрове, они формируют довольно большие снеготопы к началу весеннего снеготаяния. Максимальные снеготопы

характеризуются значительной межгодовой изменчивостью. Так, в районе Холмогор они изменяются от 78 до 201 мм.

Почвы на территории бассейна подзолистые, дерново-подзолистые и болотно-подзолистые, в отдельных районах встречается карст. Леса преимущественно хвойные, занимают ~80% водосбора.

Северная Двина относится к рекам преимущественно снегового питания. Для северных рек, основной источник питания которых – талые воды, характерно неравномерное распределение стока в году. Так, на три весенних месяца обычно приходится более половины годового объема стока, тогда как в течение четырех зимних месяцев, когда атмосферные осадки вовсе не участвуют в формировании стока, а аккумулируются в снежном покрове, сток составляет всего 2–9% годового объема. Дождевые паводки обычно незначительны.

Средняя годовая величина испарения изменяется по территории, уменьшаясь в направлении с юга на север примерно с 550 до 400 мм.

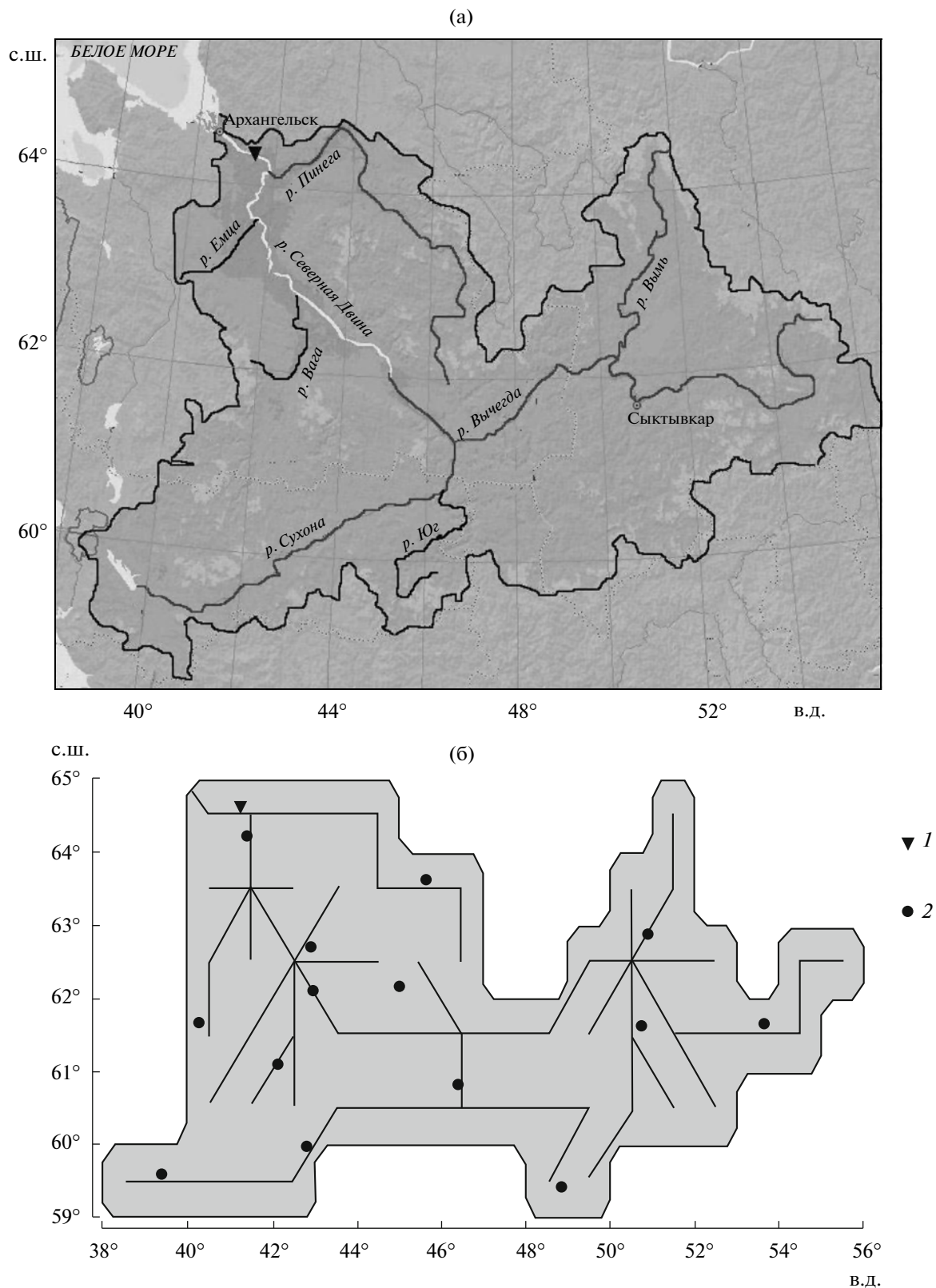
Для модельных расчетов была проведена схематизация бассейна р. Северной Двины (до стоковой ст. Усть-Пинега) в виде совокупности 62 ячеек с пространственным разрешением 1° × 1° (рис. 1б).

#### ПОДГОТОВКА ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МОДЕЛИ SWAP, НЕОБХОДИМОГО ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ СТОКА Р. СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ

Информационное обеспечение модели SWAP включает в себя приземную метеорологическую информацию (температуру и влажность воздуха, атмосферное давление, скорость ветра, атмосферные осадки, а также значения приходящих потоков длинно- и коротковолновой радиации) с временным разрешением <1 сут (обычно 3 или 6 ч) и параметры подстилающей поверхности, а именно – параметры почвы, растительного покрова, и топографические характеристики бассейна.

В случае локального объекта или регионального, но с густой сетью наблюдений, подобная информация может быть получена по рядам конкретных данных наблюдений (хотя и здесь есть свои трудности). В случае же крупномасштабных объектов, а тем более для всей поверхности суши, получение подобной достаточно точной информации представляет значительную проблему.

Главным образом, сказанное относится к двум характеристикам: осадкам и приходящей радиации. Во-первых, эти характеристики наиболее изменчивы в пространстве (обе, в основном, – по причине изменчивости облачности, пространственная структура которой имеет стохастический характер), во-вторых (и это наиболее важно), именно эти характеристики в большей степени определяют значения выходных переменных LSMs (в



**Рис. 1.** Бассейн р.Северной Двины (а) и его схематизация (б). 1 – стоковая ст. Усть-Пинега, 2 – метеорологические станции.

частности, речного стока и суммарного испарения). Точность задания в качестве исходных данных именно этих двух характеристик во многом определяет точность модельных расчетов составляющих водного и теплового балансов поверхности суши. Иллюстрацией этого служит то обстоятельство, что во многих ранних (да нередко и в ряде современных) гидрологических и климатических работах, связанных с интегральными оценками составляющих водного баланса, в качестве основных предикторов выступают две величины: осадки и радиационный баланс (во многом определяющийся приходом радиации).

Что касается параметров подстилающей поверхности, то здесь в первую очередь важна точность задания гидрофизических параметров почвы. Почвенные характеристики (коэффициент фильтрации, параметры связей коэффициента влагопроводности и водного потенциала почвы с ее влажностью, толщина корнеобитаемого слоя, пористость, наименьшая влагоемкость, влажность завядания, глубина залегания относительного водоупора) более критичны, чем параметры растительного покрова, в отношении получающихся результатов расчетов водного и даже теплового балансов. Так, коэффициент фильтрации почвы в значительной мере определяет разделение выпадающих осадков на впитывание и поверхностный сток. Объем впитавшейся, а затем прошедшей через почвенную колонку и достигшей грунтовых вод, воды во многом определяется значениями наименьшей влагоемкости и глубины почвенной колонки. Чем больше воды “застревает” в почве, тем больше окажется впоследствии величина суммарного испарения (на которую также влияет и такой параметр почвы как влажность завядания) и меньше — годовое значение стока.

Таким образом, наиболее важно для расчетов составляющих водного и теплового балансов — возможно более корректное задание характеристик, относящихся прежде всего к осадкам, приходимой радиации и гидрофизическим параметрам почвы.

В качестве первого варианта информационного обеспечения по метеорологическим характеристикам (в дальнейшем именуемого вариантом 1) были использованы результаты National Centers for Environmental Prediction/Department of Energy (NCEP/DOE) реанализа [23, 24, 31], подготовленные с 3-ч временным шагом для 1983–1995 гг. по всей территории суши земного шара (за исключением Антарктиды) с одноградусным пространственным разрешением в рамках международного проекта Second Global Soil Wetness Project (GSWP-2) [12, 16, 38]. В основе процедуры реанализа лежат спектральная модель общей циркуляции атмосферы (исходной информацией для которой служат синоптические данные) и система статистической интерполяции получаемых результатов по ячейкам пространственной сетки.

Поскольку результаты реанализа, как правило, содержат значительные, прежде всего систематические, ошибки, был использован и второй (уточненный) вариант задания входной метеорологической информации (в дальнейшем — вариант 2), подготовленный также с 3-ч шагом и одноградусным пространственным разрешением в рамках проекта GSWP-2 для 1983–1995 гг. При подготовке этого варианта наибольшие усилия были направлены на уточнение данных об атмосферных осадках посредством их гибридизации с данными наблюдений, которая осуществлялась в несколько этапов. Осадки, полученные в результате NCEP/DOE реанализа [25], на первом этапе были гибридизированы с данными наземных измерений из базы данных Global Precipitation Climatology Center (GPCC) для основного расчетного периода (с 1 января 1986 г. по 31 декабря 1995 г.) [32] и из базы данных Climate Research Unit (CRU) университета Восточной Англии [30] для периода “раскрутки” модели (с 1 июля 1982 г. по 31 декабря 1985 г.), для которого данные GPCC отсутствовали. Под “раскруткой” или инициализацией модельных расчетов понимается итерационная “прогонка” первого расчетного года до достижения состояния так называемого “квазиравновесного года”, необходимая при отсутствии конкретных начальных условий по температуре, влажности и льдистости почвы, глубин ее промерзания или оттаивания для каждой расчетной ячейки [12] (впоследствии при сравнении с данными наблюдений результаты расчетов для этого года обычно не используются). Отметим, что измеренные осадки, на которых основаны базы данных GPCC и CRU, не включали в себя так называемую “поправку на ветер”, т.е. поправку на возможный недоучет измеренных осадков вследствие влияния ветра. Эта поправка была введена в гибридизированные осадки на следующем этапе. И наконец, для районов с низкой плотностью наземной сети наблюдений за осадками подключались данные спутниковых наблюдений, содержащиеся в базе данных Global Precipitation Climatology Project (GPCP) [38].

Приземные значения температуры и влажности воздуха были получены на основе гибридизации NCEP/DOE реанализа со среднемесячными результатами измерений из базы данных CRU [30].

Для задания значений приходимых потоков коротко- и длинноволновой радиации была использована база данных Surface Radiation Budget (SRB) [38].

Приземные значения атмосферного давления и скорости ветра были результатами NCEP/DOE реанализа [16, 38].

Описанные варианты информационного метеорологического обеспечения модели SWAP, полученные на основе глобальных баз данных, позволяют провести для любого речного бассейна (при его пространственной схематизации в виде совокупности одноградусных ячеек) расчеты составляющих

водного и теплового балансов с 3-ч шагом для 1983–1995 гг. Однако при последующем анализе следует использовать результаты расчетов только за 1986–1995 гг., поскольку, во-первых, как показал опыт реализации проекта GSWP-1 [16], влияние “раскрутки” модели (при ее инициализации) [11] на результаты расчетов может продолжаться более одного расчетного года, во-вторых, это необходимо для устранения влияния неоднородности рядов данных по гибридизированным осадкам и приходящей радиации (данные SRB за 1982–1985 гг. отсутствовали и были восполнены из других источников). Таким образом, один из недостатков обоих вариантов метеорологического обеспечения – то, что они дают возможность смоделировать лишь сравнительно короткие (10-летние) ряды стока.

В связи с этим был подготовлен третий вариант метеорологического информационного обеспечения (в дальнейшем – вариант 3), основанный на данных стандартных наблюдений соответствующих характеристик на метеорологических станциях, расположенных в бассейне р. Северной Двины. Подготовка этого варианта довольно трудоемкая и потребовала больше времени, чем для вариантов 1 и 2 (в данных наблюдений было много пропусков и ошибок, которые необходимо было устранять). Кроме того, потоки приходящей длинноволновой и коротковолновой радиации, необходимые для проведения расчетов стока, на метеорологических станциях не измеряются. Потому они были рассчитаны с использованием данных стандартных метеорологических наблюдений.

Расчеты приходящей коротковолновой (солнечной) радиации с 3-ч шагом проводились по радиационной модели, разработанной А.Б. Шмакиным (ИГ РАН) [33]. Исходной информацией при этом служили также данные о географической широте места, солнечном склонении, закрытости горизонта, углах наклона подстилающей поверхности в широтном и меридиональном направлениях (две последние характеристики оценивались по полученным топографическим характеристикам расчетных ячеек), а также среднеголетние месячные значения коэффициента прозрачности атмосферы [15]. Далее полученные значения солнечной радиации при безоблачном небе корректировались с учетом общей облачности [9]. Значения приходящей длинноволновой радиации были рассчитаны по методике, изложенной в [9].

И наконец, поскольку расположение метеорологических станций не совпадает с расположением центров расчетных ячеек, в варианте 3 возникает задача интерполяции результатов измерений по этим ячейкам. Для ее решения в работе была использована процедура кригинга [3, 13], подвергшаяся некоторой модификации, детали которой описаны в [11].

Таким образом, подготовка варианта 3 информационного обеспечения потребовала значительных

усилий. Однако в результате был получен гораздо более длинный ряд (33 года: 1966–1998 гг.) исходных метеорологических характеристик – это несомненное преимущество варианта 3.

При подготовке единого для трех вариантов метеорологических характеристик информационного обеспечения по параметрам растительного покрова были использованы глобальные базы данных из проекта GSWP-2. Имеющиеся в них данные были проанализированы и скорректированы для устранения грубых несоответствий и ошибок, а также дополнены рядом специфических параметров, необходимых для расчетов по модели SWAP [11].

При создании адаптированной под модель SWAP базы данных по почвенным параметрам (также единой для трех вариантов) за основу были приняты данные из глобальной базы (ISLSCP-II)/ GSWP-2. Они были скорректированы в целях устранения неправдоподобных значений и согласования их между собой и с параметрами растительного покрова [11].

Последняя группа данных – топографические характеристики, включающие в себя среднюю высоту ячейки расчетной сетки и углы наклона поверхности ячейки в меридиональном и широтном направлениях, необходимые для расчета трансформации стока в пределах ячейки. Указанные высоты были взяты из информационной базы Центра данных по системам наблюдений за ресурсами Земли EDC (Center Earth Resources Observation Systems Data), углы наклона были рассчитаны по средним высотам соседних ячеек.

Таким образом, информационное обеспечение вариантов 1 и 2 полностью основано на использовании глобальных баз данных, в варианте 3 значения параметров подстилающей поверхности также взяты из этих баз, в то время как метеорологическая информация опиралась на стандартные наблюдения.

#### НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ МОДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ РАСЧЕТЕ СТОКА СЕВЕРНЫХ РЕК НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ SWAP

Как показал опыт моделирования гидрографов стока рек Мезени и Печоры, прямое использование (т.е. без применения процедуры оптимизации каких-либо параметров, в этом случае значения параметров будем называть априорными) информационного обеспечения, в той или иной степени основанного на глобальных базах данных, приводит к неудовлетворительным результатам воспроизведения стока. Подтвердили этот факт и аналогичные расчеты для р. Северной Двины. В табл. 1 приведены статистические характеристики соответствия измеренных и рассчитанных с использованием всех трех вариантов информационного обеспечения суточных значений стока р. Северной Двины у

**Таблица 1.** Статистические характеристики соответствия измеренных и рассчитанных по трем вариантам информационного обеспечения суточных слоев стока р. Северной Двины в районе ст. Усть-Пинега с использованием априорных и оптимизированных модельных параметров: систематическая ошибка *Bias*; эффективность расчета *Eff* и коэффициент корреляции *Corr* (прочерк – отсутствие результатов расчетов по вариантам 1 и 2 для 1967–1998 гг.)

Расчетный период, годы	Вариант 1			Вариант 2			Вариант 3		
	<i>Bias</i> , %	<i>Eff</i>	<i>Corr</i>	<i>Bias</i> , %	<i>Eff</i>	<i>Corr</i>	<i>Bias</i> , %	<i>Eff</i>	<i>Corr</i>
Расчеты с использованием априорных модельных параметров									
1986–1995	57	–0.50	0.69	56	–0.74	0.81	–44	0.36	0.72
1967–1998	–	–	–	–	–	–	–52	0.19	0.57
Расчеты с использованием оптимизированных значений параметров, не включающих корректирующие множители к осадкам и радиации									
1986–1990*	57	0.52	0.91	45	0.67	0.91	3	0.89	0.95
1986–1995	47	0.64	0.90	49	0.67	0.91	4	0.89	0.95
1967–1998	–	–	–	–	–	–	3	0.83	0.91
Расчеты с использованием оптимизированных значений параметров, включающих корректирующие множители к осадкам и радиации									
1986–1990*	6	0.85	0.93	0	0.89	0.94	0	0.88	0.94
1986–1995	2	0.88	0.94	1	0.90	0.95	0	0.89	0.95
1967–1998	–	–	–	–	–	–	1	0.83	0.91

\* Калибровочный период.

ст. Усть-Пинега. В качестве статистических критериев качества расчетов использованы традиционно применяющиеся в гидрологии (и использованные авторами в [10, 11]) систематическая ошибка *Bias*, равная разности между рассчитанными и измеренными средними значениями стока, коэффициент корреляции между рассчитанными и измеренными величинами *Corr* и эффективность расчетов *Eff* по Нэшу–Сатклиффу [27].

Обычно полагают, что при  $Eff > 0.5$  модель достаточно хорошо воспроизводит динамику исследуемой характеристики  $x$  (при  $Eff = 1$  расчет следует признать идеальным), если же  $Eff < 0$ , то временная изменчивость  $x$  воспроизводится плохо (в этом случае даже простое осреднение наблюдаемых значений лучше модельного расчета). Здесь уместно вспомнить, что при разработке методик прогнозов стока принята следующая шкала оценки их точности [1]: “хорошая” точность при  $Eff \geq 0.75$  и “удовлетворительная” при  $0.36 < Eff < 0.75$ . Что касается значения  $|Bias|$ , то в основу оценки качества моделирования стока с использованием этого критерия могут быть положены соображения о том, что систематическая ошибка суточных, месячных и годовых значений измеренного речного стока составляет в среднем  $\geq 5\%$  [36] (для периодов половодья ошибка измерения стока может быть существенно выше). В связи с этим можно принять, что в случаях, когда  $Bias \leq 5\%$ , качество расчетов стока можно признать хорошим.

В табл. 1 показано, что использование только априорных значений параметров (без какой-либо

их калибровки) для всех трех вариантов информационного обеспечения приводит к неудовлетворительному модельному воспроизведению стока. В частности, для всех вариантов абсолютное значение систематической ошибки расчета стока  $> 50\%$  (!), а эффективность расчетов  $Eff < 0.2$ , что в соответствии с [1] означает плохое качество воспроизведения гидрографа стока.

Таким образом, полученный в [10, 11] вывод о необходимости оптимизации наиболее значимых при расчетах речного стока модельных параметров (в случае использования глобальных баз данных) остается в силе и для р. Северной Двины. Исходной информацией для уточнения указанных параметров путем их оптимизации послужили измеренные значения суточного стока р. Северной Двины за 1986–1990 гг. у ст. Усть-Пинега.

Набор характерных для водосборов северных рек параметров, к которым должна быть применена процедура оптимизации, был определен и использован в [10, 11]. Поскольку бассейны рек Северной Двины и Печоры и Мезени расположены рядом и их природные условия близки между собой, набор оптимизируемых параметров в данной работе был таким же, как и в [10, 11]. В силу ограниченности объема статьи авторы не приводят здесь обоснование выбора параметров, поскольку читатель легко может найти его в [11].

При проведении процедуры оптимизации калибровалось 7 параметров подстилающей поверхности бассейна. К ним относились, в частности, корректирующие множители (общие для всего бас-

сейна) к значениям коэффициента фильтрации почвы  $K_0$ , толщины корнеобитаемого слоя  $h_r$  и альbedo подстилающей поверхности в теплый (бес-снежный) период  $alb_{sum}$  для каждой ячейки, обозначенные  $k_{K0}$ ,  $k_{hr}$  и  $k_{alb_{sum}}$  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 свежеснежного покрова  $alb_{sn}$ , коэффициент шероховатости  $n$  в формуле Маннинга и эффективная скорость движения воды в русле  $u_e$ .

Кроме того, как было показано в [10, 11, 14, 18, 28, 37], какие бы варианты информационного обеспечения по метеорологическим характеристикам ни использовались, все равно в ряде случаев необходима корректировка наиболее важных характеристик (посредством введения поправок, определяемых в данном случае в результате калибровки корректирующих множителей к соответствующим метеорологическим элементам) для получения более точных модельных результатов. Обоснование необходимости и правомочности введения указанных корректирующих множителей для северных регионов приведено в [10]. В данной работе для обеспечения максимально возможной точности воспроизведения стока р. Северной Двины в набор калибровочных параметров также были введены четыре корректирующих множителя: к жидким и твердым осадкам, к длинноволновой и коротковолновой радиации. Таким образом, общее число калибруемых параметров достигло 11, как и в [10, 11].

Однако, в отличие от [10, 11], в настоящей работе было проведено исследование, позволяющее выявить, насколько введение корректирующих множителей к осадкам и приходящей радиации способствует повышению качества расчета. Исследование было выполнено для всех трех вариантов информационного обеспечения. Сопоставлялись измеренные значения суточного стока с результатами двух модельных расчетов (по 11 и 7 параметрам). В последнем случае калибровка корректирующих множителей к осадкам и приходящей радиации не проводилась.

Необходимо отметить, что методика калибровки отличалась от использованной ранее в [10, 11]. В [10, 11] для оптимизации модельных параметров применялся разработанный авторами алгоритм случайного поиска глобального минимума целевой функции, обозначенный далее как RST (Random Search Technique) [14, 28]. В настоящей работе использовался метод эволюций тасуемых групп SCE-UA (Shuffled Complex Evolution method, Университет Аризоны), подробно описанный в [17]. При этом в качестве целевой функции использовалось значение  $1 - Eff$ . Сущность метода SCE-UA состоит в следующем.

На первом этапе оптимизации выбранных  $n$  параметров устанавливается исходная совокупность их значений путем случайной выборки в пространстве допустимых значений параметров. Для каждой точки выборки вычисляется значение целевой функции. На основе этих значений выборка разделяется на несколько групп, каждая из которых состоит из  $2n + 1$  точек. В каждой группе поиск оптимума целевой функции осуществляется в течение заданного числа шагов независимо от других групп симплексным методом склонового спуска (downhill simplex method) [29]. Периодически группы объединяются в единую выборку, точки которой перемешиваются (тасуются) с целью обмена информацией, и разделяются на новые группы. Затем осуществляется независимый поиск оптимума целевой функции вновь созданных групп. В процессе поиска вся совокупность точек сходится к глобальному оптимуму при условии, что исходная выборка достаточно велика. Эволюции и перемешивания повторяются до достижения заранее определенного критерия сходимости.

В работах [14, 28] было показано, что для модели SWAP оба алгоритма (RST и SCE-UA) приводят практически к одинаковым результатам. Преимущество первого метода заключается в том, что пользователь может вмешиваться в процесс калибровки и ускорять его за счет анализа предварительных результатов и суживания пространства значений калибруемых параметров. Если же время расчета не лимитировано, то удобнее воспользоваться вторым методом, который не требует вмешательства пользователя и не зависит от его квалификации. Именно поэтому в данной работе и был использован метод SCE-UA.

## ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Перейдем к анализу полученных результатов. В табл. 1 представлены статистические характеристики сопоставления измеренных и рассчитанных (для разных периодов и для разных вариантов информационного обеспечения) гидрографов суточного стока р. Северной Двины в створе Усть-Пинега (рис. 1) с использованием оптимизированных значений выбранных модельных параметров. Напомним, что во всех случаях калибровка параметров проводилась по значениям измеренного суточного стока за 1986–1990 гг.

Остановимся сначала на случае, когда в набор оптимизированных параметров не были включены корректирующие множители к осадкам и приходящей радиации. Как видно из табл. 1, качество расчетов стока с использованием информационного обеспечения по вариантам 1 и 2 улучшилось (по сравнению с расчетами по априорным параметрам) по таким показателям как  $Eff$  и  $Corr$ . Однако эффективность все же не достигла оценки “хорошо” (в соответствии с [1]), т.е. не превысила 0.75. Системати-

ческая ошибка продолжала оставаться очень высокой (~50%). Таким образом, для вариантов 1 и 2 (т.е. в случае использования метеорологических данных, взятых из глобальных баз данных) качество расчетов стока при наборе калибровочных значений модельных параметров, не включающих корректирующие множители к осадкам и приходящей радиации, продолжало оставаться неудовлетворительным.

Это неудивительно, поскольку, как было отмечено выше, метеорологические характеристики, полученные в результате реанализа (вариант 1), имеют значительные систематические ошибки (особенно в отношении осадков). Применение гибридации данных реанализа с данными наблюдений (вариант 2) в какой-то степени улучшило положение, однако не сделало его достаточно хорошим в районе высоких широт. Иллюстрацией этому может служить приведенное в [11] сопоставление усредненных по бассейну р. Мезени (по природным условиям и местоположению, близкому к бассейну р. Северной Двины) измеренных осадков с осадками из варианта 2, показавшее их существенное расхождение, особенно в зимний период (зимние месячные суммы осадков различались почти в два раза). Отсюда следует вывод, что резервы улучшения качества расчета стока при использовании информационного обеспечения по вариантам 1 и 2 можно попытаться найти, включив в набор калибруемых параметров поправочные коэффициенты к осадкам, а также к приходящей радиации, которая в значительной мере — расчетная.

В то же время результаты расчета стока с информационным обеспечением по варианту 3 (т.е. при использовании метеорологических характеристик, взятых из данных наблюдений метеорологических станций) с применением оптимизации параметров, не включающих корректирующие множители к осадкам и приходящей радиации, оказались высокого качества (табл. 1, рис. 2). В частности, показатели качества расчетов суточного стока р. Северной Двины у ст. Усть-Пинега за 1967–1998 гг. оказались следующими:  $Bias = 3\%$ ,  $Eff = 0.83$  и  $Corr = 0.91$ , т.е. результаты попали в диапазон “хорошо”.

Включение в набор калибруемых параметров корректирующих множителей к осадкам и приходящей радиации позволило существенно улучшить результаты в вариантах 1 и 2 (табл. 1). В варианте 1 эффективность расчета суточного стока для различных периодов составила 0.85–0.88, систематическая ошибка 2–6%, коэффициент корреляции 0.93–0.94. В варианте 2 результаты несколько лучше: систематическая ошибка практически отсут-

ствует,  $Eff$  достигла 0.89–0.90,  $Corr = 0.94$ –0.95. Таким образом, в обоих случаях качество расчетов заслуживает оценки “хорошо”. Отметим, что гибридация данных реанализа позволила добиться лишь незначительного улучшения качества расчета в случае калибровки полного набора выбранных параметров. Это говорит о том, что качество гибридации данных в северных широтах оставляет желать лучшего.

Результаты, полученные по варианту 3 с использованием оптимизированных параметров, включающих корректирующие множители к осадкам и радиации, практически не изменились (табл. 1). Лишь немного уменьшилась систематическая ошибка  $Bias$  (однако и без калибровки указанных множителей она  $\leq 5\%$ , т.е. не превышала нижнего предела погрешности измерений суточных, месячных и годовых слоев речного стока [36]). Указанное обстоятельство свидетельствует о том, что информационное обеспечение, полученное по данным метеостанций для бассейна р. Северной Двины, достаточно хорошего качества, поэтому в этом случае нет необходимости применять корректирующие множители к осадкам и приходящей радиации.

#### ГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЛЛЮСТРАЦИИ КАЧЕСТВА РАСЧЕТОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВАРИАНТОВ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Для иллюстрации качества различных методик расчета (методики могут различаться применением разных моделей рассматриваемого объекта, различными вариантами подготовки информационного обеспечения и т.д.) тех или иных геофизических величин часто используют диаграмму Тэйлора [22, 35], которая дает возможность на одном графике представить четыре статистические характеристики качества расчетов. Эти характеристики — так называемое центрированное [22, 35] среднеквадратическое отклонение  $RMSD'$  рассчитанных  $x_{cal}$  и измеренных  $x_{obs}$  значений исследуемой величины  $x$  (не учитывающее систематическое отклонение рядов  $x_{cal}$  и  $x_{obs}$ ), коэффициент корреляции  $r$  между  $x_{cal}$  и  $x_{obs}$  и стандартные отклонения  $x_{cal}$  и  $x_{obs}$  —  $\sigma_{cal}$  и  $\sigma_{obs}$ .

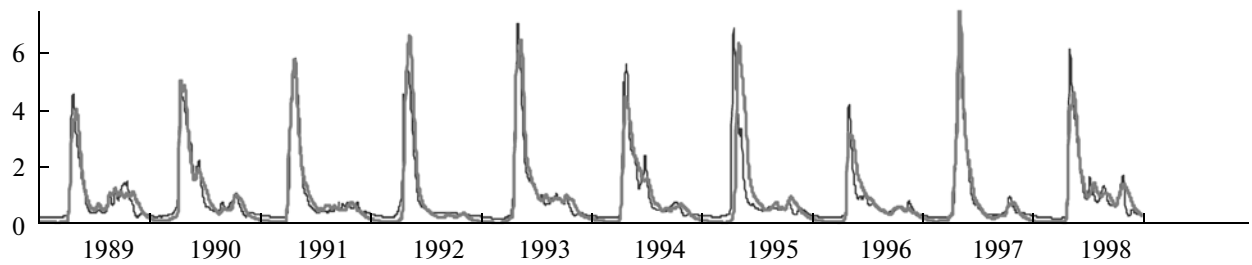
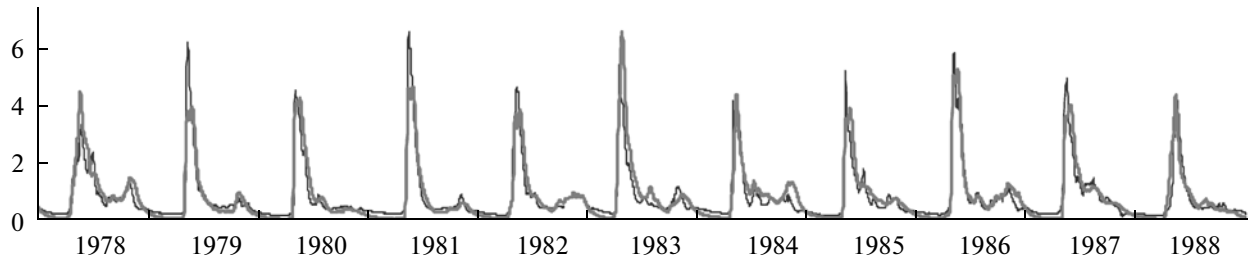
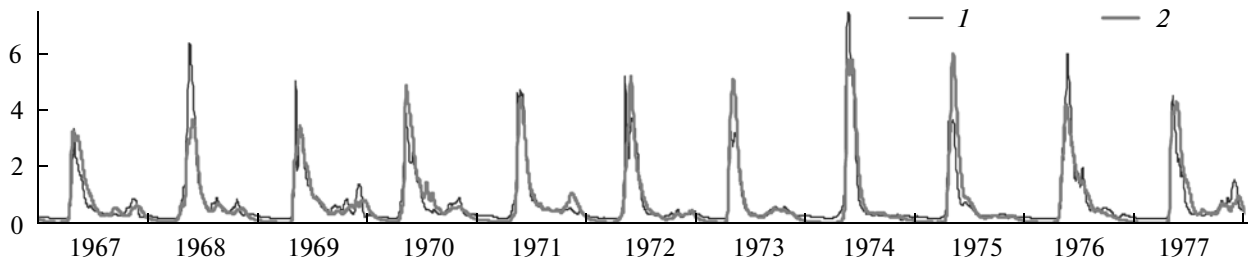
Пример использования диаграммы Тэйлора для оценки воспроизведения суточных гидрографов стока во всех вышеописанных вариантах расчета приведен на рис. 3а. Диаграмма использует полярные координаты: радиальная координата показыва-

**Рис. 2.** Динамика измеренных и рассчитанных с использованием информационного обеспечения по варианту 3 суточных (а) и месячных (б) слоев стока с бассейна р. Северной Двины в районе стоковой ст. Усть-Пинега за 1967–1998 гг. Калибровка параметров, не включающих корректирующие множители к осадкам и приходящей радиации, осуществлялась за 1986–1990 гг. 1 — измерение, 2 — расчет.



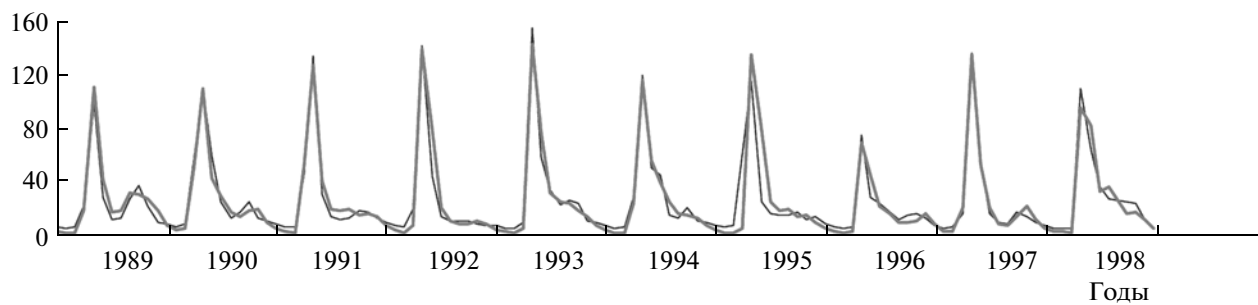
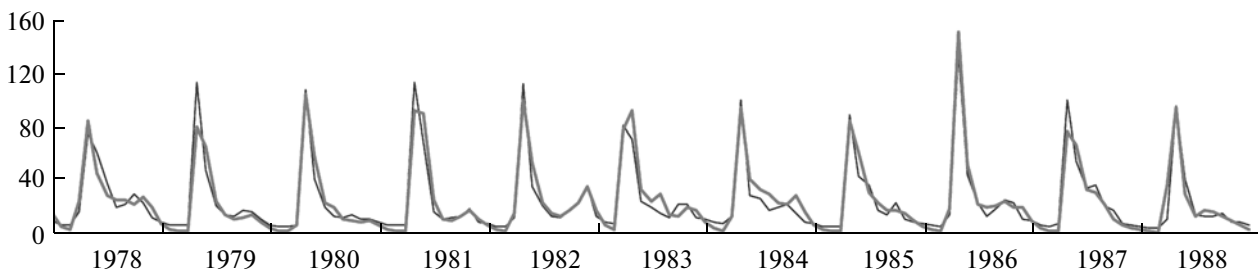
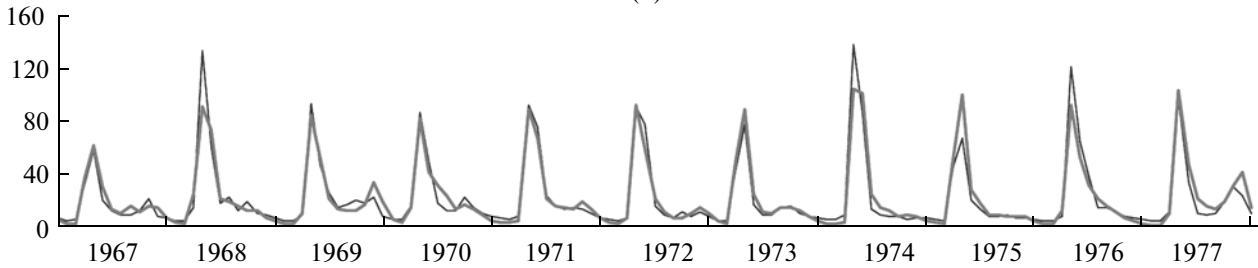
$R$ , мм/сут

(а)

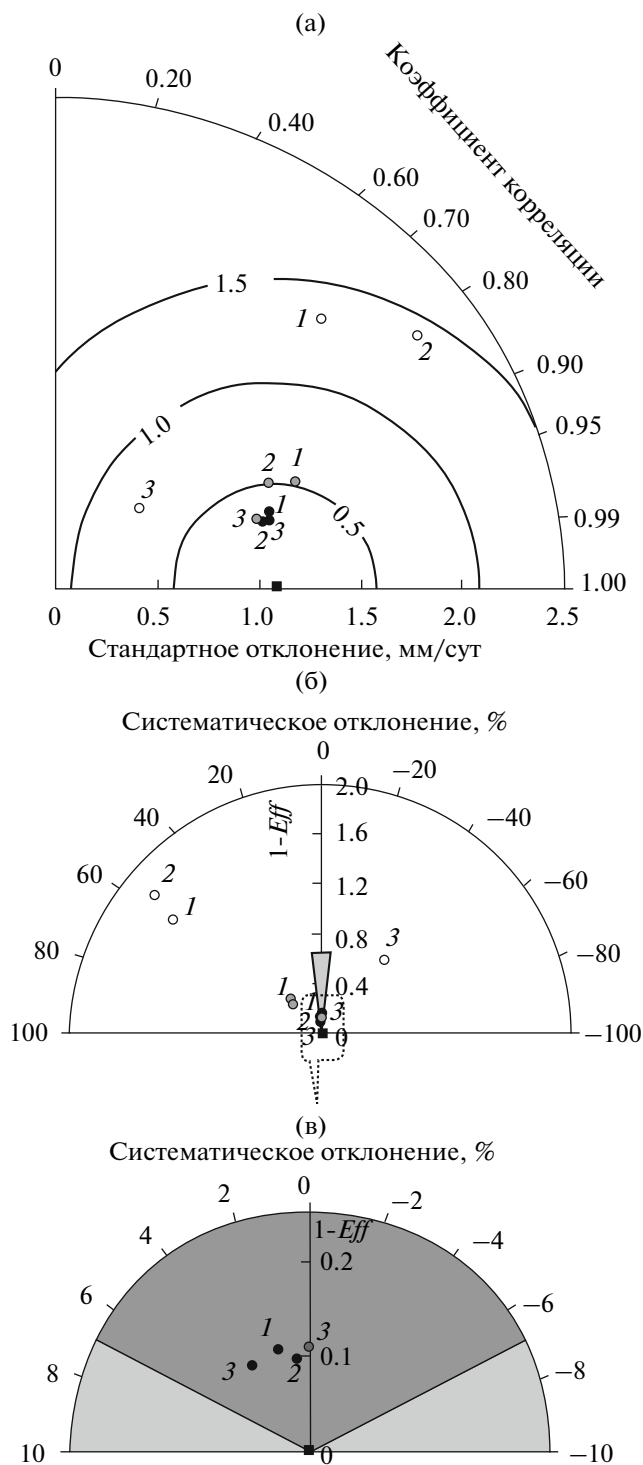


$R$ , мм/мес.

(б)



Годы



ет значение величин  $\sigma_{\text{cal}}$  и  $\sigma_{\text{obs}}$ , угловая координата демонстрирует значение  $r$  (при этом для нее используется шкала  $\arccos(r)$ ).

При использовании для коэффициента корреляции шкалы в масштабе  $\arccos(r)$  расстояние на диаграмме от черного квадрата до любой из точек, отображающей статистику результатов для выбранного модельного расчета, оказывается равным зна-

**Рис. 3.** Диаграммы качества расчетов суточного стока р. Северной Двины (за период 1985–1996 гг.) при использовании альтернативных вариантов информационного обеспечения. а – диаграмма Тэйлора [35], б, в – диаграммы авторов. Светлые, серые и черные кружки соответствуют результатам расчетов стока с использованием априорных параметров, оптимизированных значений параметров, не включающих поправочные множители к осадкам и приходящей радиации, и оптимизированных значений полного набора параметров соответственно. Цифры у кружков – номера вариантов используемого информационного обеспечения. Черный квадрат – данные наблюдений. Цифры у окружностей на диаграмме Тэйлора показывают значения центрированного среднеквадратического отклонения рядов рассчитанного и измеренного суточного стока. Белая, светлосерая и темносерая зоны на рис. 3б и в, согласно [1] и анализу авторов (пояснения в тексте) – “плохое”, “удовлетворительное” и “хорошее” соответствие рассчитанных и измеренных значений стока.

чению центрированного среднеквадратического отклонения  $\text{RMSD}'$  [35].

Таким образом, чем ближе к черному квадрату находится кружок, соответствующий какому-то варианту расчета стока, тем выше качество этого варианта (лучше соответствие между  $\sigma_{\text{cal}}$  и  $\sigma_{\text{obs}}$ , выше коэффициент корреляции между наблюдаемым и рассчитанным гидрографами стока и меньше их центрированное среднеквадратическое отклонение). Расположение точек на рис. 3 полностью подтверждает сделанный выше анализ качества различных вариантов расчета стока.

Тем не менее, следует отметить одно обстоятельство в отношении использования диаграммы Тэйлора. Как было отмечено выше, удобство диаграммы состоит в том, что на ней можно видеть сразу четыре статистические характеристики:  $\text{RMSD}'$ ,  $r$ ,  $\sigma_{\text{cal}}$  и  $\sigma_{\text{obs}}$ . Однако все указанные характеристики отражают только степень случайных отклонений между  $x_{\text{cal}}$  и  $x_{\text{obs}}$ , не давая никакой информации о возможном систематическом отклонении, т.е. не показывают отклонение средних рассчитанных  $\bar{x}_{\text{cal}}$  и измеренных  $\bar{x}_{\text{obs}}$  значений исследуемой величины  $\text{Bias} = \bar{x}_{\text{cal}} - \bar{x}_{\text{obs}}$ . Поэтому возможна ситуация, когда при более или менее одинаковой (пусть даже очень хорошей) статистике случайных отклонений два варианта расчета приводят к разным систематическим отклонениям, причем для одного из вариантов систематическое отклонение может быть очень большим. Для такого варианта это приведет соответственно и к большому значению полного среднеквадратического отклонения  $\text{RMSD}$  (учитывающего как случайную, так и систематическую составляющие), в силу чего качество этого варианта расчета нельзя признать высоким. Однако на диаграмме Тэйлора точки, соответствующие обоим вариантам, будут расположены практически рядом. Подобная ситуация полу-

чилась в случае использования оптимизированных значений параметров, не включающих корректирующие множители к метеозлементам (серые точки на рис. 3а, которые расположены довольно близко друг к другу в трех вариантах расчета, хотя в первых двух вариантах, как отмечалось выше, систематические ошибки велики (~50%) и эффективности гораздо ниже, чем в варианте 3). Конечно, когда случайная составляющая отклонений рядов  $x_{cal}$  и  $x_{obs}$  по абсолютной величине гораздо больше их систематического отклонения  $Bias$ , значение последнего практически не играет роли (как это, например, имеет место в рассмотренных выше вариантах расчета стока с применением процедуры оптимизации калибровочных параметров с включением в них корректирующих множителей к осадкам и проходящей радиации), и в этом случае использование диаграммы Тэйлора достаточно эффективно.

Для того чтобы получить более универсальный способ иллюстративного представления полученных результатов, авторы решили использовать другой тип диаграммы, на которой представлены только два статистических критерия качества расчетов. Однако эти два критерия, с точки зрения авторов, наиболее полно отражают степень соответствия рассчитанных и измеренных искомым величин. В качестве одного из критериев используется систематическое отклонение рассчитанных и измеренных данных  $Bias$ , а второй основан на использовании не централизованного среднеквадратического отклонения  $RMSD'$ , а полного среднеквадратического отклонения  $RMSD$ , включающего случайную и систематическую составляющие

$$RMSD = \sqrt{RMSD'^2 + Bias^2}. \quad (1)$$

На предлагаемой диаграмме (рис. 3б) (представленной также в полярных координатах) качество расчетов суточного стока характеризуется значением указанной выше величины  $Bias$  (угловая координата) и статистикой  $(1 - Eff)$  (радиальная координата), где  $Eff$  – упоминавшаяся выше расчетная эффективность по Нэшу–Сатклиффу [27], которая определяется следующим выражением:

$$Eff = 1 - \frac{RMSD'^2}{\sigma_{obs}^2}. \quad (2)$$

Обозначения точек на диаграмме те же, что и на рис. 3а. Качество расчета при рассматриваемом варианте исходного обеспечения тем выше, чем соответствующая этому варианту точка находится ближе к черному квадрату (т.е. к данным наблюдений, для которых значения  $(1 - Eff)$  и  $Bias$ , естественно, равны 0) и к оси ординат (меньше абсолютное значение систематического отклонения рассчитанных и измеренных данных).

Площадь диаграммы разделена на три условные области, соответствующие “хорошему”, “удовле-

творительному” и “плохому” модельному воспроизведению стока, границы которых (довольно условные), определяются как величиной  $(1 - Eff)$  по ее значениям, заданным в [1] (где принимается, что “хорошая” точность воспроизведения стока – при  $Eff \geq 0.75$  и “удовлетворительная” – при  $0.36 < Eff < 0.75$ ; если же  $Eff < 0$ , то временнбя изменчивость стока воспроизводится совсем плохо – в этом случае даже простое осреднение наблюдаемых значений лучше модельного расчета), так и значениями величины  $Bias$ .

В частности, верхняя граница диапазона “хороших” значений  $|Bias|$  определяется в 7%. Данное значение установлено по следующим соображениям. Как отмечено выше, систематические ошибки измерения суточных, месячных и годовых значений речного стока имеют нижний предел (по абсолютной величине) порядка 5%. Полагая, что и ошибка расчета должна быть не меньше этого значения, а также что ошибки измерения и расчета независимы, приходим к выводу, что абсолютное значение систематического отклонения измеренных и рассчитанных величин  $|Bias|$  при “хорошем” воспроизведении стока не должно превышать  $\sqrt{2} \times 5\% \approx 7\%$ .

В [1] верхняя граница диапазона “удовлетворительных” значений  $\frac{RMSD}{\sigma_{obs}}$  определяется из отношения верхних границ этой величины для областей с “хорошими” и “удовлетворительными” их значениями. Указанное отношение равно 1.6. Принимая такое же отношение и для систематических ошибок, получаем, что верхняя граница “удовлетворительного” значения  $|Bias| \approx 11\%$ .

Табл. 1 и рис. 3б, в показывают, что в область “хорошего” модельного воспроизведения стока попадают результаты расчетов с использованием всех трех вариантов информационного обеспечения (варианты 1–3), но при условии оптимизации значений 11 параметров (т.е. включая корректирующие множители к осадкам и проходящей радиации). Кроме того, сюда же попадает и вариант расчета по данным наблюдений метеорологических станций (вариант 3) в случае оптимизации значений 7 параметров (т.е. без калибровки корректирующих множителей к метеорологическим элементам).

По указанным выше причинам (т.е. благодаря учету не только случайного, но и систематического отклонения рассчитанных значений стока от измеренных) диаграммы, приведенные на рис. 3б, в, представляются более объективными по сравнению с диаграммой Тэйлора в отношении сопоставления качества различных вариантов расчета стока и выявления наилучшего из них.

**Таблица 2.** Статистические характеристики соответствия измеренных и рассчитанных на основе моделей SWAP и VIC месячных слоев стока рек Мезени, Печоры и Северной Двины

Река	Расчетный период, годы	Статистические характеристики	
		<i>Bias</i> , %	<i>Eff</i>
Модель VIC			
Мезень	1979–1999	–9	0.83
Печора	1979–1999	–15	0.77
Северная Двина	1979–1999	–1	0.85
Модель SWAP			
Мезень	1986–1994	–2	0.96
Печора	1981–2000	–9	0.94
Северная Двина	1967–1998	3	0.91

#### СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА РЕЧНОГО СТОКА НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ SWAP И VIC

В [10] было выполнено сопоставление результатов расчетов стока для рек Мезени и Печоры, полученных на основе модели SWAP с использованием оптимизации модельных параметров, с результатами аналогичных расчетов на основе всемирно известной модели Variable Infiltration Capacity (VIC) [26, 34], которая широко используется в США для решения как практических, так научных задач в области гидрологии суши. VIC представляет собой макромасштабную гидрологическую модель с элементами модели взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой. Модель VIC (так же как и модель SWAP) воспроизводит динамику составляющих водного и теплового балансов бассейнов, находящихся в различных природных условиях, в связи с чем в [34] она была использована для моделирования стока рек пан-Арктического бассейна. В настоящей работе приведенное в [10] сопоставление было дополнено результатами для Северной Двины (табл. 2). При расчете стока на основе модели SWAP для всех трех рек использовалось информационное обеспечение, полученное по варианту 3. При этом для Северной Двины оптимизировались только параметры подстилающей поверхности, поскольку полученные в этом случае результаты практически не отличаются от результатов, полученных с включением в процедуру оптимизации поправочных множителей к осадкам и приходящей радиации (табл. 1), а количество оптимизируемых параметров сокращается в 1.5 раза.

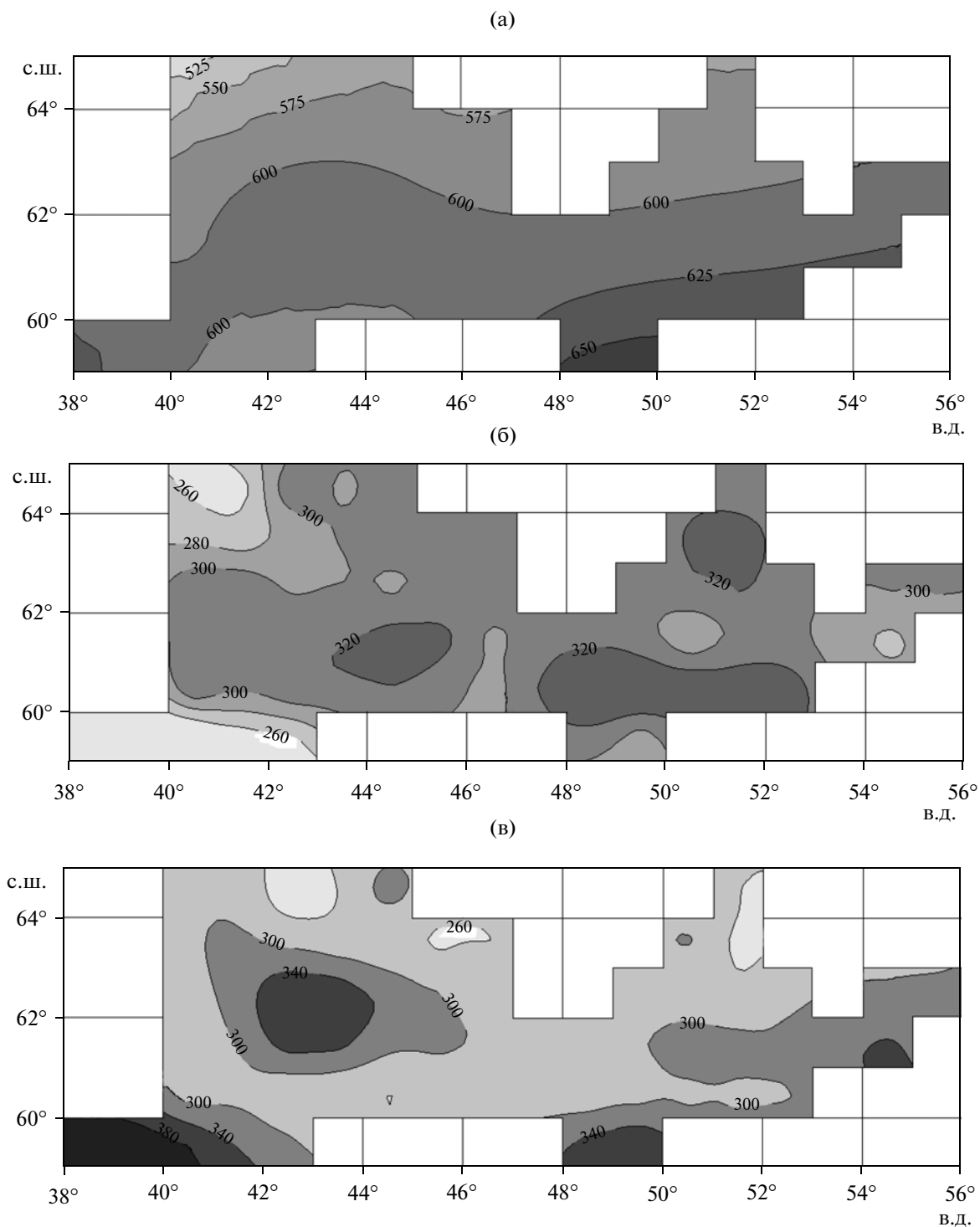
Представленные в табл. 2 показатели качества расчетов месячных значений речного стока (поскольку в [34] приведена статистика только для месячных величин) оставляют в силе сделанный в [10] вывод о том, что методика расчета стока на основе

модели SWAP дает для выбранных рек лучшие результаты, чем методика, основанная на использовании модели VIC. Так, значения эффективности расчетов месячного стока с использованием VIC лежат в диапазоне 0.77–0.85, в то время как для SWAP они значительно выше – от 0.91 до 0.96, абсолютное же значение систематического отклонения рассчитанных значений стока от измеренных для VIC достигает 15% измеренного стока, в то время как для SWAP оно не превышает 9%.

#### ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ В БАССЕЙНЕ Р. СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ

Многочисленные проверки модели SWAP, выполненные на объектах суши разных пространственных масштабов и находящихся в различных природных условиях [5–8, 19–21], продемонстрировали ее хорошую работоспособность по воспроизведению составляющих водного и теплового балансов при условии, что информация по параметрам подстилающей поверхности и метеорологическим характеристикам обладает достаточно высоким качеством. Поскольку при расчете стока р. Северной Двины была проведена процедура оптимизации наиболее важных модельных параметров, можно считать, что последнее условие более или менее выполнено. Это обстоятельство подтверждено и высокими значениями статистических критериев качества воспроизведения моделью значений речного стока, который интегрально отражает результат протекания всех процессов теплообмена на территории бассейна. Поэтому авторы полагают, что модель SWAP может быть использована и для оценки других составляющих водного баланса.

В качестве примера в работе была решена задача о пространственном распределении водных ресурсов в бассейне р. Северной Двины. При этом использована концепция оценки динамических водных ресурсов, предложенная А.И. Будаговским [2] и обоснованная также с экологических позиций в [4]. В данной концепции меры оценки различных составляющих водных ресурсов основаны на значениях потоков воды, что подчеркивает возобновляемость данных ресурсов и указывает на то, что рассмотренные составляющие являются ресурсами в той мере, в какой они вовлечены в так называемый гидрологический цикл (круговорот воды на Земле). В этом случае среднеголетние осадки рассматриваются в качестве меры ресурсов естественного увлажнения территории, среднеголетний речной сток – в качестве меры ресурсов поверхностных и подземных вод (поскольку последние дренируются речной сетью), а среднеголетнее суммарное испарение – в качестве меры ресурсов почвенных вод (обоснование последнего положения приведено в [4]).



**Рис. 4.** Пространственное распределение по территории бассейна р. Северной Двины ресурсов естественного увлажнения (среднегодовое количество осадков) (а), ресурсов почвенных вод (среднегодовое суммарное испарение) (б) и ресурсов поверхностных и подземных вод (речного стока) (в) в последней трети XX в. Цифры у изолиний – мм/год.

На рис. 4 приведено пространственное распределение всех трех указанных характеристик для бассейна р. Северной Двины, рассчитанных за 1967–1998 гг. с использованием информационного

обеспечения по варианту 3. Таким образом, рис. 4 иллюстрирует пространственное распределение составляющих водных ресурсов, сложившееся на территории бассейна в последней трети XX в.

## ВЫВОДЫ

Проведенное исследование показало, что использование модели теплообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP в сочетании с информационным обеспечением, основанным на глобальных базах данных по параметрам подстилающей поверхности и на различных вариантах метеорологической информации (полученной по результатам реанализа, по результатам реанализа с последующей их гибридизацией с данными наземных и спутниковых наблюдений, по данным наблюдений метеорологических станций, расположенных в бассейне р. Северной Двины), позволяет воспроизводить гидрографы суточного и месячного стоков р. Северной Двины с высоким качеством, т.е. с хорошими статистическими критериями сопоставления рассчитанного и измеренного стока.

При этом во всех случаях требуется проведение процедуры оптимизации части модельных параметров. При использовании метеорологического информационного обеспечения — продукта чистого реанализа или же реанализа с последующей гибридизацией с данными наблюдений (т.е. информационного обеспечения, основанного на глобальных базах данных) — требуется калибровка не только семи параметров подстилающей поверхности, но и четырех корректирующих множителей к осадкам и входящей радиации. В случае же использования метеорологической информации, полученной по данным наблюдений метеорологических станций, для достижения высоких показателей качества расчета стока р. Северной Двины достаточно калибровки только семи параметров подстилающей поверхности бассейна, что, в свою очередь, свидетельствует о достаточно высоком качестве данных метеорологических наблюдений в районе бассейна указанной реки (что характерно далеко не для любого речного бассейна северного региона Российской Федерации).

Предложен метод графического сопоставления качества модельных расчетов стока, использующих альтернативные варианты информационного обеспечения. Метод основан на построении диаграммы в координатах статистических показателей качества расчета: систематического отклонения между рассчитанными и измеренными значениями суточного стока и эффективности расчетов по Нэш—Сатклиффу.

Подтвержден полученный ранее [10] вывод о том, что, по крайней мере, для трех исследованных северных рек (Мезени, Печоры и Северной Двины) методика расчета стока на основе модели SWAP дает лучшие результаты, чем методика, основанная на использовании широко известной в мире модели VIC, применяемой в США для решения как практических, так и научных задач в области гидрологии суши.

Представлена картина распределения различных составляющих водных ресурсов в бассейне р. Северной Двины, сложившаяся на конец XX в.

Авторы выражают признательность сотрудникам Центра данных по глобальному речному стоку (The Global Runoff Data Centre, Germany) за предоставленные данные измерений речного стока р. Северной Двины.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анполов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д.* Курс гидрологических прогнозов. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 366 с.
2. *Будаговский А.И.* Ресурсы почвенных вод и водообеспеченность растительного покрова // *Вод. ресурсы.* 1985. № 4. С.3–13.
3. *Глобус А.М.* Почвенно-гидрофизическое обеспечение агроэкологических математических моделей. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 428 с.
4. *Гусев Е.М.* Экологическая роль почвенных вод и их ресурсы // *Вод. ресурсы.* 1990. № 5. С.110–121.
5. *Гусев Е.М., Насонова О.Н.* Параметризация тепло- и влагообмена на поверхности суши при сопряжении гидрологических и климатических моделей // *Вод. ресурсы.* 1998. Т.25. № 4. С. 421–431.
6. *Гусев Е.М., Насонова О.Н.* Параметризация процессов теплообмена в системе “грунтовые воды—почва—растительный/снежный покров—атмосфера” для территорий с четко выраженной сезонной изменчивостью климата // *Почвоведение.* 2000. № 6. С. 733–748.
7. *Гусев Е.М., Насонова О.Н.* Параметризация процессов теплообмена в бореальных лесных экосистемах // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2001. Т. 37. № 2. С. 182–200.
8. *Гусев Е.М., Насонова О.Н.* Моделирование процессов теплообмена суши с атмосферой в локальном масштабе для территорий с многолетней мерзлотой // *Почвоведение.* 2004. №9. С. 1077–1092.
9. *Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я.* Моделирование стока на малых водосборах в зоне многолетней мерзлоты на основе модели SWAP // *Вод. ресурсы.* 2006. Т. 33. № 2. С. 133–145.
10. *Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я.* Воспроизведение гидрографов стока р.Печоры на основе модели теплообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP // *Вод. ресурсы.* 2010. Т.37. № 2. С.186–198.
11. *Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я., Ковалев Е.Э.* Использование модели взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой для расчетов речного стока в высоких широтах // *Вод. ресурсы.* 2008. Т.35. № 2. С.181–195.
12. *Гусев Е.М., Насонова О.Н., Ковалев Е.Э.* Моделирование составляющих теплового и водного балансов поверхности суши земного шара // *Вод. ресурсы.* 2006. Т.33. № 6. С. 664–676.
13. *Матерон Ж.* Основы прикладной геостатистики. М.: Мир, 1968. 407 с.

14. *Насонова О.Н., Гусев Е.М., Ковалев Е.Э.* Применение модели теплообмена суши с атмосферой к расчету гидрографа дождевого речного стока. 1. Калибровка модели // *Вод. ресурсы.* 2011. Т. 38. № 2. С. 148–162.
15. *Пивоварова З.И.* Радиационные характеристики климата СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 355 с.
16. *Dirmeyer P., Gao X., Oki T.* The Second Global Soil Wetness Project. Science and Implementation Plan. IGPO Publ. Series. Silver Spring: International GEWEX Project Office, 2002. № 37. 75 p.
17. *Duan Q., Sorooshian S., Gupta V.K.* Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall runoff models // *Water Resour. Res.* 1992. V. 28. № 4. P. 1015–1031.
18. *Gan T.Y., Gusev Ye., Burges S.J., Nasonova O.* Performance comparison of a complex, physics-based land surface model and a conceptual, lumped-parameter hydrological model at the basin-scale // *IAHS Publ.* 2006. №. 307. P. 196–207.
19. *Gusev Ye.M., Nasonova O.N.* The land surface parameterization scheme SWAP: description and partial validation // *Global Plan. Change.* 1998. V. 19. № 1–4. P. 63–86.
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 // *Hydrol. Processes.* 2002. V. 16. № 10. P. 1893–1919.
21. *Gusev Ye.M., Nasonova O.N.* The simulation of heat and water exchange in the boreal spruce forest by the land-surface model SWAP // *J. Hydrol.* 2003. V. 280. № 1–4. P. 162–191.
22. IPCC: Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change /Eds. Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J. et al. Cambridge; N. Y.: Cambridge Univer. Press, 2001. 881 p.
23. *Kanamitsu M.* Description of the NCEP global data assimilation and forecast system // *Weather and Forecasting.* 1989. V. 4. № 3. P. 334–342.
24. *Kanamitsu M., Alpert J.C., Campana K.A. et al.* Recent changes implemented into the global forecast system at NCEP // *Weather and Forecasting.* 1991. V. 6. № 1. P. 1–12.
25. *Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J. et al.* NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2) // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2002. V. 83. № 11. P. 1631–1648.
26. *Liang X., Lettenmaier D. P., Wood E. F., Burges S. J.* A Simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for GSMs // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. № D7. P. 14415–14428.
27. *Nash J.E., Sutcliffe J.V.* River flow forecasting through conceptual models: 1 A discussion of principles // *J. Hydrol.* 1970. V. 10. № 3. P. 282–290.
28. *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. Hydrometeorol.* 2010. V. 10. № 5. P. 1128–1150.
29. *Nelder J.A., Mead R.* A simplex method for function minimization // *Computer J.* 1965. V. 7. № 4. P. 308–313.
30. *New M., Hulme M., Jones P.* Representing twentieth-century space-time climate variability. Part II: Development of 1901–96 monthly grids of terrestrial surface climate // *J. Climate.* 2000. V. 13. № 3. P. 2217–2238.
31. *Parrish D.F., Derber J.C.* The National Meteorological Center's spectral statistical interpolation analysis system // *Mon. Wea. Rev.* 1992. V. 120. № 8. P. 1747–1763.
32. *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.
33. *Shmakin A.B.* The updated version of SPONSOR land surface scheme: PILPS-influenced improvements // *Global Plan. Change.* 1998. V. 19. № 1–4. P. 49–62.
34. *Su F., Adam J.C., Bowling L.C., Lettenmaier D.P.* Streamflow simulations of the terrestrial Arctic domain // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. № D08112, doi:10.1029/2004JD005518
35. *Taylor K.E.* Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. № D7. P. 7183–7192
36. WMO, 1994. Guide to hydrological practices. WMO-No.168. Geneva: World Meteorological Organization, 1994. 738 p.
37. *Xia Y.* Calibration of LaD Model in the Northeast United States Using Observed Annual Streamflow // *J. Hydrometeorol.* 2007. V. 8. № 5. P. 1098–1110.
38. *Zhao M., Dirmeyer P.* Production and Analysis of GSWP-2 near-surface meteorology data sets // *COLA Technical Report.* Calverton: Center for Ocean–Land–Atmosphere Studies, 2003. № 159. 38 p.