

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОД СУШИ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

УДК 556.13

### ПРИБЛИЖЕННАЯ ФОРМУЛА ДЛЯ РАСЧЕТА ДЕФИЦИТА ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА ПРИ ОЦЕНКАХ ИСПАРЕНИЯ В МОДЕЛЯХ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА НА РЕКАХ РОССИИ<sup>1</sup>

© 2022 г. Ю. Г. Мотовилов<sup>а</sup> \*, В. М. Морейдо<sup>а</sup>, Т. Д. Миллионщикова<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

\*e-mail: motol49@yandex.ru

Поступила в редакцию 03.12.2021 г.

После доработки 11.02.2022 г.

Принята к публикации 29.03.2022 г.

На основе статистического анализа суточных рядов наблюдений на 1719 метеостанциях России за период с 1966 по 2014 г. получена приближенная формула для расчета среднесуточного дефицита влажности воздуха по среднесуточной температуре воздуха и суточным суммам осадков. Формула предложена с целью сокращения количества метеорологических показателей, необходимых для использования в региональных моделях формирования стока, при оценках суммарного испарения за счет исключения менее доступной информации об измеренных дефицитах влажности воздуха. Испытания предложенной формулы для задач гидрологических расчетов проиллюстрированы путем сравнения гидрографов стока за многолетние периоды, рассчитанных по двум версиям гидрологической модели с фактическими дефицитами и рассчитанными по предложенной эмпирической формуле, для ряда построенных на базе модельного комплекса ECOMAG региональных моделей формирования стока крупнейших российских речных бассейнов. С помощью статистических критериев показано, что расчеты с использованием приближенной формулы для большинства сравниваемых водосборов дают примерно такую же точность результатов моделирования, что и расчеты с использованием фактических дефицитов влажности воздуха.

**Ключевые слова:** дефицит влажности воздуха, испарение, модели формирования стока, речной бассейн.

DOI: 10.31857/S0321059622060098

#### ВВЕДЕНИЕ

В гидрологических расчетах и прогнозах, в задачах управления водными ресурсами водохозяйственных систем, во многих научных и прикладных проектах при оценках влияния климатических и антропогенных изменений на характеристики гидрологического цикла крупных речных бассейнов все большее применение находят пространственно распределенные гидрологические модели [11]. Один из ключевых компонентов гидрологических моделей — блок расчета суммарного испарения — важнейшая составляющая водного баланса речных бассейнов. Суммарное испарение (эвапотранспирация) представляет собой комбинацию двух одновременно протекающих процессов, при которых вода испаряется с поверхности суши (почвы, влажной растительности, открытой воды, снега и др.) и удаляется из почвы путем транспирации через устьица растений.

Суммарное испарение на больших площадях и водосборах обычно ниже максимально возможной (потенциальной) эвапотранспирации, под которой понимают эвапотранспирацию свободной от болезней растительности при оптимальных почвенно-гидрологических условиях. Лимитирующим фактором снижения эвапотранспирации относительно потенциальной может быть недостаток влаги в почве, при котором в результате физиологической адаптации закрываются устьица растений, через которые влага транспирируется в атмосферу.

Эвапотранспирация зависит от погодных условий (солнечной радиации, температуры и влажности воздуха, скорости ветра), а также от характеристик подстилающей поверхности, таких как тип и увлажнение почвы, ее водоудерживающая способность, определяющая доступную растениям воду, тип и возраст растительного полога, структура и шероховатость растительного полога, плотность и глубина корней [1, 3, 4, 8]. В силу значительной пространственной изменчивости

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема FMWZ-2022-0003).

этих характеристик эвапотранспирация — наиболее трудно определяемый элемент водного баланса речных бассейнов.

Помимо прямых методов измерения эвапотранспирации почвенными испарителями, физически обоснованные методы оценки эвапотранспирации базируются на использовании уравнений тепло- и массообмена между атмосферой и подстилающей поверхностью. В частности, в методах энергетического баланса эвапотранспирация зависит от радиационного баланса земной поверхности [4]. В массообменных (аэродинамических) методах используется концепция турбулентного переноса водяного пара с испаряющейся поверхности в атмосферу. Эти методы основаны на законе Дальтона [19]. Строгое применение обеих групп методов подразумевает проведение детальных градиентных метеорологических наблюдений с использованием специального оборудования для определения характеристик радиационного баланса, турбулентных потоков тепла и влаги в приземном слое. Эти методики трудоемки и не входят в перечень обязательных наблюдений на большинстве метеорологических станций. Поэтому в гидрологической практике широкое применение получили основанные на этих подходах приближенные методы расчета. В этих методах, как правило, используется двухшаговая схема расчета: сначала оценивается потенциальная эвапотранспирация, а затем она преобразуется в фактическую с применением функции извлечения почвенной влаги.

Из базирующихся на теории тепло- и массообмена упрощенных методов оценки эвапотранспирации широко применяется (особенно в зарубежной практике) метод Пенмана [37], который позднее был модифицирован для учета аэродинамического сопротивления растительности Дж. Монтейтом [34] и называется уравнением Пенмана–Монтейта. Однако даже этот метод требует наличия ряда метеорологических элементов, которые измеряются не на всех метеорологических станциях, а также трудно определяемых параметров, что ограничивает его применение для массовых расчетов.

В этом плане гораздо более широко распространены методы расчета потенциального испарения  $E_0$ , базирующиеся на законе Дальтона:

$$E_0 = c(e_s - e_a), \quad (1)$$

$e_s$  и  $e_a$  — упругости водяного пара на уровне испаряющей поверхности и в метеорологической будке соответственно;  $c$  — коэффициент, характеризующий аэродинамическое сопротивление, в общем случае зависящее от шероховатости поверхности, параметров турбулентности приземного слоя воздуха, вертикальных профилей скорости ветра, влажности воздуха, температурной

стратификации атмосферы. В прикладных расчетах  $c$  обычно задается функцией скорости ветра  $v$ , а в гидрологических моделях зачастую принимается постоянной величиной, определяемой в процессе калибровки параметров. В упрощенных формулах  $e_s$  часто заменяется на упругость насыщения в метеорологической будке  $e_{ST}$ , и тогда формула (1) принимает вид:

$$E_0 = cd, \quad (2)$$

$d = (e_{ST} - e_a)$  — дефицит влажности воздуха. Формулы подобного типа во многих случаях дают удовлетворительные результаты расчетов [38], используют легко измеряемые стандартные метеорологические переменные и до сих пор привлекательны для оценки потенциального испарения речных бассейнов из-за их простоты и приемлемой точности.

Существуют две основные группы методов, учитывающих влияние недостатка влаги в почве на снижение эвапотранспирации [28, 29]. В первой группе методов, которые обычно применяются в детальных физико-математических моделях формирования стока [9, 14], моделях массо- и энергообмена в системе почва–растение–атмосфера [22, 31], для расчета эвапотранспирации используются уравнения вертикального влагопереноса Ричардса с учетом влияния влажности почвы и корневой системы растений при регулировании потока транспирации растениями в условиях дефицита почвенной влаги и водного стресса механизмом устьичной регуляции. Уравнения влагопереноса в корнеобитаемом слое почвы обычно решаются методами конечных разностей. Большая пространственная и вертикальная изменчивость характеристик почв и растений может приводить к численной неустойчивости при решении уравнения Ричардса и существенному увеличению времени моделирования с использованием итерационных процедур. Кроме того, такие модели требуют большого количества входных данных. В частности, необходимы послойные зависимости капиллярно-сорбционного потенциала влаги и гидравлической проводимости от влажности почвы, проективной площади листьев, глубины и вертикальной структуры корневой системы. При наличии такой информации после калибровки параметров физико-математические модели — наиболее точные и детальные при расчетах и прогнозировании эвапотранспирации в локальном масштабе [12].

В другой группе так называемых интегральных методов различия между ними заключаются в способах оценки потенциальной эвапотранспирации и задания функции извлечения почвенной влаги в состоянии водного стресса, испытываемого растениями. В качестве характеристики такой функции часто рассматривается относительная влажность почвы. Когда фактическое со-

держание влаги в почве  $W$  больше некоторой критической влажности, за которую часто принимают наименьшую полевую влагемкость почвы  $FC$ , суммарное испарение определяется метеорологическими условиями, и вода испаряется с наибольшей скоростью. С уменьшением влажности почвы скорость эвапотранспирации уменьшается до тех пор, пока фактическое содержание влаги в почве не станет меньше, чем влажность завядания  $WP$ , при которой эвапотранспирация стремится к нулю. Вид взаимосвязи относительной эвапотранспирации и относительной влажности почвы зависит от характеристик почвы и стадий роста растительности, которые трудно поддаются определению. В работе [39] дан обзор 12 различных формул, аппроксимирующих связи относительной эвапотранспирации с влажностью почвы. Однако чаще всего в гидрологических моделях ввиду отсутствия дополнительной информации о растительном покрове эта связь задается линейной функцией от относительной влажности почвы в диапазоне между  $FC$  и  $WP$  [20], и тогда формула для расчета эвапотранспирации  $E$  принимает вид:

$$E = cd \frac{(W - WP)}{(FC - WP)}. \quad (3)$$

Интегральные методы просты в использовании, требуют небольшого количества входных данных, обладают сильной адаптивной способностью и в этом плане имеют некоторые преимущества при оценке эвапотранспирации речных бассейнов перед первой группой методов. Пространственные различия эвапотранспирации, обусловленные мозаикой распределения почв и растительности на территории речного бассейна, учитываются с помощью ГИС-технологий.

В прикладных и научных исследованиях находят также применение комбинированные эмпирические методы расчета суммарного испарения, базирующиеся на легко доступных данных стандартных гидрометеорологических наблюдений и на зависимостях между испарением и метеорологическими показателями. Среди них наиболее известны расчетные зависимости, разработанные С.М. Алпатьевым, А.И. Будаговским, М.И. Будыко, А.Р. Константиновым, А.Н. Костяковым, В.С. Мезенцевым, Э.М. Ольдекопом, А.Н. Постниковым, Л. Тюрком, П. Шрайбером, И.А. Шаровым и др. [2, 8, 10]. Из недостатков эмпирических методов можно отметить их региональный характер и, вследствие этого, ограниченный диапазон применимости в других регионах с иными физико-географическими характеристиками речных бассейнов.

В качестве входной метеорологической информации, по которой рассчитываются процессы гидрологического цикла и формирования речно-

го стока в речных бассейнах с помощью пространственно распределенных физико-математических моделей, задаются поля метеорологических переменных. Как правило, минимальный состав метеорологических параметров для многих гидрологических моделей включает в себя поля среднесуточной температуры и дефицита влажности воздуха, а также суточных осадков. Среднесуточная температура воздуха и суточные суммы осадков на метеорологических станциях – наиболее доступная информация на многих информационных ресурсах (например, [23, 25–27]). Что касается доступности данных по дефицитам влажности воздуха, то здесь могут возникнуть приведенные ниже трудности.

1. Информация по среднесуточным дефицитам доступна на Интернет-ресурсах в значительно меньшей степени, чем по температуре и осадкам.

2. Дефицит рассчитывается по измеряемым значениям влажности воздуха и точки росы. Анализ оперативной информации, поступающей с метеорологических станций в виде телеграмм ТМ-1, показывает, что заметная часть измерений хотя бы одного из этих параметров либо оказывается ненадежной и бракуется, либо вообще отсутствует. Кроме того, влажность воздуха измеряется не на всех пунктах метеонаблюдений, где измеряются температура и осадки [36].

3. В методиках расчета среднесуточных дефицитов влажности воздуха у разных авторов допускаются незначительные вариации: в системе Росгидромета среднесуточный дефицит рассчитывается осреднением дефицитов влажности воздуха, определенных по измерениям в сроки метеорологических наблюдений в течение суток; иногда среднесуточный дефицит рассчитывается по среднесуточным значениям влажности воздуха и температуры точки росы. Сравнение значений, определенных этими двумя способами осреднения, показывает систематические различия между ними. Расчеты по откалиброванной для конкретного речного бассейна гидрологической модели с одним типом данных по дефицитам дают плохие результаты с использованием другого типа данных из-за значительных ошибок при расчетах в блоке испарения.

4. В краткосрочных гидрологических прогнозах по моделям формирования стока в качестве входов в модели задаются прогностические поля метеоэлементов на период заблаговременности, рассчитанные по прогностическим метеорологическим моделям [18]. Что касается оправдываемости прогностических полей среднесуточной температуры воздуха и суточных сумм осадков, то на короткие сроки (до 7 дней) она достаточно высокая (в особенности температуры). Приемлемая оправдываемость прогностических полей влажности воздуха сохраняется на период 4–5 дней,



Рис. 1. Расположение метеорологических станций, данные которых использовались в исследовании.

что связано с их зависимостью от прогноза полей осадков в моделях общей циркуляции [16].

Отмеченные выше сложности с доступностью надежной архивной, оперативной и прогностической информации по дефицитам влажности воздуха на метеостанциях затрудняют широкое использование моделей, в особенности для задач оперативного управления и краткосрочного прогнозирования водноресурсных систем. Цель данной статьи – исследование возможностей сокращения количества необходимых для гидрологического моделирования метеорологических показателей за счет исключения наиболее труднодоступной информации о дефицитах влажности воздуха. С этой целью решались следующие задачи:

на основе анализа рядов многолетних метеорологических данных на метеостанциях России предложить структуру и определить параметры эмпирической формулы для расчета среднесуточного дефицита влажности воздуха по значениям температуры и осадков;

осуществить проверку предложенного подхода путем сравнения результатов моделирования гидрографов стока для ряда крупных речных бассейнов России по традиционной версии модели с дефицитами влажности воздуха и по модели с теми

же параметрами, но с аппроксимацией дефицитов по предложенной эмпирической формуле.

## МАТЕРИАЛЫ, МЕТОДЫ, ФОРМУЛА

Исходной информацией для построения статистических связей послужил выверенный массив данных ВНИИГМИ-МЦД [5], содержащий среднесуточные данные по температуре, дефицитам влажности воздуха и данные по сумме суточных осадков на 1719 метеорологических станциях России за период с 1966 по 2014 г. (рис. 1).

При выборе структуры эмпирической формулы для расчета среднесуточного дефицита влажности воздуха по среднесуточной температуре и суммам суточных осадков анализировались статистические связи между этими метеорологическими показателями для всех метеорологических станций. На наличие тесных связей между этими характеристиками при более крупном временном разрешении (сезон) указывалось в некоторых работах [13, 15]. На первом этапе из многолетнего архива метеоданных для каждой метеостанции были выделены дни без осадков и построены связи среднесуточных дефицитов с температурой воздуха. Они получились достаточно тесными и, по-

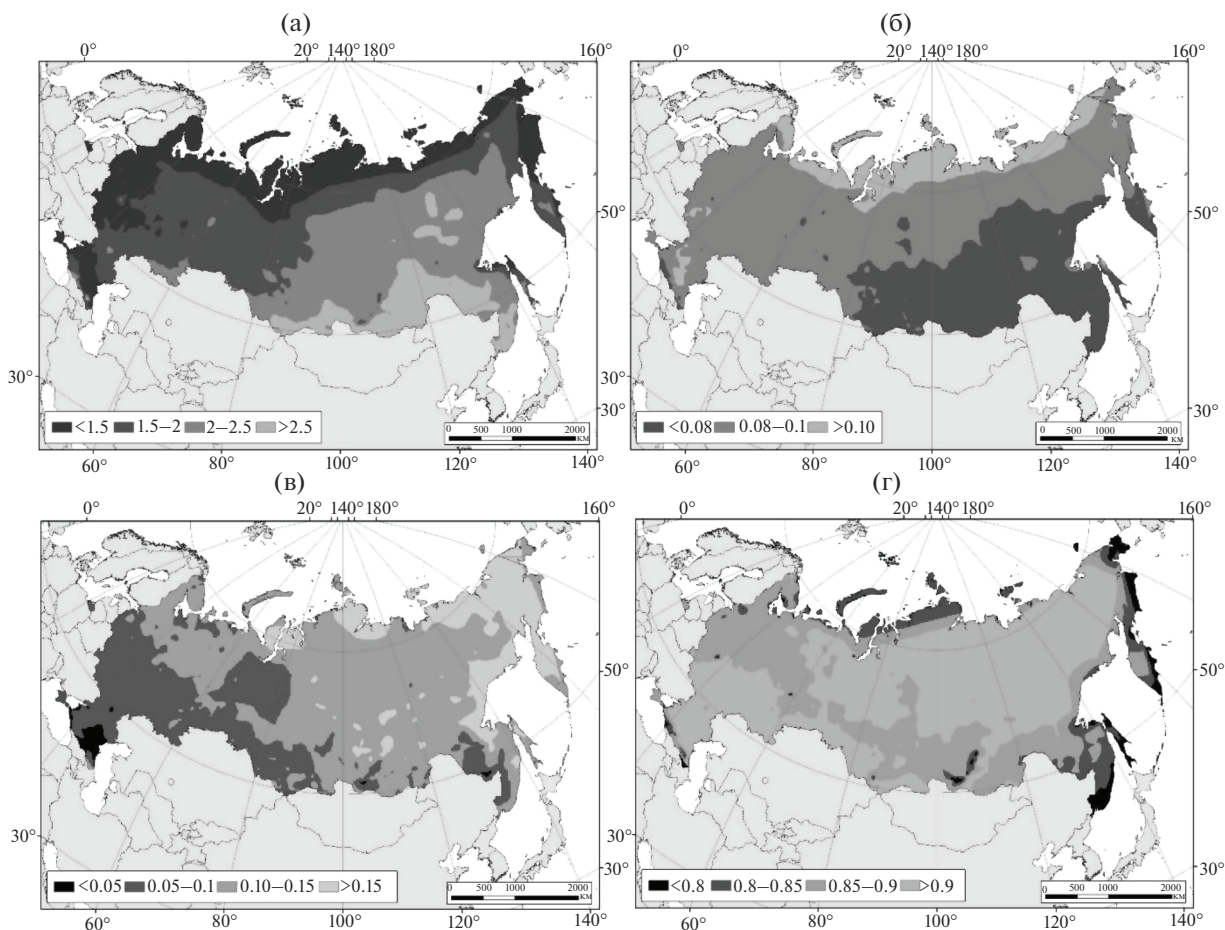


Рис. 2. Карты значений коэффициентов *a* (а), *b* (б) и *c* (в), рассчитанных по формуле (4), и коэффициентов корреляции (г).

видимому, отражают некоторые осредненные для района расположения метеостанции условия по увлажненности воздуха и скорости ветра при данной температуре в отсутствие осадков. Связи дефицитов с температурой хорошо аппроксимируются экспоненциальной зависимостью. Для подавляющего числа метеостанций (87%) коэффициенты нелинейной корреляции >0.80.

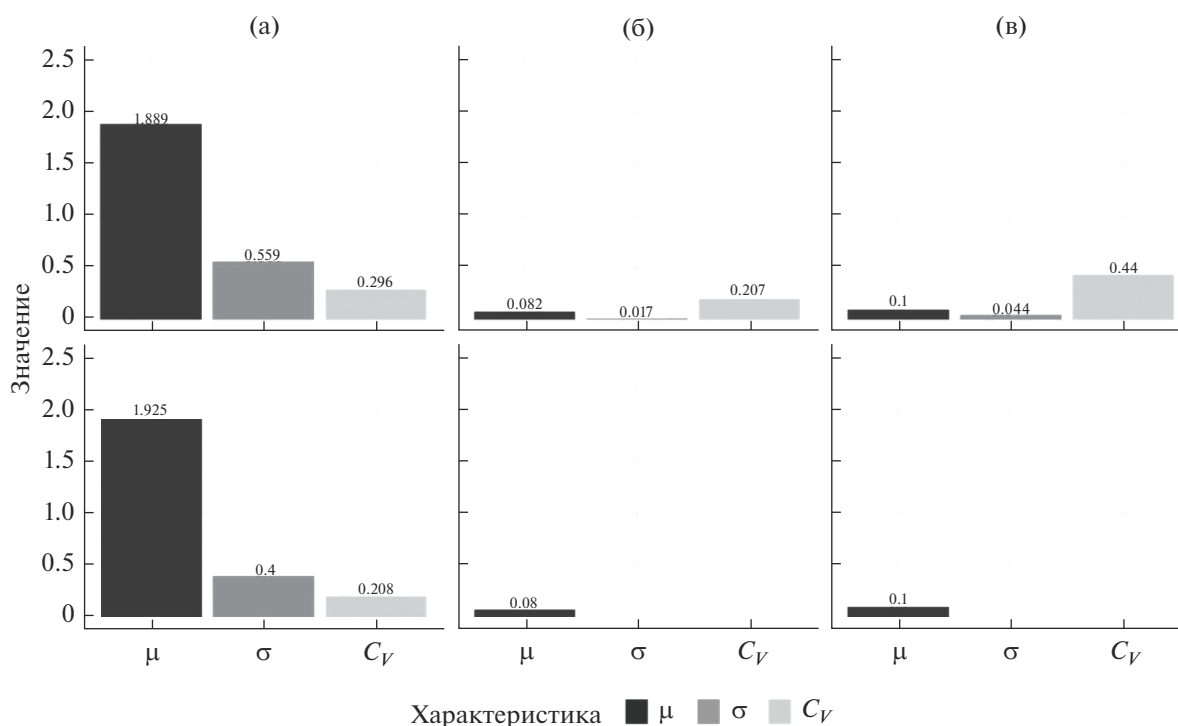
Очевидно, что в дни с осадками дефициты влажности воздуха снижаются. Чтобы учесть этот фактор, в экспоненциальную формулу включен дополнительный член, понижающий дефициты влажности воздуха в зависимости от количества осадков. Таким образом, для расчета суточных значений дефицита влажности воздуха использовалась следующая эмпирическая формула:

$$d = ae^{(bt - cp)}, \tag{4}$$

где *d* – среднесуточный дефицит влажности воздуха, гПа; *t* – среднесуточная температура воздуха, °С; *p* – суточная сумма осадков, мм; *a*, *b*, *c* – эмпирические коэффициенты.

Для каждой из 1719 метеостанций проведен подбор эмпирических коэффициентов *a*, *b*, *c* по программе, составленной на языке программирования R, путем аппроксимации регрессионных зависимостей методом нелинейных наименьших квадратов [17]. Код программы доступен в публичном репозитории [24]. Подобранные оптимальные значения коэффициентов *a*, *b*, *c* и коэффициенты корреляции между фактическими и рассчитанными по формуле (4) среднесуточными дефицитами влажности воздуха за весь период наблюдений по всем метеостанциям нанесены на карту расположения метеостанций (рис. 2).

Анализ карт на рис. 2 показывает, что изменения значений коэффициента *a* по территории России имеют зональный характер: наименьшие значения (*a* < 1.5) отмечаются на влажном Арктическом побережье, на западной и восточной окраинах России. На территории Европейской части России и Западной Сибири 1.5 < *a* < 2.0. На большей части Центральной и Восточной Сибири с суровым континентальным климатом 2.0 < *a* < 2.5. И, наконец, в районах высокогорий Си-



**Рис. 3.** Математическое ожидание  $\mu$ , стандартное отклонение  $\sigma$  и коэффициент вариации  $C_V$  для коэффициентов  $a$ ,  $b$  и  $c$  в формуле (4) (верхняя строка графиков) и для коэффициента  $a$  в формуле (5) с табулированными значениями коэффициентов  $b$  и  $c$  (нижняя строка графиков) а–в – коэффициенты а–с соответственно.

бири, а также на южной ее окраине, испытывающей дополнительное засушливое влияние со стороны территории Монголии и Китая, отмечаются максимальные значения коэффициента  $a$  – до 4.2.

Пространственное распределение значений коэффициента  $b$  более равномерное. На большей части территории России его значения находятся в диапазоне от 0.08 до 0.1. Максимальные значения ( $b > 0.1$ ) отмечаются на Арктическом побережье. В юго-восточных регионах Азиатской части России – минимальные значения ( $0.06 > b > 0.08$ ).

Еще более равномерно по территории распределение коэффициента  $c$ . На большей части территории России  $1.0 < c < 1.5$ . В центральных и южных регионах Европейской части России, в Западной Сибири, а также на южной окраине Дальнего Востока  $0.05 < c < 0.15$ . На восточной окраине России  $c > 0.15$ .

Значения коэффициентов корреляции между фактическими и рассчитанными по формуле (4) среднесуточными дефицитами влажности воздуха за весь период наблюдений на большей части метеостанций  $> 0.85$ , причем на большей части сибирского региона и в южных регионах Европейской части России они  $> 0.9$ . Значения коэффициента корреляции рядов фактических и модельных дефицитов влажности  $< 0.75$  отмечались для 133 метеостанций, что составляет всего 7.7% от общего количества. Более детальный и тща-

тельный анализ показал, что на некоторых из этих метеостанций в значениях фактических дефицитов часто встречались грубые ошибки, поэтому эти метеостанции в дальнейшем были забракованы и не вошли в исследуемую выборку при построении данных карт. Средние значения коэффициента корреляции и среднеквадратической ошибки расчета дефицитов на всех станциях составили соответственно  $R = 0.88$ ,  $RMSE = 1.51$  гПа.

Анализ результатов расчетов по формуле (4) показал, что она наиболее чувствительна к изменению коэффициента  $a$ . Чувствительность результатов к изменению коэффициентов  $b$  и  $c$  существенно ниже. Значения этих коэффициентов меняются в очень узких диапазонах (рис. 3). Поэтому предложен еще один вариант малопараметрической формулы для приближенного расчета дефицита влажности с одним оптимальным эффективным коэффициентом  $a$ , а коэффициенты  $b$  и  $c$  жестко табулировались и задавались их средними по территории России значениями:  $b = 0.08$  и  $c = 0.1$ . Таким образом, расчет среднесуточных дефицитов влажности воздуха проводился по приближенной формуле:

$$d = ae^{(0.08t - 0.1p)}. \quad (5)$$

Карта распределения оптимальных значений коэффициента  $a$  в формуле (5) по территории

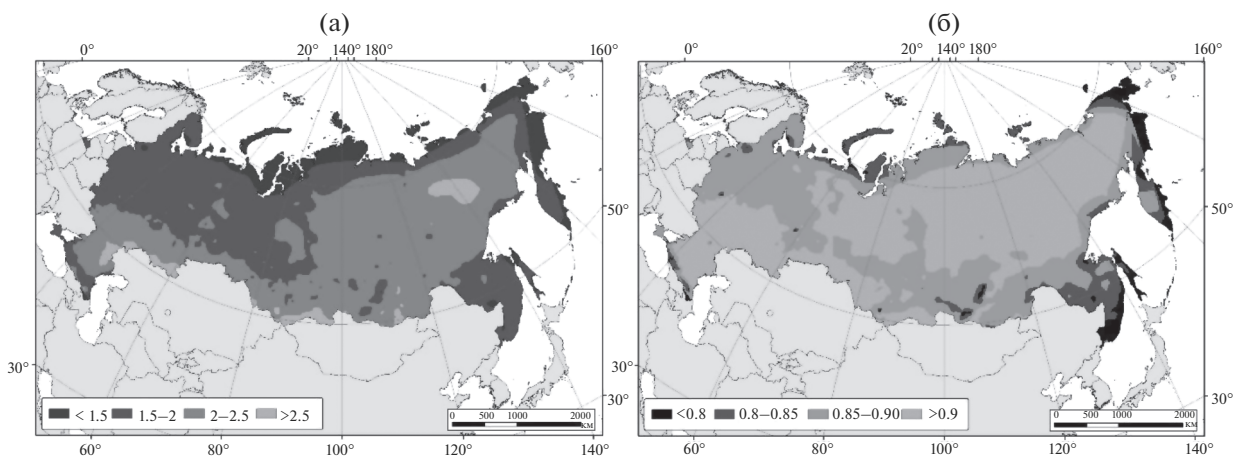


Рис. 4. Распределение значений коэффициента  $a$  в формуле (5) (а) и коэффициентов корреляции (б) по территории России.

России показана на рис. 4а, а значений коэффициентов корреляции – на рис. 4б. Сравнение этих карт с соответствующими картами, представленными на рис. 2, показывает, что они не сильно различаются между собой, т. е. расчет по формуле (5) с табулированными значениями коэффициентов  $b$  и  $c$  не вносит больших погрешностей относительно результатов расчетов с оптимальными значениями этих коэффициентов по формуле (4). Об этом свидетельствуют значения коэффициента корреляции и среднеквадратической ошибки расчета дефицитов по формуле (5), которые составили соответственно  $R = 0.87$ ,  $RMSE = 1.57$  гПа. Таким образом, расчеты по формуле (5) дают примерно такие же статистические оценки точности расчетов, как и по формуле (4). Кроме того, обращает на себя внимание тот факт, что значение стандартного отклонения коэффициента  $a$  в формуле (5) оказалось ниже, чем по формуле (4) (рис. 3), что, по-видимому, связано с сокращением неопределенностей, связанных с учетом изменчивости коэффициентов  $b$  и  $c$  по территории России.

Из левой картосхемы на рис. 4 следует, что на большей части России значения коэффициента  $a$  – от 1.5 до 2.5, причем более высокие его значения охватывают гористую часть территории Сибири, южные регионы Европейской части России и Уральских гор. Примерно с этими же областями связаны и более высокие значения коэффициентов корреляции между фактическими и рассчитанными по формуле (5) значениями среднесуточных дефицитов влажности воздуха. На рис. 5 приведены примеры приближенных зависимостей дефицитов для двух метеостанций, а на рис. 6 – хронологический ход фактических и рассчитанных по формуле (5) дефицитов влажности воздуха для этих метеостанций для произвольного периода в июне–июле 1980 г. Из рис. 6 следует,

что расчеты по формуле (5) с хорошей точностью воспроизводят связанные с циклогенезом внутримесячные колебания среднесуточных дефицитов влажности воздуха.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ И ДИСКУССИЯ

Испытания предложенной формулы для расчета дефицита влажности воздуха и испарения при моделировании процессов гидрологического цикла проводились на примерах, построенных на базе модельного комплекса ECOMAG [11, 36], региональных моделей формирования стока для ряда крупных речных бассейнов, расположенных в разных физико-географических зонах с разными условиями формирования стока, типами питания и гидрологического режима водных объектов: Волги [6], Оки [30], Северной Двины [32], Белой [35], Лены [21], Селенги [33] и Амура [7] (рис. 7). Для этого результаты расчетов гидрографов стока по откалиброванным региональным гидрологическим моделям этих речных бассейнов в традиционной конфигурации по полному составу метеорологической информации: суточные суммы осадков, среднесуточные значения температуры и дефицита влажности воздуха, – сравнивались с результатами расчета гидрографов с использованием предложенной эмпирической формулы (5) для расчета среднесуточных дефицитов влажности воздуха по среднесуточной температуре воздуха и сумме суточных осадков. Поскольку более чем на 90% территории России  $1.5 < a < 2.5$  в формуле (5) (рис. 3), то пробные расчеты проводились для двух значений:  $a = 1.5$  и  $a = 2.0$ . Сопоставление результатов расчетов по двум предложенным версиям модели выполнено с использованием традиционных статистических критериев Нэша–Сатклифа  $NSE$  (соответствие

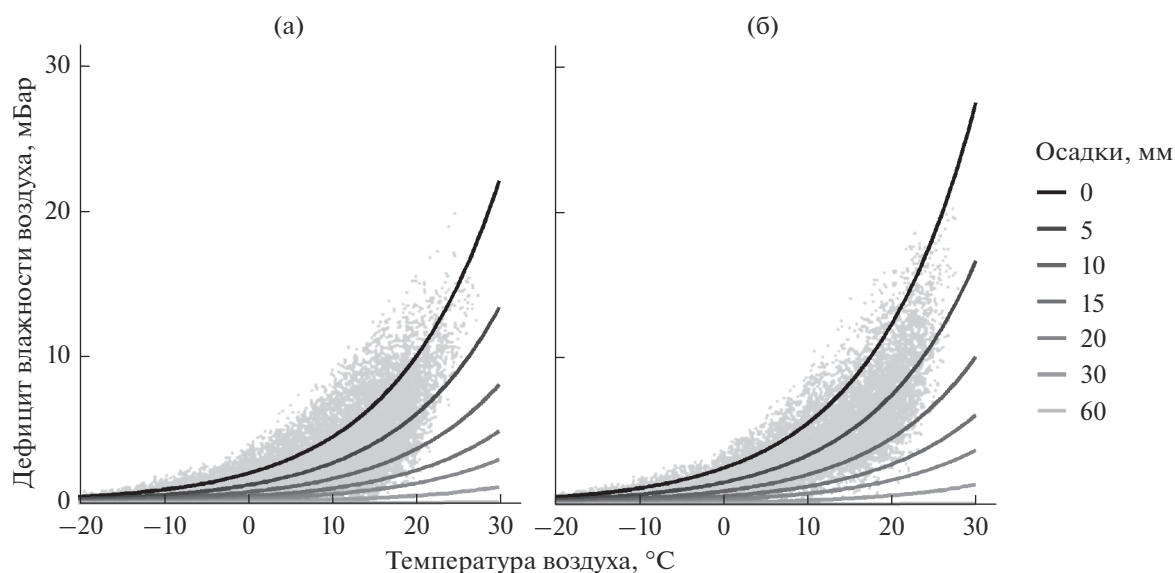


Рис. 5. Зависимости среднесуточного дефицита влажности воздуха от среднесуточной температуры воздуха при различных суточных суммах осадков для метеостанций Вологда (а) и Новосибирск (б).

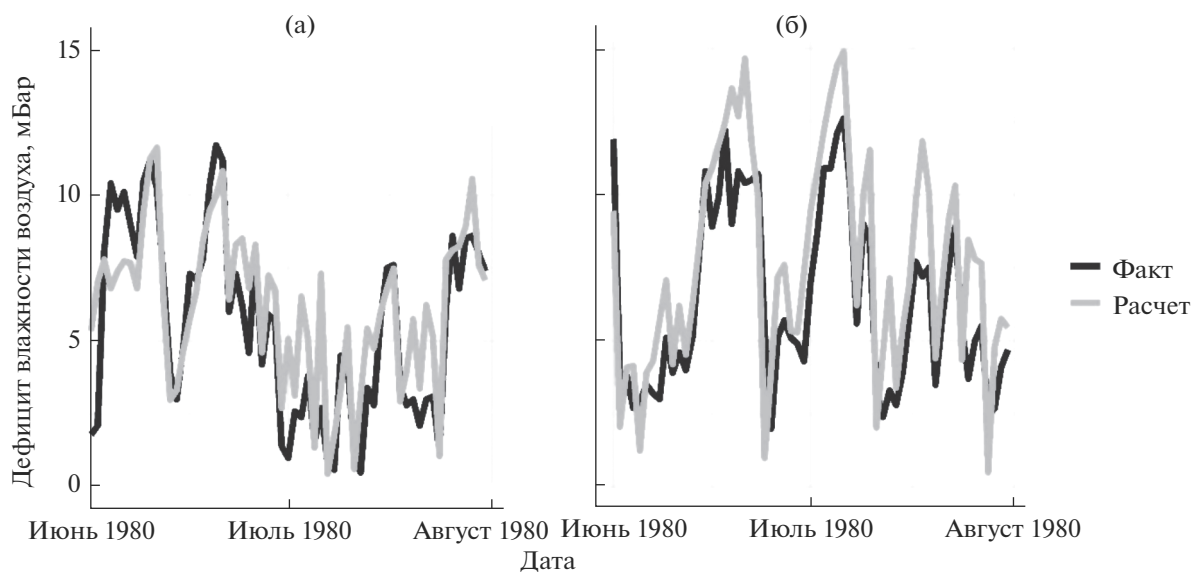


Рис. 6. Хронологический ход фактических и рассчитанных по формуле (5) среднесуточных дефицитов влажности воздуха в июне–июле 1980 г. на метеостанциях Вологда (а) и Новосибирск (б).

гидрографов) и *BIAS* (соответствие объемов стока за многолетний период, %) (табл. 1).

В табл. 1 выделены наиболее близкие варианты расчета гидрографов по модели формирования стока с использованием предложенной зависимости (5) к варианту расчета по модели с фактическими дефицитами влажности воздуха (в смысле близости результатов по критериям *NSE* и *BIAS*). Как и следовало ожидать, в соответствии с картой распределения коэффициента *a* по территории России наиболее близкие результаты

расчетов получаются при значении  $a = 1.5$  для водосборов Северной Двины, Чебоксарского водохранилища, Селенги и Амура. Для бассейна Лены лучшие результаты получаются при расчетах с  $a = 2.0$ . Для водосбора Нижнекамского водохранилища, включающего в себя области Южного Урала, значения коэффициента  $a = 1.5$  и  $a = 2.0$  дают примерно одинаковые результаты моделирования гидрографов стока. Примеры расчета гидрографов стока по модели ECOMAG для отдельных



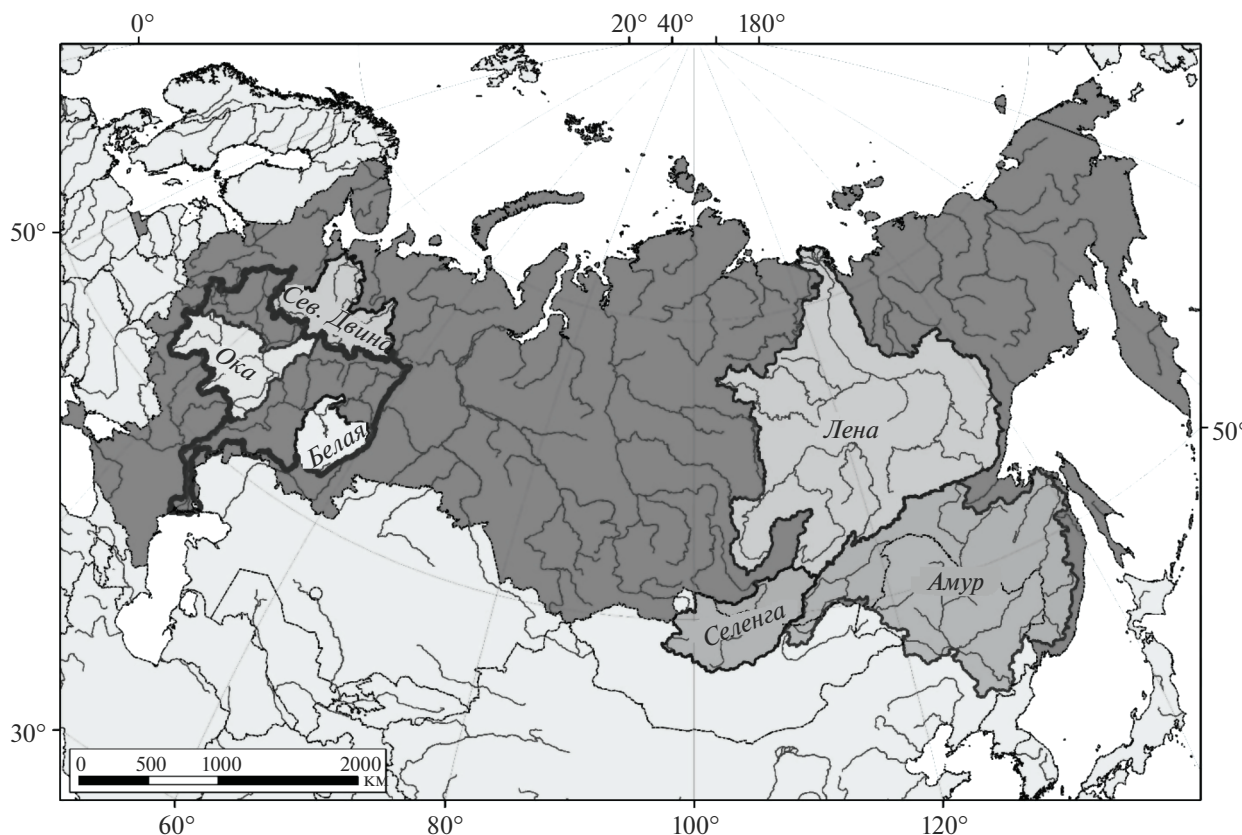


Рис. 7. Речные бассейны, на которых проведены испытания формулы (5) по региональным моделям формирования стока.

гидрологических створов во всех указанных в табл. 1 речных бассейнах приведены на рис. 8.

Кроме того, из табл. 1 видно, что расчеты по модели с использованием приближенной формулы (5) примерно в половине случаев неожиданно дают такую же или даже несколько большую точность (по критерию Нэша–Сатклифа), чем расчеты с использованием фактических дефицитов влажности воздуха. Одной из причин этого может быть увеличение вероятности внесения достаточно грубых ошибок с увеличением количества используемых в расчетах измеряемых метеорологических параметров на некоторых метеостанциях. Такие ошибки могут вносить погрешности в ежедневные поля метеорологических характеристик, полученных путем пространственной интерполяции значений метеопараметров по данным метеостанций, расположенных на территории водосборов. Необходимо учитывать, что грубое искажение хотя бы одного из трех полей, задействованных в расчетах в конкретные сутки (поля температуры, осадков и дефицитов влажности воздуха), может негативно сказаться на результатах расчетов гидрографов стока за достаточно длительный последующий период расчетов по модели. Поэтому позиция авторов статьи состоит

в нахождении разумного компромисса между увеличением количества используемых метеорологических показателей во входной метеорологической информации и повышением качества гидрологического моделирования при проведении расчетов по пространственно распределенным моделям формирования стока.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По многим гидрологическим моделям расчеты процессов формирования стока в речных бассейнах проводятся по данным наблюдений за температурой, осадками и влажностью воздуха. Ограниченная доступность качественной архивной и прогностической информации по дефицитам влажности воздуха зачастую затрудняет более широкое использование моделей, в особенности для задач оперативного управления и краткосрочного прогнозирования водноресурсных систем. Поэтому в статье выполнено исследование возможностей сокращения количества необходимых для гидрологического моделирования метеорологических показателей за счет исключения информации о дефицитах влажности воздуха. С этой целью предложена структура экспоненци-

**Таблица 1.** Значения критериев соответствия рассчитанных и фактических гидрографов стока по моделям в традиционной конфигурации с фактическими дефицитами влажности воздуха для расчета испарения и с использованием приближенной формулы (5) при двух значениях коэффициента  $a$

№	Водосбор—створ, площадь, км <sup>2</sup>	Период	<i>NSE</i>	<i>BIAS</i>	<i>NSE</i>	<i>BIAS</i>	<i>NSE</i>	<i>BIAS</i>
			дефицит		формула (2) $a = 1.5$		формула (2) $a = 2.0$	
Водосбор Чебоксарского водохранилища								
1	Чебоксарская ГЭС 373800	1982–2011	0.85	2.6	<b>0.79</b>	<b>-6.7</b>	0.56	-34.4
2	Ока—Горбатов 240000	2002–2011	0.74	3.8	<b>0.76</b>	<b>-7.0</b>	0.56	-34.2
Водосбор Нижнекамского водохранилища								
3	Нижнекамская ГЭС 184400	1979–2011	0.86	10.2	<b>0.83</b>	<b>10.7</b>	<b>0.81</b>	<b>-1.5</b>
4	Белая—Бирск 121000	2002–2011	0.84	6.9	<b>0.86</b>	<b>11.6</b>	<b>0.86</b>	<b>-0.5</b>
5	Белая—Уфа 100000	2002–2011	0.91	-16.8	<b>0.91</b>	<b>10.6</b>	<b>0.91</b>	<b>-0.9</b>
Водосбор Северной Двины								
6	Северная Двина— Усть-Пинега	1971–2009	0.92	-0.9	<b>0.90</b>	<b>-5.8</b>	0.71	-32.6
7	Сухона—Каликино	1971–2009	0.74	13.7	<b>0.76</b>	<b>2.3</b>	0.67	-26.7
Бассейн Лены								
8	Лена—Столб 2460000	1966–2002	0.87	6.0	0.70	29.9	<b>0.84</b>	<b>11.7</b>
9	Лена—Кюсюр 2430000	1966–2008	0.87	-3.1	0.81	17.5	<b>0.88</b>	<b>1.3</b>
10	Лена—Солянка 770000	1966–2008	0.86	-4.2	0.76	13.7	<b>0.86</b>	<b>-0.8</b>
11	Лена—Крестовский 440000	1966–2002	0.80	-4.9	0.70	11.4	<b>0.81</b>	<b>-2.1</b>
12	Алдан—Верхоянский Перевоз 696000	1966–2008	0.77	4.4	0.57	25.8	<b>0.69</b>	<b>10.5</b>
Бассейн Селенги								
13	Селенга—Кабанск, 445000	1980–2013	0.81	1.0	<b>0.76</b>	<b>14.1</b>	0.61	-23.0
Бассейн Амура								
14	Амур—Хабаровск, 1630000	1994–2013	0.87	1.6	<b>0.82</b>	<b>3.9</b>	0.63	-28.5

альной формулы для расчета среднесуточного дефицита влажности воздуха по среднесуточной температуре воздуха и сумме суточных осадков. Оптимальные значения трех коэффициентов этой эмпирической формулы для каждой из 1719 метеостанций подобраны методом нелинейных наименьших квадратов по архивным рядам данных наблюдений с 1966 по 2014 г. На основе анализа чувствительности изменчивости коэффициентов предложена приближенная формула (5), в которой значения двух коэффициентов были та-

булированы и заданы их средними величинами, а для оценки единственного коэффициента —  $a$  средствами ГИС-технологий построены карты распределения его значений по территории России. Хронологические расчеты дефицитов по этой формуле и их сопоставление с данными наблюдений для отдельных метеостанций показали хорошую точность воспроизведения внутримесячных колебаний среднесуточных дефицитов влажности воздуха.

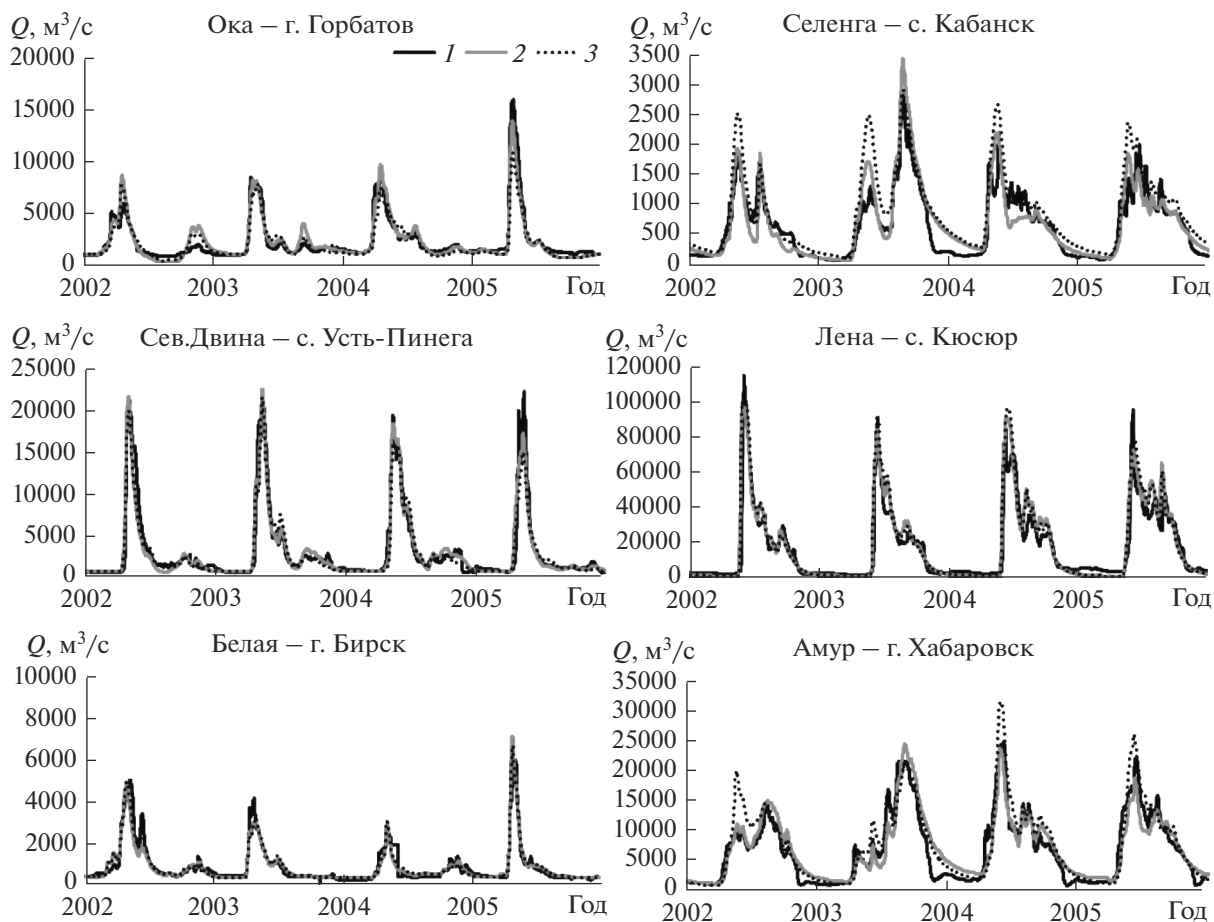


Рис. 8. Гидрографы стока в бассейнах рек за период 2002–2005 гг. 1 – фактические, 2 – рассчитанные по фактическим дефицитам влажности воздуха, 3 – рассчитанные с использованием формулы (5).

Испытания предложенной формулы (5) для задач гидрологических расчетов проводились путем сравнения результатов параллельных расчетов гидрографов стока за многолетние периоды по традиционной версии гидрологической модели с фактическими дефицитами влажности воздуха и по модели с теми же параметрами, но с аппроксимацией дефицитов по предложенной эмпирической формуле по температуре воздуха и осадкам. На примере построенных на базе модельного комплекса ЕСОМАГ региональных моделей формирования стока для ряда крупнейших российских речных бассейнов с помощью статистических критериев показано, что расчеты с использованием приближенной формулы (5) для большинства сравниваемых водосборов дают примерно такую же точность, что и расчеты с использованием фактических дефицитов влажности воздуха. Таким образом, проведенное исследование показало, что количество метеорологических показателей во входной информации для гидрологического моделирования крупных речных бассейнов может быть ограничено данными

по осадкам и температуре воздуха. Привлечение дополнительной информации по другим метеорологическим элементам (влажность воздуха, скорость ветра, облачность, характеристики солнечной радиации, альbedo и др.) чревато удорожанием необходимых данных, внесением грубых ошибок при усвоении больших объемов информации в пространственно распределенных моделях и связанными с этим искажениями в результатах расчетов. Поэтому, предвзято использование расширенного состава метеоданных для конкретных речных бассейнов и конкретных водохозяйственных задач, целесообразно провести анализ чувствительности модели с целью оценки эффективности гидрологических расчетов с привлечением того или иного дополнительного вида метеоданных.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алпатьев А.М. Влагообороты в природе и их преобразование. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 323 с.

2. Братсерт У.Х. Испарение в атмосферу. Теория, история, приложения. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 352 с.
3. Будаговский А.И. Испарение почвенной влаги. М.: Наука, 1964. 244 с.
4. Будыко М.И. Испарение в естественных условиях. Л.: Гидрометеоздат, 1948. 136 с.
5. Булыгина О.Н., Веселов В.М., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России. Свид. гос. регистрации базы данных № 2014620549. 2014.
6. Калугин А.С. Моделирование естественного формирования стока Волги в условиях современных климатических изменений // Сб. тр. VII международ. науч. конф.-шк. молодых ученых “Физическое и математическое процессов в геосредах”. М.: ИПМех РАН, 2021. С. 125–128.
7. Калугин А.С., Мотовилов Ю.Г. Модель формирования стока для бассейна р. Амур // Вод. ресурсы. 2018. Т. 45. № 2. С. 121–132.
8. Константинов А. Р. Испарение в природе. Л.: Гидрометеоздат, 1971. 532 с.
9. Кучмент Л.С., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г., Смахтин В.Ю. Система физико-математических моделей гидрологических процессов и опыт ее применения к задачам формирования стока // Вод. ресурсы. 1986. Т. 13. № 5. С. 24–36.
10. Методы изучения и расчета водного баланса / Под ред. В.С. Вуглинского, Г.С. Клейн. Л.: Гидрометеоздат, 1981. С. 201–248.
11. Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: ИВП РАН, 2018. 300 с. <https://www.iwr.ru/upload/iblock/a4a/a4ab6902d99c4fa97e5a0-da01859042e.pdf> (дата обращения: 01.12.2021).
12. Мотовилов Ю.Г., Старцева З.П. Численное моделирование влагообмена между деятельным слоем почвы и атмосферой // Метеорология и гидрология. 1985. № 6. С. 85–93.
13. Сало Ю.А., Назарова Л.Е., Балаганский А.Ф. Расчет испаряемости и суммарного испарения с водосборов северо-запада России // Тр. КарНЦ РАН, 2016. № 9. С. 95–101. <https://doi.org/10.17076/lim389>
14. Abbott M.B., Bathurst J.C., Cunge J.A., O’onnell P.E., Rasmussen J. An Introduction to the European Hydrological System – Systeme Hydrologique Europeen (SHE). 1. History and Philosophy of a Physically-Based Distributed Modelling System // J. Hydrol. 1986. V. 87. P. 45–59.
15. Alharbi A., Alzoheiry A. Evaluation of Reference Evapotranspiration Estimation for Arid Sites with Only Temperature Records // G.A.R.J.A.S. 2018. V. 7 (1). P. 020–027.
16. Andersson E., Hölm E., Bauer P., Beljaars A., Kelly G.A., McNally A.P., Simmons A.J., Thépaut J.-N., Tompkins A.M. Analysis and forecast impact of the main humidity observing systems // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2007. V. 133 (627). P. 1473–1485.
17. Bates D.M., Chambers J.M. Nonlinear models. Chapter 10 of Statistical Models in S / Eds J.M. Chambers, T.J. Hastie. Pacific Grove, California: Wadsworth & Brooks/Cole, 1992. P. 421–454.
18. Bürger G., Reusser D., Kneis D. Early flood warnings from empirical (expanded) downscaling of the full ECMWF Ensemble Prediction System // Water Resour. Res. 2009. V. 45. № 10. <https://doi.org/10.1029/2009WR007779>
19. Dalton J. Experimental essays on the constitution of mixed gases: On the force of steam or vapor from water or other liquids in different temperatures, both in a Torricelli vacuum and in air; on evaporation; and on expansion of gases by heat // Manchester Literary Philosophical Soc. Mem. Proc. 1802. V. 5. P. 536–602.
20. Feddes R.A., Bresler E., Neuman S.P. Field test of modified numerical model for water uptake by root systems // Water Resour. Res. 1974. V. 10 (6). P. 1166–1206.
21. Gelfan A., Kalugin A., Krylenko I., Nasonova O., Gusev Ye., Kovalev E. Does a successful comprehensive evaluation increase confidence in a hydrological model intended for climate impact assessment? // Clim. Change. 2020. V. 163. P. 1165–1185. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02930-z>
22. Gusev Y.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. № 1–4 (280). P. 162–191.
23. <http://aisori-m.meteo.ru/waisori> (дата обращения: 25.11.2021)
24. [https://github.com/esmoreido/deficit\\_approximation](https://github.com/esmoreido/deficit_approximation) (дата обращения: 11.02.2022)
25. <http://pogodaiklimat.ru> (дата обращения: 25.11.2021)
26. <https://trp5.ru> (дата обращения: 25.11.2021 г.)
27. <https://www.ncei.noaa.gov/> (дата обращения: 25.11.2021)
28. Islam Z. A Review on Physically Based Hydrologic Modeling. Dept. Civil Environ. Eng. Univ. Alberta. Tech. Rep. 2011. May. 44 p. <https://doi.org/10.13140/2.1.4544.5924>
29. Jovanovic N., Israel S. Critical Review of Methods for the Estimation of Actual Evapotranspiration in Hydrological Models // Evapotranspiration: Remote Sensing and Modeling / Ed. Ayse Irmak. London: IntechOpen, 2012. <https://doi.org/10.5772/21279>
30. Kalugin A.S. The Impact of Climate Change on Surface, Subsurface, and Groundwater Flow: A Case Study of the Oka River (European Russia) // Water Resour. 2019. V. 46. P. S31–S39. <https://doi.org/10.1134/S0097807819080104>
31. Kroes L.G., Wesseling J.G., Van Dam J.C. Integrated modelling of the soil–water–atmosphere–plant system using the model SWAP 2.0 an overview of theory and an application // Hydrol. Process. 2000. V. 14. P. 1993–2002.
32. Krylenko I., Motovilov Yu., Antokhina E., Zhuk V., Surkova G. Physically-based distributed modelling of river runoff under changing climate conditions // Proc. IAHS. 2015. V. 368. P. 156–161. <https://doi.org/10.5194/piahs-368-156-2015>
33. Millionshchikova T. Projections of Selenga river runoff in the XXI century and uncertainty estimates // Proc.

- IAHS. 2019. V. 381. P. 107–112.  
<https://doi.org/10.5194/piahs-381-107-2019>
34. *Monteith J.L.* Evaporation and Environment // 19th Sympos. Soc. Experimental Biol. Cambridge: Univ. Press, 1965. V. 19. P. 205–234.
35. *Motovilov Yu., Fashevsckaya T.* Modeling Management and Climate Change Impacts on Water Pollution by Heavy Metals in the Nizhnekamskoe Reservoir Watershed // Water. 2021. V. 13. № 22. 3214.  
<https://doi.org/10.3390/w13223214>
36. *Motovilov Yu.G., Gottschalk L., Engeland K., Belokurov A.* ECOMAG – regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region // Department of Geophysics. Univ. Oslo. Inst. Rep. Ser. No 105. 1999. 88 p. ISBN 82-91885-04-4, ISSN 1501-6854
37. *Penman H.L.* Natural evaporation from open water, bare soil and grass // Proc. Royal Soc. London (A). 1948. V. 193. P. 120–145.
38. *Singh V.P., Xu C.-Y.* Evaluation and Generalization of 13 Mass-Transfer Equations for Determining Free Water Evaporation // Hydrol. Process. 1997. V. 11 P. 311–323.
39. *Zhao L., Xia J., Xu C.-Y., Wang Z., Sobkowiak L., Long C.* Evapotranspiration estimation methods in hydrological models // J. Geogr. Sci. 2013. V. 23 (2). P. 359–369.  
<https://doi.org/10.1007/s11442-013-1015-9>