

ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 556.048

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ТЕПЛОВЛАГООБМЕНА СУШИ С АТМОСФЕРОЙ К РАСЧЕТУ ГИДРОГРАФА ДОЖДЕВОГО РЕЧНОГО СТОКА. 2. СОПОСТАВЛЕНИЕ С ГИДРОЛОГИЧЕСКИМИ МОДЕЛЯМИ¹

© 2011 г. О. Н. Насонова

Институт водных проблем Российской академии наук

119333 Москва, ул. Губкина, 3

Поступила в редакцию 19.01.2010 г.

Выполнено сопоставление гидрографов дождевого стока для 12 речных бассейнов площадью $\sim 10^3$ км², воспроизведенных с помощью модели тепловлагообмена суши с атмосферой SWAP, с аналогичными гидрографами, полученными с использованием гидрологических моделей, участвовавших в международном проекте Model Parameter Estimation Experiment и показавших наилучшие результаты. Все модели были предварительно откалиброваны по данным о суточных значениях речного стока с каждого бассейна за 20-летний период (1960–1979 гг.). Оптимизированные модельные параметры использовались для расчетов гидрографов стока для последующих 19 лет (1980–1998 гг.). Сопоставление смоделированных гидрографов стока для 12 бассейнов за различные расчетные периоды позволило сделать вывод, что модель SWAP способна воспроизводить речной сток с точностью, сопоставимой с точностью гидрологических моделей.

Ключевые слова: гидрографы дождевого стока, модель тепловлагообмена суши с атмосферой, гидрологические модели, оптимизация параметров.

Данная статья – вторая часть работы, посвященной исследованию возможности применения физико-математической модели тепловлагообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP для расчета гидрографов дождевого стока. Как уже отмечалась в предыдущей части, SWAP относится к классу LSM-моделей. Ее принципиальное отличие от других физико-математических LSM- и гидрологических моделей состоит в применении, по возможности, аналитических методов решения систем уравнений (в то время как в большинстве указанных моделей используются численные методы), что обеспечивает будущую экономичность и быстродействие модели. Кроме того, SWAP – довольно универсальная модель, которая может применяться (что подтверждено ее многочисленными проверками, результаты которых представлены в отечественных и зарубежных публикациях, приведенных в первой части статьи) для объектов разных пространственных масштабов (от локального до глобального), для агроэкосистем и естественных травяных и лесных растительных сообществ, расположенных в различных физико-географических условиях (от аридных до гумидных, при наличии сезоннопромерзающих и характерных для районов многолетней мерзлоты сезоннооттаивающих почв). В отличие от гидрологических моделей, SWAP, по-

мимо стока, позволяет рассчитывать несколько десятков характеристик теплового и водного режимов системы почва – растительный/снежный покров – приземный слой атмосферы (SVAS), а также радиационных, тепловых и водных потоков, имеющих место в этой системе. К тому же, SWAP ориентирована на разные источники информационного обеспечения. В качестве исходной метеорологической информации могут быть использованы данные непосредственных наблюдений, данные с нижнего расчетного уровня моделей общей циркуляции атмосферы, а также глобальные базы данных. Априорные значения параметров подстилающей поверхности могут быть получены на основе непосредственных измерений, из литературных источников, из глобальных баз данных или же оценены по данным о типах почв и растительности. Ошибки и неточности в исходной информации могут отчасти компенсироваться калибровкой модели.

Все вышесказанное делает заманчивым применение модели SWAP для гидрологических расчетов, в частности, для расчета дождевого стока рек. Для этого необходимо выяснить, способна ли модель SWAP воспроизводить гидрографы дождевого стока с точностью гидрологических моделей. Эта задача – цель настоящей работы.

Работа выполнена по материалам международного проекта Model Parameter Estimation Experiment (MOPEX) [4], полученным авторами в процессе

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 08-05-00027).

участия в этом проекте и описанным в первой части статьи, а также по результатам расчетов гидрографов стока по различным участвовавшим в проекте моделям, любезно предоставленным Дж. Шааке (Национальная служба погоды/Национальная океаническая и атмосферная администрация NWS/NOAA, США). В проекте MOPEX участвовало восемь моделей: четыре гидрологические (SWB, SAC, GR4J и PRMS), три LSM-модели (ISBA, SWAP и NOAH) и одна модель (VIC-3L), которая может использоваться как крупномасштабная гидрологическая модель в гидрологических приложениях и как LSM-модель в метеорологических и климатических приложениях [4]. Результаты четырех гидрологических моделей и были использованы в настоящей работе.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА В ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ SWB, SAC, GR4J И PRMS

Прежде всего кратко рассмотрим, как в гидрологических моделях SWB, SAC, GR4J и PRMS описаны гидрологические процессы, чтобы показать их отличие от модели SWAP, рассмотренной в первой части данной статьи.

SWB, SAC и GR4J – концептуальные модели с пространственно сосредоточенными параметрами, в то время как PRMS – физико-математическая модель, которая может работать и с сосредоточенными, и с распределенными параметрами. Каждая из этих моделей состоит из нескольких взаимосвязанных водных резервуаров. Емкости резервуаров определяются параметрами модели. Помимо этого, имеются так называемые функции влагопереноса, которые определяют перераспределение воды между резервуарами и потоками, а также движение воды в речной сети.

Модель Simple Water Balance Model

Модель Simple Water Balance model (SWB) – концептуальная модель, воспроизводящая формирование дождевого стока с водосбора с использованием данных об атмосферных осадках и потенциальном суммарном испарении [9]. SWB – наиболее простая из рассматриваемых моделей. В модели два водных резервуара. Верхний резервуар представляет собой тонкий слой, предназначенный для перехвата осадков. Из этого резервуара может осуществляться только испарение. Нижний резервуар – более мощный слой, вода из которого может как испаряться, так и формировать подземный сток. Поверхностный сток в модели начинает формироваться после того, как интенсивность осадков превысит интенсивность впитывания воды в почву (хортоновская концепция генезиса стока). Гидрограф речного стока рассчитывается на основе метода единичного гидрографа. В модели имеется пять параметров и

две переменных состояния. Все пять параметров автоматизировано калибруются с использованием алгоритма SCE-UA [2], рассмотренного в первой части данной статьи. Модель используется Национальной службой погоды США.

Модель Sacramento Soil Moisture Accounting Model

Модель SAC, полное название которой Sacramento Soil Moisture Accounting model (SAC-SMA), представляет собой концептуальную модель с пространственно сосредоточенными параметрами, воспроизводящую сток с водосбора с использованием в качестве исходной информации данных по атмосферным осадкам и потенциальному испарению [2, 3, 5]. SAC-SMA состоит из шести резервуаров: двух в верхней зоне почвы, трех – в нижней, шестой резервуар аккумулирует воду над водонепроницаемыми участками водосбора. Ключевая функция – уравнение просачивания почвенной влаги, определяющее движение воды от верхних резервуаров почвы к нижним. Модель описывает следующие гидрологические процессы: формирование поверхностного стока над водонепроницаемым слоем, формирование поверхностного стока при полном насыщении верхней зоны почвы, внутриводосборный горизонтальный сток из второго резервуара верхней зоны почвы, подземный сток из резервуаров нижней зоны (отчасти попадающий в речное русло, отчасти уходящий за пределы водосбора), суммарное испарение из всех резервуаров. Рассчитанный мгновенный сток преобразуется в речной сток на основе концепции единичного гидрографа. Учитываются потери воды через речное русло. Модель содержит 16 параметров (13 из которых калибруются), определяющих емкости резервуаров и скорости их иссушения, долю водонепроницаемого поверхностного слоя, перераспределение воды между резервуарами и отток ее в речную сеть, возможные потери воды речным руслом. Для калибровки модели применяется метод SCE-UA. Критерий оптимизации представляет собой сочетание суточной и месячной среднеквадратических ошибок, что позволяет добиться наилучшего водного баланса, практически не содержащего систематическую ошибку, и довольно хорошо воспроизводить суточную изменчивость стока (персональное сообщение Дж. Шааке).

Отметим, что SAC-SMA – хорошо известная в гидрологическом сообществе модель, получившая широкое распространение во всем мире для прогнозов наводнений, водообеспеченности и для решения ряда других оперативных гидрологических задач. SAC-SMA применяется в оперативной практике NWS США для речных бассейнов площадью от 300 до 5000 км² [6].

Модель GR4J

Модель GR4J (Semagref, Франция) — концептуальная модель с четырьмя калибровочными параметрами и более простой структурой по сравнению с SAC-SMA. Ее описание можно найти в [2, 8]. Исходная метеорологическая информация также представляет собой суточные суммы осадков и потенциального суммарного испарения. В модели два взаимосвязанных резервуара: производящий и транспортирующий. Первый состоит из резервуара перехвата осадков нулевой емкости (потенциальное испарение непосредственно воздействует на осадки) и резервуара почвенной влаги, который необходим для расчета эффективных осадков и суммарного испарения. В модели также учитывается водообмен с подземными участками за пределами водосбора. Функции влагопереноса описывают просачивание из почвенного резервуара, разделение эффективных осадков на две составляющие, для каждой из которых используется свой единичный гидрограф. Далее осуществляется нелинейная трансформация одной из этих составляющих (концепция нелинейно транспортирующего резервуара). Все четыре параметра модели (максимальные емкости резервуаров, коэффициент водообмена с грунтовыми водами и временной параметр единичного гидрографа) калибруются. Для калибровки используется алгоритм пошаговой оптимизации, основанный на методе локального градиентного поиска. Результаты многочисленного тестирования этого алгоритма показали, что в случае 4–10 параметров он столь же успешен, как и алгоритмы глобального поиска (например, SCE-UA) [2].

Модель Precipitation Runoff Modelling System

Модель Precipitation Runoff Modelling System (PRMS), разработанная в Геологической службе США (USGS) [7], — физико-математическая модель водосбора. PRMS может работать как с сосредоточенными, так и с распределенными параметрами. Исходными данными для модели служат суточные суммы осадков, суточные значения максимальной и минимальной температуры воздуха и солнечной радиации (для процессов снеготаяния). В PRMS четыре резервуара: водонепроницаемая зона, почвенная зона, подземный резервуар и грунтовые воды. Почвенный резервуар разделен на две зоны — верхнюю и нижнюю. В верхней зоне потери воды происходят из-за испарения и транспирации, тогда как в нижней — только из-за транспирации. Водонепроницаемый и почвенный резервуары генерируют поверхностный сток. Избыток воды почвенного резервуара уходит в подземный резервуар и грунтовые воды, которые, в свою очередь, образуют подземный и грунтовый стоки. Эти потоки, наряду с поверхностным стоком, формируют речной сток. Помимо этого, из резервуара грунтовых вод происходит «утечка» части воды за пределы водосбора, т.е.

эта вода не попадает в речное русло. Калибровка модели во время участия в проекте MOPEX осуществлялась в два этапа с использованием оптимизационной схемы Розенброка. На обоих этапах использовалась одна и та же целевая функция, представляющая собой сумму абсолютных значений разностей между рассчитанным и измеренным суточным стоком. На первом этапе выполнялась калибровка трех параметров, позволяющих «подогнать» годовой водный баланс (один из этих параметров, имеющий отношение к суммарному испарению, калибровался для каждого сезона). На втором этапе калибровались параметры, влияющие на гидрограф (восемь параметров плюс два дополнительно для самых засушливых 11-го и 12-го бассейнов). Подробности калибровки модели предоставлены Дж. Ливсли (USGS) (персональное сообщение).

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Участники проекта MOPEX должны были смоделировать суточные гидрографы стока для 12 речных бассейнов, расположенных в юго-восточной части США, за период 1960–1998 гг., используя собственные априорные значения модельных параметров, полученные в основном на базе качественного описания бассейнов. Априорные оценки параметров могли быть улучшены в результате калибровки с использованием суточных значений измеренного стока с каждого бассейна за 1960–1979 гг. Затем оптимизированные параметры применялись для моделирования речного стока за все 39 лет.

В свернутом виде эти результаты помещены на рис. 1, где показаны медианы эффективности расчета суточных Eff_c и месячных Eff_m значений стока, а также абсолютных значений систематической ошибки расчета $Bias$, полученные на основе сопоставления измеренного и смоделированного стока для 12 бассейнов за 1960–1998 гг. Как видно из рис. 1, гидрологические модели (первые четыре модели) показали лучшие результаты в терминах эффективности и систематических ошибок по сравнению с LSM-моделями.

Более низкая точность расчета стока LSM-моделями, в том числе и моделью SWAP (SWAP_K0 на рис. 1), в эксперименте MOPEX в значительной мере связана с менее эффективной их калибровкой по сравнению с гидрологическими моделями [1]. Так, параметры модели ISBA вовсе не калибровались, в модели SWAP калибровался вручную лишь один параметр (коэффициент фильтрации), в модели NOAH калибровалось несколько почвенных параметров. В то же время в гидрологических моделях калибровались либо все, либо большинство модельных параметров с использованием современных автоматизированных алгоритмов оптимизации.

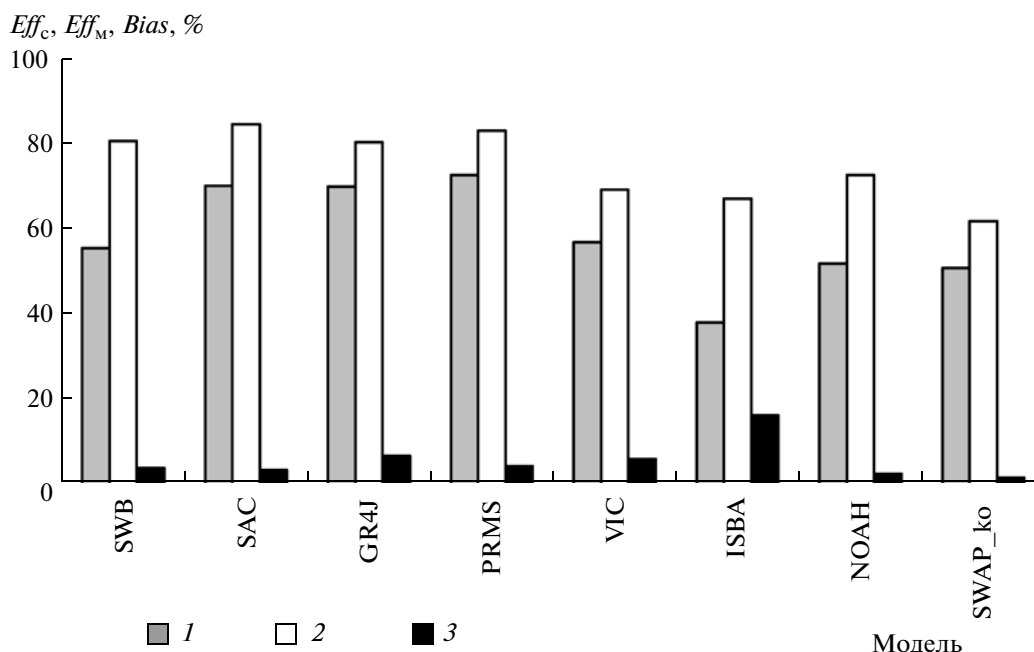


Рис. 1. Медианы Eff_c , Eff_M и $Bias$ для 12 речных бассейнов за 1960–1998 гг., полученные моделями, участвовавшими в проекте MOPEX.

Как было показано в первой части данной статьи, усовершенствованная калибровка модели SWAP позволила существенно повысить точность расчета гидрографов стока по сравнению с вариантом SWAP_K0. Лучшие результаты (эксперимент SWAP_SCE3) и будут сопоставлены ниже с результатами моделирования гидрографов стока для всех 12 бассейнов и за все расчетные периоды, которые получены в проекте MOPEX гидрологическими моделями.

Напомним, что в эксперименте SWAP_SCE3 калибровалось 15 параметров: гидрофизические параметры почвы: коэффициент фильтрации, пористость почвы, влажность завядания, наименьшая влагоемкость, B -параметр и матричный потенциал почвенной влаги при насыщении, толщина почвенной колонки; параметры растительности: глубина корнеобитаемого слоя, корректирующие коэффициенты для альбедо и относительной площади листьев; параметр, определяющий трансформацию стока, – коэффициент шероховатости Маннинга; корректирующие множители к жидким и твердым осадкам, а также к приходящим потокам длинноволновой и коротковолновой радиации.

Следует отметить, что в модели SWAP корректирующие множители к осадкам и приходящей радиации калибровались, чтобы избежать влияния неточностей и неопределенностей в этих характеристиках на результаты оптимизации модельных параметров и на моделирование тепло- и влагообмена в SVAS. В то же время в рассматриваемых гидрологических моделях это не делалось. Тем не ме-

нее, сопоставление моделей можно считать правомочным, исходя из следующих соображений.

Как известно, точность расчета по модели определяется качеством как самой модели, так и используемой для расчетов информации (исходных метеорологических характеристик и модельных параметров). Обычно считается, что априорные значения параметров могут быть определены неточно и поэтому их калибровка для повышения точности расчетов – общепринятая практика. При этом, вероятно, полагается, что метеорологические характеристики заданы хорошо. На самом же деле они неизбежно содержат неточности и неопределенности, связанные как с ошибками самих измерений (или же оценок по данным других стандартных измерений, как в случае с радиацией), так и с переходом от точечных измерений к площадным оценкам. Поэтому полученные оптимальные значения параметров будут неизбежно (даже в случае гипотетической идеальной модели, реально отражающей окружающий мир) отклоняться от “реальности”. Чем менее точно заданы метеорологические характеристики, тем большим должно быть это отклонение. Но если в модели параметры физически обоснованы, поиск их оптимальных значений должен быть ограничен снизу и сверху предельно допустимыми их значениями. В таком случае вполне возможны ситуации, когда полученные оптимальные значения параметров не смогут скомпенсировать “плохую метеорологию” в силу невозможности выйти за предписанные границы. Выход из этой ситуации автор видит в корректировке метеорологических характе-

ристик в пределах точности их определения. Для этого и были введены корректирующие множители, которые калибровались одновременно с параметрами модели. Для моделей, параметры которых не столь “физичны” и могут калиброваться в широких диапазонах, корректировка метеорологических характеристик, вероятно, необязательна, поскольку неточности в метеорологии могут в какой-то мере компенсироваться в процессе калибровки (за счет сдвига оптимальных значений параметров относительно тех значений, которые были бы получены при “идеальной метеорологии”).

Автор не может судить о том, в какой степени неточности задания исходных метеорологических характеристик могут быть скомпенсированы за счет калибровки модельных параметров в рассматриваемых гидрологических моделях, но следует отметить, что в этих моделях есть и другие механизмы компенсации (в частности, за счет наличия на поверхности водосбора дополнительного резервуара воды над участком с водонепроницаемым слоем, площадь которого калибруется; отвода части воды из подземного резервуара за пределы водосбора или притока дополнительной воды из соседних участков; калибровки потери воды через русло). В модели SWAP подобные механизмы отсутствуют, т.е. нет возможности добавлять к стоку недостающую воду в случае заниженных осадков (и/или повышенной радиации) или же убирать избыточную воду в обратном случае, к тому же, как уже отмечалось, значения калибруемых параметров ограничены их физическими пределами, поэтому для компенсации неточностей в исходных метеорологических данных возможен лишь один путь — введение поправок к осадкам и радиации, калибруемых в пределах точности определения последних.

СОПОСТАВЛЕНИЕ ГИДРОГРАФОВ РЕЧНОГО СТОКА, ПОЛУЧЕННЫХ МОДЕЛЬЮ SWAP И ГИДРОЛОГИЧЕСКИМИ МОДЕЛЯМИ

Перейдем к рассмотрению результатов сопоставления модели SWAP и вышеуказанных гидрологических моделей для всех расчетных периодов: калибровочного (1960–1979 гг.), проверочного (1980–1998 гг.) и всего 39-летнего (1960–1998 гг.).

На рис. 2 представлены медианы эффективности расчета суточных Eff_c и месячных Eff_m значений стока и абсолютных значений систематических ошибок расчета $Bias$, полученных гидрологическими моделями и моделью SWAP (в двух экспериментах: SWAP_K0 и SWAP_SCE3) для 12 бассейнов. Среднеквадратические отклонения σ указанных статистик, характеризующие их разброс по бассейнам, показаны в виде вертикальных отрезков, соответствующих $\pm\sigma$. Как видно из рис. 2 и таблицы, калибровка модели SWAP лишь по одному параметру (SWAP_K0) привела к результатам, близким по су-

точной статистике к результатам наиболее простой из гидрологических моделей — SWB, но месячная статистика у SWB намного лучше (в основном из-за меньших случайных ошибок расчета, систематические же ошибки у обеих моделей близки и не превышают 5%).

После усовершенствованной калибровки (эксперимент SWAP_SCE3) результаты модели SWAP значительно улучшились по сравнению с экспериментом SWAP_K0. В этом варианте SWAP превзошла SWB по всем статистическим показателям (таблица). Кроме того, SWAP превзошла и модель GR4J по всем месячным статистикам и систематическим ошибкам расчета, что особенно хорошо видно на рис. 2 (средний и нижний графики), суточные же статистики этих моделей близки между собой. Модель GR4J отличается от остальных моделей большим разбросом статистических характеристик (особенно систематических ошибок) по бассейнам, т.е. характеризуется наименьшей стабильностью в отношении воспроизведения стока с 12 бассейнов.

Анализируя рис. 2 и таблицу, нетрудно прийти к выводу, что наилучшими среди гидрологических моделей оказались SAC и PRMS. Результаты расчетов SWAP_SCE3 вплотную приблизились к результатам расчетов по этим двум моделям. Так, для калибровочного периода (1960–1979 гг.) медианы значений Eff_c , Eff_m и $Bias$ для модели PRMS получились равными 73.1, 83.3 и 3.1% соответственно, а для модели SAC — 70.8, 83.2 и 6.9%, тогда как в эксперименте SWAP_SCE3 они равны 70.0, 83.5 и 5.0%. Для всего расчетного периода (1960–1998 гг.) медианы значений Eff_c , Eff_m и $Bias$ составили соответственно 72.9, 83.4 и 4.4% для PRMS, 70.4, 84.8 и 3.5% для SAC, 68.6, 83.5 и 3.7% для SWAP_SCE3.

На рис. 3 эффективности расчета суточных и месячных значений стока, а также абсолютные значения систематических ошибок расчета приведены для каждого из 12 бассейнов. Для большей наглядности все статистические характеристики ранжированы в порядке возрастания. Здесь очень хорошо прослеживаются отмеченные выше закономерности. На верхнем графике слева, где показаны эффективности расчета суточного стока Eff_c для калибровочного периода, хорошо видно, что все модели можно разделить на две группы в соответствии со значениями Eff_c . SWAP_K0 и SWB образуют группу с более низкой эффективностью, тогда как результаты эксперимента SWAP_SCE3 попадают в группу лучших гидрологических моделей. Такая же закономерность наблюдается и для всего расчетного периода (1960–1998 гг.). На средних графиках четко видно, что Eff_m в эксперименте SWAP_SCE3 очень высокие, причем для калибровочного периода они непревзойденные почти для всех бассейнов. Абсолютные систематические ошибки расчета стока в эксперименте SWAP_SCE3 также можно считать приемлемыми, так как в большинстве случаев

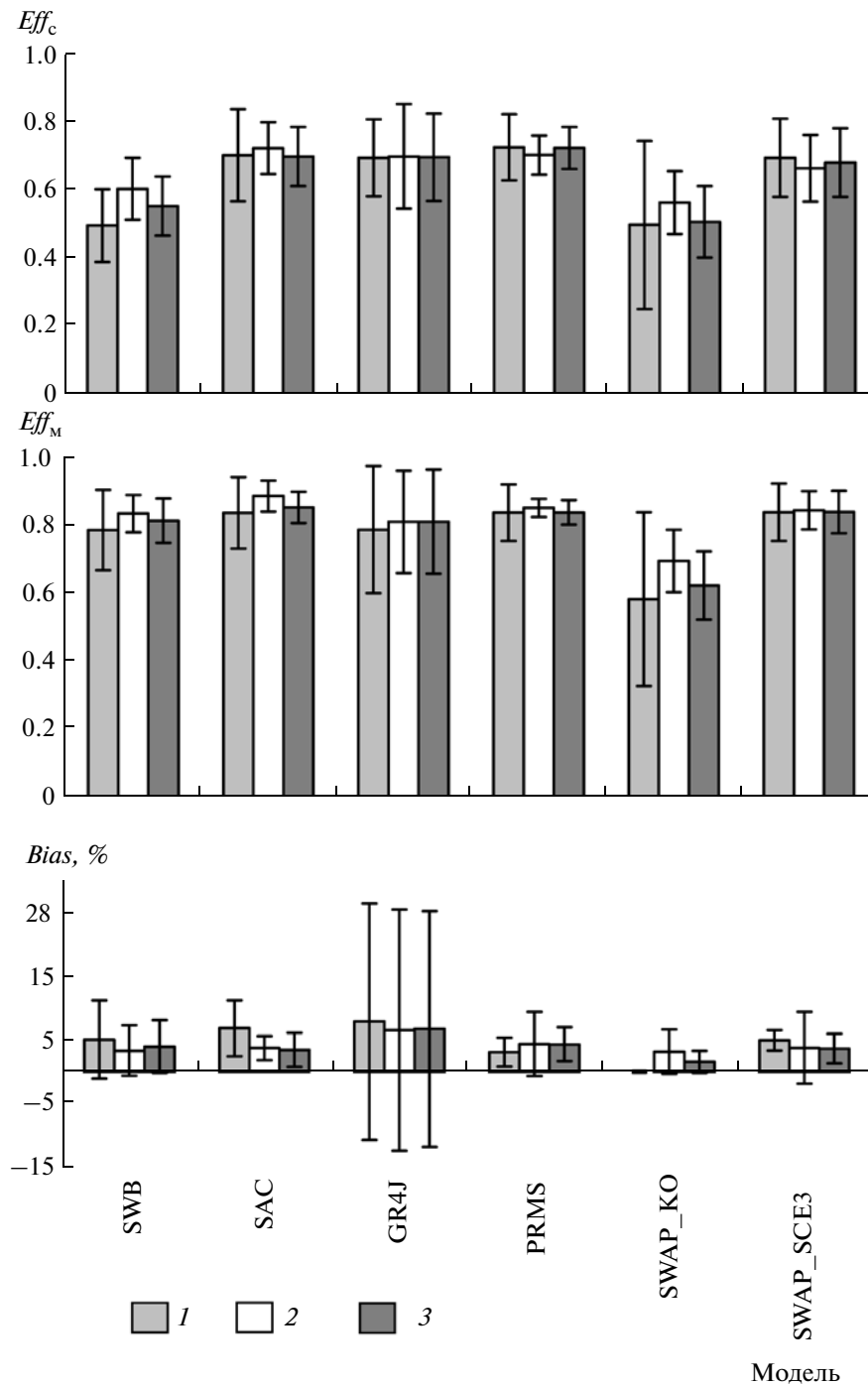


Рис. 2. Рассчитанные для 12 бассейнов медианы (прямоугольники) и среднеквадратические отклонения (вертикальные отрезки) Eff_c , Eff_M и $Bias$ для разных моделей и трех расчетных периодов: 1960–1979 1, 1980–1998 2 и 1960–1998 3 гг.

они не превышают 5%. Таким образом, можно сделать вывод, что более тщательная калибровка модели SWAP позволила существенно улучшить значения статистических критериев качества воспроизведения как суточных, так и месячных гидрографов речного стока в целом, приблизив их к лучшим гидрологическим моделям.

До сих пор рассматривались общие показатели качества расчета стока разными моделями. Перейдем к более детальному сопоставлению гидрографов. Очевидно, что при этом наибольший интерес представляют PRMS и SAC. На рис. 4 приведены примеры гидрографов стока, полученных моделями PRMS, SAC и SWAP (эксперимент SWAP_SCE3)

Медианы статистических критериев качества расчета речного стока различными моделями, полученные на основе сопоставления измеренного и смоделированного стока для 12 бассейнов

Модель	Суточная статистика			Месячная статистика			Bias, %
	Eff_c , %	RMSE	r	Eff_M , %	RMSE	r	
Калибровочный период (1960–1979 гг.)							
SWB	49.9	1.29	0.733	78.2	13.7	0.897	5.1
SAC	70.8	0.97	0.843	83.2	11.9	0.915	6.9
GR4J	70.0	0.94	0.840	78.3	13.1	0.891	8.0
PRMS	73.1	0.94	0.861	83.3	11.7	0.915	3.1
SWAP_K0	50.1	1.28	0.724	58.1	18.5	0.792	0.0
SWAP_SCE3	70.0	0.93	0.840	83.5	11.4	0.919	5.0
Проверочный период (1980–1998 гг.)							
SWB	60.8	1.27	0.793	83.0	15.2	0.912	3.3
SAC	72.8	1.06	0.855	88.1	12.1	0.941	3.8
GR4J	70.4	1.15	0.842	80.6	16.0	0.910	6.6
PRMS	70.8	1.07	0.842	84.7	13.1	0.921	4.4
SWAP_K0	56.7	1.28	0.762	69.2	18.5	0.844	3.2
SWAP_SCE3	66.9	1.15	0.819	84.0	13.5	0.927	3.8
39-летний период (1960–1998 гг.)							
SWB	55.7	1.30	0.763	81.0	14.2	0.902	4.0
SAC	70.4	1.05	0.842	84.8	12.6	0.928	3.5
GR4J	70.2	1.15	0.840	80.7	14.6	0.907	6.8
PRMS	72.9	1.00	0.854	83.4	12.6	0.917	4.4
SWAP_K0	51.0	1.31	0.747	62.0	18.8	0.803	1.6
SWAP_SCE3	68.6	1.11	0.829	83.5	12.2	0.916	3.7

для трех бассейнов за два гидрологических года. Выбранные бассейны существенно отличаются физико-географическими условиями. Бассейн Фрэнч Брод Ривер (ФБР) самый влажный из 12 бассейнов. Среднегодовое количество осадков P в среднем по бассейну составляет 1544 мм, годовой сток Q равен 774 мм, а коэффициент стока $Q/P = 0.59$. Растительность представлена в основном лесными сообществами с преобладанием широколиственных пород (до 52%), вечнозеленые хвойные леса занимают 17% территории бассейна, а смешанные леса – 13%. Бассейн Сан Маркос Ривер (СМР) – один из самых сухих бассейнов: $P = 860$ мм/год, $Q = 161$ мм/год и $Q/P = 0.13$. Растительность в основном луговая. Бассейн Спринг Ривер (СР) гораздо более сухой по сравнению с первым из рассмотренных бассейнов и несколько более влажный по сравнению со вторым: $P = 1103$ мм/год, $Q = 281$ мм/год и $Q/P = 0.28$. Территория бассейна в основном занята под сельскохозяйственные угодья.

Результаты расчетов модели SWAP для самого влажного бассейна ФБР хорошо согласуются с данными наблюдений, за исключением пиков паводка вблизи 35-го дня (ноябрь 1977 г.), 120-го (конец января 1978 г.) и 520-го (начало марта 1979 г.). Инте-

ресно отметить, что пики паводка вблизи 35-го и 520-го дней зафиксированы как моделью SWAP, так и гидрологическими моделями, но воспроизведенные максимальные значения стока, которые хорошо согласуются друг с другом, ниже измеренных. Это можно объяснить или несовершенством всех моделей, или неточностью исходной информации, или же низкой точностью измерений стока во время паводка. В то же время ни одна из моделей не воспроизвела пик паводка вблизи 120-го дня. Что касается модели SWAP, это связано с заданными низкими ($<0^\circ\text{C}$) значениями температуры воздуха, при которых осадки трактуются в модели как твердые, что привело к формированию снежного покрова вместо стока. Когда же температура воздуха стала положительной, началось снеготаяние, однако опять-таки талая вода не пошла на формирование стока, а впиталась в почву, приведя к увеличению почвенных влагозапасов. Исправить подобную ситуацию можно лишь при наличии исходной информации по разделению осадков на жидкие и твердые. После 130-го дня результаты модели SWAP вполне адекватны: наблюдаемые пики, межени и кривые спада паводков воспроизведены довольно точно и не хуже, чем у гидрологических моделей. Более того, в ре-

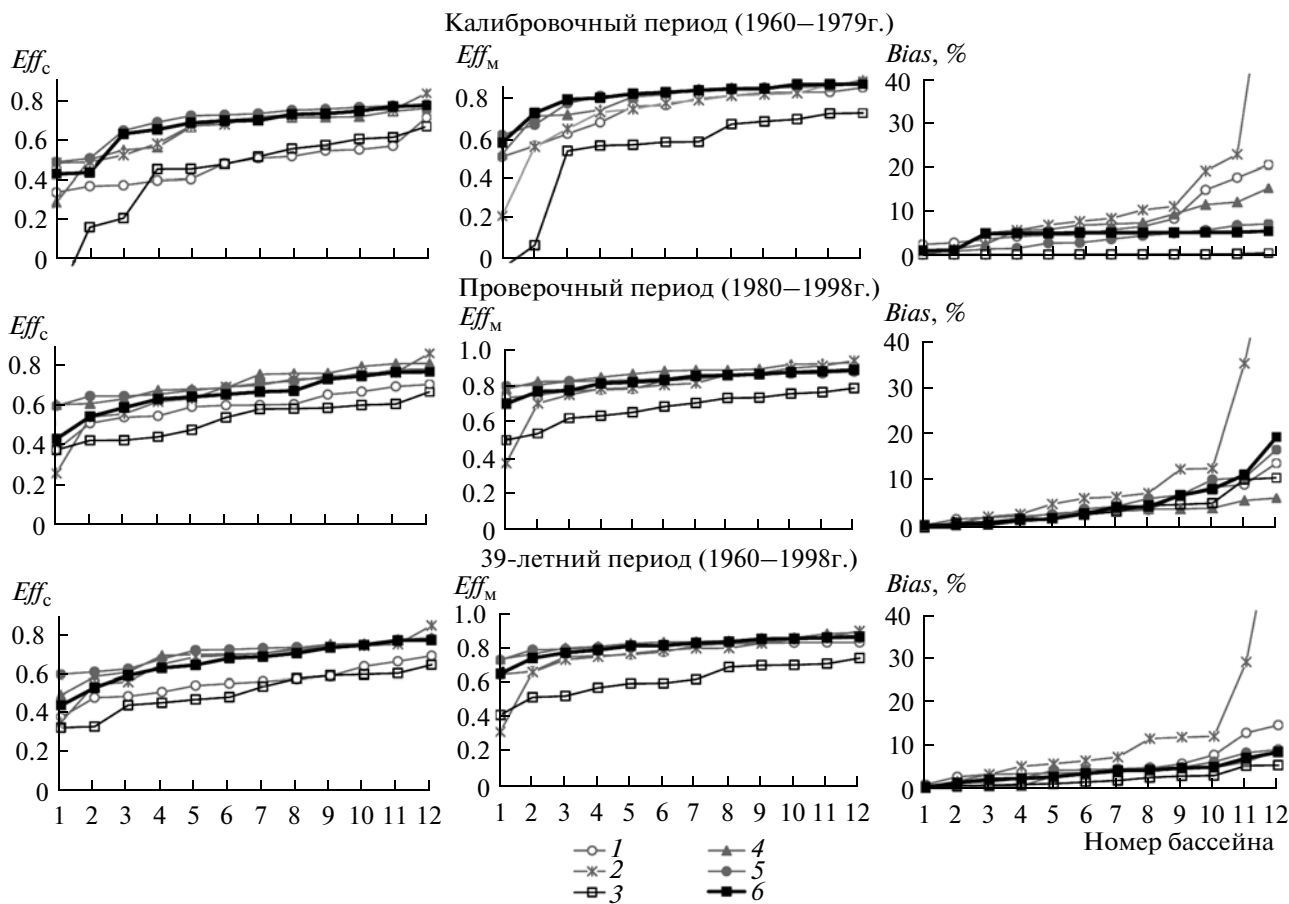


Рис. 3. Значения Eff_c , Eff_M и $Bias$ для каждого из 12 речных бассейнов и для трех расчетных периодов, полученные гидрологическими моделями и моделью SWAP. Все статистики упорядочены в порядке возрастания. SWB 1, GR4J 2, SWAP_K0 3, SAC 4, PRMS 5, SWAP_SCE3 6.

зультатах гидрологических моделей имеется даже больше проблемных мест в зимний период первого гидрологического года, чем у модели SWAP.

Что касается засушливого бассейна СМР (рис. 4), рассчитанные с помощью SWAP гидрографы не столь хорошо соответствуют измеренным. Модель SWAP адекватно воспроизвела низкие уровни стока, в то время как ее отклик на выпадение осадков иногда был завышен (например, вблизи дней под номерами 30, 225, 385, 570 и 680), а иногда, наоборот, занижен (вблизи дней 115, 140, 250 и 430). У гидрологических моделей также были проблемы с воспроизведением гидрографа (например, неточно смоделированы пики вблизи дней 110–150 и 250, а также кривые спада паводков вблизи дней 390–450), но в общей сложности их результаты несколько лучше: корреляция между измеренными и смоделированными значениями стока за эти два гидрологических года составила 0.79 и 0.86 соответственно для PRMS и SAC, а для SWAP 0.76.

Следует отметить, что в целом все модели в засушливых бассейнах сработали хуже, что не удивительно, поскольку малые объемы стока довольно

трудно воспроизвести с высокой точностью из-за ошибок и неопределенностей в исходной информации (как в метеорологических данных, так и в параметрах модели), а также недостатков самих моделей. В то же время ошибки в рассчитанном стоке также невелики (они могут быть существенно меньше, нежели во влажных бассейнах, что нетрудно заметить, сопоставляя графики для ФБР и СМР на рис. 4), но выглядят большими, будучи выраженными в относительных единицах.

Сопоставление гидрографов для третьего бассейна СР еще раз подтверждает то, что все модели воспроизводят сток не идеально, и каждая имеет свои проблемы. В целом же можно сделать вывод, что SWAP показала результаты не хуже моделей SAC и PRMS.

Наконец, рассмотрим, как SWAP, SAC и PRMS воспроизводят суточный сток в пределах разных интервалов его значений на примере тех же самых бассейнов – влажного ФБР и засушливого СМР (рис. 5). По оси абсцисс на рис. 5 отложены интервалы слоев стока, соответствующие 10%-ным вероятностным интервалам на кривой обеспеченности;

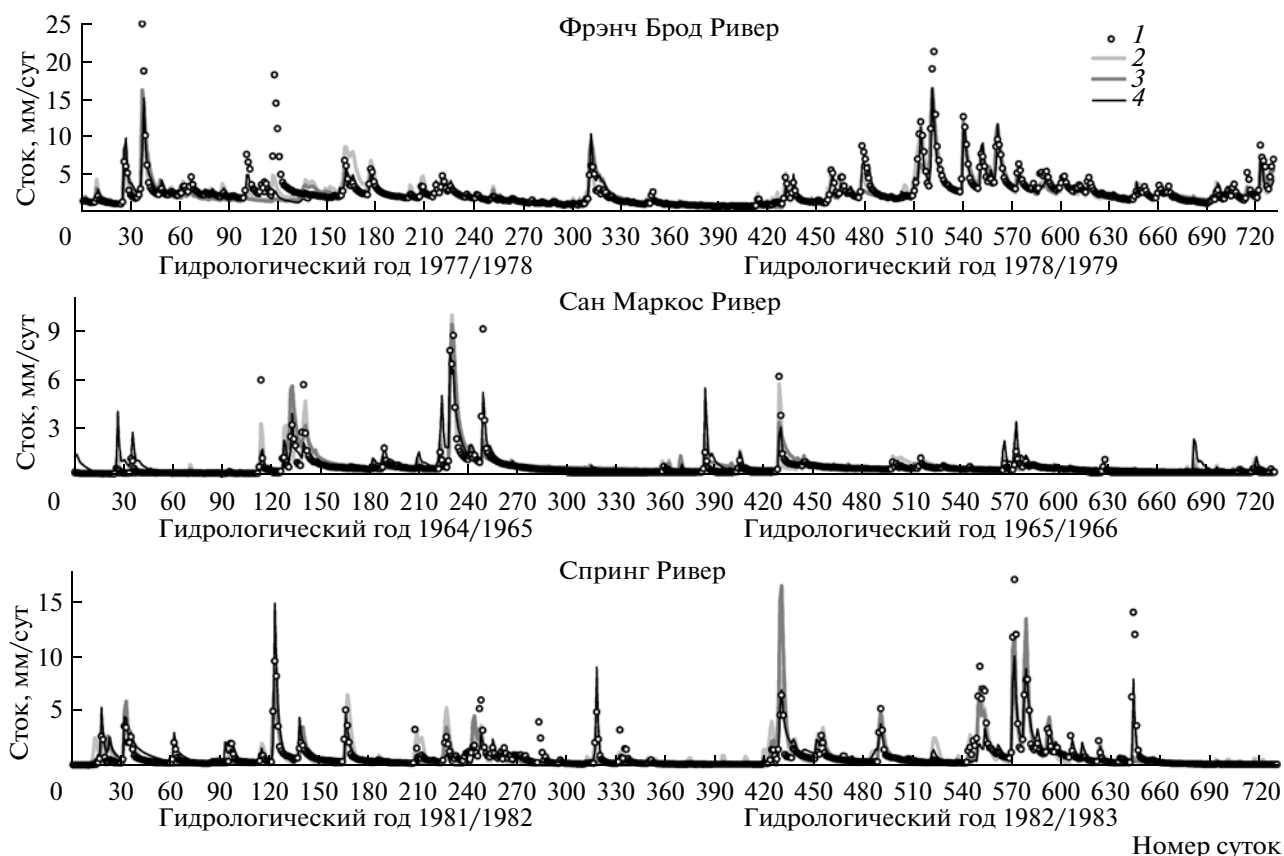


Рис. 4. Измеренные 1 и воспроизведенные моделями SAC 2, PRMS 3 и SWAP 4 гидрографы стока трех рек за два гидрологических года. Нумерация суток начинается с 1 октября первого гидрологического года.

только для самых высоких значений стока, проходящих с вероятностью <10%, интервал 0–10% для большей детализации был разделен на четыре части: <1, 1.0–2.5, 2.5–5.0 и 5–10%. В результате первый интервал на рис. 5 включает в себя наиболее высокие пики паводков, вероятность которых составляет <1%. Анализ проводился для всего расчетного периода 1960–1998 гг., в каждом 10%-ном интервале оказалось 1379 точек с суточными значениями стока. Для каждого интервала были рассчитаны статистические критерии качества расчетов по модели SWAP (эксперименты SWAP_K0 и SWAP_SCE3) и по гидрологическим моделям PRMS и SAC. Часть статистик, а именно средние измеренные и смоделированные значения, RMSE и r , приведена на рис. 5.

Как видно из рис. 5, улучшенная калибровка модели SWAP привела к уменьшению RMSE (за счет уменьшения случайной ошибки) и повышению корреляции для всех интервалов стока, за исключением наиболее высоких его значений, где результаты эксперимента SWAP_K0 иногда даже лучше, чем у гидрологических моделей. Для влажного бассейна ФБР результаты эксперимента SWAP_SCE3 близки, а в ряде случаев даже несколько лучше результатов, полученных моделями SAC и PRMS. Для за-

сушливого бассейна CMP SWAP_SCE3 менее точно воспроизводит наиболее высокие паводки. Различия в статистических характеристиках для других интервалов незначительны.

Таким образом, анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что после тщательной калибровки модель SWAP способна воспроизводить суточные и месячные гидрографы речного стока с точностью, сопоставимой с точностью наиболее сложных гидрологических моделей.

ВЫВОДЫ

С помощью LSM-модели SWAP были воспроизведены суточные и месячные гидрографы дождевого стока за 39-летний расчетный период (1960–1998 гг.) для 12 речных бассейнов, расположенных в разных природных условиях в юго-восточной части США. При этом использовался полученный в первой части данной статьи набор оптимальных значений параметров модели, позволяющий воспроизводить дождевой сток с максимальной точностью. Смоделированные гидрографы были сопоставлены с данными наблюдений и с аналогичными гидрографами, полученными четырьмя гидрологическими моделями различной степени сложности в процессе

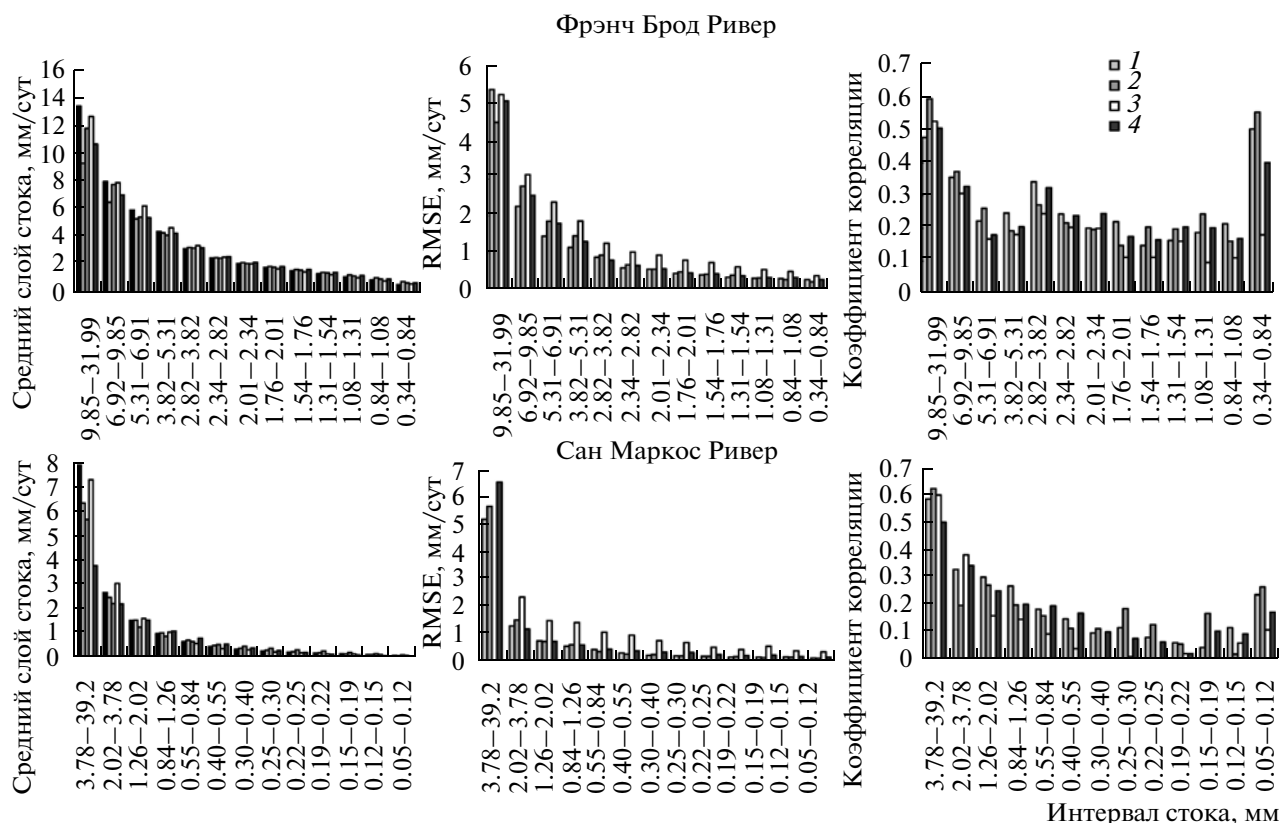


Рис. 5. Статистические характеристики для различных интервалов стока для влажного бассейна Фрэнч Брод Ривер и засушливого бассейна Сан Маркос Ривер за 39-летний период (1960–1998 гг.), рассчитанные по суточным значениям стока, воспроизведенным моделями SAC 1, PRMS 2 и SWAP – SWAP_K0 3, SWAP_SCE3 4.

участия в международном проекте MOPEX, с целью выяснения, может ли LSM-модель SWAP воспроизводить дождевой речной сток с точностью гидрологических моделей. На основе анализа результатов сопоставления можно сделать следующие выводы.

Точность моделирования речного стока зависит в большей степени от качества калибровки модельных параметров (метода калибровки, используемых целевых функций, выбора калибруемых параметров), чем от типа модели (LSM-модель или гидрологическая модель), при условии, что качество модели (ее структура, математическая формализация физических процессов, программный код и т.п.) находится на высоком уровне.

LSM-модель SWAP при соответствующей калибровке позволяет воспроизводить дождевой речной сток более точно по сравнению с наиболее простыми гидрологическими моделями (такими как SWB и GR4J) и сопоставимо с более сложными гидрологическими моделями (такими как SAC и PRMS), используемыми в оперативной практике для гидрологических расчетов. Это можно было ожидать, поскольку, если в LSM-модели адекватно описаны физические механизмы основных процессов тепло- и влагообмена, происходящих в системе почва – растительный/снежный покров – призем-

ный слой атмосферы, то эта модель обладает высоким потенциалом в отношении воспроизведения стока. Вполне возможно, что потенциал модели SWAP еще полностью не исчерпан и дальнейшее повышение точности расчетов дождевого стока может быть достигнуто за счет повышения качества как информационного обеспечения, так и самой модели, а также, вероятно, в результате дальнейшего совершенствования процедуры калибровки модельных параметров.

Автор выражает признательность Дж. Шааке и К. Дуану – организаторам международного проекта MOPEX за предоставленные материалы для проведения модельных расчетов и результаты моделирования речного стока, полученные участниками проекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Насонова О.Н., Гусев Е.М. Исследование возможностей модели теплообмена суши с атмосферой воспроизводить речной сток с точностью гидрологических моделей // Вод. ресурсы. 2008. Т. 35. № 5. С. 515–524.

2. *Andreassian V., Bergström S., Chahinian N. et al.* Catalogue of the models used in MOPEX 2004/2005 // IAHS Publ. 2006. № 307. P. 41–93.
3. *Burnash R.J.C., Ferral R.L., McGuire R.A.* A generalized Streamflow Simulation System – Conceptual Modeling for Digital Computers // Technical Report. Sacramento: Joint Federal and State River Forecast Center, 1973. 204 p.
4. *Duan Q., Schaake J., Andreassian V. et al.* Model Parameter Estimation Experiment (MOPEX): An overview of science strategy and major results from the second and third workshops // J. Hydrology. 2006. V. 320. № 1–2. P. 3–17.
5. *Gan T.Y., Burges S.J.* Assessment of soil-based and calibrated parameters of the Sacramento model and parameter transferability // J. Hydrology. 2006. V. 320. № 1–2. P. 117–131.
6. *Gan T.Y., Gusev Y.M., Burges S.J., Nasonova O.N.* Performance comparison of a complex, physics-based land surface model and a conceptual, lumped-parameter, hydrologic model at the basin-scale // IAHS Publ. 2006. № 307. P. 196–207.
7. *Leavesley G.H., Lichty R.W., Troutman B.M., Saindon L.G.* Precipitation-runoff modeling system // User's manual. Report. U.S. Geological Survey Water Resources Investigation. 1983. № 83–4238. 207 p.
8. *Perrin C., Michel C., Andreassian V.* Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation // J. Hydrology. 2003. V. 279. № 1–4. P. 275–289.
9. *Schaake J.C., Koren V.I., Duan Q.Y. et al.* Simple water balance model for estimating runoff at different spatial and temporal scales // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. № D3. P. 7461–7475.