

## ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 556.048

### ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ТЕПЛОВЛАГООБМЕНА СУШИ С АТМОСФЕРОЙ К РАСЧЕТУ ГИДРОГРАФА ДОЖДЕВОГО РЕЧНОГО СТОКА. 1. КАЛИБРОВКА МОДЕЛИ<sup>1</sup>

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

*Институт водных проблем Российской академии наук*

*119333 Москва, ул. Губкина, 3*

Поступила в редакцию 19.01.2010 г.

Исследованы различные варианты калибровки параметров модели тепловлагообмена суши с атмосферой SWAP с целью максимизации точности воспроизведения гидрографа дождевого речного стока. Оптимизация значений параметров проводилась автоматизировано на основе двух различных алгоритмов поиска глобального оптимума целевой функции: случайного поиска и эволюций тасуемых групп SCE-UA. В обоих случаях использовались две целевые функции, основанные на средней систематической ошибке расчета и коэффициенте эффективности расчета Нэша и Сэтклифа. Число калибруемых параметров изменялось от 10 до 15, а их значения были ограничены сверху и снизу таким образом, чтобы не противоречить физическому смыслу и обеспечить наилучшее соответствие воспроизведенного суточного речного стока измеренному. Выполнено сравнение гидрографов дождевого стока ряда рек США, смоделированных с использованием различных наборов оптимизированных параметров, с данными наблюдений.

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

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

В последнее время появилось много публикаций, в которых расчет гидрографов речного стока осуществляется с помощью моделей тепловлагообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой [14, 16, 28, 35], развиваемых метеорологами, климатологами и физиками атмосферы и известных в англоязычной литературе как атмосферные Land Surface Models (LSMs). Изначально эти модели предназначались для сопряжения с моделями общей циркуляции атмосферы и представляли собой простейшие параметризационные схемы [27]. Впоследствии они эволюционировали в независимые, достаточно детальные модели, служащие мощным инструментом для решения самых различных задач в области климатологии, глобальной экологии и т.д. [33].

В отличие от классических гидрологических моделей водосборов LSM-модели воспроизводят не только водный, но и радиационный и тепловой обмен в системе почва—растительный/снежный покров—приземный слой атмосферы (Soil—Vegetation/snow cover—Atmosphere System (SVAS)) и имеют большее число входных и выходных переменных [13]. Входные переменные включают в себя приходящую радиацию (коротковолновую и длинноволновую), осадки, температуру и влажность воздуха, скорость ветра и атмосферное давление. Выходных характеристик может быть несколько десятков. Это, в частности, переменные состояния (температура подстилающей поверхности, влажность почвы и т.п.), а также радиационные, тепловые и водные потоки (например, турбулентные потоки скрытого и явного тепла, поток тепла в почву, суммарное испарение и его составляющие, поверхностная и подземная составляющие стока в пределах каждой расчетной ячейки и т.п.).

Таким образом, в отличие от гидрологических моделей LSM-модели не предназначены для расчета речного стока. Если все же в научных исследованиях LSM-модели используются для расчетов гидрографов стока, как это сделано в вышеперечисленных работах, то полученный в каждой расчетной ячейке сток (вернее, стокообразование, т.е. количество воды, которое формирует склоновый и речной стоки в пределах ячейки) трансформируется для по-

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 08-05-00027).

лучения стока на выходе из ячейки и в русле. Для этого используются методы единичного гидрографа, уравнение кинематической волны, простая линейная модель формирования водного баланса в речной сети и т.п. [10, 22, 26, 32]. При этом разумно предположить, что если та или иная LSM-модель адекватно воспроизводит процессы формирования тепловлагообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой, то она способна эффективно воспроизводить и речной сток, являющийся интегральной характеристикой формирования водного баланса речного бассейна.

Однако результаты сопоставления гидрографов дождевого стока рек, рассчитанных по различным моделям, показали, что эффективность расчета стока наиболее сложными гидрологическими моделями выше по сравнению с LSM-моделями [16]. По всей вероятности, основные причины этого заключаются, во-первых, в качестве самих моделей (так, несмотря на более сложную структуру LSM-моделей, рассматриваемые в них процессы, наиболее тесно связанные с формированием стока, могут быть слишком упрощены по сравнению с наиболее развитыми гидрологическими моделями); во-вторых – в недостаточной калибровке LSM-моделей. В предыдущей работе [11] на примере LSM-модели Soil Water–Atmosphere–Plants (SWAP) было показано, насколько существенным является последний фактор, если исходная информация неполная или не очень качественная. Улучшив калибровку модели SWAP, удалось существенно повысить эффективность расчета гидрографов дождевого речного стока. В то же время стало очевидным, что эта проблема требует дальнейшего более глубокого исследования, результаты которого и представлены в настоящей работе, цель которой заключается в выявлении потенциала LSM-модели SWAP в отношении воспроизведения дождевого речного стока.

Основные отличия настоящего исследования от [11] состоят в следующем. Во-первых, автоматизированная процедура оптимизации значений модельных параметров осуществлена с использованием двух различных алгоритмов глобального поиска оптимума целевой функции: случайного поиска Random Search Technique (RST) и эволюций тасуемых групп Shuffled Complex Evolution method (SCE-UA). Метод SCE-UA в последнее время получил широкое распространение среди модельеров, позволяя эффективно оптимизировать довольно большое число параметров. В [11] использовался лишь алгоритм RST. Во-вторых, проведено исследование влияния различных наборов калибруемых параметров на результаты расчета стока с тем чтобы выявить, насколько неточности и неопределенности в исходной метеорологической информации могут повлиять на результаты калибровки и на эффективность расчета стока. В-третьих, более детально проведено сопоставление рассчитанного и измеренного стока. При этом анализировались не только

суточные, но и месячные его значения с привлечением большего числа статистических показателей, а также визуально сопоставлялась форма гидрографов стока.

## МОДЕЛЬ SWAP

LSM модель SWAP – физико-математическая модель, описывающая процессы тепло- и влагообмена в системе почва–растительный/снежный покров–атмосфера [3–6, 21, 23, 24]. В последней версии модели SWAP рассматриваются следующие процессы: перехват жидких и твердых осадков растительностью; испарение, таяние и замерзание перехваченных осадков, в том числе повторное замерзание талой воды; формирование снежного покрова под пологом леса и на открытых участках; формирование поверхностной и подземной составляющих стока; впитывание воды в почву; формирование водного баланса зоны аэрации, включающего в себя транспирацию, испарение с почвы, водообмен с нижележащими слоями и динамику почвенных влагозапасов; динамика уровня грунтовых вод; формирование теплового баланса и температурного режима SVAS; промерзание и оттаивание почвы. Здесь будет более подробно рассмотрено, каким образом в модели описываются процессы формирования дождевого стока.

Неперехваченные растительностью осадки поступают на поверхность почвы. Почвенная колонка в модели SWAP простирается до первого водонепроницаемого слоя и представлена зоной аэрации и грунтовыми водами (рис. 1). Зона аэрации почвы, в свою очередь, делится на два слоя. Первый – корнеобитаемый слой определяется как верхний слой почвы, содержащий ~95% корневой биомассы. Между нижней границей корнеобитаемого слоя и грунтовыми водами расположен второй слой. Толщина корнеобитаемого слоя  $h_r$  постоянна, а толщина второго слоя меняется со временем в связи с изменением уровня грунтовых вод  $h_g$ . Вертикальный влагоперенос в первом и втором слоях почвы описывается с помощью уравнения Букингема–Дарси (в холодный период года с учетом содержания льда в каждом слое).

Моделирование временной динамики почвенных влагозапасов в обоих слоях основано на уравнении водного баланса в каждом слое. Динамика объемной влажности почвы в корнеобитаемом слое  $W_1$  зависит от интенсивностей инфильтрации  $I$ , транспирации  $E_T$  и испарения с оголенной почвы  $E_S$ , а также от потоков воды на нижней границе корнеобитаемого слоя ( $Q_{D,1}$  и  $Q_{g,1}$ )

$$\rho_w h_r \frac{dW_1}{dt} = I - E_T - E_S + Q_{D,1} - Q_{g,1}, \quad (1)$$

где  $\rho_w$  – плотность воды,  $\tau$  – время. Здесь и далее величины, относящиеся к первому и второму слоям

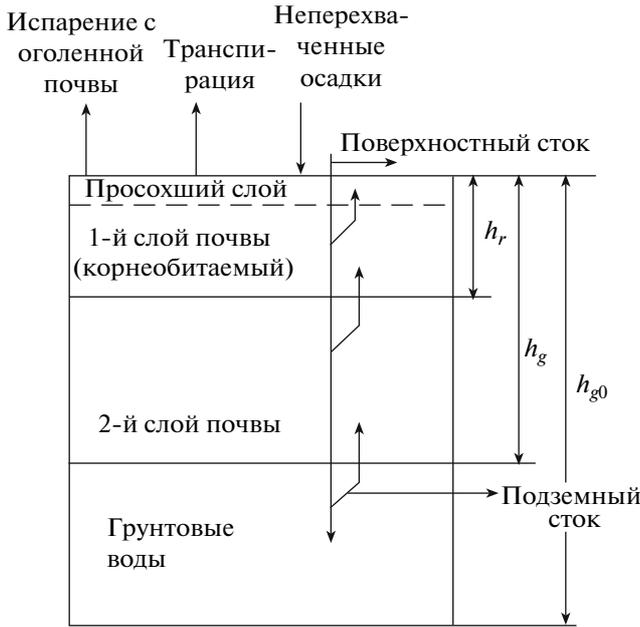


Рис. 1. Схема почвенной колонки и водных потоков, формирующих поверхностный и подземный сток в LSM-модели SWAP, где  $h_r$  – толщина корнеобитаемого слоя,  $h_g$  – уровень грунтовых вод,  $h_{g0}$  – глубина залегания верхнего водонепроницаемого слоя.

почвы, помечены индексами 1 и 2 соответственно. Динамика почвенной влаги во втором слое  $W_2$  определяется потоками воды через его верхнюю ( $Q_{D,1}$  и  $Q_{g,1}$ ) и нижнюю ( $Q_{D,2}$  и  $Q_{g,2}$ ) границы

$$\rho_w (h_g - h_r) \frac{dW_2}{d\tau} = Q_{g,1} - Q_{D,1} + Q_{D,2} - Q_{g,2}. \quad (2)$$

Восходящий поток воды на нижней границе каждого  $i$ -го слоя  $Q_{D,i}$  обусловлен диффузионным механизмом переноса влаги, в то время как нисходящий поток  $Q_{g,i}$  в основном формируется за счет гравитационного перераспределения почвенной влаги, когда ее количество превышает наименьшую влагоемкость  $W_{fc}$ . Разделение потока воды на нижних границах на две составляющие –  $Q_{D,i}$  и  $Q_{g,i}$  ( $i = 1, 2$ ) связано только с удобством построения используемого в модели расчетного алгоритма.

Параметризация потоков воды в уравнениях (1) и (2) подробно описана в [3–5, 21, 23, 24]. Интенсивность инфильтрации рассчитывается с использованием модификации уравнения Грина–Ампта [20]. При этом учитывается пространственная изменчивость коэффициента фильтрации [3]. Расчет транспирации базируется на полуэмпирической теории А.И. Будаговского [1]. Испарение с оголенной почвы моделируется с учетом формирования просохшего слоя в верхней части почвенной колонки (рис. 1) [2]. Для просохшего слоя используется концепция влагопереноса посредством механизма диффузии водяного пара. Нисходящий поток  $Q_{g,i}$  на

нижней границе  $i$ -го слоя формируется, когда содержание в слое почвенной влаги  $W_i$  превышает наименьшую влагоемкость  $W_{fc}$ . При этом избыток влаги в слое не устраняется мгновенно. Его величина уменьшается экспоненциально, а влажность почвы стремится к  $W_{fc}$  [3]. Восходящие потоки  $Q_{D,1}$  и  $Q_{D,2}$  моделируются с использованием коэффициентов диффузии почвенной влаги, полученных на основе параметризации Клепа–Хорнбергера для коэффициента влагопроводности и матричного потенциала почвенной влаги [15] с учетом влияния льдистости в каждом слое почвы в холодный период года [4, 23].

Вычисление поверхностного стока  $Q_s$  основано на концепции хортоновского механизма генезиса стока, т.е.  $Q_s$  образуется лишь в том случае, когда интенсивность неперехваченных осадков  $P_s$  превышает интенсивность инфильтрации [3]. Для зон с многолетней мерзлотой учтен и другой механизм формирования поверхностного стока – механизм Дюннэ. В этом случае поверхностный сток возникает при любой интенсивности осадков, но после того, как произойдет насыщение влагой почвенной колонки.

Подземный сток из почвенной колонки  $Q_d$  вычисляется с учетом динамики уровня грунтовых вод  $h_g(\tau)$

$$Q_d = Q_{g,2} - Q_{D,2} + (W_{sat} - W_2) \frac{dh_g}{d\tau}, \quad (3)$$

где  $W_{sat}$  – пористость почвы. Последний член уравнения (3) зависит от вертикального перемещения нижней границы второго слоя почвы из-за изменения уровня грунтовых вод  $h_g$ , который вычисляется в соответствии с алгоритмом, описанным в [4]

$$h_g = h_{g0} - \bar{h}_w / \mu_g, \quad (4)$$

где  $\bar{h}_w$  – эффективный слой стока на поверхности водосбора, осредненный по временному интервалу  $t_g$ , необходимому для достижения равновесия между водами ручейковой сети и грунтовыми водами;  $\mu_g$  – средняя по водосбору водоотдача грунтовых вод. В первом приближении значение  $t_g$  может быть оценено исходя из предположения, что  $t_g \leq t_L$ , где  $t_L$  – так называемое время добегающего, которое может быть определено в соответствии с [4], а  $\mu_g$  можно представить как разность  $W_{sat} - W_{fc}$ .

Модель SWAP использовалась как для расчетов переменных состояния системы SVAS и вертикальных потоков тепла и влаги, так и для воспроизведения стока в различных масштабах: от небольших водосборов до речных бассейнов континентального масштаба. Переход от локального масштаба к мезо- и макромасштабу осуществлялся посредством явного учета пространственной неоднородности территории путем ее деления на расчетные ячейки, соединенные речной сетью. Модельные расчеты про-

водились отдельно для каждой расчетной ячейки. Затем выходные переменные (за исключением стока) усреднялись по всем ячейкам. Для получения гидрографа стока на выходе из ячейки или речного бассейна полученные поверхностный и подземный стоки трансформировались с учетом времени добега. При этом в случае одной ячейки или небольшого водосбора ( $\leq 10^3 - 10^4$  км<sup>2</sup>) использовалось уравнение двумерной кинематической волны, описывающее трансформацию стока в пределах ячейки. В случае большего речного бассейна, состоящего из нескольких расчетных ячеек, подключалась модель трансформации стока в речной сети.

На протяжении последних десяти лет осуществлялась проверка различных вариантов модели SWAP с использованием данных наблюдений, включающих в себя характеристики, относящиеся как к тепловому балансу или температурному режиму системы SVAS (турбулентные потоки явного и скрытого тепла, поток тепла в почву, радиационный баланс, уходящие потоки длинноволновой и коротковолновой радиации, температура подстилающей поверхности, глубины промерзания и оттаивания почвы), так и к гидрологическому циклу или водному режиму системы SVAS (поверхностный и подземный сток с водосбора, речной сток, влагозапасы в различных слоях почвы, суммарное испарение, испарение с поверхности снега, перехваченные осадки, уровень грунтовых вод, плотность снега, высота снежного покрова и снеготазасы, водоотдача снежного покрова). Проверка модели осуществлялась для “точечных” экспериментальных площадок, а также для водосборов и речных бассейнов разных масштабов (от  $10^{-1}$  до  $10^5$  км<sup>2</sup>) за длительный период времени и в различных природных условиях [3–7, 9, 14, 21–24]. Результаты показали, что модель SWAP способна адекватно воспроизводить (без предварительной калибровки модельных параметров) процессы тепло- и влагообмена на поверхности суши, конечно же, при условии наличия качественной исходной информации.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ БАСЕЙНЫ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

При решении задач, поставленных в настоящей работе, в качестве гидрологических объектов были выбраны 12 речных бассейнов площадью от 1020 до 4421 км<sup>2</sup>. Исходная информация по каждому бассейну была получена в процессе участия в международном проекте по оценке модельных параметров Model Parameter Estimation Experiment (MOPEX) [16]. Детально характеристика бассейнов и исходных данных представлена в [8, 11, 16]. Поэтому здесь отметим лишь, что бассейны расположены в юго-восточной части США и характеризуются большим разнообразием природных условий: от аридных областей до зон избыточного увлажнения и от луговых до лесных растительных сообществ.

Поскольку все бассейны расположены южнее  $42^\circ$  с.ш., а их высота над уровнем моря не превышает 600 м, воздействие снежного покрова и промерзания почвы на гидрологические процессы можно считать незначительным, а питание рек – преимущественно дождевым.

Информационное обеспечение включало в себя осредненные по бассейнам часовые приземные значения метеорологических элементов за 39 лет (1960–1998 гг.), суточные значения речного стока для проверки и калибровки модели, а также общую информацию о бассейнах (их границы и средние высоты, типы почв и растительности, процентное содержание зеленых листьев) для априорной оценки параметров модели.

Методика априорной оценки параметров, основанная в значительной мере на качественном описании объектов, изложена в [8, 25]. Там же показано, что расчеты речного стока, полученные по модели SWAP с использованием априорных значений параметров для 12 вышеуказанных бассейнов, можно признать неудовлетворительными (основная причина – недостаточно качественное информационное обеспечение модели). Калибровка части модельных параметров, а именно почвенных, позволила улучшить качество расчетов, но в среднем по 12 бассейнам эффективность расчета суточного стока по Нэшу и Сатклифу *Eff* [29] составила лишь 0.52–0.57 для разных расчетных периодов. Это свидетельствует о том, что потенциал калибровки модели SWAP еще не был исчерпан и эта проблема потребовала дальнейшего исследования.

### ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ SWAP

Цель оптимизации (калибровки) параметров модели – поиск таких значений параметров, при которых достигается минимум целевой функции (или же максимум, в зависимости от ее вида) – меры различия выходных переменных модели (в данном случае – величины стока) и результатов их измерений. В данной работе оптимизация значений параметров проводилась автоматизированно двумя способами – с применением двух различных алгоритмов поиска глобального оптимума. В первом алгоритме, основанном на идеях, описанных в [13, 34], и подробно изложенном и апробированном в [10], используется статистический метод прямого поиска оптимума, иначе говоря, – метод случайного поиска (RST) целевой функции. Название второго алгоритма, разработанного в США [17], можно перевести как метод эволюций тасуемых групп (SCE-UA). Этот алгоритм в последнее время получил широкое распространение в силу своей робастности, надежности и эффективности [18].

В процессе оптимизации вычислялись, а затем минимизировались две целевые функции: *Ext* =

$= 1 - Eff$  и абсолютная систематическая ошибка (абсолютное значение средней разности между смоделированными и измеренными значениями выходной переменной), нормализованная на среднее измеренное значение

$$Bias = \left| \frac{\sum_{\Omega} (x_{sim} - x_{obs})}{\sum_{\Omega} x_{obs}} \right| 100\%, \quad (5)$$

где  $x_{sim}$  и  $x_{obs}$  – смоделированное и измеренное значения переменной  $x$ , а  $\Omega$  – дискретное множество значений переменной  $x$ . Применение в качестве целевой функции  $Bias$ , наряду с  $Eff$ , обусловлено тем, что максимальные значения  $Eff$  не гарантируют низких значений  $Bias$ . Это становится ясным, если эффективность выразить через среднеквадратическую ошибку RSME

$$Eff = 1 - \frac{\sum_{\Omega} (x_{sim} - x_{obs})^2}{\sum_{\Omega} (x_{obs} - \overline{x_{obs}})^2} = 1 - \left( \frac{RMSE}{STD_{obs}} \right)^2, \quad (6)$$

где  $STD_{obs}$  – стандартное отклонение измеренных величин. Поскольку RSME включает в себя и систематическую, и случайную ошибки, одним и тем же значениям RSME (и, очевидно,  $Eff$ ) могут соответствовать разные значения систематической ошибки. Следовательно, среди различных наборов “оптимальных” параметров, соответствующих минимальным RSME (или максимальным  $Eff$ ) следует выбрать тот, который обеспечивает минимальную систематическую ошибку.

После автоматизированной калибровки получившиеся “оптимальные” значения параметров слегка уточнялись вручную. “Подгонка” вручную проводилась детерминировано на регулярной сетке вблизи полученного минимума  $Ext$  (в пределах  $\pm 20\%$  оптимальных значений параметров). Это позволяло, во-первых, найти компромисс между обеими целевыми функциями  $Ext$  и  $Bias$ ; а во-вторых – оценить чувствительность моделирования стока к параметрам модели.

Поиск оптимальных значений параметров осуществлялся в пределах заданных диапазонов, не противоречащих физическому смыслу параметров. Эти диапазоны по возможности задавались достаточно широкими, чтобы избежать ситуации, когда глобальный оптимум целевой функции окажется вне выбранного диапазона. В подобной ситуации полученное в процессе калибровки “оптимальное” значение какого-нибудь параметра оказывается вблизи нижней или верхней границы заданного интервала. При этом следует сдвинуть границы интервала и заново осуществить калибровку параметров. Если же сдвиг границы невозможен, так как он приводит к нереальным значениям параметра, то ка-

либровка на этом прекращается. Этот случай (имеющий место не так часто) представляет собой компромисс между наивысшим качеством расчета и относительной реальностью значений калибруемых параметров.

#### Алгоритм случайного поиска RST

Алгоритм случайного поиска минимума целевой функции RST состоит из нескольких этапов [10]. На первом этапе задается достаточно широкое пространство допустимых значений параметров посредством фиксирования нижней и верхней границ значений каждого параметра таким образом, чтобы не противоречить физическому смыслу и обеспечить наилучшее соответствие воспроизведенного суточного речного стока измеренному. Затем осуществляется заданное число прогонов модели (реализаций) с различными наборами значений калибруемых параметров. Значения параметров выбираются случайным образом в пределах заданных диапазонов с использованием генератора равномерно распределенных случайных чисел. Для каждой реализации вычисляется сток и оцениваются значения целевых функций  $Ext$  и  $Bias$ . После этого выбираются “лучшие” реализации (при которых  $Ext$  и  $Bias$  минимальны), а соответствующие им наборы значений оптимизируемых параметров используются для сужения (“вручную”) диапазонов допустимых значений. На следующем этапе выполняется новый поиск оптимума, но уже в суженном пространстве значений параметров, что позволяет уменьшить число реализаций. Это особенно важно при большом числе калибруемых параметров, потому что, когда пространство допустимых значений параметров остается в процессе оптимизации неизменным, число реализаций, необходимых для нахождения оптимума с заданной точностью, возрастает экспоненциально с увеличением числа параметров [34]. В случае необходимости пространство допустимых значений параметров может сужаться и дальше, а поиск оптимума – продолжаться до тех пор, пока значения функций  $Ext$  и  $Bias$  не перестанут уменьшаться. По окончании оптимизации выбирается набор параметров с наименьшими значениями  $Ext$  и  $Bias$ , и этот набор признается оптимальным.

В настоящей работе на первом этапе поиск оптимума прекращался после 20000 реализаций. Число реализаций на втором и третьем этапах определялось на основе анализа “лучших” реализаций (учитывались сходимость целевых функций и разброс значений параметров) и, как правило, не превышало 5000.

#### Метод эволюций тасуемых групп SCE-UA

Метод SCE-UA был разработан для оптимизации какой-либо одной целевой функции. Чтобы

применить его для двух целевых функций *Ext* и *Bias*, поиск минимального значения *Ext* осуществлялся при условии, что *Bias* не должен превышать 5%.

Метод SCE-UA подробно описан в [17]. На первом этапе устанавливается исходная совокупность значений оптимизируемых параметров путем случайной выборки в пространстве допустимых значений *n* параметров, определяемом заданными диапазонами их значений. Для каждой точки 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) [31], т.е. происходит независимая эволюция этих групп. Периодически группы объединяются в единую выборку, точки которой перемешиваются (тасуются) с целью обмена информацией и разделяются на новые группы. Затем осуществляется независимая эволюция вновь созданных групп. В процессе поиска вся совокупность точек сходится к глобальному оптимуму при условии, что исходная выборка достаточно велика. Эволюции и перемешивание повторяются до достижения заранее определенного критерия сходимости. В настоящей работе число групп задавалось равным 6 (с уменьшением до 3 в процессе работы алгоритма), а критерий сходимости составлял 0.1% (изменение значения *Ext*) в течение 8 циклов.

#### *Выбор параметров, требующих оптимизации*

Поскольку LSM-модели имеют довольно большое число параметров, возникает проблема выбора тех из них, которые следует оптимизировать. Стратегия выбора оптимизируемых параметров определяется, во-первых, чувствительностью результатов моделирования к тем или иным параметрам, во-вторых – независимостью оптимизируемых параметров, в-третьих – их робастностью, т.е. устойчивостью при неоднократном использовании процедуры оптимизации. При этом общее число оптимизируемых параметров не должно быть слишком мало, чтобы обеспечить достаточное число степеней свободы для установления хорошего соответствия смоделированных и измеренных рядов суточного стока. В то же время это число не должно быть слишком велико, чтобы при приемлемом числе реализаций получить устойчивые значения калибруемых параметров. Конкретное число параметров определяется лишь опытным путем и зависит от модели и от объекта исследования. Наборы калибруемых параметров и их количество могут быть разными для различных по природным условиям объектов (например, для бассейнов рек с преимущественно снеговым или дождевым питанием).

Для рассматриваемых бассейнов в качестве калибровочных были выбраны следующие параметры модели SWAP: гидрофизические параметры почвы – коэффициент фильтрации  $K_0$ , пористость почвы  $W_{sat}$ , влажность завядания  $W_{wp}$ , наименьшая влагоемкость  $W_{fc}$ , *B*-параметр и матричный потенциал почвенной влаги при насыщении  $\phi_0$ , толщина почвенной колонки  $h_{g0}$ ; параметры растительности – глубина корнеобитаемого слоя  $h_r$ , альbedo  $\alpha$ , относительная площадь листьев LAI; параметр, определяющий трансформацию стока – коэффициент шероховатости Маннинга *n*. Выбор этих параметров был сделан исходя из следующих соображений.

$K_0$  – один из самых важных параметров модели SWAP, потому что он контролирует разделение воды, достигшей поверхности почвы, на впитывание в почву и поверхностный сток. При этом принимается во внимание пространственная изменчивость  $K_0$ , что позволяет учесть подсеточные эффекты, обусловленные вариабельностью этого параметра. Гидрофизические параметры почвы  $W_{sat}$ ,  $W_{wp}$  и  $W_{fc}$  имеют большое значение для описания суммарного испарения и динамики почвенных влагозапасов. Параметры *B* и  $\phi_0$  используются для формализации зависимости коэффициента влагопроводности почвы *K* и матричного потенциала почвенной влаги  $\phi$  от влажности почвы *W* (в параметризациях функций  $K(W)$  и  $\phi(W)$  по Клэпу–Хорнбергеру [15]). Модель SWAP также чувствительна к толщине почвенной колонки  $h_{g0}$ , которая, влияя на общий запас почвенной влаги, в значительной степени контролирует (наряду с некоторыми другими факторами) разделение поступающей в почву влаги на пополнение почвенных влагозапасов и дренаж. Толщина корнеобитаемого слоя  $h_r$  определяет максимальные влагозапасы, доступные для транспирации. От альbedo  $\alpha$  зависит величина неотраженной приходящей солнечной радиации, влияющей на тепло- и влагообмен на границе суши и атмосферы. Параметр LAI воздействует на суммарное испарение. Альbedo растительности и LAI характеризуются внутригодовой изменчивостью, поэтому в модели SWAP используются их среднемесячные значения. Априорные месячные значения этих параметров были взяты авторами из базы данных ISLSCIP-II. В настоящей работе полагается, что форма годового хода как  $\alpha$ , так и LAI соответствует действительности, тогда как значения этих параметров могут содержать систематические ошибки. Для корректировки возможных ошибок были введены два корректирующих коэффициента (постоянные в течение года) –  $k_\alpha$  и  $k_{LAI}$  для альbedo и LAI соответственно. Коэффициент шероховатости Маннинга *n* влияет на форму гидрографа стока.

Исходные метеорологические данные также могут содержать ошибки и неопределенности. Если

**Таблица 1.** Параметры, оптимизируемые в различных калибровочных экспериментах (+ – калибровка осуществлялась для всех бассейнов; ++ – калибровка проводилась для некоторых бассейнов; – – калибровка не проводилась)

Параметр	Описание	Эксперименты				
		SWAP_K0	SWAP_SCE1	SWAP_SCE2	SWAP_RST	SWAP_SCE3
Почвенные параметры						
$K_0$	Коэффициент фильтрации	+	+	+	+	+
$h_{g0}$	Толщина почвенной колонки	–	+	+	+	+
$W_{sat}$	Пористость	–	+	+	+	+
$W_{fc}$	Наименьшая влагоемкость	–	+	+	+	+
$W_{wp}$	Влажность завядания	–	+	+	+	+
$B$	$B$ -параметр	–	+	+	+	+
$\phi_0$	Потенциал почвенной влаги при насыщении	–	+	+	+	+
Параметры трансформации стока						
$n$	Коэффициент шероховатости Маннинга	–	+	+	+	+
Параметры растительности						
$h_r$	Толщина корнеобитаемого слоя	–	+	+	+	+
$k_\alpha$	Корректирующий множитель к альбедо	–	+	–	–	+
$k_{LAI}$	Корректирующий множитель к LAI	–	–	–	–	+
Корректирующие множители к метеорологическим данным						
$k_{lp}$	к жидким осадкам	–	–	+	+	+
$k_{sp}$	к твердым осадкам	–	–	–	–	++
$k_{sw}$	к коротковолновой радиации	–	–	+	+	+
$k_{lw}$	к длинноволновой радиации	–	–	+	+	+

эти данные получены в результате реанализа, то они неизбежно содержат систематические ошибки (в силу невысокой точности моделей общей циркуляции атмосферы, используемых для реанализа) [37]. Если же необходимые для расчетов осредненные по площади бассейна метеорологические данные получены на основе измерений, то их точность зависит как от точности самих измерений, так и от плотности и репрезентативности метеорологических станций. В силу указанных причин некоторые специалисты в области гидрологического моделирования пришли к выводу, что для снижения влияния ошибок и неточностей в исходной метеорологической информации на результаты расчетов необходимо, наряду с калибровкой параметров подстилающей поверхности, вводить также калибруемые поправки к наиболее влияющим на формирование стока метеорологическим характеристикам [19, 36]. Поскольку осадки и приходящая радиация в наибольшей степени влияют на формирование стока (по сравнению с другими метеоэлементами), авторами было принято решение использовать следующие калибруемые корректирующие коэффициенты:  $k_{lp}$ ,  $k_{sp}$ ,  $k_{sw}$  и  $k_{lw}$  соответственно для жидких и твердых осадков, коротковолновой и длинноволновой радиации.

#### Эксперименты по калибровке модели

Для выявления потенциала модели SWAP в отношении воспроизведения дождевого стока модель была откалибрована различными способами с использованием суточных данных измерений речного стока с 12 вышеописанных бассейнов за 1960–1979 гг. При этом значения всех калибруемых параметров, как отмечалось выше, удерживались в пределах допустимых диапазонов, не противоречащих физическому смыслу параметров.

Для каждого бассейна выполнялось три эксперимента по калибровке модели с использованием алгоритма SCE-UA (здесь и далее будем называть их SWAP\_SCE1, SWAP\_SCE2 и SWAP\_SCE3) с различным числом калибруемых параметров: 10, 12 и 15 соответственно (табл. 1). В первом варианте (SWAP\_SCE1) калибровка корректирующих множителей для метеорологических данных и LAI не проводилась. Во втором варианте в число калибруемых параметров были включены корректирующие множители для основных метеорологических характеристик –  $k_{lp}$ ,  $k_{sw}$  и  $k_{lw}$  (эксперимент SWAP\_SCE2 в табл. 1). Вовлечение коэффициента  $k_{sw}$  в процедуру оптимизации позволило исключить альбедо  $\alpha$  из числа калибруемых параметров, так как в модели указанные параметры представлены в виде произ-

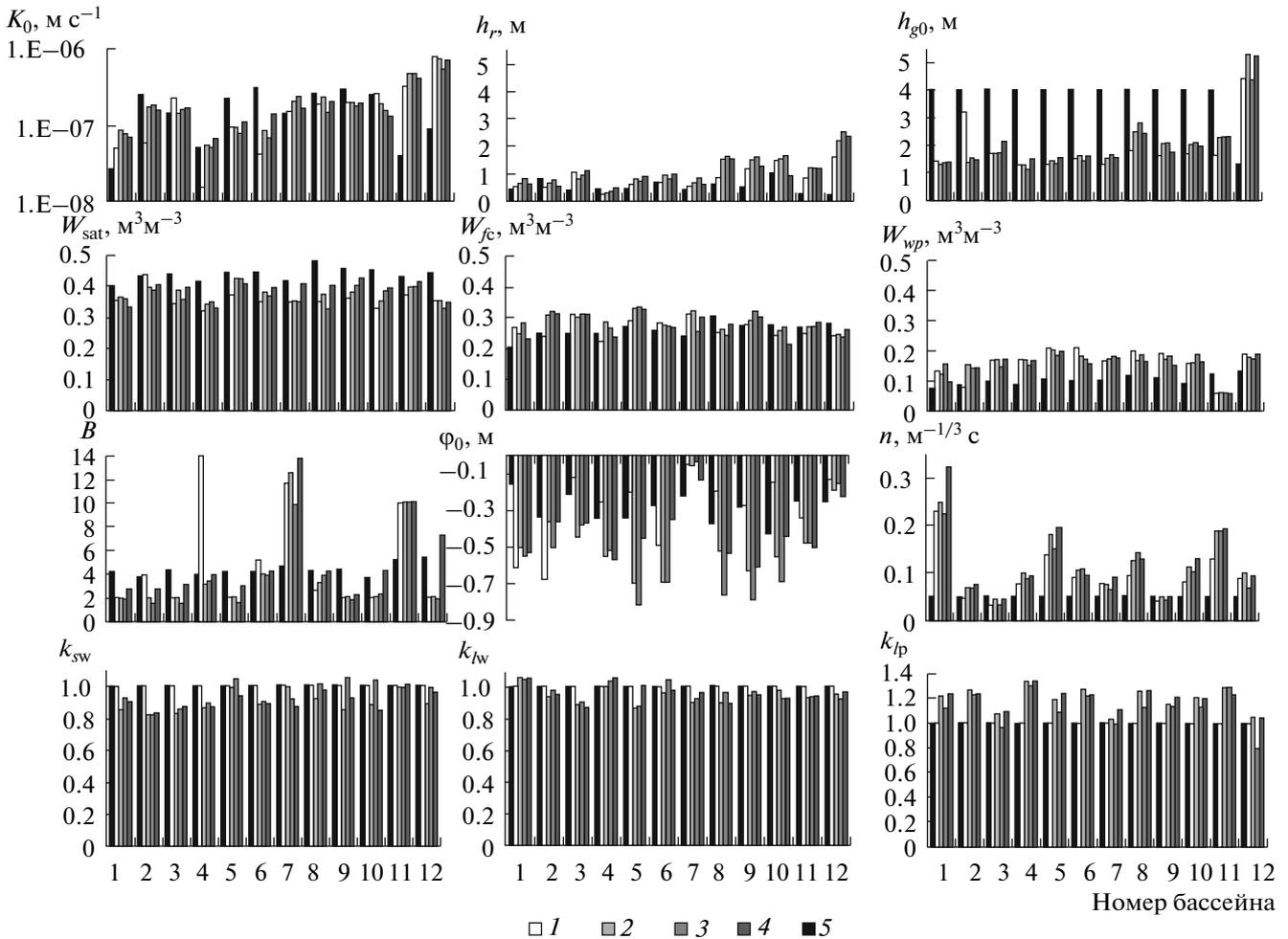


Рис. 2. Оптимальные значения параметров и корректирующих множителей, полученные в калибровочных экспериментах SWAP\_SCE1 1, SWAP\_SCE2 2, SWAP\_SCE3 3 и SWAP\_RST 4, а также их априорные значения SWAP\_apriori 5.

ведения  $\alpha \times k_{sw} \times R_{sw}$  (где  $R_{sw}$  – коротковолновая радиация). Поэтому уменьшение  $k_{sw}$  с одновременным увеличением  $\alpha$  (и наоборот) может привести к одинаковым результатам. В эксперименте SWAP\_SCE3 осуществлялась калибровка всех 15 выбранных параметров.

Так как в предыдущих исследованиях [10, 11, 30] использовался только оптимизационный алгоритм RST, было интересно сопоставить его с методом SCE-UA. Для этого выполнена калибровка 12 параметров модели (как и в эксперименте SWAP\_SCE2) методом RST. Этот эксперимент получил название SWAP\_RST.

Сведения обо всех вышеупомянутых экспериментах приведены в табл. 1, куда также включен вариант калибровки модели SWAP\_K0, реализованный во время участия авторов в проекте MOPEX. Тогда калибровка выполнялась вручную и оптимизировался лишь один параметр  $K_0$  посредством минимизации систематической ошибки расчета годового стока.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Оптимальные значения калибруемых параметров

Оптимальные значения большинства калибруемых параметров, полученные в результате четырех калибровочных экспериментов для каждого речного бассейна, а также их априорные значения показаны на рис. 2. Как видно из рисунка, оптимальные значения параметров в разных экспериментах несколько различаются, что, вероятно, связано с различными наборами оптимизируемых параметров, поскольку на результаты калибровки оказывают влияние неточности в априорных оценках некалибруемых, но также участвующих в формировании стока параметров. Так, в эксперименте SWAP\_SCE1, когда калибровка корректирующих множителей к метеорологическим характеристикам не проводилась, ошибки и неопределенности в исходных метеорологических данных, безусловно, повлияли на оптимальные значения калибруемых параметров, что привело к их отличию от соответствующих оптимальных значений в других калиб-

ровочных экспериментах. В то же время следует отметить, что различия в оптимальных значениях параметров в разных экспериментах не столь существенны и могут считаться допустимыми. Кроме того, следует подчеркнуть, что все оптимальные значения физически обоснованы, так как их поиск осуществлялся в пределах физически допустимых значений.

Немалый интерес представляют собой результаты калибровки корректирующих множителей к исходным метеорологическим данным (рис. 2, нижний ряд графиков). Калибровка этих множителей в эксперименте SWAP\_SCE3 привела в среднем к уменьшению приходящей коротковолновой SW и длинноволновой LW радиации на 5 и 4% соответственно. Это хорошо согласуется с возможными неточностями в значениях приходящей радиации, рассчитанных на основе стандартных метеорологических наблюдений. Так, анализ глобальных оценок приходящих потоков SW и LW, взятых из четырех различных баз данных (SRB, ISCCP, NCEP/DOE- и ERA-40-реанализ), показал, что максимальные различия в оценках достигают 8 и 4% для SW и LW соответственно, тогда как в региональном масштабе они могут быть несколько больше [12]. Корректирующие множители к осадкам в среднем по бассейнам получились равными 1.12 и 1.04 соответственно для жидких и твердых осадков, т.е. первые должны быть увеличены на 12, а последние на 4%. Это находится в пределах точности оценки пространственно осредненных осадков, которая зависит как от точности измерения осадков, так и от плотности осадкомерной сети.

Калибровка корректирующих множителей  $k_{\alpha}$  и  $k_{LAI}$  для параметров растительности (альbedo и LAI соответственно) проводилась только в эксперименте SWAP\_SCE3. Оптимальные значения параметра  $k_{\alpha}$  довольно высоки (от 2 до 3). Это может быть связано с заниженными априорными оценками альbedo растительности. Так, априорные значения альbedo для большинства бассейнов в течение летних месяцев варьируют от 0.08 до 0.1. Столь низкие значения типичны для темнохвойных еловых лесов, которые не характерны для исследуемых бассейнов. Умножая эти значения на параметр  $k_{\alpha}$ , изменяющийся от 2 до 3, можно прийти к более приемлемым значениям альbedo для растительного покрова бассейнов. Корректирующий множитель для LAI изменяется по бассейнам от 0.5 до 1.7 (в среднем 1.06), также обеспечивая вполне допустимые значения LAI.

#### *Воспроизведение гидрографов дождевого стока при различных наборах оптимальных параметров*

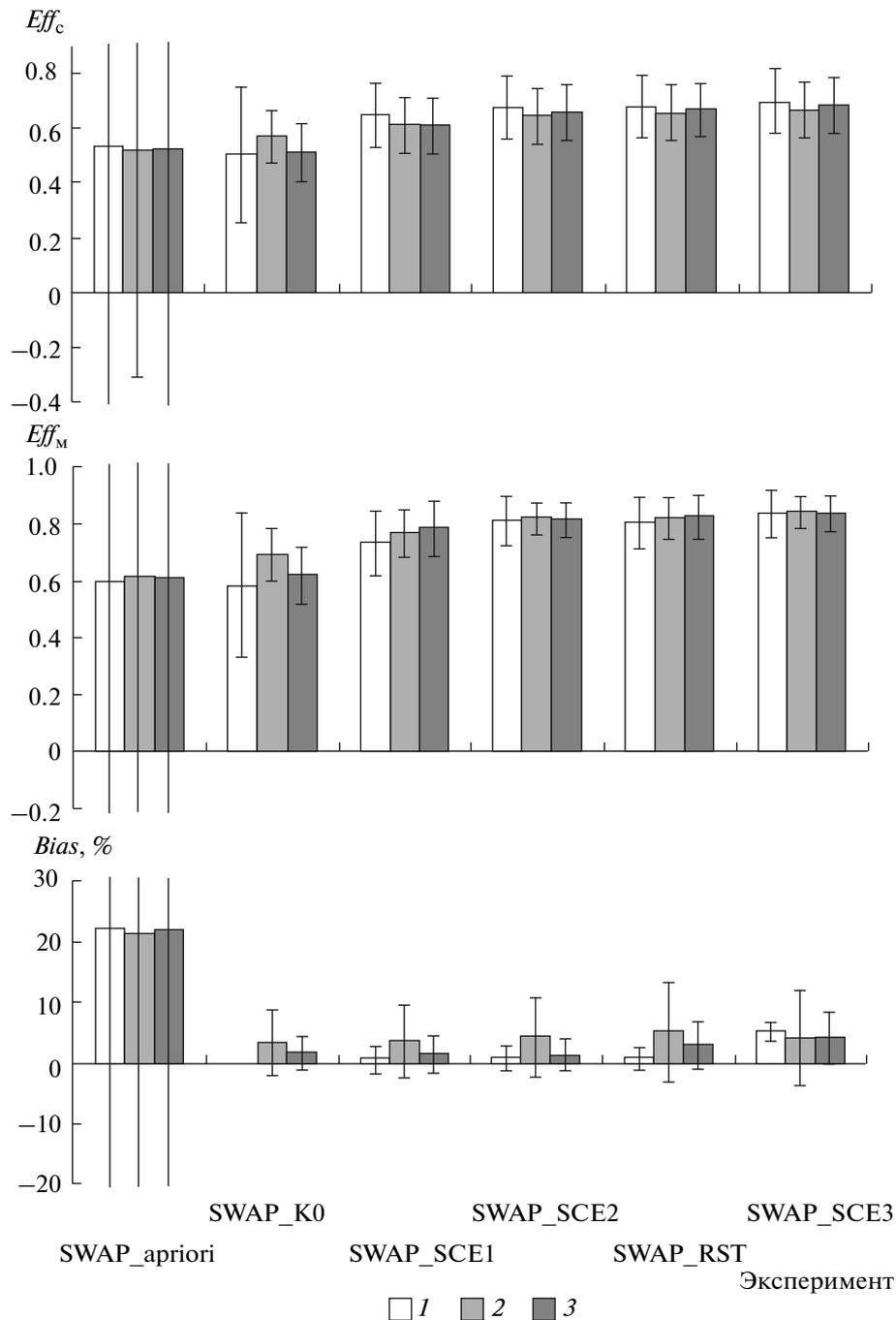
Результаты моделирования суточных значений стока с использованием различных наборов оптимизированных параметров были сопоставлены с

данными наблюдений за 1980–1998 и 1960–1998 гг. Первый период – проверочный, так как содержит независимые данные для проверки модели, а второй охватывает весь расчетный 39-летний период, в том числе годы (1960–1979 гг.), использованные для калибровки модели. Смоделированные суточные и месячные гидрографы речного стока для каждого бассейна сопоставлялись с измеренными визуально и с помощью статистических критериев согласия: коэффициента эффективности расчета Нэша и Сатклифа  $Eff$ , среднеквадратической RMSE и систематической  $bias$  (абсолютное значение этой ошибки будем обозначать  $Bias$ ) ошибок расчета и коэффициента корреляции  $r$ .

Прогресс в воспроизведении стока моделью SWAP благодаря оптимизации параметров виден на рис. 3 в сравнении с результатами расчета (обозначенного как SWAP\_apriori) на основе априорных параметров. На рис. 3 приведены медианы эффективностей расчета суточных  $Eff_c$  и месячных  $Eff_m$  значений речного стока, а также абсолютных значений систематической ошибки расчета  $Bias$ , полученных для 12 бассейнов в разных экспериментах. Здесь же показаны среднеквадратические отклонения  $\sigma$  указанных статистик (в виде вертикальных отрезков, соответствующих  $\pm\sigma$ ), характеризующие их разброс по бассейнам. На рис. 4 эффективности расчета и систематические ошибки показаны для каждого из 12 бассейнов.

Сравнение результатов экспериментов SWAP\_apriori и SWAP\_K0 показало, что калибровка параметра  $K_0$  привела к значительному улучшению годового водного баланса для всех бассейнов: для периода калибровки абсолютная систематическая ошибка расчетов  $Bias$  отсутствовала, а для проверочного и 39-летнего расчетных периодов она составила 3.2 и 1.6% соответственно (рис. 3). Это не удивительно, потому что систематическая ошибка играла роль целевой функции в процессе калибровки. Разброс всех статистик по бассейнам тоже значительно уменьшился. В то же время столь слабая калибровка не привела к значительным улучшениям эффективности рассчитанного суточного стока, медиана которой почти не изменилась (рис. 3). Для некоторых бассейнов (№ 3–5, 8 и 9) значения  $Eff_c$  даже стали несколько ниже, тогда как значения  $bias$  намного улучшились (рис. 4). Для остальных бассейнов  $Eff_c$  несколько увеличилась, особенно для бассейнов 1, 11 и 12, которые были наихудшими в расчетах без калибровки (значения  $Eff_c$  для них были отрицательны, а величина  $bias$  очень большой) (рис. 4).

Наибольший прогресс в расчете стока был достигнут при калибровке 15 параметров модели SWAP (эксперимент SWAP\_SCE3). По сравнению с экспериментом SWAP\_K0 медиана  $Eff_c$  увеличилась на 19.9, 10.2 и 17.6% соответственно для калибровочного, проверочного и 39-летнего перио-

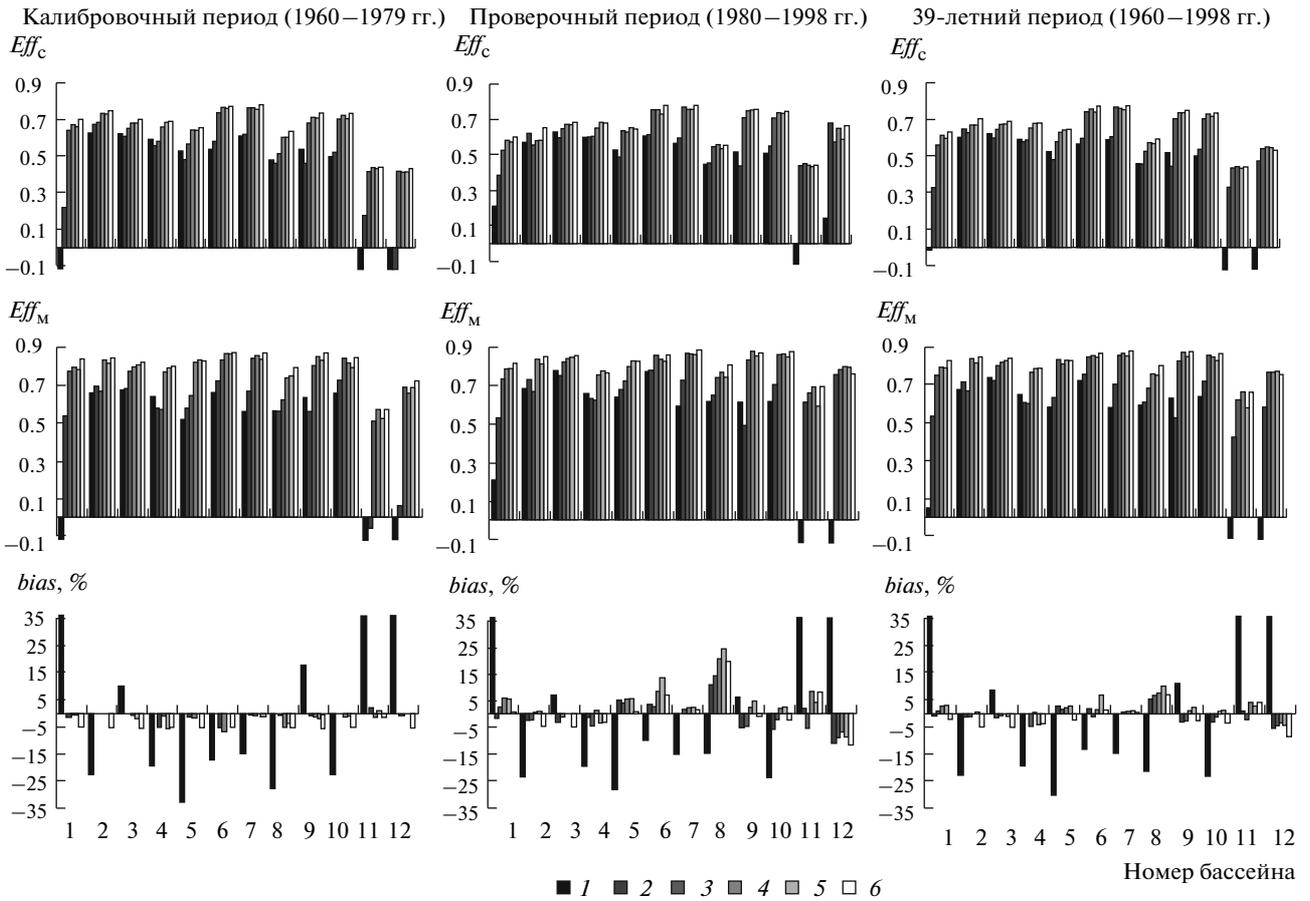


**Рис. 3.** Рассчитанные для 12 бассейнов медианы (прямоугольники) и среднеквадратические отклонения (вертикальные отрезки) эффективностей расчета суточных  $Eff_c$  и месячных  $Eff_m$  значений стока и систематической ошибки расчетов  $Bias$  для трех расчетных периодов и разных экспериментов: 1 – 1960–1979, 2 – 1980–1998, 3 – 1960–1998 гг.

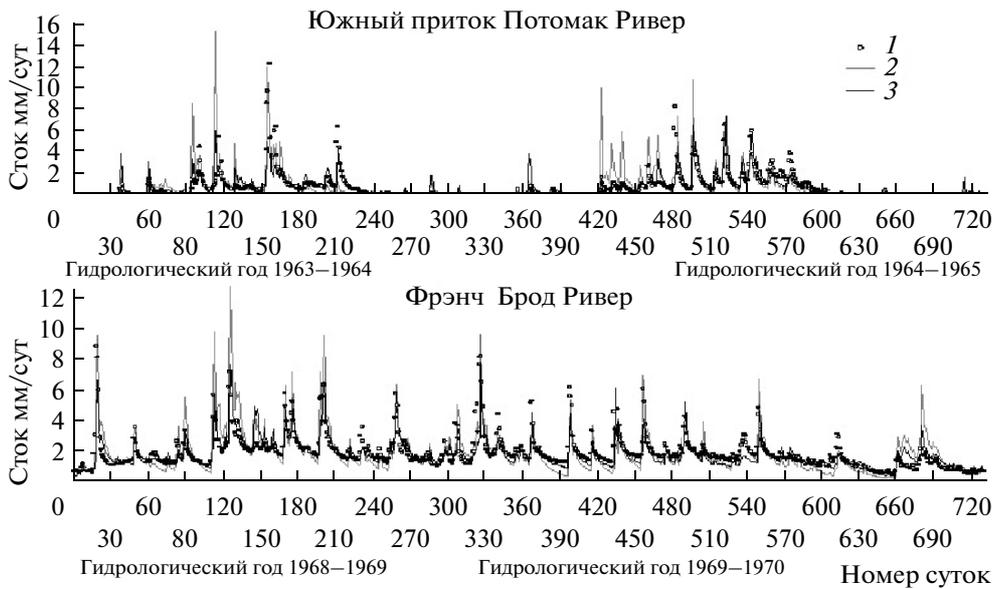
дов; медиана  $Eff_m$  для тех же периодов возросла на 25.4, 14.8 и 21.5% (табл. 2). Медиана абсолютного значения систематической ошибки  $Bias$  во всех случаях не превышала 5%. Визуальное сопоставление смоделированных гидрографов стока также свидетельствует о существенном прогрессе по

сравнению с результатами эксперимента SWAP\_K0 (рис. 5).

Помимо сказанного, сравнение различных калибровочных экспериментов позволило выявить следующие важные моменты. Применение оптимизационных методов RST и SCE-UA к одинаковому набору калибруемых параметров приводит к очень



**Рис. 4.** Эффективность расчета суточных  $Eff_c$  и месячных  $Eff_M$  значений стока, а также систематическая ошибка расчета стока  $bias$ , полученные в различных экспериментах для 12 речных бассейнов и трех расчетных периодов. 1 – SWAP\_apriori, 2 – SWAP\_K0, 3 – SWAP\_SCE1, 4 – SWAP\_SCE2, 5 – SWAP\_RST, 6 – SWAP\_SCE3.



**Рис. 5.** Сопоставление гидрографов стока, измеренных 1 и смоделированных в калибровочных экспериментах SWAP\_K0 2 и SWAP\_SCE3 3 для двух бассейнов за два гидрологических года. Нумерация дней начинается с 1 октября первого гидрологического года.

**Таблица 2.** Медианы статистических критериев качества расчетов речного стока моделью SWAP в разных экспериментах, полученные по результатам сопоставления измеренного и смоделированного стока для 12 бассейнов

Эксперимент	Суточная статистика		Месячная статистика		Bias, %
	$Eff_c$ , %	$r$	$Eff_m$ , %	$r$	
Калибровочный период (1960–1979 гг.)					
SWAP_apriori	52.7	0.741	59.8	0.819	22.1
SWAP_K0	50.1	0.724	58.1	0.792	0.0
SWAP_SCE1	64.7	0.805	73.3	0.866	0.5
SWAP_SCE2	67.7	0.829	80.8	0.910	0.7
SWAP_RST	68.0	0.829	80.3	0.913	0.6
SWAP_SCE3	70.0	0.840	83.5	0.919	5.0
Проверочный период (1980–1998 гг.)					
SWAP_apriori	51.6	0.761	61.7	0.848	21.4
SWAP_K0	56.7	0.763	69.2	0.844	3.2
SWAP_SCE1	61.5	0.787	76.6	0.881	3.5
SWAP_SCE2	64.5	0.805	81.9	0.923	4.0
SWAP_RST	65.9	0.815	82.0	0.920	4.8
SWAP_SCE3	66.9	0.819	84.0	0.927	3.8
39-летний период (1960–1998 гг.)					
SWAP_apriori	52.1	0.748	61.0	0.839	21.9
SWAP_K0	51.0	0.747	62.0	0.803	1.6
SWAP_SCE1	61.0	0.782	78.3	0.886	1.3
SWAP_SCE2	66.1	0.817	81.5	0.911	1.2
SWAP_RST	67.1	0.822	82.3	0.911	2.7
SWAP_SCE3	68.6	0.829	83.5	0.916	3.7

близким результатам расчета стока (SWAP\_RST и SWAP\_SCE2 на рис. 3, 4, в табл. 2). При расчетах с использованием RST-набора оптимальных параметров медианы  $Eff_c$  получились равными 68.0, 65.9 и 67.1%, а медианы  $Bias$  составили 0.6, 4.8 и 2.7% соответственно для калибровочного, проверочного и 39-летнего периодов. Применение же метода SCE-UA обеспечило медианы  $Eff_c$ , равные 67.7, 64.5 и 66.1, а медианы  $Bias$  – 0.7, 4.0 и 1.2% для тех же периодов соответственно. Подобная закономерность наблюдается и для месячных значений. При визуальном сравнении гидрографов обнаруживаются лишь незначительные расхождения. Полученные результаты означают, что метод калибровки RST столь же эффективен, что и SCE-UA.

Сравнение результатов экспериментов SWAP\_SCE1 и SWAP\_SCE2 показывает, что вовлечение корректирующих множителей для исходных метеорологических данных в процесс калибровки

способствовало увеличению медианы  $Eff_c$  на 3.0, 3.0 и 5.0% для калибровочного, проверочного и 39-летнего периодов соответственно (табл. 2). Подобное увеличение выглядит незначительным, однако для некоторых бассейнов его величина достигала 8.8% для калибровочного и 7.3% для проверочного периодов (SWAP-SCE1 и SWAP-SCE2, рис. 4). Это можно объяснить различной точностью площадных оценок метеорологических характеристик для разных бассейнов. Различия в эффективности расчета месячного стока для отдельных бассейнов оказались еще более существенными, достигая 19.7% для калибровочного и 16.7% для проверочного периодов.

Более детально гидрографы будут проанализированы во второй части данной статьи в сравнении с гидрографами, полученными гидрологическими моделями в процессе участия в международном проекте MOPEX.

## ВЫВОДЫ

Исследованы различные варианты калибровки параметров модели тепловлагообмена суши с атмосферой SWAP с целью достижения максимально возможной точности воспроизведения моделью гидрографа дождевого стока. Оптимизация значений параметров проводилась автоматизировано с использованием двух различных алгоритмов поиска глобального оптимума целевой функции: алгоритма случайного поиска RST и метода эволюций тасуемых групп SCE-UA. Было получено, что оба алгоритма приводят практически к одинаковым результатам. Преимущества первого метода заключаются 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 не лимитировано, то удобнее воспользоваться вторым методом, который не требует вмешательства пользователя и не зависит от его квалификации.

Использование в процессе калибровки различных наборов оптимизируемых параметров позволило выявить, в какой степени различные параметры влияют на результаты моделирования стока. Наиболее важный вывод касается корректирующих множителей к осадкам и приходящей радиации. Калибровка этих множителей совместно с другими модельными параметрами в среднем немного повлияла на эффективность расчета суточного стока, которая возросла лишь на 3–5% для различных расчетных периодов. Однако для отдельных бассейнов суточная эффективность увеличилась на 7–9%, а для месячного стока это увеличение еще более существенно – 17–19%. По-видимому, для этих бассейнов точность оценки осредненных по их площади метеорологических характеристик была ниже. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что неточности и ошибки в исходной метеорологической информации могут быть в какой-то степени скомпенсированы применением корректирующих множителей к тем метеорологическим характеристикам, которые в наибольшей степени влияют на формирование стока. Калибровка этих множителей совместно с параметрами модели позволяет снизить влияние систематических ошибок в исходных метеоданных на оптимизацию параметров модели и результаты моделирования в целом. Очевидно, что корректировка метеоэлементов должна осуществляться в пределах точности их оценки, в таком случае введение корректирующих множителей будет аналогично введению традиционных поправок (которые в данном случае определяются посредством калибровки) к метеоэлементам, что вполне допустимо.

Наконец, был выявлен набор параметров модели SWAP, позволяющий воспроизводить гидрографы дождевого стока с максимальной точностью.

Оптимальные значения этих параметров будут использованы во второй части данной статьи для моделирования гидрографов стока, которые будут сопоставлены с аналогичными результатами, полученными с помощью гидрологических моделей.

Отметим, что оптимизированные значения параметров нельзя считать истинными (т.е. близкими к результатам измерений), поскольку на них неизбежно оказывают влияние как неточности в исходной информации (метеорологических характеристиках и некалибруемых параметрах) и данных по стоку, так и несовершенство самой модели. К тому же, измерения, как правило, носят точечный характер, в то время как значения параметров, требующиеся при моделировании и получаемые в результате калибровки, относятся ко всему водосбору, т.е. являются площадными. Откалиброванные значения можно интерпретировать как эффективные для данного водосбора и данной модели. При использовании достаточно качественной модели, хорошо воспроизводящей механизм происходящих на водосборе процессов, а также качественной информации по стоку и исходным метеорологическим характеристикам эти значения должны быть близки к средним по расчетным площадям значениям измеренных реальных параметров.

Следует также подчеркнуть, что полученные в процессе калибровки значения параметров – оптимальные только для того створа речного бассейна, для которого эта калибровка осуществлялась. Вопрос о том, возможно ли использовать эти значения для других (соседних или близких по физико-географическим условиям) водосборов или других створов данного водосбора выходит за рамки данной статьи и требует дополнительного исследования.

Авторы выражают признательность Дж. Шааке и К. Дуану (NWS/NOAA, США) – организаторам международного проекта MOREX за предоставленные материалы для проведения модельных расчетов. Авторы также благодарны К. Дуану, Х.В. Гупте и С. Сорошиану (Университет Аризоны, США) за программный код алгоритма SCE-UA.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будаговский А.И. Основы методики расчета оросительных норм и режимов орошения // Вод. ресурсы. 1989. № 1. С. 38–48.
2. Гусев Е.М. Испарение воды просыхающей почвой // Почвоведение. 1998. № 8. С. 921–927.
3. 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.
4. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Параметризация процессов тепловлагообмена в системе “грунтовые воды–почва–растительный/снежный покров–атмосфера” для территорий с четко выраженной се-

- зонной изменчивостью климата // Почвоведение. 2000. № 6. С. 733–747.
5. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Параметризация процессов теплообмена в бореальных лесных экосистемах // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 2001. Т. 37. № 2. С. 182–200.
  6. 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.
  7. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Проблемы изучения и моделирования тепло- и влагообмена в системе почва–растительный и (или) снежный покров–приземный слой атмосферы // Вод. ресурсы. 2004. Т. 31. № 2. С. 148–164.
  8. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Исследование влияния различных способов оценки модельных параметров на точность воспроизведения речного стока на основе модели SWAP // Вод. ресурсы. 2007. Т. 34. № 3. С. 1–11.
  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., 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.
  11. 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.
  12. Насонова О.Н., Гусев Е.М., Ковалев Е.Э. Глобальные оценки составляющих теплового и водного балансов суши // Изв. РАН. Сер. геогр. 2008. № 1. С. 8–19.
  13. Bastidas L.A., Gupta H.V., Sorooshian S. et al. Sensitivity Analysis of a Land Surface Scheme using Multi-Criteria Methods // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. № D16. P. 19481–19490.
  14. Boone A., Habets F., Noilhan J. et al. The Rhone-aggregation land surface scheme intercomparison project: An overview // J. Climate. 2004. V. 17. № 1. P. 187–208.
  15. Clapp R.B., Hornberger G.M. Empirical equations for some soil hydraulic properties // Water Resour. Res. 1978. V. 14. № 4. P. 601–604.
  16. 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.
  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. Duan Q., Sorooshian S., Gupta V.K. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models // J. Hydrology. 1994. V. 158. № 3–4. P. 265–284.
  19. 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.
  20. Green W.H., Ampt G.A. Studies on Soil Physics. 1. The Flow of Air and Water through Soils // J. Agric. Sci. 1911. V. 4. № 1. P. 1–24.
  21. Gusev Ye.M., Nasonova O.N. The Land Surface Parameterization scheme SWAP: description and partial validation // Global Planet. Change. 1998. V. 19. № 1–4. P. 63–86.
  22. Gusev Ye.M., Nasonova O.N. An experience of modeling heat and water exchange at the land surface on a large river basin scale // J. Hydrology. 2000. V. 233. № 1–4. P. 1–18.
  23. 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.
  24. Gusev Ye.M., Nasonova O.N. Modelling heat and water exchange in the boreal spruce forest by the land-surface model SWAP // J. Hydrology. 2003. V. 280. № 1–4. P. 162–191.
  25. Gusev Y.M., Nasonova O.N. Simulating runoff from MOPEX experimental river basins using the land surface model SWAP and different parameter estimation techniques // IAHS Publ. 2006. №. 307. P. 188–195.
  26. Lohmann D., Lettenmaier D.P., Liang X. et al. The project for intercomparison of land-surface parameterization schemes (PILPS) phase-2(c) Red-Arkansas River basin experiment: 3. Spatial and temporal analysis of water fluxes // Global Planet. Change. 1998. V. 19. № 1–4. P. 161–179.
  27. Manabe S. Climate and the ocean circulation. 1. The atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface // Mon. Weath. Rev. 1969. V. 97. № 11. P. 739–805.
  28. Mengelkamp H.-T., Warrach K., Ruhe C., Raschke E. Simulation of runoff and streamflow on local and regional scales // Meteorol. Atmos. Phys. 2001. V. 76. № 1–4. P. 107–117.
  29. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models: 1 A discussion of principles // J. Hydrology. 1970. V. 10. № 3. P. 282–290.
  30. Nasonova O.N., Gusev Ye.M. Can a land surface model simulate runoff with the same accuracy as a hydrological model? // IAHS Publ. 2007. №. 313. P. 258–265.
  31. Nelder J.A., Mead R. A simplex method for function minimization // Computer Journal. 1965. V. 7. № 4. P. 308–313.
  32. Oki T. Validating the runoff from LSP-SVAT models using a global river routing network by one degree

- mesh // Proc. 13<sup>th</sup> Conf. on Hydrology. Long Beach: Amer. Met. Soc., 1997. P. 319–322.
33. *Polcher J.* The global land-atmosphere system study (GLASS) // BAHC/GEWEX News Joint Issue. 2001. V. 11. № 2. P. 5–6.
34. *Solomatine D.P., Dibike Y.B., Kukuric N.* Automatic calibration of groundwater models using global optimization techniques // Hydrological Sciences J. 1999. V. 44. № 6. P. 879–894.
35. *Wood E.F., Lettenmaier D.P., Liang X. et al.* The project for intercomparison of land-surface parameterization schemes (PILPS) phase-2(c) Red-Arkansas River basin experiment. 1. Experiment description and summary intercomparisons // Global Planet. Change. 1998. V. 19. № 1–4. P. 115–135.
36. *Xia Y.* Calibration of LaD model in the northeast United States using observed annual streamflow // J. Hydrometeorology. 2007. V. 8. № 5. P. 1098–1110.
37. *Zhao M., Dirmeyer P.A.* Production and analysis of GSWP-2 near-surface meteorology data sets // COLA Technical Report. 2003. № 159. 38 p.