

М. САЙФУЛЛАХ*, **, ЧЖИЦЗЯ ЛИ*, ШИИН ЛЮ*, М. ЗАМАН****, М. АДНАН*,
Ш. МУХАММАД*, *****, ВУ КУНЬПЭН*, И ИН*, С. ХАШИМ****

*Институт международных рек и экологической безопасности Юньнаньского университета,
650500, Куньмин, Китай, saif_2146@yahoo.com, shiyin.liu@ynu.edu.cn, adnan@lzb.ac.cn,
sher.muhammad@icimod.org, wukunpeng@ynu.edu.cn, yi@ynu.edu.cn, s.h@yahoo.com

**Сельскохозяйственный университет им. Мухаммада Наваза Шарифа,
66000, Мултан, Пакистан, saif_2146@yahoo.com, s.h@yahoo.com

***Колледж гидрологии и водных ресурсов Университета Хохая,
210098, Нанкин, Китай, zhijia-li@vip.sina.com

****Сельскохозяйственный университет, 380000, Фейсалабад,
Пакистан, muhammad.zaman@uaf.edu.pk

*****Международный центр по комплексному освоению горных районов,
3226, Катманду, Непал, sher.muhammad@icimod.org

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ НА ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ В БАССЕЙНЕ РЕКИ ДУНВАНЬ (КИТАЙ)

Землепользование оказывает значительное воздействие на объем стока в полусухом бассейне, входящем в речную систему Хуанхэ. С помощью модели взаимодействия почвы, растительного покрова и атмосферных осадков SWAT (Soil and Water Assessment Tools) изучено влияние изменений в землепользовании на водные ресурсы. Данная оценка необходима для рациональной организации водохозяйственной деятельности в стране. В районе исследования наблюдаются определенные изменения в землепользовании. Конверсия видов землепользования с переходом земель в разряд городских территорий создает неопределенность параметров в модели SWAT. Полученные результаты свидетельствуют о том, что модель SWAT может успешно использоваться для оценки влияния изменений в землепользовании на водные ресурсы в бассейне исследования. Результаты работы могут применяться в качестве основы при рациональном использовании водных ресурсов и сохранении почв, а также в экогидрологии речного бассейна.

Ключевые слова: сельскохозяйственное землепользование, модель SWAT, полусухой бассейн, речной сток, водный баланс.

M. SAIFULLAH*, **, ZHIJIA LI*, SHIYIN LIU*, M. ZAMAN****, M. ADNAN*,
Sh. MUHAMMAD*, *****, WU KUNPENG*, YI YING*, S. HASHIM****

*Institute of International Rivers and Eco-Security, Yunnan University,
650500, Kunming, China, saif_2146@yahoo.com, shiyin.liu@ynu.edu.cn, adnan@lzb.ac.cn,
sher.muhammad@icimod.org, wukunpeng@ynu.edu.cn, yi@ynu.edu.cn, s.h@yahoo.com

**Muhammad Nawaz Shareef University of Agriculture,
66000, Multan, Pakistan, saif_2146@yahoo.com, s.h@yahoo.com

***College of Hydrology and Water Resources, Hohai University,
210098, Nanjing, China, zhijia-li@vip.sina.com

****University of Agriculture, 380000, Faisalabad, Pakistan, muhammad.zaman@uaf.edu.pk

*****International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD),
GPO Box 3226, Kathmandu, Nepal, sher.muhammad@icimod.org

ASSESSING THE LAND-USE IMPACTS ON WATER RESOURCES IN THE DONGWAN SUBBASIN (CHINA)

Land-use has considerable influences on runoff in the semi-arid basin of the Yellow River. Assessing the impacts of land-use changes on runoff characteristics is a vital role for water resources managers. The goal of this study is to evaluate the land-use change impacts on water resources by using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model. This assessment is needed for a rational organization of water economy activity in the country. Considerable land-use changes have been noticed in the

© 2023 Сайфуллах М., Чжицзя Ли, Шиин Лю, Заман М., Аднан М., Мухаммад Ш.,
Ву Куньпэн, И Ин, Хашим С.

study area. The conversion of land-use to urban land causes uncertainty of parameters in the SWAT model. The results obtained indicate that the SWAT model can be used successfully to assess the impacts of land-use variability on water resources of the study basin. The findings of this research could provide an important reference for soil and water conservation and eco-hydrology of the river basin.

Keywords: *agricultural land-use, SWAT model, semi-arid basin, river discharge, water balance.*

ВВЕДЕНИЕ

Китай является первой по численности населения и второй по экономике страной в мире и в будущем может столкнуться с продовольственными проблемами и дефицитом водных ресурсов, поскольку уже сегодня некоторые речные бассейны страдают от нехватки воды из-за изменений в гидрологическом цикле. Гидрологический цикл в речных бассейнах может нарушаться по причине антропогенных изменений в землепользовании, таких как увеличение площади сельскохозяйственных угодий и урбанизированных территорий, обезлесение и лесовозобновление. Для выработки стратегий экологически рационального регулирования стока с водосборов необходимо исследовать реакцию гидрологических параметров на изменения климата и землепользования. На водный баланс оказывают существенное влияние изменения в землепользовании. В предыдущих исследованиях, например [1–3], большое внимание уделялось оценке влияния изменений в землепользовании на гидрологические процессы и водные ресурсы. Основными гидрологическими параметрами с пространственно-временными вариациями в зависимости от изменений в землепользовании являются испарение, перехват влаги и инфильтрация [4–7]. Согласно результатам предыдущих исследований, на гидрологические характеристики (годовой сток водотоков [8], повторяемость паводков [9] и генезис стока [10]) существенно влияют изменения в землепользовании.

Также было выявлено, что процесс образования стока и чувствительность соотношения осадков и стока, как правило, уменьшаются в лесной местности, на сельхозугодиях и рисовых полях при аналогичных условиях уклона местности и механического состава почвы [11]. Модель Soil and Water Assessment Tools (SWAT) и метод наименьшей квадратичной регрессии использовались в работе [6] при исследовании влияния изменений в землепользовании на сток в бассейне р. Верхняя Ду. От изменений в землепользовании меньше зависят вариации годового стока и месячный расход, однако влияние возрастает в случае ежедневных колебаний стока (максимальный уровень и величина паводка) [12]. В работе [13], посвященной исследованию водосборного бассейна р. Дунвань с использованием системы гидрологического моделирования Центра гидрологической техники (НЕС-НМС), было выявлено, что объем стока уменьшился, в то время как аккумулирующая способность почв увеличилась в результате изменений в землепользовании на этой территории. Изменения в землепользовании воздействуют не только на гидрологические процессы, но и на окружающую среду, экосистему и экономику региона в масштабе водосборного бассейна, поэтому полное понимание этой проблемы необходимо для рационального использования водных ресурсов.

Проблема влияния изменений в землепользовании на гидрологические процессы в масштабе водосборов некоторых речных бассейнов Китая привлекает внимание ученых всего мира ввиду ее важности для понимания взаимодействия суши и океана, глобального гидрологического цикла и глобального седиментационного цикла [14–18]. Моделирование гидрологических процессов с распределенными параметрами может сыграть важную роль при количественном определении влияния изменений в землепользовании на процессы, происходящие на водосборах, а также позволит получить более глубокие представления о пространственно-временных вариациях компонентов водного баланса гидрологического цикла в масштабе бассейна [19].

Влияние изменения климата и человеческой деятельности на водные ресурсы в бассейне р. Хуэйфа было исследовано в работе [20]; сделан вывод, что уменьшение стока в этом регионе обусловлено человеческой деятельностью и изменением климата. В предыдущих исследованиях было установлено, что модель SWAT является эффективным инструментом для оценки гидрологического процесса в различных временных масштабах — от суточного до годового [21]. При анализе влияния изменений в землепользовании на водные ресурсы данная модель была использована на аридных и полуаридных водосборах для оценки ее применимости [11]. В последние десятилетия реакция гидрологических процессов на изменения в землепользовании широко исследовалась на примере целого ряда водосборов [22, 23]. Однако сложность морфологии бассейна диктует необходимость использования эффективного инструмента при моделировании влияния изменений в землепользовании на водные ресурсы. Модель SWAT охватывает широкий спектр применений и имеет впечатляющую

конфигурацию, ее можно использовать при исследовании районов с недостаточным количеством данных для оценки различных процессов, связанных с управлением водными ресурсами и землепользованием [24, 25].

В проведенном нами исследовании модель SWAT применялась для определения влияния изменений в землепользовании на водные ресурсы в полуаридном бассейне одного из притоков р. Хуанхэ. Актуальность работы обусловлена тем, что данная проблема в условиях полуаридного бассейна изучена недостаточно. Результаты настоящего исследования могут составить основу для обеспечения экологической безопасности р. Хуанхэ и сбережения почвенных и водных ресурсов в ее полуаридном бассейне.

ТЕРРИТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Хуанхэ — вторая по величине и наиболее важная река в Китае. Площадь ее бассейна и общая длина составляют 752 тыс. км² и 5464 км соответственно. Годовой объем стока — 2 % от стока всех рек Китая. Хуанхэ орошает 15 % пахотных земель и удовлетворяет потребности в воде 12 % населения страны, доля ее территории в валовой внутренней продукции составляет 9 % [26]. В среднем течении река имеет 30 небольших притоков, которыми обеспечивается 44 % общего стока р. Хуанхэ. Один из крупнейших притоков Хуанхэ — р. Ихэ, в верхнем течении которой в полуаридной климатической зоне расположен исследуемый нами бассейн р. Дунвань. Бассейн р. Дунвань расположен между 33,5–34,5° с. ш. и 111–112° в. д. в провинции Хунань (рис. 1).

Четыре водохранилища в бассейне р. Дунвань (Сяоланди, Гусянь, Санмэнься и Лухунь) контролируют максимальные уровни паводка и объем стока р. Хуанхэ в ее нижнем течении. Атмосферные осадки выпадают в летний и осенний периоды. Сезон паводков в бассейне р. Дунвань продолжается с июня по сентябрь, а засушливый сезон — с октября по май; примерно 63 % осадков выпадает в период с июля по сентябрь. При стремительном росте численности населения в течение последних 50 лет был реализован ряд программ, направленных на облесение, восстановление растительности, охрану и рациональное использование почвенных и водных ресурсов и строительство водохранилищ. Кроме того, в последние годы в верховьях исследуемого бассейна было реализовано много проектов, связанных с туризмом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходные пространственные данные для симуляционного моделирования с помощью модели взаимодействия почвы, растительного покрова и атмосферных осадков SWAT включают цифровую модель рельефа (ЦМР) с разрешением 90 м, картографические данные о почвенном покрове

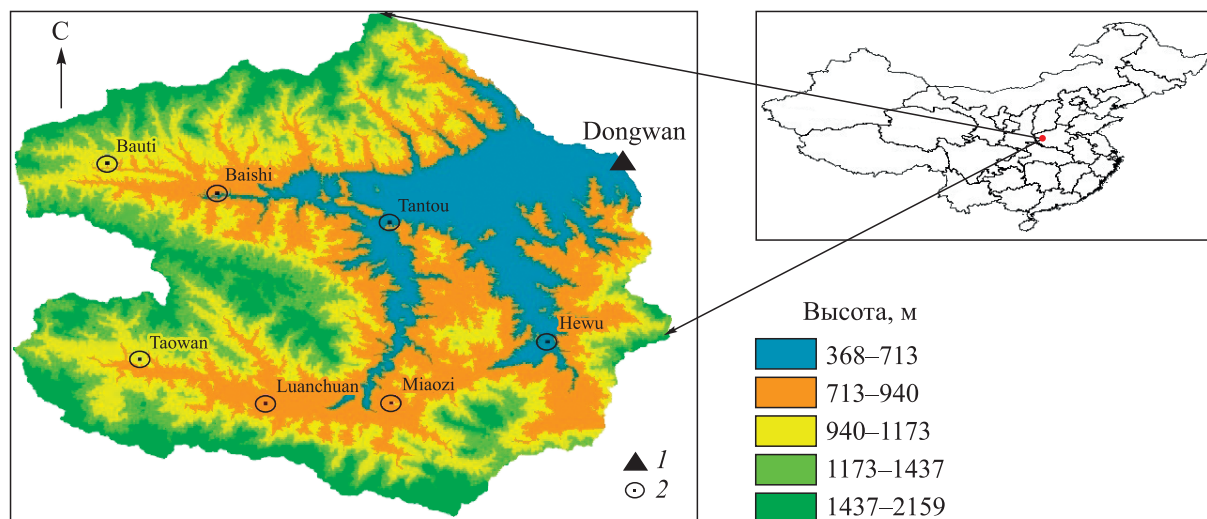


Рис. 1. Расположение района исследования.

1 — гидрологический пост; 2 — осадкомерный пост.

(м-б 1:100 000) и землепользовании (LUCC) (м-б 1:100 000). Данные ЦРМ были взяты из базы глобальных топографических данных, почвенные характеристики были получены в Институте почвоведения Китайской академии наук, а сведения о землепользовании — в Центре данных о ресурсах и экологии Китайской академии наук (RESDC) (<http://www.resdc.cn>). Цифровая модель рельефа использовалась для определения границ бассейна, далее на ее основе были созданы элементарные вычислительные гидрологические единицы реагирования (HRU), характеризующиеся однородностью типов почв, элементов рельефа, видов землепользования. Ежедневные данные об атмосферных осадках и стоке за период 1981–2010 гг. были предоставлены Комиссией по сохранению р. Хуанхэ. Ежедневная метеорологическая информация о таких характеристиках, как солнечная радиация, относительная влажность, скорость ветра, максимальная и минимальная температура, была взята на сайте Китайской службы обмена метеорологическими данными (China Meteorological Data Sharing Service System) (<http://www.cma.gov.cn>).

Модель SWAT представляет собой физически обоснованную полураспределенную гидрологическую модель, которая была использована для расчета влияния изменений в землепользовании в бассейне со сложным рельефом за продолжительный период времени [3, 27]. Блок-схема модели SWAT представлена на рис. 2. Исходная структура моделирования SWAT основана на физических характеристиках водосборного бассейна. Водосбор подразделяется на подбассейны на основе гидрографической

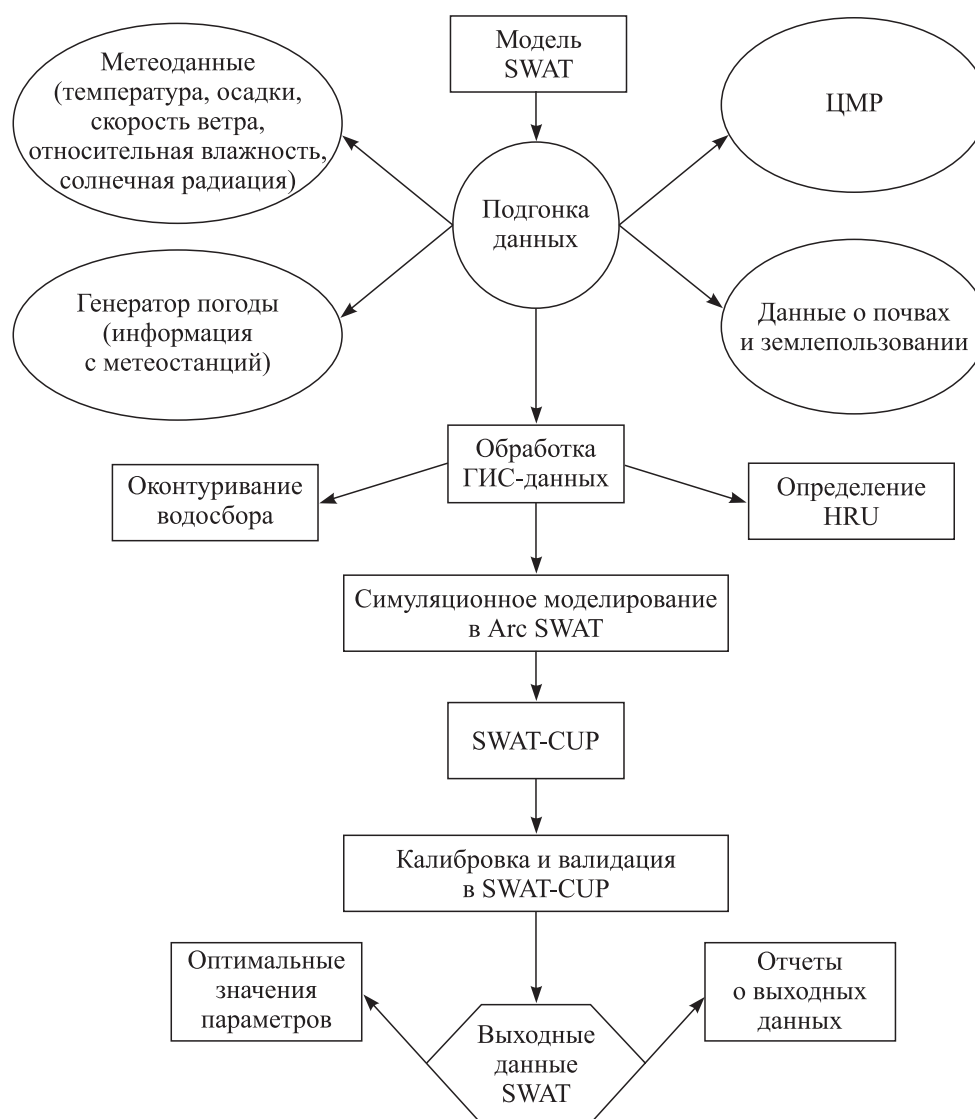


Рис. 2. Блок-схема модели SWAT.

Таблица 1

Список параметров, скорректированных для бассейна р. Дунвань

Параметр	Описание	Скорректированное значение для калибровки
v_CH_K2.rte	Эффективная гидропроводность	49,6
v_CH_N2.rte	Коэффициент шероховатости Маннинга	0,025
r_CN2.mgt	Начальный номер кривой стока SCS для условия увлажнения II	0,06
v_ESCO.hru	Коэффициент компенсации испарения почвой	0,63
v_ALPHA_BNK.rte	Альфа-фактор базисного стока для берегового накопления	0,27
r_SOL_BD.sol	Объемная плотность влаги (г/см ³)	0,15
r_SOL_K.sol	Коэффициент фильтрации почвы в водонасыщенном состоянии (мм/ч)	0,41
r_SOL_AWC.sol	Водоудерживающая способность почвы (мм H ₂ O/мм почв)	0,35
v_GW_REVAP.gw	Коэффициент для повторного испарения	0,12
v_GW_DELAY.gw	Задержка грунтовых вод (дни)	135
v_ALPHA_BF.gw	Альфа-фактор базисного стока (дни)	0,41
v_GWQMN.gw	Пороговая глубина в неглубоко залегающем водоносном слое для обратного потока (мм)	0,95
v_RCHRG_DP.gw	Просачивание из глубокого водоносного слоя	0,13

схемы водотоков, причем каждый суббассейн подразделяется на HRU. В то же время в работе [28] было отмечено, что на значения стока не влияют количество подбассейнов и их площади. Основное уравнение водного баланса в модели SWAT:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{\text{day}} - Q_{\text{surf}} - E_a - W_{\text{seep}} - Q_{\text{gw}}), \quad (1)$$

где SW_t — конечное содержание влаги в почве (мм); SW_0 — начальное содержание влаги в почве в день i ; t — время (дни); R_{day} — количество осадков в день i (мм); Q_{surf} — количество поверхностного стока в день i (мм); E_a — количество эвапотранспирации в день i (мм); W_{seep} — количество влаги, поступающей из почвенного профиля в день i (мм); Q_{gw} — количество возвратного стока в день i (мм).

При моделировании основной речной сети и притоков в программе ArcGIS использована ЦМР. Бассейн был подразделен на 27 подбассейнов и 397 HRU. Анализ чувствительности и неопределенности осуществлялся с помощью программы калибровки и расчета неопределенности модели SWAT (SWAT-CUP). В этой программе объединены процедуры SUFI-2, PSO, GLUE, ParaSol и MCMC с моделью SWAT. Алгоритм последовательного анализа всех возможных источников неопределенностей (SUFI-2) был использован при выполнении анализа чувствительности. Каждый параметр был смоделирован три раза для проверки чувствительности модели. В табл. 1 приведены списки параметров, использованных для калибровки модели SWAT.

При анализе влияния изменений в землепользовании на образование стока исследуемый период был подразделен на два десятилетия: 1981–1990 и 1991–2000 гг. Для первого и второго десятилетий период настройки модели составил два года, т. е. 1981–1982 и 1991–1992 гг. соответственно. Модель SWAT была дополнена метеорологическими и пространственными данными, а имитационный сток представлял собой выходные данные. Имитационный сток и коэффициенты стока оценивались для каждого подбассейна за период 1981–2000 гг. Влияние изменений в землепользовании и пространственные особенности стока в HRU рассматривались на основе двух карт землепользования. Были изучены соотношения между осадками и стоком для различных типов почвенно-растительного покрова, а также влияние почвенно-растительного покрова на соотношение между осадками и стоком в масштабе отдельного водосбора.

Оценка эффективности модели осуществлялась с помощью коэффициента эффективности модели Нэша–Сатклиффа (E_{ns}) и коэффициента детерминации (R^2):

$$E_{\text{ns}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o - \bar{Q}_o)^2}, \quad (2)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - \bar{Q}_o)(Q_s - \bar{Q}_s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_o - \bar{Q}_o)^2 \sum_{i=1}^n (Q_s - \bar{Q}_s)^2}} \right]^2, \quad (3)$$

где i — временной шаг; n — общее количество модельных временных шагов; Q_o и Q_s — наблюдаемые и модельные значения стока соответственно. Величина E_{ns} удовлетворительная, если значение $E_{ns} > 0,5$. Чем больше значение E_{ns} , тем выше точность модели. Коэффициент детерминации используется в качестве степени устойчивости линейной связи между модельными и наблюдаемыми временными рядами. Значения R^2 варьируют между 0 и 1. Точность модели является почти идеальной, если значение R^2 близко к единице, и удовлетворительной, если $R^2 > 0,6$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Калибровка и проверка достоверности модели. Модель SWAT была успешно использована при исследовании полуаридного бассейна р. Дунвань. Калибровка (охватывает период 1983–1986 гг.) и валидация (1987–1990 гг.) модели SWAT для десятилетия 1981–1990 гг. показаны на рис. 3. Статистические параметры E_{ns} и R^2 продемонстрировали хорошее согласие между наблюдаемыми и смоделированными значениями для второго десятилетия — 1991–2000 гг. (табл. 2). Оценка эффективности модели SWAT в месячном временном масштабе показана на рис. 4 и в табл. 2. В процессе калибровки всего было оптимизировано 13 параметров. Наиболее чувствительным оказался такой параметр, как CN. На этапе имитационного моделирования для первого десятилетия (1981–1990 гг.) значение CN для бассейна составило 63 по причине преобладания лесного покрова. На уровне HRU значения CN для сельского и лесного хозяйства составили 77 и 63 соответственно, варьируя в зависимости от типа землепользования. На этапе моделирования для второго десятилетия (1991–2000 гг.) значение CN меняется от 39 до 81 в зависимости от степени урбанизации в районе исследования. При увеличении значений, вычисленных по методу Службы охраны почв (SCS), возрастает объем стока, поскольку увеличивается площадь водонепроницаемой поверхности из-за интенсивной урбанизации.

Влияние изменений в землепользовании на водные ресурсы. В период 1991–2000 гг. интенсивная урбанизация стала причиной сокращения водных ресурсов в бассейне р. Дунвань. Анализ гидрологического процесса выявил изменение водного баланса в 1991–2000 гг. по сравнению с 1981–1990 гг. Согласно наблюдениям, поверхностный сток и эвапотранспирация уменьшились в районе исследования в результате увеличения аккумулированной влаги.

К основным типам подстилающей поверхности в бассейне относятся леса, пастбища, сельскохозяйственные угодья, а также водные объекты и урбанизированные территории. В период с 1991 по 2000 г. в районе исследования произошло увеличение площади водоемов (с 1,42 до 1,75 %), городских земель (с 4,26 до 4,56 %) и других типов землепользования — бесплодных, засоленных земель, водноболотных угодий (с 0,07 до 0,21 %). Площади сельскохозяйственных угодий, напротив, уменьшились — с 45,9 до 44,2 %.

В 1981–1990 гг. в бассейне р. Дунвань площадь, занятая лесами, составляла 88 % территории, лугопастбищными угодьями — 8 %, сельскохозяйственными землями — 3,5 %. Однако в 2000 г. площадь сельскохозяйственных земель и пастбищ уменьшилась на 1,5 и 0,5 % соответственно из-за увеличения на 1 % урбанизированных территорий, при этом лесопокрытая площадь в районе исследования увеличилась на 0,5 %.

В целом предполагается, что в XXI в. изменения в землепользовании будут сопровождаться сокращением площади сельскохозяйственных земель вследствие интенсивной урбанизации и масштабного опустынивания. Кроме того, в результате выполнения Программы преобразования пахотных земель в лесные и лугопастбищные угодья (CCFGP) площадь последних увеличилась с 900 гм^2 (гм^2 — квадратный гектометр — единица длины в Международной системе единиц, равная 100 м^2) до 34 100 гм^2 за 2000–2009 гг., что, в свою очередь, привело к росту изменений в землепользовании в районе исследования [29].

Создание Национального лесного парка «Остров драконов», а также другие виды туристской деятельности привели к дальнейшему уменьшению поверхностного стока в районе исследования [13]. Результаты имитационного моделирования с помощью модели SWAT выявили изменения поверх-

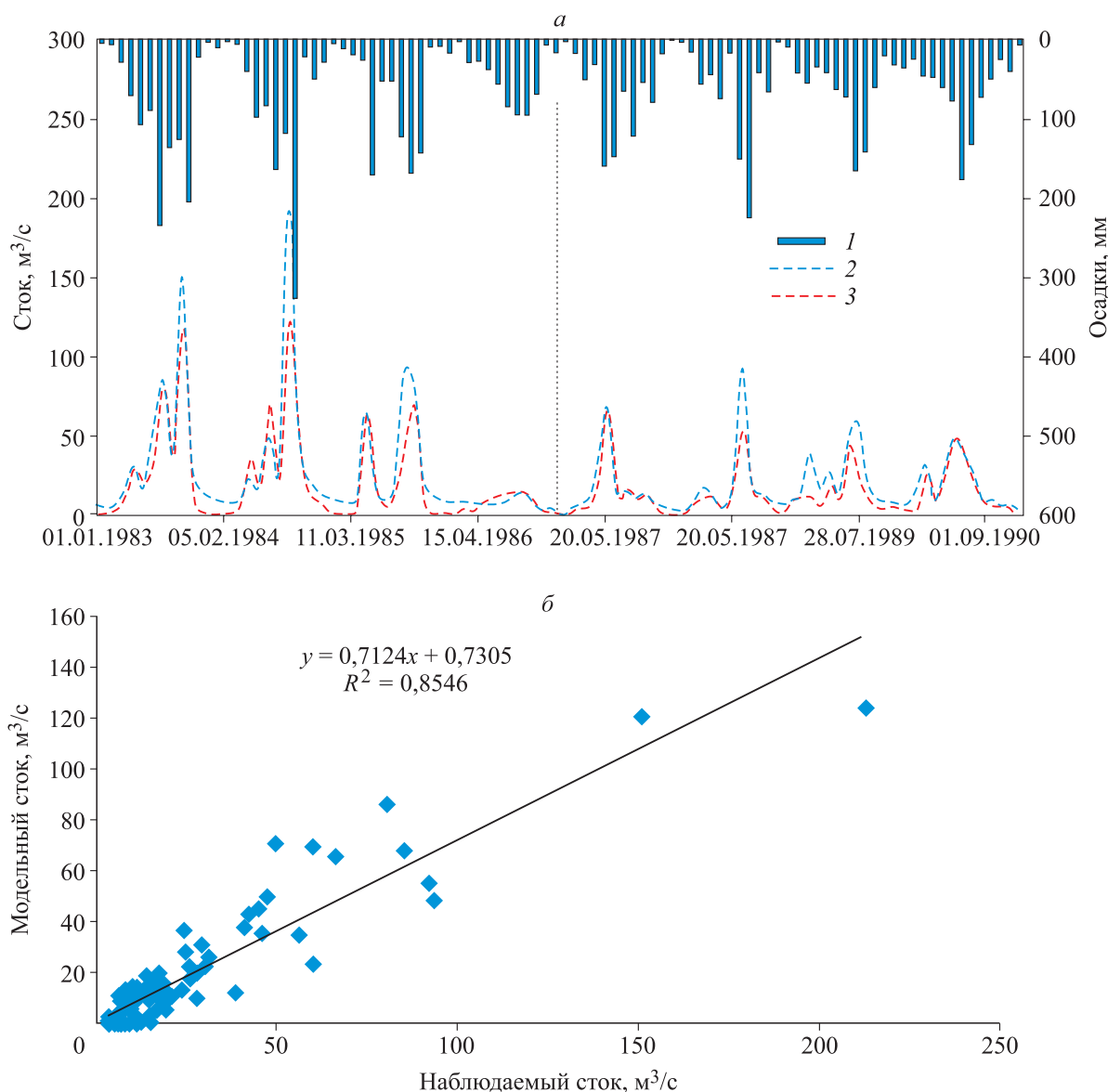


Рис. 3. Калибровка (1983–1986 гг.) и валидация (1987–1990 гг.) модели SWAT в месячном временном масштабе (а) и график соответствия наблюдаемых и модельных временных рядов (б).

1 — осадки; 2 — наблюдаемый сток; 3 — смоделированный сток.

ностного и речного стока, а также эвапотранспирации за период исследования. Значения последней уменьшились в результате изменений в почвенно-растительном покрове. Эвапотранспирация относится к факторам, непосредственно влияющим на изменения водных ресурсов; среди других факторов — скорость инфильтрации и водоудерживающая способность почвы, которые привели к увели-

Таблица 2

Статистика калибровки и валидации модели SWAT

Период, годы	Годовой временной масштаб				Месячный временной масштаб			
	калибровка (1983–1986)		валидация (1987–1990)		калибровка (1993–1996)		валидация (1997–2000)	
	E_{ns}	R^2	E_{ns}	R^2	E_{ns}	R^2	E_{ns}	R^2
1981–1990	0,97	0,93	0,78	0,75	0,81	0,87	0,77	0,70
1991–2000	0,91	0,89	0,88	0,86	0,83	0,84	0,90	0,92

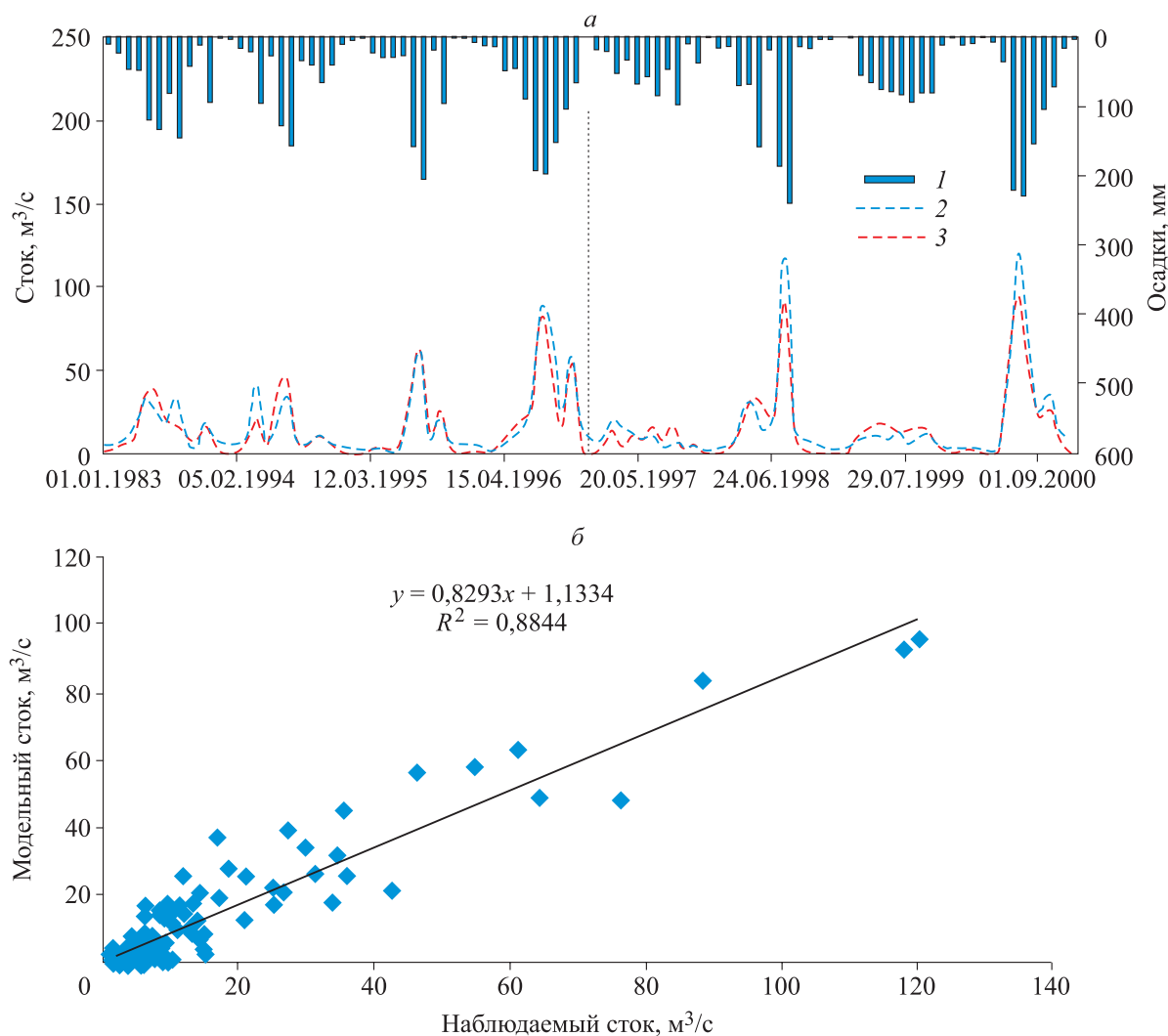


Рис. 4. Калибровка (1993–1996 гг.) и валидация (1997–2000 гг.) модели SWAT в месячном временном масштабе (а) и график соответствия наблюдаемых и модельных временных рядов (б).

1–3 — см. рис. 3.

чению поверхностного стока в результате увеличения водонепроницаемой поверхности в районе исследования. Приведенный в работе анализ может служить основой при реализации мер, направленных на уменьшение дальнейших изменений в землепользовании, вызванных преобразованием территории. Необходимо принятие альтернативных решений по сохранению и защите водных ресурсов в районе исследования. Результаты настоящего исследования могут оказаться полезными при принятии решений в сфере управления водными ресурсами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С привлечением полураспределенной гидрологической модели исследовано влияние изменений в землепользовании на водные ресурсы в полуаридном бассейне системы р. Хуанхэ. Полученные результаты оказались удовлетворительными. Анализ изменений в землепользовании в бассейне р. Дунвань выявил увеличение площади урбанизированных территорий и водных объектов и сокращение площади сельскохозяйственных и лугопастбищных угодий. Наиболее выраженные изменения в землепользовании были зафиксированы в 1990–2000 гг., и они сопровождались минимальными вариациями значений параметров гидрологической модели. Установлено, что влияние изменений в землепользовании на водные ресурсы возрастает медленно по причине увеличения площади лугопастбищных

угодий, водных объектов и урбанизированных территорий. Лугопастбищные угодья были трансформированы в урбанизированные территории и водные объекты в результате экономического развития района исследования. Изменения в землепользовании также оказали влияние на соотношение осадков и стока в масштабе водосборного бассейна. Таким образом, надлежащее понимание влияния изменений в землепользовании и связанных с ними изменений стока может помочь экономистам и руководителям водохозяйственных органов в деле управления водными ресурсами в более широких масштабах.

Работа выполнена при поддержке совместного проекта NSFC-ICIMOD (41761144075), Комиссии по высшему образованию (HEC) Пакистана и Комитета постдокторантуры Китая (209071).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Baker T.J., Miller S.N.** Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed // *Journ. of Hydrology*. — 2013. — Vol. 486. — P. 100–111.
2. **Memarian H., Balasundram S.K., Abbaspour K.C., Talib J.B., Boon Sung C.T., Sood A.M.** SWAT-based hydrological modelling of tropical land-use scenarios // *Hydrological Sciences Journ.* — 2014. — Vol. 59, N 10. — P. 1808–1829.
3. **Babar S., Ramesh H.** Streamflow response to land use—land cover change over the Nethravathi River Basin, India // *Journ. of Hydrologic Engineering*. — 2015. — Vol. 20, N 10. — P. 05015002.
4. **Mango L.M., Melesse A.M., McClain M.E., Gann D., Setegn S.** Land use and climate change impacts on the hydrology of the upper Mara River Basin, Kenya: results of a modeling study to support better resource management // *Hydrology and Earth System Sciences*. — 2011. — Vol. 15, N 7. — P. 2245–2258.
5. **Chen J., Wu Y.** Advancing representation of hydrologic processes in the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) through integration of the TOPographic MODEL (TOPMODEL) features // *Journ. of Hydrology*. — 2012. — Vol. 420. — P. 319–328.
6. **Yan B., Fang N.F., Zhang P.C., Shi Z.H.** Impacts of land use change on watershed streamflow and sediment yield: An assessment using hydrologic modelling and partial least squares regression // *Journ. of Hydrology*. — 2013. — Vol. 484. — P. 26–37.
7. **Wagner P.D., Kumar S., Schneider K.** An assessment of land use change impacts on the water resources of the Mula and Mutha Rivers catchment upstream of Pune, India // *Hydrology and Earth System Sciences*. — 2013. — Vol. 17, N 6. — P. 2233–2246.
8. **Zhao G., Tian P., Mu X., Jiao J., Wang F., Gao P.** Quantifying the impact of climate variability and human activities on streamflow in the middle reaches of the Yellow River basin, China // *Journ. of Hydrology*. — 2014. — Vol. 519. — P. 387–398.
9. **Brath A., Montanari A., Moretti G.** Assessing the effect on flood frequency of land use change via hydrological simulation (with uncertainty) // *Journ. of Hydrology*. — 2006. — Vol. 324, N 1–4. — P. 141–153.
10. **Meaurio M., Zabaleta A., Uriarte J.A., Srinivasan R., Antigüedad I.** Evaluation of SWAT models performance to simulate streamflow spatial origin. The case of a small forested watershed // *Journ. of Hydrology*. — 2015. — Vol. 525. — P. 326–334.
11. **Li Q., Yu X., Xin Z., Sun Y.** Modeling the effects of climate change and human activities on the hydrological processes in a semiarid watershed of loess plateau // *Journ. of Hydrologic Engineering*. — 2013. — Vol. 18, N 4. — P. 401–412.
12. **Lin B., Chen X., Yao H., Chen Y., Liu M., Gao L., James A.** Analyses of landuse change impacts on catchment runoff using different time indicators based on SWAT model // *Ecological Indicators*. — 2015. — Vol. 58. — P. 55–63.
13. **Yao C.H., Chang L., Ding J., Li Z.H., An D.O., Zhang Y.** Evaluation of the effects of underlying surface change on catchment hydrological response using the HEC-HMS model // *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*. — 2014. — Vol. 364. — P. 145–150.
14. **Jiang S., Ren L., Yong B., Singh V.P., Yang X., Yuan F.** Quantifying the effects of climate variability and human activities on runoff from the Laohahe basin in northern China using three different methods // *Hydrological Processes*. — 2011. — Vol. 25, N 16. — P. 2492–2505.
15. **Chen Z., Chen Y., Li B.** Quantifying the effects of climate variability and human activities on runoff for Kaidu River Basin in arid region of northwest China // *Theoretical and Applied Climatology*. — 2013. — Vol. 111, N 3. — P. 537–545.
16. **Wang H., Chen Y., Li W., Deng H.** Runoff responses to climate change in arid region of northwestern China during 1960–2010 // *Chinese Geographical Science*. — 2013. — Vol. 23, N 3. — P. 286–300.
17. **Yang X., Ren L., Liu Y., Jiao D., Jiang S.** Hydrological response to land use and land cover changes in a sub-watershed of West Liaohe River Basin, China // *Journ. of Arid Land*. — 2014. — Vol. 6, N 6. — P. 678–689.
18. **He Y., Wang F., Mu X., Yan H., Zhao G.** An assessment of human versus climatic impacts on Jing River Basin, Loess Plateau, China // *Advances in Meteorology*. — 2015. — Vol. 2015 [Электронный ресурс]. — <https://doi.org/10.1155/2015/478739> (дата обращения 18.08.2021).

19. **Guo Y., Shen Y.** Quantifying water and energy budgets and the impacts of climatic and human factors in the Haihe River Basin, China: 2. Trends and implications to water resources // *Journ. of Hydrology*. — 2015. — Vol. 527. — P. 251–261.
20. **Zhang A., Zhang C., Fu G., Wang B., Bao Z., Zheng H.** Assessments of impacts of climate change and human activities on runoff with SWAT for the Huifa River Basin, Northeast China // *Water Resources Management*. — 2012. — Vol. 26, N 8. — P. 2199–2217.
21. **Fan J., Tian F., Yang Y., Han S., Qiu G.** Quantifying the magnitude of the impact of climate change and human activity on runoff decline in Mian River Basin, China // *Water Science and Technology*. — 2010. — Vol. 62, N 4. — P. 783–791.
22. **Ghoraba S.M.** Hydrological modeling of the Simly Dam watershed (Pakistan) using GIS and SWAT model // *Alexandria Engineering Journ.* — 2015. — Vol. 54, N 3. — P. 583–594.
23. **Santra P., Das B.S.** Modeling runoff from an agricultural watershed of western catchment of Chilika lake through ArcSWAT // *Journ. of Hydro-Environment Research*. — 2013. — Vol. 7, N 4. — P. 261–269.
24. **Tang Y., Tang Q., Tian F., Zhang Z., Liu G.** Responses of natural runoff to recent climatic variations in the Yellow River basin, China // *Hydrology and Earth System Sciences*. — 2013. — Vol. 17, N 11. — P. 4471–4480.
25. **Zeng S., Zhan C., Sun F., Du H., Wang F.** Effects of climate change and human activities on surface runoff in the Luan River Basin // *Advances in Meteorology*. — 2015. — Vol. 2015. — P. 1–12.
26. **Miao C., Ni J., Borthwick A.G., Yang L.** A preliminary estimate of human and natural contributions to the changes in water discharge and sediment load in the Yellow River // *Global and Planetary Change*. — 2011. — Vol. 76, N 3–4. — P. 196–205.
27. **Zhang Z., Si H., Feng B., Wang Y., Lv M., Wagan B.** Research of hydrological responses to land-use variability in a semiarid watershed based on SWAT model // *Fresenius Environmental Bulletin*. — 2014. — Vol. 23, N 5. — P. 1190–1197.
28. **Abu-Allaban M., El-Naqa A., Jaber M., Hammouri N.** Water scarcity impact of climate change in semi-arid regions: a case study in Mujib basin, Jordanian Arabic // *Journ. of Geosciences*. — 2015. — Vol. 8, N 2. — P. 951–959.
29. **Wang X.** Sustainable land use changes in the north west provinces of China under the Conversion of Cropland to Forest and Grassland Program, 2007 [Электронный ресурс]. — DOI: 10.25911/5D78 D8C63E034 (дата обращения 20.08.2021).

Поступила в редакцию 24.11.2021

После доработки 18.04.2022

Принята к печати 01.11.2022