

Амиргалиева А.¹, Абдрахимов Р.¹, Гафуров А.², Полякова С.¹

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби,
Казахстан, г. Алматы, e-mail lunnyisvet@mail.ru

²Немецкий центр исследования Наук о Земле,
Германия, г. Потсдам, e-mail gafurov@gfz-potsdam.de

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ
СНЕЖНОГО ПОКРОВА И СНЕГОВОГО СТОКА РЕК
ИЛЕ-БАЛКАШСКОГО БАСЕЙНА
С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА “DEGREE-DAY”
(на примере р. Киши Алматы)**

В статье представлены результаты апробации и использования метода формирования стока рек «Degree-Day». На примере реки Киши Алматы Иле-Балкашского бассейна показана работоспособность метода моделирования и определены границы её применимости. Моделирование формирования стока является необходимым элементом для стимуляции эффективности процессов и управления земельными и водными ресурсами. Хотя и нет исчерпывающего руководства, которое могло бы помочь смоделировать характеристики стока достаточно точно по сравнению с измеренными значениями расхода и его составляющих. Таким образом, цели исследования, заключаются в следующем: определить эффективность расчета гидрометеорологических характеристик для моделирования с помощью метода «Degree-Day»; рассмотреть представленные границы величин проверочных составных частей метода и результативность для содержащей в себе рекомендации статистики; и с точностью выяснить самое существенное исходное положение для соотнесения входных данных метода опираясь на результаты анализа и конкретных проектов моделирования стока рек. Рассчитаны рекомендованные графические и статистические данные: эффективность Нэша-Сатклиффа (NSE), процентная разница между смоделированными и наблюдаемыми данными (PBIAS) и средняя квадратическая ошибка относительно стандартного отклонения измеренных данных (RSR), сделаны доступными и графические методы, которые употребляются при оценке модели. Смоделированы ежедневные данные по температуре воздуха и осадкам по метеостанции Есик за период 2000-2015 гг., которые являются основными для моделирования формирования стока методом «Degree-Day».

Ключевые слова: калибровка, проверка, начало снегонакопления, конец снеготаяния, объем снега, высота снега, температура воздуха, количество осадков.

Amirgaliyeva A.¹, Abdrahimov R.¹, Gafurov A.², Polyakova S.¹

¹Al-Farabi Kazakh National University,
Kazakhstan, Almaty, e-mail lunnyisvet@mail.ru

²GFZ German Research Centre for Geosciences,
Germany, Potsdam, e-mail gafurov@gfz-potsdam.de

**Modeling the formation of the dynamics of snow cover and
snow flow of the rivers of the Ile-Balkhash basin using the “Degree-Day” method
(using the example of the Kishi Almaty River)**

The article presents the results of testing and using the method of model of formation of the flow of the rivers “Degree-Day”. Using the example of the Kishi Almaty River in the Ile-Balkhash Basin, the model’s workability is shown and the limits of its applicability are determined. The method of model of flow formation is an essential element for stimulating the efficiency of efficiency and management of land and water resources. Thus, the objectives of the study are as follows: to define the effectiveness of the calculation of hydro meteorological characteristics for the model “Degree-Day”; consider the presented ranges of sampling values and efficiency for recommended statistics, and establish basic principles for evaluating the model based on the results of the analysis and specific projects for modeling river flow. Recommended graphics and statistics are calculated: Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), percentage difference between simulated and observed data (PBIAS), and the ratio of the standard error relative to the standard deviation of the measured data (RSR), provide graphical methods

that will be used to evaluate the model. Simulated daily data on air temperature and precipitation at the Esik meteorological station for the period 2000-2015, which are the main ones for the Degree-Day method of flow formation model.

Key words: calibration, validation, start of snow accumulation, end of snowmelt, snow volume, snow height, air temperature, rainfall.

Әмірғалиева А.¹, Әбдірахимов Р.¹, Гафуров А.², Полякова С.¹

¹әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
Қазақстан, Алматы қ., e-mail lunnyisvet@mail.ru

²PhD, Жер туралы Ғылым Неміс зерттеу орталығы,
Германия, Потсдам қ., e-mail gafurov@gfz-potsdam.de

“Degree-Day” әдісінің көмегімен Іле-Балқаш алабы өзендерінің қар жамылғысы мен қар ағындысының қалыптасу динамикасын модельдеу (Кіші Алматы өзені мысалында)

Мақалада «Degree-Day» өзен ағындысының қалыптасу әдісін қолдану мен апробация нәтижелері келтірілген. Іле-Балқаш алабының Кіші Алматы өзені мысалында модельдеу әдісінің жұмысқа қабілеттілігі және оны қолданудың шекаралары анықталды. Ағынды қалыптастыру моделі үрдістер тиімділігін ширеңдету үшін және су мен жер қорларын басқарудағы қажетті элемент болып табылады. Ағынды сипаттамаларын өлшенген су өтімдері мен оның құраушыларымен нақты салыстырмалы түрдегі сипаттамаларын модельдеп беруге көмек көрсететін толыққанды басшылық жоқ. Сонымен, зерттеу мақсаты мынада: «Degree-Day» әдісімен модельдеу үшін гидрометеорологиялық сипаттамалардың есептеу тиімділігін анықтау; ұсынылған статистика үшін таңдаулы элементтер мәндерінің берілген ауқымын қарастыру және өзен ағындысын модельдеудің нақты жобалары мен талдау нәтижелері негізінде модельді бағалау үшін негізгі қағидаларын анықтау. Ұсынылған графикалық және статистикалық мәліметтер есептелінді. Нэш-Сатклиффа тиімділігі (NSE), (PBIAS) пайыздық ауытқу мен орташа квадраттық қателіктің өлшенген мәліметтердің стандартты ауытқуына қатынасы (RSR), модельді бағалау кезінде қолданылатын графикалық әдістер де келтірілді. «Degree-Day» әдісімен ағынды қалыптасуын модельдеу үшін негізгі болып табылатын 2000-2015 жж. аралығындағы Есік метеостансасы бойынша күнделікті ауа температурасы мен жауын-шашынның мәліметтері модельденді.

Түйін сөздер: калибровка, тексеру, қар жиналудың басы, қар ерудің соңы, қардың көлемі, қардағы су қоры, ауа температурасы, жауын-шашын мөлшері.

Введение

Компьютерные модели стокообразования в бассейнах рек могут сэкономить время и средства, за счет возможности выполнять долгосрочное моделирование воздействия процессов формирования стока и в последующем управлять качеством и количеством воды. Благодаря этим моделям можно упростить влияние на окружающую среду осуществления основанное на специальном исследовании заключения о предстоящем развитии и исходе и процесса действия указаний для изменения к лучшему качества используемой воды и самой почвы. Входные и выходные данные модели при решении гидрологических задач, должны быть научно обоснованными, надежными и оправданными (U.S. EPA, 2002).

Для выполнения расчетов с использованием водных и выходных данных для метода моделирования формирования снежного покрова и снегового стока «Degree-Day» использовались

следующие определения Это анализ чувствительности, калибровка модели, проверка модели (Ma et al., 2000; Refsgaard, 1997; ASCE, 1993) и оценка эффективности, которая выполнялась по рекомендациям нижеследующих авторов (Donigian et al., 1983; Ramanarayanan et al., 1997; Gupta et al., 1999; Motovilov et al., 1999; Saleh et al., 2000; Santhi et al., 2001; Singh et al., 2004; Bracmort et al., 2006; Van Liew et al., 2007). Следует отметить, что еще нет общепринятых утвержденных рекомендаций, но разработаны и применяются определенные статистические данные.

Расчет формирования входных данных моделирования стокообразования снегового стока представлено на примере реки Киши Алматы, Иле-Балкашского водохозяйственного бассейна. Зона формирования стока рек Иле-Балкашского бассейна находится, в основном, в горных и предгорных районах, а их питание складывается из талых снеговых, ледниковых и дождевых вод. Режим годового стока рек

зависит не только от суммы годовых осадков, но и от таяния высокогорных снегов и льдов, накопившихся за предыдущие многолетия.

Материал и методы

Методы оценки моделирования «Degree-Day»

Для выбора, используемых моделей формирования стока в бассейнах рек, был проведен обзор литературы, по критериям калибровки, проверки и применимости модели к формированию стока в бассейнах горных рек (Mogias et al., 2007). Для этого принимались в расчет обязательные для решения вполне точной и вещественно определенной задачи и наставления по их использованию, характеристики всего без изъятия, статистического и графического методов. Для оценки метода “Degree-Day” при моделировании динамики снежного покрова и снегового стока реки Киши Алматы, применялись и были учтены нижеследующие факторы. Это – ее надежность, которая при использовании метода по отношению к различным компонентам, параметрам и климатическим условиям, повсеместно используется в гидрологической практике в различных странах мира. По рекомендации автора (Boyle et al., 2000), можно прийти к соглашению на основе взаимной уступки при возникновении разночтений между осуществляемыми на длительный срок смещением и остаточной дисперсией. При этом смещение, по сравнению с наблюдаемыми значениями данных измеряет среднюю тенденцию значений моделируемых характеристик. В свою очередь, остаточная дисперсия, является разницей между измеренными и смоделированными значениями. Разница, при этом чаще всего оценивается по (RMSE), которая имеет место быть остаточной средней квадратичной или средней квадратической ошибке. В соответствии с рекомендациями (Legates and McCabe, 1999), следует применять дающее правильное объяснение статистические входные данные. Для этого предложено включать хотя бы одну безразмерную статистику, индекс абсолютной ошибки, а также включить одну графическую методику.

Для апробации метода модели выбран водосбор реки Киши Алматы, который не подвержен хозяйственной деятельности, то есть имеет в настоящее время естественное условие стокообразования.

Для использования метода модели «Degree-Day», выполнен анализ следующих гидрометеорологических элементов – снежный покров и питание реки, на основе материалов, публикуемых в справочной литературе Гидрометеорологической службы Казахстана.

Снежный покров

Длительность периода залегания снежного покрова, его сроки становления и схода, высота, плотность снега, запас воды в нем к периоду начала снеготаяния зависят от широты и рельефа местности. *Появление снежного покрова* наблюдается в высокогорных районах исследуемого бассейна в начале сентября. Более чем в 70-80% случаев выпавший первый снег на территории исследуемого бассейна реки Киши Алматы, не покрывается сплошным снежным покровом. *Устойчивый снежный покров* формируется в левобережной части р. Иле, к востоку от бассейна р. Киши Алматы на высотах 500-1000 м максимум приходится в среднем на 1-10 февраля. В горных районах левобережной части бассейна р. Иле к востоку от р. Киши Алматы наибольшая высота снега с увеличением высоты местности на 100 м увеличивается примерно на 4-5 см, а на высотах 2500-3000 м снежный покров достигает 100 см и более. *Отношение массы снежного покрова в его объем (то есть его плотность)*, также, как и высота, увеличивается в зимний период, достигая своего максимума в период снеготаяния. В горных районах при наибольшем снегонакоплении плотность снега в среднем также колеблется в пределах от 0,20-0,30, но на больших высотах в горах она может достигать 0,40 и больше. *Максимальные запасы воды в снежном покрове* в исследуемом регионе распределяются неравномерно.

Сход снежного покрова в левобережной части бассейна р. Иле снежный покров сходит в первой-второй декаде марта, а в предгорьях северного склона Жетису Алатау, Кунгей и Терскей Алатау – в конце марта начале апреля (Ресурсы поверхностных вод СССР, 1970).

Питание рек

Дождевые осадки не в полной мере питают снеговой сток в период половодья. Величина подземного питания, не столь велико. На большинстве рек верхней левобережной части реки Иле грунтовая составляющая то же обычно превосходит снеговую в 1,5-2 раза (Ресурсы поверхностных вод СССР, 1970).

После выбора методики расчета формирования стока и подбора соответствующих материалов с помощью программы QGIS создана карта цифровой модели водосбора реки Киши Алматы, которая была получена на основе космических снимков ДЗЗ (SRTM 90) и представлена на рисунке 1. На территории водосбора расположена автоматическая метеостанция (далее – АМС) Медеу, наблюдения за метеорологическими элементами

ведутся по ней с 2015 года. По этой причине выбрана близ расположенная к бассейну реки метеостанция Есик, наблюдения по которой проводятся с 1937 года. Данные по метеостанции, а именно ежедневная температура воздуха и количества осадков необходимы для построения графика и выбора параметров пороговой температуры воздуха (T_0) в диапазоне от -5 до $+5$ °С и запас воды в снеге (C_m) в диапазоне от 2 до 8 мм.

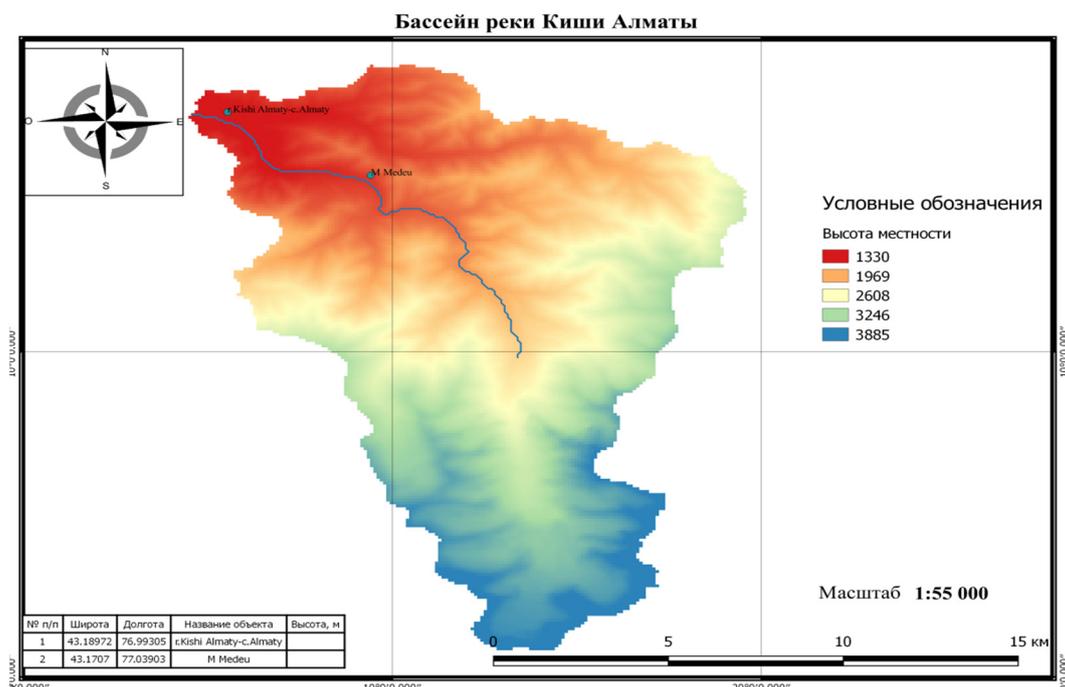


Рисунок 1 – Бассейн реки Киши Алматы

Результаты и обсуждение

Моделирование процесса формирования стока в бассейне реки Киши Алматы выполнено с использованием двух методов – статистического и графического. Ряды гидрометеорологических характеристик за многолетний период собраны с учетом рекомендаций (Legates and McCabe, 1999). При этом рассчитаны: безразмерная статистика и статистика индекса абсолютной ошибки с дополнительной информацией, такой как стандартное отклонение измеренных данных, и построен график смоделированных и наблюдаемых гидрометеорологических характеристик.

При апробации модели были определены:

1. *эффективность Нэша-Сатклиффа (NSE)*: NSE вычислено, по уравнению 1:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{набл.} - Y_i^{смод.})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{набл.} - Y_i^{ср.многог.})^2} \quad (1)$$

где, $Y_i^{набл.}$ – i -ое наблюдаемое значение оцениваемой составляющей; $Y_i^{смод.}$ – i -ое смоделированное значение оцениваемой составляющей; $Y_i^{ср.многог.}$ – среднее многолетнее значение наблюдаемой составляющей.

Данная характеристика имеет следующие величины:

$$(T_0=1, C_m=7) \quad -1,542669$$

NSE находится в диапазоне $\leq 0,0$, что характеризуется условием – среднее наблюдаемое значение является лучшим показателем, чем моделируемое значение.

Процентное смещение (PBIAS): Процентная разница между смоделированными и наблюдаемыми данными (PBIAS) рассчитывалось по следующему выражению:

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{набл.} - Y_i^{смод.}) * (100)}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{набл.})} \right] \quad (2)$$

где, PBIAS – это отклонение оцениваемых данных, выраженное в процентах.

PBIAS по результатам расчетов имеет следующие величины $-0,03928$ и $-0,03828$, что положительно характеризует использование данной модели.

Коэффициент стандартного отклонения наблюдений RMSE (RSR)

RMSE по рекомендациям (Chu and Shirmonhamadi, 2004; Singh et al., 2004; Vazquez-AmáBILE and Engel, 2005) является одним из наиболее широко применяемых статис-

тических величин об ошибках в использовании моделирования метода динамики формирования снежного покрова и снегового стока. RSR рассчитывается как отношением RMSE к стандартному отклонению измеренных данных, как показано в уравнении 3:

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{набл.}} = \frac{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{набл.} - Y_i^{смод.})^2} \right]}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{набл.} - Y^{ср.мног.})^2} \right]} \quad (3)$$

Рассчитанные величины RSR, по модели формирования стока водосбора Киши Алматы имеют следующие значения $1,594575$ и $1,574511$ что незначительно превышает рекомендуемые нормы.

По результатам калибровки параметров за период 2000-2015 гг., были определены следующие гидрометеорологические характеристики: пороговая температура $T_0 = 1 \text{ } ^\circ\text{C}$ и $2 \text{ } ^\circ\text{C}$, высота снежного покрова $C_m = 7 \text{ мм}$ и 8 мм . Значения результатов расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты выборки параметров калибровки по ежедневным данным температуре воздуха и количества осадков на метеостанции Есик

Калибровка параметров	NSE	PBIAS	RSR
$(T_0=1, C_m=7)$	-1,542669	-0,03928	1,594575
$(T_0=1, C_m=8)$	-1,479083	-0,03848	1,574511

Графическое изображение наблюдаемых и смоделированных данных представлены на рисунке 2.

Из рисунка 2 видно, что смоделированные значения температуры воздуха и осадков за

период снегонакопления и таяния его за 2000-2015 гг. позволяют считать использование модели формирования стока в процессе снеготаяния в водосборе реки Киши Алматы эффективной.

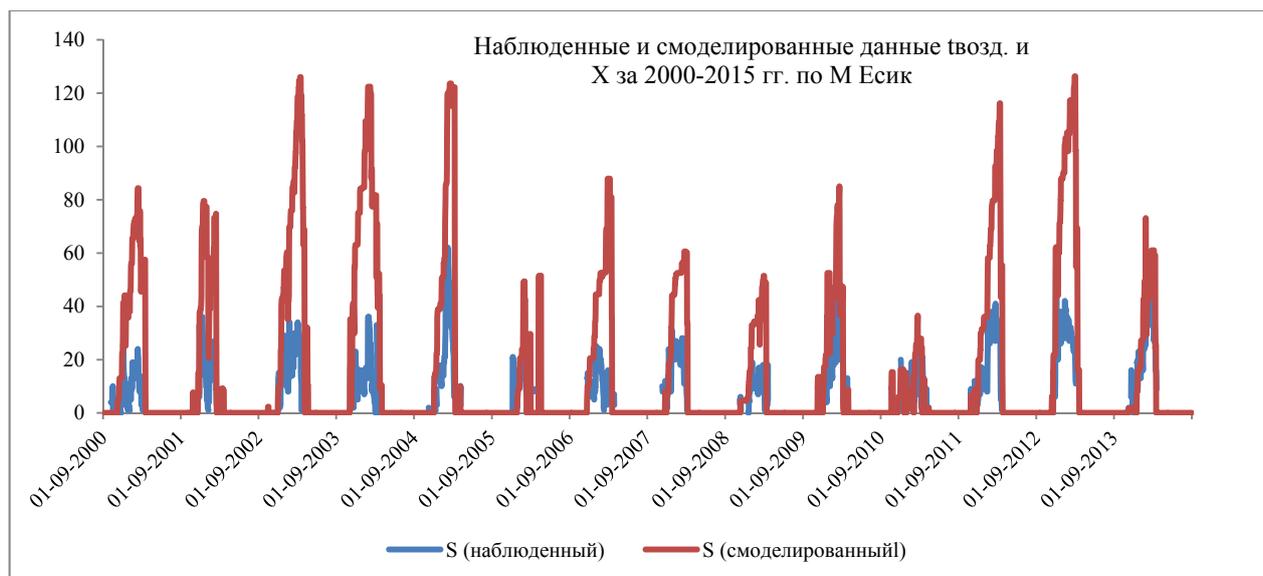


Рисунок 2 – Наблюденные и смоделированные ежедневные данные по температуре воздуха и осадкам по М Есик за период 2000-2015 гг.

Выводы

По результатам проведенных исследований основных гидрометеорологических характеристик, влияющих на стокообразование бассейнов горных рек можно сделать следующие выводы.

1) Смоделированные и наблюдаемые значения входных параметров метода модели “Degree-Day” процессов снегонакопления и снеготаяния находятся в пределах допустимых значений.

2) Смоделированная величина запаса воды в снеге в большинстве случаев превосходят натурные его значения. Расхождение значений обуславливается расположением метеостанции Есик, которая находится выше расчетного водосбора в 30 км.

3) характеристики NSE находятся в диапазоне $\leq 0,0$, равны -1,542669 и -1,479083; процентное соотношение PBIAS по результатам расчетов имеет следующие величины -0,03928 и -0,03828, что характеризует положительные условия применимости данной модели к решению задач стокообразования в бассейне рассматриваемой реки RSR равные 1,594575 и 1,574511 что, в свою очередь, незначительно превышает рекомендуемые нормы

4) Аprobация оценки входных данных метода моделирования “Degree-Day”, стокообразования горных рек, позволяет нам более широко использовать ее при моделировании формирования волны половодья в весенний период в бассейне реки Киши Алматы.

Литература

- ASCE. 1993. Criteria for evaluation of watershed models. *J. Irrigation Drainage Eng.* 119(3): 429-442.
- Boyle, D.P., H. V. Gupta, and S. Sorooshian (2000). Toward improved calibration of hydrological models: Combining the strength of manual and automatic methods. *Water Resources Res.* 36(12): 3663-3674.
- Bracmort, K. S., M. Arabi, J. R. Frankenberger, B. A. Engel, and J. G. Arnold. 2006. Modeling long-term water quality impact of structural BMPs. *Trans. ASAE* 49(2): 367-384.
- Chu, T. W., and A. Shirmohammadi. 2004. Evaluation of the SWAT model's hydrology component in the piedmont physiographic region of Maryland. *Trans. ASAE* 47(4): 1057-1073.
- Donigian, A. S., J. C. Imhoff, and B. R. Bicknell. 1983. Predicting water quality resulting from agricultural nonpoint-source pollution via simulation – HSPF. In *Agricultural Management and Water Quality*, 200-249. Ames, Iowa: Iowa State University Press.
- Gupta, H. V., S. Sorooshian, and P. O. Yapo. 1999. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *J. Hydrology Eng.* 4(2): 135-143.
- Legates, D. R., and G. J. McCabe. 1999. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Res.* 35(1): 233-241.

- Ma, L., J. C. Ascough II, L. R. Ahuja, M. J. Shaffer, J. D. Hanson, and K/ W/ Rojas. 2000. Root zone water quality model sensitivity analysis using Monte Carlo simulation. *Trans. ASAE* 43(4): 883-895.
- Moriasi, D.N., J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, T. L. Veith. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE* 50(3): 885-900.
- Motovilov, Y. G., L. Gottshalk, K. England, and A. Rodhe. 1999. Validation of distributed hydrological model against spatial observations. *Agric. Forest Meteorology* 98-99: 257-277.
- Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. *J. Hydrology* 10(3): 282-290.
- Ramanarayanan, T. S., J. R. Williams, W. A. Dugas, L. M. Hauck, and A. M. S. McFarnald. 1997. Using APEX to identify alternative practices for animal waste management. ASAE Paper No. 972209. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Refsgaard, J. C. 1997. Parameterisation, calibration, and validation of distributed hydrological models. *J. Hydrology* 198(1): 69-97.
- Saleh, A., J. G. Arnold, P. W. Gassman, L. M. Hauck, W. D. Rosenthal, J. R. Williams, and A. M. McFarnald. 2000. Application of SWAT for the upper North Bosque River watershed. *Trans. ASAE* 43(5): 1077-1087.
- Santhi, C., J. G. Arnold, J. R. Williams, W. A. Dugas, R. Srinivasan, and L. M. Hauck. 2001. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *J. American Water Resources Assoc.* 37(5): 1169-1188.
- Sevat, E., and A. Dezetter. 1991. Selection of calibration objectives functions in the context of rainfall-runoff modeling in a Sudanese savannah area. *Hydrological Sci. J.* 36(4): 307-330.
- Singh, J., H. V. Knapp, and M. Demissie. 2004. Hydrologic modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT. ISWS CR 2004-08. Champaign, Ill.: Illinois State Water Survey. Available at: www.sws.uiuc.edu/pubdoc/CR/
- U.S. EPA. 2002. Guidance for quality assurance project plans for modeling. EPA QA/G-5M. Report EPA/240/R-02/007. Washington, D. G.: EPA, Office of Environmental Information.
- Van Liew, M. W., J. G. Arnold, and J. D. Garbrecht. 2003. Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between two models. *Trans. ASAE* 46(6): 1539-1551.
- Vazquez-Amabile, G. G., and B. A. Engel. 2005. Use of SWAT to compute groundwater table depth and streamflow in the Muscatatuck River watershed. *Trans. ASAE* 48(3): 991-1003.
- Инструкции по созданию водосбора рек с использованием общедоступной программы QGIS, 2017.
- Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Том V. Казахская ССР. Вып.4. Бассейны рек оз. Балхаш и бессточных районов Центрального Казахстана. – Л.: Гидрометеоздат, 1987. – стр. 450.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 13. Центральный и южный Казахстан. Вып. 2. Бассейн озера Балхаш. – Л.: Гидрометеоздат, 1970. – стр. 644.

References

- ASCE. 1993. Criteria for evaluation of watershed models. *J. Irrigation Drainage Eng.* 119(3): 429-442.
- Boyle, D.P., H. V. Gupta, and S. Sorooshian (2000). Toward improved calibration of hydrological models: Combining the strength of manual and automatic methods. *Water Resources Res.* 36(12): 3663-3674.
- Bracmort, K. S., M. Arabi, J. R. Frankenberger, B. A. Engel, and J. G. Arnold. 2006. Modeling long-term water quality impact of structural BMPs. *Trans. ASAE* 49(2): 367-384.
- Chu, T. W., and A. Shirmohammadi. 2004. Evaluation of the SWAT model's hydrology component in the piedmont physiographic region of Maryland. *Trans. ASAE* 47(4): 1057-1073.
- Donigian, A. S., J. C. Imhoff, and B. R. Bicknell. 1983. Predicting water quality resulting from agricultural nonpoint-source pollution via simulation – HSPF. In *Agricultural Management and Water Quality*, 200-249. Ames, Iowa: Iowa State University Press.
- Gupta, H. V., S. Sorooshian, and P. O. Yapo. 1999. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *J. Hydrology Eng.* 4(2): 135-143.
- Legates, D. R., and G. J. McCabe. 1999. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Res.* 35(1): 233-241.
- Ma, L., J. C. Ascough II, L. R. Ahuja, M. J. Shaffer, J. D. Hanson, and K/ W/ Rojas. 2000. Root zone water quality model sensitivity analysis using Monte Carlo simulation. *Trans. ASAE* 43(4): 883-895.
- Moriasi, D.N., J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, T. L. Veith. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE* 50(3): 885-900.
- Motovilov, Y. G., L. Gottshalk, K. England, and A. Rodhe. 1999. Validation of distributed hydrological model against spatial observations. *Agric. Forest Meteorology* 98-99: 257-277.
- Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. *J. Hydrology* 10(3): 282-290.
- Ramanarayanan, T. S., J. R. Williams, W. A. Dugas, L. M. Hauck, and A. M. S. McFarnald. 1997. Using APEX to identify alternative practices for animal waste management. ASAE Paper No. 972209. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Refsgaard, J. C. 1997. Parameterisation, calibration, and validation of distributed hydrological models. *J. Hydrology* 198(1): 69-97.
- Saleh, A., J. G. Arnold, P. W. Gassman, L. M. Hauck, W. D. Rosenthal, J. R. Williams, and A. M. McFarnald. 2000. Application of SWAT for the upper North Bosque River watershed. *Trans. ASAE* 43(5): 1077-1087.
- Santhi, C., J. G. Arnold, J. R. Williams, W. A. Dugas, R. Srinivasan, and L. M. Hauck. 2001. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *J. American Water Resources Assoc.* 37(5): 1169-1188.

Sevat, E., and A. Dezetter. 1991. Selection of calibration objectives functions in the context of rainfall-runoff modeling in a Sudanese savannah area. *Hydrological Sci. J.* 36(4): 307-330.

Singh, J., H. V. Knapp, and M. Demissie. 2004. Hydrologic modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT. ISWS CR 2004-08. Champaign, Ill.: Illinois State Water Survey. Available at: www.sws.uiuc.edu/pubdoc/CR/

U.S. EPA. 2002. Guidance for quality assurance project plans for modeling. EPA QA/G-5M. Report EPA/240/R/-02/007. Washington, D. G.: EPA, Office of Environmental Information.

Van Liew, M. W., J. G. Arnold, and J. D. Garbrecht. 2003. Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between two models. *Trans. ASAE* 46(6): 1539-1551.

Vazquez-Amabile, G. G., and B. A. Engel. 2005. Use of SWAT to compute groundwater table depth and streamflow in the Muscatatuck River watershed. *Trans. ASAE* 48(3): 991-1003.

Instructions for creating a river catchment using the publicly available QGIS program (2017) [Инструкции по созданию водосбора рек с использованием общедоступной программы QGIS].

Long-term data on the regime and resources of land surface water. Volume V. Kazakh SSR. Issue 4. River basins Balkhash and inland regions of Central Kazakhstan [Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Том V. Казахская ССР. Вып.4. Бассейны рек оз. Балхаш и бессточных районов Центрального Казахстана]. – L.: Gidrometeoizdat, 1987. – p. 450.

Surface water resources of the USSR [Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 13. Центральный и южный Казахстан] (1970). Volume 13. Central and southern Kazakhstan. Vol. 2. The basin of Lake Balkhash. – L.: Gidrometeoizdat. – p. 644.