

УДК 556.56.3/4; 517.958:52/59
<https://doi.org/10.15407/ugz2017.03.047>

В.В. Осипов, Н.Н. Осадчая

Украинский гидрометеорологический институт ГСЧС Украины и НАН Украины, Киев

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫНОСА БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ВОДОСБОРА МАЛОЙ РЕКИ ЗОНЫ СМЕШАННЫХ ЛЕСОВ УКРАИНЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДЕЛИ SWAT

Мета дослідження – налаштувати та відкалібрувати модель SWAT (Soil and Water Assessment Tool) для оцінювання надходження біогенних елементів з водозбірної території малих річок від розподілених джерел. Адаптацію моделі для умов зони мішаних лісів України виконано на прикладі водозбору р. Головесні, розташованого на території Придеснянської водно-балансової станції. Це забезпечило наявність багаторічних рядів спостережень за гідрологічними, гідрогеологічними і метеорологічними параметрами, які використовуються у SWAT. Калібрування та валідацію моделі виконано з використанням програми автокалібрування SWAT-CUP. Ефективність моделювання оцінювалася на підставі коефіцієнта Неша-Саткліффа, коефіцієнта детермінації (R^2), процентного відхилення і нормалізованого квадратного кореня помилки моделі. Виконано моделювання водного стоку у різні фази водності та оцінено надходження з ним сполук нітрогену і фосфору. Визначено роль застосування мінеральних добрив у формуванні стоку біогенних елементів у досліджуваному басейні. Запропонована модель може бути використана для оцінювання надходження біогенних елементів від дифузних джерел при підготовці планів управління річковими басейнами та розробці програми дій зі зменшення забруднення водних екосистем.

Ключові слова: SWAT; нітроген; фосфор; стік біогенних елементів

V.V. Osypov, N.M. Osadcha

Ukrainian Hydrometeorological Institute State Service of Ukraine on Emergencies and National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

SIMULATION OF NUTRIENT EMISSION FROM A SMALL RIVER CATCHMENT OF THE FOREST ZONE OF UKRAINE WITH THE USE OF THE SWAT MODEL

The article presents a practical application of the SWAT model (Soil and Water Assessment Tool) to assess the nutrient emission from the catchment area of rivers from distributed sources. The small Holovesnya catchment was used for the model adaptation for the conditions of forest zone of Ukraine. The study area is situated on the territory of the Desna water-balance station that ensures the availability of long-term series of observations over hydrological, hydrogeological and meteorological parameters used by SWAT. The calibration and validation of the model are made using the auto-calibration software SWAT-CUP. The model performance efficiency was assessed by the following criteria: Nash–Sutcliffe coefficient (NS), the coefficient of determination (R^2), the percentage of bias (PBIAS) and the RMSE-observations (root mean square error) standard deviation ratio (RSR). Simulation of water runoff in different phases of water content was performed and the leaching of nitrogen and phosphorus compounds was estimated. The role of mineral fertilizers application in formation of nutrient runoff was determined for the studied basin. The proposed model can be used to prepare river management plans and develop a program of measures to reduce the pollution of water ecosystems by nutrients from distributed sources.

Keywords: SWAT; nitrogen; phosphorus; nutrient emission.

Актуальность темы исследования

Загрязнение поверхностных вод биогенными элементами является важной проблемой, требующей дальнейших научных разработок по усовершенствованию управления речными бассейнами. Интенсивное поступление в поверхностные воды соединений азота и фосфора стимулирует избыточное развитие водной флоры и эвтрофикацию водных экосистем [7]. Несмотря на значительные

многолетние усилия различных стран, справиться с этим явлением до сих пор не удалось, и до настоящего времени многие водные объекты находятся под угрозой недостижения «хорошего» экологического состояния [8, 9].

Для борьбы с явлением эвтрофикации в Европейском Союзе (ЕС) наработаны следующие законодательные нормы.

- Водная Рамочная Директива [6], требующая разработки интегрированных планов управления

© **В.В. Осипов, Н.Н. Осадчая, 2017**

водосборов на основании оценки их загрязнения;

- Нитратная директива [5], регулирующая поступление биогенных элементов от сельскохозяйственных источников;

- Директива о сточных водах урбанизированных территорий [4], которая вводит норму обязательной очистки сточных вод для населенных пунктов с эквивалентом населения > 2000.

Подписав в 2014 г. Соглашение по ассоциации с ЕС, Украина взяла на себя обязательство по внедрению вышеназванных Директив в практику управления водными ресурсами. В настоящее время проводятся активные работы по их последовательной имплементации.

Биогенные элементы поступают в водные объекты от точечных источников: сбросов сточных вод коммунальных, промышленных и сельскохозяйственных предприятий и от распределенных (диффузионных) источников в результате вымывания удобрений из почвенного горизонта.

Снижение загрязнения от точечных источников осуществляется путем инвентаризации сбросов и усовершенствования методов очистки сточных вод. Оценка диффузионного загрязнения – более сложная задача, решение которой находится преимущественно в области моделирования.

Как указано в отчете Европейского агентства по экологии (ЕЕА), потребность в продуктах питания обуславливает все большую интенсификацию сельскохозяйственного производства, что связано с повышенным использованием удобрений. Последнее неизменно отражается на экологическом состоянии водных объектов [8]. В частности, в бассейне Дуная уже сейчас 46% соединений азота и 28% соединений фосфора поступают за счет сельскохозяйственных источников [11].

В Украине аграрный сектор – один из ведущих в экономике страны, а сельскохозяйственные угодья занимают около 70% площади земельного фонда. Это является важным фактором, обуславливающим значительное влияние на поверхностные и подземные воды. В то же время данных, позволяющих провести обобщающий анализ состояния рек страны, в настоящее время не достаточно. Государственная система мониторинга поверхностных вод имеет разреженный пространственный охват и, главное, недостаточную частоту отбора проб для проведения статистического анализа. Многие потенциальные ареалы загрязнения вообще не исследуются.

В связи с этим в Украине встала острая необходимость разработки или внедрения уже имеющихся инструментов для оценки поступления биогенных элементов от диффузионных источников. Для этой цели в мировой практике главенствующие позиции завоевали методы моделирования. На сегодняшний день наиболее часто используются 3 модели: европейские концептуальные модели MONERIS и GREEN, а также детерминированная модель SWAT, разработанная Агентством сельского хозяйства США [12, 17]. Последняя прочно удерживает мировое первенство для моделирования биогенного загрязнения [18]. Эта модель совместима с ГИС-системами, использует входные параметры, доступные в национальной системе наблюдений, обладает внешней программой для автокалибровки SWAT-CUP.

Ц е л ь данной работы – установка и калибровка модели SWAT для оценивания поступления биогенных элементов от диффузионных источников на исследуемой территории.

Изложение основного материала

Объект исследования

Калибровка модели SWAT выполнялась для водосбора р. Головесни, являющейся притоком первого порядка р. Десны. Длина реки 6,3 км; площадь бассейна 30,4 км². Он расположен в Черниговской области, на юго-западном отроге Среднероссийской возвышенности. Рельеф местности холмистый; абсолютные высоты варьируют от 140 до 200 м над уровнем моря. Средний уклон составляет 0,3%.

Исследуемый водосбор находится в зоне смешанных лесов. Около 48% территории обрабатывается, остальная часть занята лесами (35%) и лугами (13%). В пределах бассейна почвенные разности представлены 3 основными типами: темно-серые оподзоленные (54,2%), серые лесные (40,2%) и черноземы оподзоленные (5,6%).

Среднегодовая сумма осадков относительно велика - 670 мм. Внутригодовое распределение стока характеризуется выраженным весенним половодьем, составляющим 20–40% общегодового стока, а также летне-осенней и зимней меженью, иногда прерывающейся кратковременными дождевыми паводками.

Входные данные

Входными материалами служили результаты наблюдений Придеснянской водно-балансовой

станции за период с 1956 г. до 2012 г. Гидрологические ряды представлены ежедневными данными, тогда как частота отбора проб на химические показатели не превышала 4–16 раз в год. Кроме этого, на территории станции ведутся наблюдения за метеорологическими параметрами (осадки, температура воздуха, влажность, скорость ветра, солнечная радиация), которые были использованы при моделировании водного стока.

Географической основой служила цифровая карта с разрешающей способностью 30x30м. Данные о землепользовании получены путем оцифровки космического снимка Google Maps, цифровая карта типов почв взята из публичной кадастровой карты Украины [16].

Модель SWAT

Модель SWAT относится к группе детерминированных моделей, описывающих процессы перераспределение воды и вещества в системе «водосбор-речной сток». Модель была разработана для прогноза влияния сельскохозяйственных практик на гидрологические процессы, седиментацию и вынос химических веществ на комплексных водосборах с разными типами почв, природопользованием и физико-географическими условиями. У пользователя есть возможность указывать различные параметры сельскохозяйственных практик, включая время посева-сбора урожая, особенности вспашки, использование полива, применение удобрений и другие.

SWAT разделяет водосбор на участки с уникальной комбинацией типа почв и природопользования, так называемые гидрологические единицы (HRUs – Hydrologic Response Units). В пределах указанных единиц SWAT моделирует формирование водного стока, рост растений, сельскохозяйственные практики. Водный, биогенный и твердый сток, поступающие с каждой гидрологической единицы, прокладываются по маршруту речной сети к замыкающему створу.

Калибровка модели

Калибровка модели SWAT выполнялась с помощью последовательной процедуры уменьшения неопределенностей SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting) в программе авто-калибровки SWAT-CUP (Calibration Uncertainty Procedures) [2]. В первую очередь была проведена калибровка водного стока как основного переносчика растворенных и взвешенных веществ. На втором этапе была выполнена калибровка выноса нитратных

ионов и минеральных соединений фосфора. С помощью анализа чувствительности были отсеяны параметры, которые практически не влияют на процессы, происходящие на исследуемом водосборе. В целом для калибровки стока были выбраны 18 параметров, для калибровки выноса нитратов – 7 параметров и для выноса соединений растворенного фосфора – 5 параметров. Перечень выбранных параметров и диапазон их значений указаны в табл. 1.

Критерии оценки

Для оценки качества автокалибровки использовались коэффициент Нэша-Сатклиффа (NS), коэффициент детерминации (R^2), процентное отклонение (PBIAS – percent bias) и нормализованный квадратный корень ошибки модели (RSR – RMSE-observations standard deviation ratio).

Коэффициент NS – это нормализованный статистический показатель, показывающий относительную величину остаточной дисперсии по сравнению с дисперсией измеренной величины [14]. Вычисляется по формуле (1):

$$NS = 1 - \frac{\sum_i (Q_p - Q_m)_i^2}{\sum_i (Q_{p,i} - \bar{Q}_p)^2}, \quad (1)$$

где Q_p и Q_m – реальные и модельные значения соответственно, \bar{Q}_p – средние реальные значения.

NS изменяется от $-\infty$ до 1, где 1 – это оптимальная величина. Величины между 0 и 1, как правило, рассматриваются как допустимые.

Коэффициент детерминации (R^2) рассчитывается по формуле (2):

$$R^2 = \frac{\left[\sum_i (Q_{p,i} - \bar{Q}_p)(Q_{m,i} - \bar{Q}_m) \right]^2}{\sum_i (Q_{p,i} - \bar{Q}_p)^2 \sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2}, \quad (2)$$

где Q_p и Q_m – реальные и модельные значения соответственно, \bar{Q}_p и \bar{Q}_m – средние реальные и модельные значения соответственно. R^2 изменяется от 0 до 1, чем ближе значение к 1, тем меньше ошибка.

Процентное отклонение (PBIAS – percent bias). Эта величина показывает среднюю тенденцию данных модели превышать или не достигать аналогичных реальных данных [10]. PBIAS аналогичен таким критериям: процентная ошибка величины стока (PVE – Percent streamflow volume error), ошибка прогноза (PE – prediction error), процентное отклонение величины стока (D_v),

Таблица 1.

**Перечень калибровочных параметров SWAT, диапазон их значений и величины
для периодов 1985–1989 гг. и 2005–2012 гг.**

Параметр	Определение	Значения			
		min.	max.	1985–1989	2005–2012
Параметры чувствительности для водного стока					
ALPHA_BF	Фактор меженного стока (1/день)	0	1	0.0029	0.0018
RCHRG_DP	Коэффициент просачивания в нижний водоносный горизонт	0	1	0.4	0.52
GW_DELAY	Запаздывание грунтовых вод (дни)	0	500	9	12
CN2_AGRC	Номер зависимости осадки-поверх. сток для с/х земель	35	98	75.8	66
CN2_FRST	Номер зависимости осадки-поверх. сток для леса	35	98	59.2	55.7
CN2_RNGE	Номер зависимости осадки-поверх. сток для луга	35	98	78.3	62.8
CNCOEF	Коэффициент эвапотранспирации растений	0.5	2	0.82	0.76
SOL_AWC	Свободная влага слоя почвы, мм H ₂ O/мм почвы	0	1	0.13	0.106
SOL_K_AGRC	Коэффициент фильтрации для с/х земель, мм/ч	0	2000	139	107
SOL_K_FRST	Коэффициент фильтрации для леса, мм/ч	0	2000	157	165
SFTMP	Осадки в виде снега, °C	-5	5	0.43	0.27
SMTMP	Температура начала таяния снега, °C	-5	5	0.47	0
SMFMX	Условная скорость таяния снега на 21 декабря, мм H ₂ O/°C-day	0	20	2.57	1.27
SMFMN	Условная скорость таяния снега на 21 июня, мм H ₂ O/°C-day	0	20	0.64	4.92
TIMP	Фактор запаздывания таяния снега	0	1	0.63	0.73
SURLAG	Фактор запаздывания поверхностного стока	0.05	24	3.5	2
ESCO	Почвенный компенсационный фактор испарения	0	1	0.7	0.8
EPCO	Компенсационный фактор питания растений	0	1	0.35	0.42
Параметры чувствительности для нитратных соединений					
RCN	Концентрация азота в осадках, мгN/дм ³	0	15	1.3/0.15	0.2
CDN	Коэффициент денитрификации	0	3	2.61	
SDNCO	Минимальная доля воды в почве для денитрификации	0	1	0.995	
NPERCO	Коэффициент просачивания азота	0	1	0.3	
ANION_EXCL	Фракция пористости, откуда исключаются основания	0.01	1	0.144	
CMN	Фактор скорости минерализации гумуса	0.001	0.003	0.1	
N_UPDIS	Фактор распределения потребления азота по глубине	0	100	81	
Параметры чувствительности для соединений неорганического фосфора					
PHOSKD	Коэффициент взаимодействия фосфора с почвой	100	200	128	
ERORGP	Степень обогащения седиментов фосфором	0	5	4.24	
SOL_SOLP_AGRC	Начальная концентрация подвижного фосфора в верхнем слое для с/х земель, мгP/кг	0	100	8.5	
SOL_SOLP_FRST	Начальная концентрация подвижного фосфора в верхнем слое для леса, мгP/кг	0	100	1.1	
P_UPDIS	Фактор распределения потребления фосфора по глубине	0	100	72	

которые также встречаются в международной литературе. В идеале значение PBIAS равно 0. Позитивные значения показывают, что модельные данные занижены, негативные значения – завышены. Рассчитывается по формуле (3):

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_p - Q_m)_i}{\sum_{i=1}^n Q_{p,i}} \cdot 100, \tag{3}$$

где Q_p и Q_m – реальные и модельные значения соответственно.

Нормализованный квадратный корень ошибки модели (RSR) характеризует величину отклонения модельных данных от измеренной величины. Рассчитывается по формуле (4):

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_i^n (Q_p - Q_m)_i^2}}{\sqrt{\sum_i^n (Q_{p,i} - \bar{Q}_p)^2}}, \tag{4}$$

где Q_p и Q_m – реальные и модельные значения соответственно.

RSR изменяется от 0 до $+\infty$, чем ближе значение к 0, тем меньше ошибка.

Выбор данных критериев прежде всего обусловлен их широким использованием и, соответственно, возможностью сравнения полученных результатов с другими исследованиями. Также NSE и PBIAS рекомендованы ASCE (American Society of Civil Engineers) [3].

Общепринятые оценки качества вышеуказанных критериев представлены в *табл. 2*.

Обсуждение результатов исследования

Калибровка водного стока

В процессе исследований были проанализированы данные ежедневных наблюдений водного стока за период с 1983 г. по 2013 г., исключение составили 1992–1998 гг., когда наблюдения не

проводились. Средние ежегодные значения расходов характеризовались спадающим трендом (*рис. 1, А*). В тоже время, аналогичной тенденции для значений суммарных ежегодных осадков не обнаружено (*рис. 1, Б*). Таким образом, коэффициент стока также характеризовался спадающим трендом. Причина этих изменений в данной работе не обсуждается. В целом водному стоку рек свойственна многолетняя цикличность [15].

Колебания водного стока р. Головесни описываются одним полным 59-летним циклом (1947–2006 гг.). Первые 35 лет (1947–1982 гг.) соответствовали маловодной фазе, которая в 1983 г. сменилась на многоводную, длившуюся до 2006 г. После этого началась следующая маловодная фаза. Средний расход воды за полный цикл водности составил 0,17 м³/с, что соответствовало его среднему многолетнему значению, установленному вероятностно-статистическим методом.

В связи с этим для калибровки водного стока было выбрано 2 периода, характеризовавшие различные гидрологические условия: первый на ветви подъема стока, когда среднегодовые характеристики превышали норму стока (1985–1988 гг.), второй соответствовал ниспадающей фазе цикла с показателями водности ниже средней многолетней величины (2007–2012 гг.).

Калибровочные параметры, соответствующие лучшей итерации, представлены в *табл. 1*. Сравнение гидрографов стока за 1985–1986 гг. (*рис. 2*) и 2007 г., 2009 г. (*рис. 3*) показывает, что во второй период (2007–2012 гг.) уменьшаются все три составляющие водного стока: поверхностный, латеральный и глубоководный грунтовый. Эта закономерность также характерна для основных, наиболее значимых параметров модели (*табл. 1*). Снижение поверхностного стока отражается в уменьшении коэффициентов осадки-поверхностный сток (CN2). Снижение латерального стока

Таблица 2.

Оценка качества значения критериев [13]

Оценка	NS & R ²	PBIAS, % (речной сток)	PBIAS, % (азот, фосфор)	RMSE (RSR)
Очень хорошо	0.75 < NS ≤ 1	PBIAS ± 10	PBIAS ± 25	0 < RSR ≤ 0.5
Хорошо	0.65 < NS ≤ 0.75	± 10 ≤ PBIAS < ± 15	± 25 ≤ PBIAS < ± 40	0.5 < RSR ≤ 0.6
Удовлетворительно	0.5 < NS ≤ 0.65	± 15 ≤ PBIAS < ± 25	± 40 ≤ PBIAS < ± 70	0.6 < RSR ≤ 0.7
Неудовлетворительно	NS ≤ 0.5	PBIAS ≥ ± 25	PBIAS ≥ ± 70	RSR > 0.7

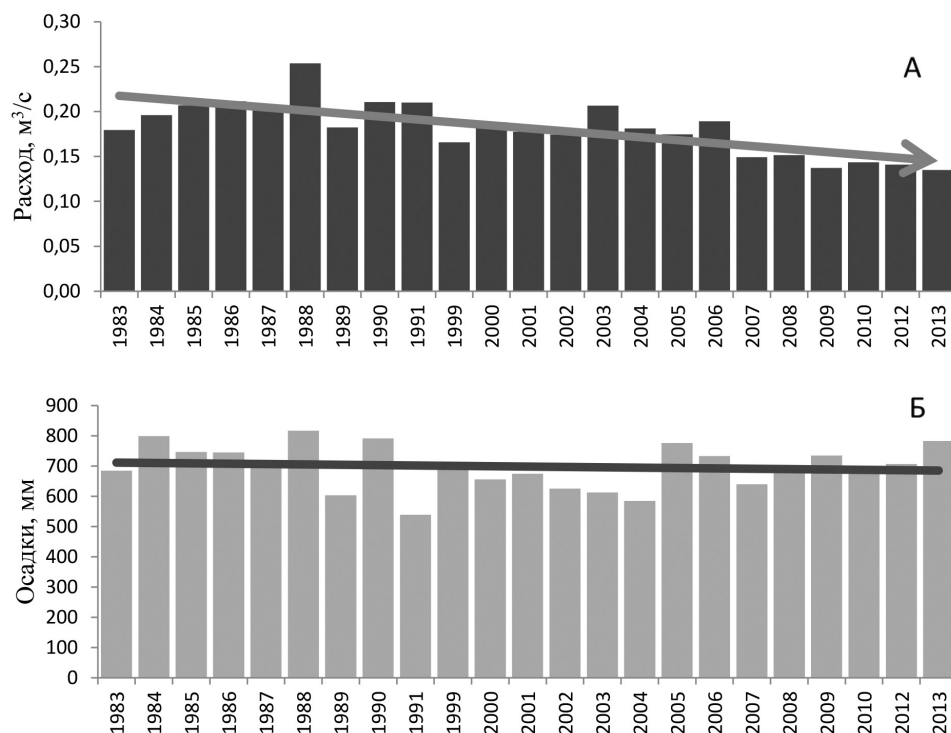


Рис. 1. Среднесуточные значения расходов воды (А) и сумма годовых осадков (Б) в бассейне р. Головесня

коррелирует с уменьшением коэффициента фильтрации пахотных земель (SOL_K_agrc) и свободной почвенной влаги (SOL_AWC). Почвенный сток уменьшается в связи с тем, что потери в глубокие водоносные горизонты возрастают, коэффициент просачивания в нижний водоносный горизонт (RCHRG_DP) увеличивается с 0.4 до 0,52. Это может быть вызвано как природными, так и антропогенными факторами. Так, многолетние наблюдения за водопроницаемостью черноземов по отношению к распахиваемому эталону показали, что многократные проходы трактора уменьшают водопроницаемость на 60%, применение минеральных удобрений в повышенных дозах - на 7%, 20-летнее орошение - на 24% [1].

В соответствии с общепринятыми критериями оценки качества калибровки/валидации (табл. 2), калибровка показала хорошие результаты для обоих выбранных нами периодов. Результаты

валидации были ниже, но отвечали необходимым требованиям (табл. 3).

Качество калибровки прежде всего зависит от точности моделирования событий с высоким расходом стока. В нашем случае это период весеннего половодья; он же и самый сложный период для имитации ввиду дополнительно возникающих неопределенностей, связанных с процессом снеготаяния.

Калибровка выноса нитратных соединений и минерального фосфора

Вследствие невнимания к проблеме диффузного загрязнения в предыдущие годы в Украине нет детальных данных мониторинга концентраций биогенных веществ в реках. Тем не менее, в период 1985–1989 гг. измерения на р. Головесня проводилось чаще (12–16 раз в год), чем в период 2007–2012 гг. (4 раза в год). В связи с этим для

Таблица 3.

Значения критериев оценки качества калибровки/валидации речного стока

Критерий	Калибровка	Валидация	Калибровка	Валидация
	1985–1986 гг.	1987–1988 гг.	2007 г., 2009 г.	2010 г., 2012 г.
NS	0.86	0.6	0.68	0.6
R ²	0.87	0.6	0.68	0.63
PBIAS	-4	1.5	2.2	0.5

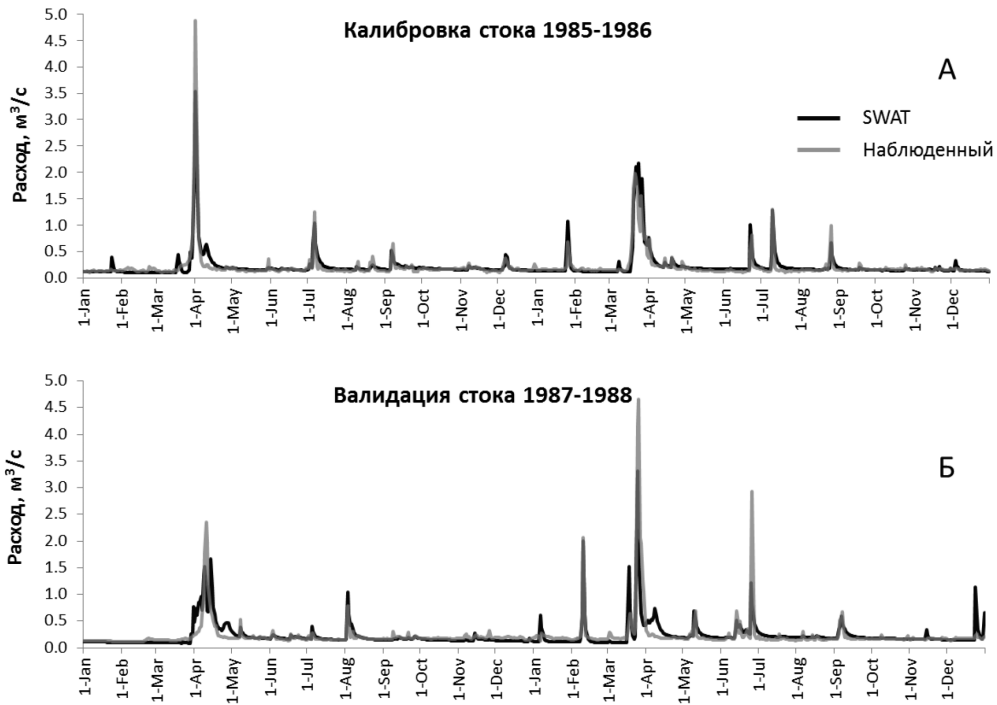


Рис. 2. Результаты калибровки стока р. Головесня за период 1985–1986 гг. (А) и валидации за период 1987–1988 гг. (Б)

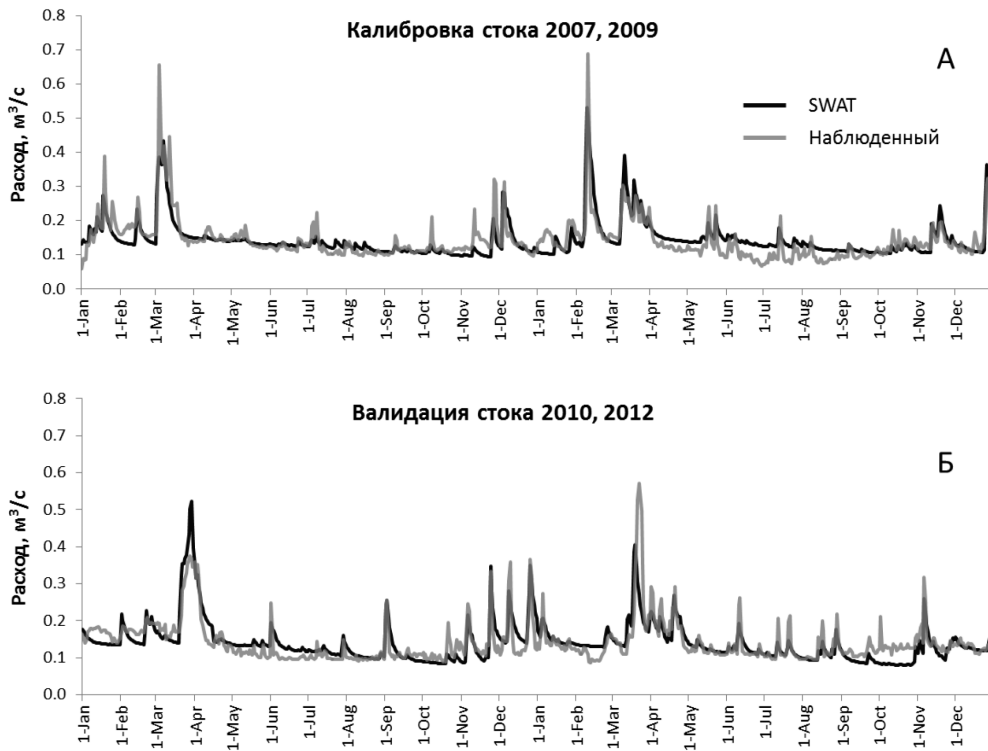


Рис. 3. Результаты калибровки стока р.Головесня за (А) 2007 г. и 2009 г. и (Б) валидации за 2010 г., 2012 г.

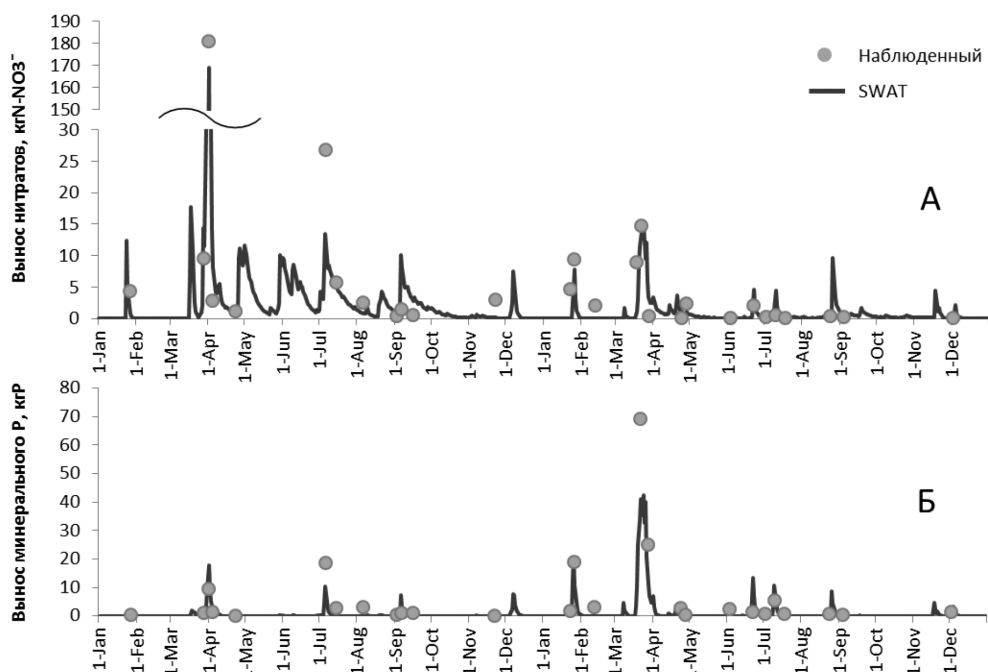


Рис. 4. Калибровка выноса (А) азота нитратных соединений и (Б) соединений минерального фосфора за 1985–1986 гг.

калибровки переноса нитратов и минерального фосфора выбран период 1985–1986 гг. (рис. 4).

Установлено, что за исключением концентрации азота в осадках, полученные в результате калибровки параметры остаются постоянными в течение всего периода наблюдений, в отличие от параметров гидрологического цикла (табл. 1).

Поэтому для валидации переноса нитратных соединений взят период 1987 г. и 1989 г. (1988 исключен ввиду отсутствия данных в период весеннего половодья), а также 2007 г. и 2009 г. Валидация модели переноса соединений фосфора проведена за период 1987–1988 гг.

Согласно общепринятым критериям оценки качества калибровки и валидации результаты калибровки выноса нитратов и минерального фосфора показали хороший результат. Результаты валидации существенно отличались для соединений азота и фосфора. Если азот показал в целом

хорошие результаты, то значения критериев качества валидации фосфора были ниже, однако укладывались в удовлетворительные пределы (табл. 4). Полученные данные показали, что критерии NS и R^2 более чувствительны к высоким значениям параметра, чем RSR. Поэтому для оценки моделирования выноса соединений азота и фосфора включен RSR, т.к. R^2 и NS часто превышают результаты ($NS=0.97$), практически не учитывая расхождения малых значений.

В течение года значительное поступление нитратных соединений наблюдается в период половодья. В зимний период в почвенном горизонте накапливается значительное количество соединений азота вследствие минерализации растительных остатков и их последующей гумификации. Определенная доля азота вносится также за счет атмосферных осадков. Установлено, что в 1985 г.

Таблица 4.

Значения критериев оценки качества калибровки/валидации выноса азота нитратных соединений и соединений минерального фосфора

Критерий	Азот нитратных соединений			Соединения минерального фосфора	
	Калибровка 1985–1986	Валидация		Калибровка 1985–1986	Валидация 1987–1988
		1987,1989	2007,2009		
NS	0.97	0.69	0.71	0.73	0.6
RSR	0.15	0.56	0.54	0.52	0.63
PBIAS	10.2	-29.3	10.4	21	42.5

на пахотные земли дополнительно вносили минеральные азотные удобрения в период посева – третья декада апреля. Точное количество внесенных удобрений неизвестно, поэтому условно принято стандартное рекомендованное значение для данного типа почв – 200 кгN/га. Все нитратные соединения имеют высокую растворимость в воде и практически не подлежат сорбции.

В связи с этим остаток неиспользованных растениями удобрений практически полностью выносится осадками в течение 3-х месяцев после их применения. В 1986 г. азотные удобрения не вносили, поэтому, в отличие от 1985 г., с мая по июль вынос нитратных ионов был низким и обуславливался только природными факторами.

В отличие от нитратных ионов, соединения минерального фосфора имеют высокие сорбционные свойства, поэтому хорошо удерживаются почвой и вымываются только во время значительных расходов воды. Именно поэтому фосфорные удобрения, внесенные при посеве в третьей декаде апреля в 1985 г., в основном были смыты в период весеннего половодья следующего года. Расчетное количество применяемых фосфорных удобрений также было принято в размере рекомендованной нормы – 200 кгP/га.

По оценкам многочисленных исследователей в настоящее время основная причина нитратного загрязнения вод – применяемые удобрения.

Выводы

Выполнена настройка и адаптация физико-математической модели SWAT для оценки поступления биогенных элементов с водосбора малой реки в зоне смешанных лесов Украины от диффузионных источников.

Значения параметров модели SWAT были отка-

либрованы в программном модуле автоматической калибровки SWAT-CUP, включающей 4 различные процедуры.

В качестве критериев оценки качества калибровки использованы 4 общепринятых показателя: коэффициент Нэша-Сатклиффа (NS), коэффициент детерминации (R^2), процентное отклонение (PBIAS) и нормализованный квадратный корень ошибки модели (RSR).

Калибровка водного стока с использованием приложения SWAT-CUP показала хорошие результаты. Результаты валидации также были удовлетворительными.

Калибровка и валидация выноса соединений минерального азота и фосфора показали соответственно хорошие и удовлетворительные результаты. Существенным недостатком при этом было небольшое количество наблюдений в течение года. Установлено, что характер вымывания азота нитратных соединений и минеральных соединений фосфора, представленного преимущественно PO_4^{3-} , имеет различные черты, обусловленные химическими свойствами данных соединений. Нитратные соединения в связи с их высокой растворимостью вымываются в первый месяц после внесения удобрений. Соединения минерального фосфора в связи с высокими сорбционными свойствами последнего хорошо удерживаются почвой и попадают в русла рек в период половодья следующего года.

Предложенная модель может быть использована для оценки поступления биогенных элементов от диффузионных источников при подготовке планов управления рек, а также разработке программы мер по уменьшению загрязнения водных экосистем.

References [Литература]

1. Medvedev V.V. (2012). *Monitoring of soils in Ukraine. Concept. Results. Tasks*. Kharkov. [In Russian]. [Медведев В.В. Мониторинг почв Украины. Концепция. Итоги. Задачи. (2-ое пересмотренное и дополненное издание). Харьков», 2012. 536с.]
2. Abbaspour K.C. (2007). *User manual for SWAT-CUP, SWAT calibration and uncertainty analysis programs*. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag), Duebendorf, Switzerland.
3. American Society of Civil Engineers (ASCE) Task Committee on Definition of Criteria for Evaluation of Watershed Models, Irrigation and Drainage Division (1993). Criteria for evaluation of watershed models. *J. Irrigation Drainage Eng.*, 119(3), 429-442.
4. Council Directive 91/271/EEC of 21 May 1991 concerning urban waste-water treatment. URL: <http://eur-lex.europa.eu/eli/dir/1991/271/oj>
5. Council Directive 91/676/EEC of 12 December 1991 concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources. URL: <http://data.europa.eu/eli/dir/1991/676/oj>
6. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the Community action in the field of water policy. URL: http://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/index_en.html
7. Dodds W. (2006). Eutrophication and trophic state in rivers and streams. *Limnol Oceanogr*, 51, 671–680.

8. European Environment Agency. (2015). *The European environment — state and outlook 2015: synthesis report*. Copenhagen, Denmark.
9. European Topic Centre. Inland, Coastal, Marine waters (ETC/ICM). (2012). *Ecological and chemical status and pressures in European waters: Thematic assessment for EEA water 2012 Report*. URL: http://icm.eionet.europa.eu/ETC_Reports/EcoChemStatusPressInEurWaters_201211
10. Gupta, H.V., Sorooshian, S., Yapo, P.O. (1999). Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrological Engineering*, 4(2), 135 – 143.
11. ICPDR. (2015). *The Danube River Basin District Management Plan*. URL: <https://www.icpdr.org/main/management-plans-danube-river-basin-published>
12. Malago A., Venhor M., Gericke A., Vigiak O., Bouraoui F., Grizzetti B., Kovacs A. (2015). Modelling nutrient pollution in the Danube River Basin: a comparative study of SWAT, MONERIS and GREEN models. *Joint Research Centre technical reports*, JRC99193. <http://doi.org/10.2788/156278>
13. Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., Veith T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Am. Soc. Agric. Biol. Eng.*, 50 (3), 885 –900.
14. Nash J. E., Sutcliffe J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. *J. Hydrology*, 10(3), 282-290.
15. Szolgayova E., Parajka J., Blöschl G., Bucher C. (2014). Long term variability of the Danube River flow and its relation to precipitation and air temperature. *Journal of Hydrology*, 519, 871-880. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.07.047>
16. The State Service of Ukraine for Geodesy, Cartography and Cadastre. *Soil types map*. URL: <http://map.land.gov.ua/kadastrova-karta>
17. United States Environmental Protection Agency. (2005). *Total Maximum Daily Loads Model Evaluation and Research Needs*. 600/R-05/149.
18. Wellen C., Kamran-Disfani A.-R., Arhonditsis G.B. (2015). Evaluation of the current state of distributed watershed nutrient water quality modeling. *Environ. Sci. Technol*, 49, 3278–3290.

Статья поступила в редакцию 10.08.2017

ІНФОРМАЦІЯ

З 28 по 30 серпня 2017 року за ініціативою Ради молодих учених Інституту географії НАН України проведено польову школу-семінар «Комплексні географічні дослідження у сучасних умовах». Місце проведення – с. Стайки Кагарлицького району Київської області. У заході взяли участь представники відділів геоморфології, палеогеографії та суспільної географії Інституту.

У процесі роботи були представлені у форматі «open-air» доповіді: «Відображення кліматичних змін у розрізах плейстоценових і голоценових відкладів України» (д. геогр. н., проф. Ж.М. Матвіїшина); «Природні умови та економічний розвиток Кагарлицького району Київської області» (к. геогр. н. А.В. Марущинець); «Сучасні природні та природно-антропогенні геоморфологічні процеси правобережжя річки Дніпро» (к. геогр. н. Р.О. Спиця); «Геоморфологічні аспекти Ядлівсько-Трахтемирівської зони глибинного розлому» (С.В. Жилкін); «Можливості георхеологічних досліджень у межах Кагарлицького району та міждисциплінарна взаємодія» (к. геогр. н. А.С. Кушнір); «Географічна наука: основні постулати при побудові мультимедійних презентацій» (к. геогр. н. С.А. Покляцький); «Антропогенна трансформація рельєфу Волинського Полісся в умовах меліорації» (М.Л. Антошук).

Під час геоморфологічного маршруту «Сучасні природні та природно-антропогенні геоморфологічні процеси правобережжя річки Дніпро» (організатори – Р.О. Спиця, С.В. Жилкін) загальною протяжністю понад 20 км учасники отримали актуальну інформацію щодо будови рельєфоутворювальних відкладів, типів та інтенсивності прояву сучасних геоморфологічних процесів, оглянули природні та природно-антропогенні ландшафтні комплекси долини Дніпра та прилеглих вододілів в околицях с. Стайки.

Практикум «Палеогеографічні записи, відображені у особливостях відкладів с. Стайки» (організатори – к. геогр. н. С.П. Дорошкевич, к. геогр. н. А.С. Кушнір) був присвячений особливостям проведення палеогеографічних досліджень.

Були також організовані (С.А. Покляцький, С.П. Дорошкевич) географічні командоутворюючі практикуми, зокрема, проведено науково-пошукову гру «Навколо світу».

Крім отримання нових знань, польову школу-семінар можна вважати важливим заходом в оцінюванні сучасних можливостей та визначенні перспективних напрямів комплексних географічних досліджень, обміні знаннями та напрацюваннями між структурними підрозділами Інституту. Було висловлено пропозицію щодо надання їй статусу щорічної із залученням більшої кількості науковців Інституту та фахівців-географів з інших установ.

© С.П. Дорошкевич, С.А. Покляцький, 2017

ISSN 1561-4980. *Ukr. geogr. ž.*, 2017, 3(99)