Осипов Валерій Валерійович, старший науко&shy;вий співробітник відділу гідрохімії Українського гід&shy;рометеорологічного інституту ДСНС та НАН України: &laquo;Моделювання стоку сполук нітрогену та фосфору з водозборів малих річок лісової зони України (на при&shy;кладі р. Головесня)&raquo; (11.00.07 - гідрологія суші, водні ресурси, гідрохімія). Спецрада Д 26.001.22 у Київсько&shy;му національному університеті імені Тараса Шевчен&shy;ка

Український гідрометеорологічний інститут

Державна служба України з надзвичайних ситуацій

Національна академія наук України

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця

на правах рукопису

ОСИПОВ ВАЛЕРІЙ ВАЛЕРІЙОВИЧ

УДК 004.94:556.16+556.114.6

ДИСЕРТАЦІЯ

МОДЕЛЮВАННЯ СТОКУ СПОЛУК НІТРОГЕНУ ТА ФОСФОРУ З

ВОДОЗБОРІВ МАЛИХ РІЧОК ЛІСОВОЇ ЗОНИ УКРАЇНИ

(НА ПРИКЛАДІ Р. ГОЛОВЕСНЯ)

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата географічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,

результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Науковий керівник Осадча Наталія Миколаївна, д. геогр. н.

Київ – 2017

ЗМІСТ

ВСТУП.......................................................................................................................... 15

РОЗДІЛ 1. Евтрофікація природних вод, методологія оцінки та

прогнозування.............................................................................................................. 23

1.1. Чинники, що зумовлюють евтрофікацію........................................................ 23

1.2. Роль точкових та розподілених (дифузних) джерел у формуванні

евтрофікації вод........................................................................................................ 28

1.3. Впровадження європейського законодавства в Україні як ефективний

інструмент зменшення евтрофікації поверхневих вод......................................... 31

1.4. Основні методологічні підходи оцінювання впливу дифузних джерел...... 33

1.4.1. Використання спостережень для оцінювання впливу дифузних джерел

................................................................................................................................. 33

1.4.2. Використання статистичної інформації.................................................... 34

1.4.3. Сучасні моделі прогнозування винесення хімічних елементів із

водозбірної території ............................................................................................ 37

1.4.4. Приклади досліджень на території Україні щодо моделювання процесів

винесення сполук нітрогену та фосфору ............................................................ 40

РОЗДІЛ 2. Фізико-математична модель прогнозування винесення біогенних

елементів із сільськогосподарських водозборів SWAT.......................................... 44

2.1. Обґрунтування вибору моделі ......................................................................... 44

2.2. Загальний опис моделі SWAT ......................................................................... 47

2.3. Принципова схема розрахунку циклу нітрогену ........................................... 59

2.3.1. Встановлення початкових концентрацій сполук нітрогену ................... 60

2.3.2. Органічний нітроген ................................................................................... 62

2.3.3. Неорганічний (мінеральний) нітроген...................................................... 65

2.3.4. Азотне живлення рослин............................................................................ 69

2.3.5. Рух нітратів у профілі ґрунту..................................................................... 73

2.4. Принципова схема розрахунку фосфорного циклу ....................................... 75

2.4.1 Встановлення початкових концентрацій сполук фосфору ...................... 77

2.4.2. Органічний фосфор..................................................................................... 78

2.4.3. Неорганічний (мінеральний) фосфор........................................................ 79

2.4.4. Фосфорне живлення рослин ...................................................................... 81

13

2.4.5. Рух сполук фосфору в профілі ґрунту ...................................................... 82

2.5. Методологія калібрування фізико-математичних моделей......................... 83

РОЗДІЛ 3. Фізико-географічна характеристика досліджуваного водозбору та

розроблення його цифрової основни для моделі SWAT......................................... 89

3.1. Розташування та загальна характеристика досліджуваного водозбору...... 89

3.2. Фізико-географічна характеристика досліджуваного басейну .................... 91

3.2.1. Геологічна будова та рельєф...................................................................... 91

3.2.2. Кліматичні умови........................................................................................ 92

3.2.3. Гідрологічний режим.................................................................................. 94

3.3. Характеристика вихідних матеріалів спостережень Придеснянської ВБС 95

3.4. Підготовка цифрової основи досліджуваного басейну для моделі SWAT. 96

3.4.1. Створення цифрової моделі висот (ЦМВ)................................................ 96

3.4.2. Характеристика ґрунтів водозбору р. Головесня відповідно до вимог

SWAT...................................................................................................................... 97

3.4.3. Характеристика природокористування водозбору р. Головесня за

номенклатурою SWAT ....................................................................................... 101

РОЗДІЛ 4. Моделювання гідрографу стоку р. Головесня..................................... 104

4.1. Обґрунтування вибору періоду моделювання ............................................. 104

4.2. Калібрування стоку в програмі SWAT-CUP ................................................ 109

4.3. Оцінка ефективності моделювання............................................................... 116

РОЗДІЛ 5. Моделювання винесення біогенних елементів ................................... 121

5.1. Моделювання винесення нітрогену .............................................................. 121

5.1.1.Калібрування винесення нітрогену в програмі SWAT-CUP ................. 121

5.1.2. Валідація винесення нітрогену та оцінка ефективності моделювання

............................................................................................................................... 123

5.1.3. Аналіз взаємозв’язку водного стоку та винесення сполук

нітрогену (N-NO3ˉ )............................................................................................. 125

5.2. Моделювання винесення фосфору................................................................ 127

5.2.1. Калібрування винесення фосфору у програмі SWAT-CUP.................. 127

5.2.2. Валідація винесення фосфору та оцінка ефективності моделювання 129

5.2.3 Аналіз взаємозв’язку водного стоку та винесення сполук фосфору.... 131

14

РОЗДІЛ 6. Моделювання кращих методів сільськогосподарських робіт для

зменшення евтрофікації поверхневих вод.............................................................. 134

6.1. Модель циклу нітрогену за умови внесення добрив ................................... 135

6.2. Вплив азотних добрив на формування винесення N-NO3ˉ......................... 137

6.3 Вплив різних видів сільськогосподарської культури на винесення нітратіонів.......................................................................................................................... 143

Висновки .................................................................................................................... 148

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ................................................................. 151

Додаток А. Класи землекористування SWAT........................................................ 166

Додаток Б. Перевірка ряду щоденних спостережень за стоком на відповідність

закону нормального розподілу................................................................................. 174

Додаток В. Список наукових публікацій здобувача за темою дисертації........... 181

15

ВСТУП

Актуальність теми. Глобальне зростання кількості населення поставило

на порядок денний питання подолання дефіциту продовольства [138]. Високий

ступінь освоєння земельного фонду обмежив можливості для подальшого

екстенсивного шляху виробництва продуктів харчування. На сучасному етапі

збільшення продуктивності сільськогосподарського виробництва може бути

досягнуто завдяки його інтенсифікації. Сучасні інноваційні технології

землеробства ґрунтуються на застосуванні добрив, серед яких найбільшу

ефективність до підвищення врожайності виявляють мінеральні добрива [28].

Норми внесення добрив тісно залежать від ґрунтово-кліматичних умов,

агротехнічних заходів, культури та багатьох інших чинників. Незбалансоване

використання добрив призводить до їхніх втрат у навколишнє середовище. Так,

у зоні достатнього зволоження втрати азотних добрив із водним стоком

досягають у середньому 15%, фосфорних добрив – 1% [5].

Надходження в природні водні об’єкти біогенних елементів (сполук

нітрогену та фосфору) є важливою рушійною силою процесу евтрофікації, який

призводить до порушення природної рівноваги біопродуктивності, погіршення

якості води та недосягнення водними екосистемами «доброго» екологічного

стану [11].

Дослідження впливу сільськогосподарських джерел на хімічний склад та

якість води річок в Україні вперше виконано Хільчевським В. К. у 1996 році. У

його роботі [45] встановлено зв'язок між застосуванням агрохімічних засобів та

винесенням мінеральних сполук у басейні Дніпра. З того часу з’явилися лише

поодинокі роботи, присвячені впливу змиву біогенних елементів з водозбірної

площі на трофний стан озер Волинської області [46], басейну р. Десни [20],

Українського Придунав'я [16].

16

Моделювання біогенного стоку річок, засноване на балансовому принципі,

розроблено радянськими вченими Хрисановим і Осиповим [12]. Беручи до уваги,

що метод містить велику кількість розрахунків, його подальший розвиток

істотно стримувався недостатнім поширенням ГІС технологій. Для великого

річкового басейну цей підхід вперше було реалізовано Кондратьевим С. для

р. Неви [19]. При цьому моделювання водного стоку виконувалось на основі

розробленої ним фізико-математичної моделі, а для прогнозування винесення

біогенних елементів був задіяний концептуальний підхід. В Україні цей метод

уперше був втілений Яциком А. В. для малої річки України у межах окремого

господарства [48, 50].

Тривалий час забруднення вод біогенними елементами пов’язувалося

виключно з дією точкових джерел. Однак усе більше охоплення населених

пунктів очисними спорудами та поступове поглиблення глибини очищення

стічних вод, впровадження замкнутих технологій водокористування призвели до

поступового збільшення вагомості забруднення, спричиненого розподіленими

сільськогосподарськими джерелами. Уже сьогодні досвід розвинених країн

показує, що в умовах дієвого скорочення надходження біогенних елементів від

скиду стічних вод роль дифузних джерел набуває домінуючого впливу [74].

В Україні приблизно 70% території належить до земель

сільськогосподарського призначення [42]. Політичні зміни на початку 1990-х

років призвели до значного зменшення застосування добрив через брак коштів.

Проте, поступово сільськогосподарське виробництво відновлюється, станом на

2016 р. частка агросектору в загальному ВВП країни досягла 11,7% [42]. Це

ставить необхідність збалансованого застосування кращих

сільськогосподарських і кращих екологічних практик, у зв’язку з чим

розроблення методів якісної та кількісної оцінки надходжень сполук нітрогену

та фосфору від дифузних джерел є актуальним завданням у галузі охорони

водних ресурсів.

Важливість цього питання вийшла на новий рівень після підписання

Україною Угоди про асоціацію з Європейським Союзом та внесенням

17

відповідних змін до Водного кодексу [37]. У планах управління річкових

басейнів має бути наявна оцінка трофного стану водних екосистем, визначено

зони, вразливі до нітратного забруднення, запроваджено кращі методи ведення

сільськогосподарських робіт [38].

Для вирішення вищевказаних завдань використовується, передусім,

модельний підхід [98]. Невпинний розвиток цифрових та космічних технологій

призвів до домінуючого використання фізико-математичних моделей із

розподіленими параметрами, що ґрунтуються на формалізації окремих процесів.

Дана робота є першим прикладом застосування в Україні моделей

подібного класу для визначення біогенного забруднення вод та закладає

фундамент для подальшого розвитку цього напряму.

Зв’язок роботи з науковими програми, планами, темами.

Наукові результати, викладені в дисертаційній роботі, отримано під час

проведення досліджень у відділі гідрохімії УкрГМІ ДСНС України та НАН

України за безпосередньої участі автора як виконавця державних бюджетних

науково- дослідних робіт: № 9/12 “Розроблення ГІС-орієнтованої системи для

прогнозування виносу компонентів хімічного складу поверхневих вод із

водозборів річкових басейнів” (ДР № 0112 U003627, 2012–2014 рр.); № 8/15

“Розробка методології та методів оцінки хімічного стану поверхневих вод

України відповідно до європейських стандартів” (ДР № 0115 U004100, 2015–

2017 рр.).

Мета та завдання дослідження. Мета роботи – кількісна оцінка та

розроблення заходів із мінімізації стоку біогенних елементів (сполук нітрогену

та фосфору) з водозбірної території малої річки шляхом фізико-математичного

моделювання із застосуванням моделі SWAT.

Для досягнення мети було сформульовано та вирішено такі завдання:

- виконати аналіз фізико-географічних умов досліджуваного водозбору;

- проаналізувати основні шляхи надходження біогенних елементів із

водним стоком та методи їхньої кількісної оцінки;

18

- виконати порівняльний аналіз наявних моделей розрахунку стоку

біогенних елементів, оцінити їхні переваги та недоліки;

- дослідити багаторічну циклічність водного стоку тестового водозбору;

- провести налаштування фізико-математичної моделі SWAT для

тестового водозбору та виконати аналіз чутливості моделі до окремих

вхідних параметрів;

- виконати калібрування моделі SWAT для тестового водозбору для

показників водного стоку, сполук нітрогену та фосфору;

- виконати валідацію моделі для тестового водозбору для показників

водного стоку, сполук нітрогену та фосфору ;

- оцінити ефективність моделювання за допомогою набору критеріїв;

- визначити основні чинники надходження біогенних елементів у

тестовому водному басейні та кількісно оцінити їхній вплив;

- обґрунтувати кращі методи ведення сільськогосподарських робіт для

зменшення біогенного забруднення поверхневих вод тестового водозбору.

Об’єкт дослідження – закономірності формування стоку біогенних

елементів та основні шляхи їхньою надходження з водозбірної території малої

річки.

Предмет дослідження – прогнозування надходження сполук нітрогену і

фосфору шляхом моделювання перебігу фізичних, хімічних та біологічних

процесів на водозбірній території малої річки із застосування фізикоматематичної моделі SWAT.

Методи дослідження і вихідна інформація.

Вихідними даними були матеріали моніторингу вод ДСНС України за

параметрами водного стоку, концентрацією компонентів хімічного складу

р. Головесня за період 1983–2013 рр., а також матеріали метеорологічних

спостережень Придеснянської водно-балансової станції за період 1983–2013 рр.

Обробка первинної інформації, розрахунки, статистичний аналіз, побудова

графіків та переведення вихідних даних у належний для програми SWAT формат

проводилися за допомогою програмних компонентів «Microsoft Excel» та

19

«Microsoft Access» пакету «Microsoft Office». Дослідження багаторічної

циклічності водного стоку здійснено з використанням різницевої інтегральної

кривої.

Завантаження вихідних даних проводилось у програмному середовищі

ArcGIS за допомогою надбудови ArcSWAT [144]. Моделювання гідрологічних та

гідрохімічних процесів, на підставі яких отримано щоденні значення водного

стоку, винесення сполук нітрогену та фосфору, здійснювалося в програмному

комплексі SWAT, розробленого Міністерством сільського господарства

США [53]. Аналіз чутливості параметрів, калібрування та валідація моделі

виконано в програмі автоматичного калібрування SWAT-CUP за процедурою

SUFI-2 (розробка Швейцарського інституту водних наук та технологій) [51].

Наукова новизна отриманих результатів.

Уперше:

- адаптовано комп'ютерну фізико-математичну модель SWAT для

моделювання винесення біогенних елементів із водозбору малої річки лісової

зони України;

- обґрунтовано перелік параметрів, чутливих до визначення водного та

біогенного стоку для малих річок лісової зони України;

- виконано моделювання водного стоку та надходження від

розподілених джерел сполук нітрогену та фосфору зі щоденною роздільною

здатністю;

- встановлено кількісний зв’язок між фізико-географічними

характеристиками об'єкту (клімат, ґрунти, природокористування), водним

стоком та винесенням біогенних елементів;

- побудовано кількісну модель азотного циклу для водозбірної

території;

- шляхом імітаційного моделювання встановлено вплив

сільськогосподарських практик на винесення сполук нітрогену з водозбірної

території малої річки.

20

Удосконалено:

- методи кількісного визначення поверхневого та латерального стоку;

- методологію розрахунку надходження забруднювальних речовин у

водні об'єкти від розподілених джерел.

Дістали подальший розвиток:

- методи розділення гідрографу стоку на складові (поверхневий,

латеральний, ґрунтовий);

- знання щодо сезонного розподілу стоку біогенних елементів та

впливу на нього водного стоку;

- знання щодо впливу застосування азотних добрив на біогенне

забруднення поверхневих вод біогенними елементами

Практичне значення отриманих результатів полягає в розширенні

теоретичних і практичних знань щодо закономірностей формування водного

стоку та винесення біогенних елементів із водозборів малих річок лісової зони

України. Основні наукові положення та висновки дисертаційної роботи доведено

до рівня конкретних методичних розробок і прикладних рекомендацій, що

можуть бути використані в подальших наукових дослідженнях.

Отримані результати можуть бути застосовані для моделювання водного

стоку та проведення кількісних оцінок надходження біогенних елементів від

розподілених джерел на водозборах лісової зони України як за наявності, так і за

відсутності моніторингу вод для підготовки планів управління річковими

басейнами, а також розроблення заходів із мінімізації біогенного забруднення та

зниження евтрофікації річкових екосистем. Розроблені практичні рекомендації

можуть бути використані для оцінки впливів застосування мінеральних добрив

та інших сільськогосподарських практик. Матеріали дисертаційного

дослідження можуть бути впроваджені в навчальні курси з фахової підготовки

здобувачів вищої освіти різних кваліфікаційних рівнів вищих учбових закладів

відповідного профілю, а також в освітньо-наукову програму підготовки

аспірантів за спеціальністю «гідрологія суші, водні ресурси, гідрохімія» в

Українському гідрометеорологічному інституті ДСНС України та НАН України.

21

Особистий внесок здобувача полягає у вивченні та аналізі наукової та

нормативної літератури за темою дисертаційної роботи, налаштуванні та

адаптації програмного комплексу SWAT для застосування в умовах України,

математичній обробці та узагальненні вихідних матеріалів дослідження. Усі

результати отримано здобувачем самостійно.

Формування мети й завдань досліджень, обговорення основних результатів

та висновків – разом із науковим керівником.

У роботах, підготовлених у співавторстві, особистий внесок здобувача

поділяється порівну з іншими співавторами.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати

досліджень було оприлюднено на міжнародних та всеукраїнських конференціях і

з’їздах: 16th Biennial Conference of the Euromediterranean Network of Experimental

and Representative Basins «Hydrological behavior in small basins under changing

conditions» (Bucharest, Romania, 2016 р.); International Soil and Water Assessment

Tool conference «SWAT 2017» (Warsaw, Poland, 2017 р.); Першому

Всеукраїнському гідрометеорологічному з’їзді (м. Одеса, 2017 р.).

Отримані результати обговорювалися на семінарах відділу гідрохімії

УкрГМІ, кафедри гідрології та гідроекології географічного факультету

Київського національного університету імені Тараса Шевченка, засіданні Вченої

ради УкрГМІ.

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 8 наукових

праць: 4 статті у фахових наукових виданнях, рекомендованих МОН України,

1 стаття в закордонному науковому фаховому виданні, 3 тези наукових

доповідей.