розвитку даної тематики.

Ключові слова: *гроза; атмосферний фронт; прогнозування гроз.*

Пространственно-временные особенности распределения гроз на территории Украины и их прогнозирование: современное состояние вопроса и перспективы развития

Гуда Е. В., Остроградская О. С.

Дается обзор современного состояния исследований и способов прогнозирования распределения гроз как в пространстве, так и во времени на территории Украины и изучаются аспекты перспективы дальнейшего развития данной тематики.

Ключевые слова: *гроза; атмосферный фронт; прогнозирование гроз.*

Spatial and temporal distribution features of thunderstorms on the territory of Ukraine and their forecasting: the current state of the issue and development prospects

Huda K. V., Ostrogradska O. S.

Thunderstorms are one of the most complex atmospheric phenomena, the characteristic feature of which is the close connection and interdependence of meteorological and electrical processes. The formation of large volumetric charges and, correspondingly, strong electric fields is accompanied by intense lightning discharges between clouds and the cloud and the surface. According to official statistics, thunderstorms occupy the second place among the natural factors that threaten human life, and their activity causes significant losses to various sectors of the economy and influences to the dynamics of ecosystems. Therefore, the problems of research and, in particular, the forecasting of thunderstorms are relevant and rather complicated tasks not only of meteorology, but also related sciences.

Features of the distribution of thunderstorms and their prediction were studied by not one generation of researchers. To do this, they used a variety of methods, including synoptic, climatic and numerical simulations. However, the interest in this problem does not disappear, because in the background of global warming there is an increase in cases of dangerous natural phenomena, including thunderstorm activity. Synoptic studies go to the background, with more experiments, using numerical models, which are an effective tool for modeling thunderstorms, but also for their prediction. But even during entering of input data, some difficulties may arise: primary information coming from meteorological stations is not complete, because of a great distance between stations it is impossible to record all thunderstorms on the territory of Ukraine. Therefore, for the sake of the most comprehensive picture, it is necessary to use the data of radars, lightning direction finders and satellites, which can be used to refine the forecast.

Thunderstorms are inextricably linked with cumulonimbus clouds, which makes it very important to study the properties of these clouds. Proceeding from this, the perspective direction is to improve the models of convective clouds, primarily for the study of electrical processes inside the clouds and the effect of these processes on the phase transitions of moisture and coagulation of cloudy elements.

Keywords: *thunderstorm; atmospheric front; thunderstorms forecasting.*

Надійшла до редколегії 23.05.2017

УДК 556.551.3/.4; +556.561.3/.4; 628.1.03

Осипов В.В.

Українській гідрометеорологічний інститут, м. Київ

ОБҐРУНТУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ОЦІНКИ ТА РЕГУЛЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ВОД УКРАЇНИ БІОГЕННИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

Ключові слова: *евтрофікація, нітроген, фосфор, моделювання, SWAT*

Вступ. Активне використання водних ресурсів у процесі функціонування людського суспільства призводить до ряду негативних екологічних наслідків, серед яких важливу роль відіграє порушення балансу організмів водної екосистеми за рахунок масового розвитку водоростей і вищих водяних рослин, добре відоме під терміном евтрофікація. Це явище призводить до погіршення фізичних, фізико-хімічних і органолептичних властивостей води і обмежує її подальше використання. Відомо, що перехід водних об'єктів до евтрофного стану може бути викликаний як

природними, так і техногенними процесами, серед яких за швидкістю, інтенсивністю та просторовим охопленням, безумовно, домінуюча роль належить антропогенному чиннику.

На початковому етапі боротьбу з підвищеною продуктивністю водних об'єктів в основному було направлено на подолання наслідків. Біомасу водоростей фізично збирали і вилучали з водного об'єкта, або обробляли плями «цвітіння» хімічними реагентами (мідним купоросом, окремими видами пестицидів, коагулянтами) з метою загальмувати подальше зростання біопродуктивності. Практична реалізація зазначених заходів показала їхню недостатню ефективність і згодом основні зусилля щодо боротьби з евтрофікацією зосередились на попередженні її виникнення. Головним завданням було запобігти збільшенню або знизити надходження до водних об'єктів елементів, які є пусковим механізмом масового розвитку водоростей, а саме, сполук нітрогену та фосфору. В англомовній літературі ці елементи відносяться до групи nutrients, тобто поживних елементів, що прямо відображає їхню роль у водних екосистемах.

До основних факторів, що обумовлюють надходження зазначених біогенних елементів, відносяться скидання стічних вод комунальних, промислових і сільськогосподарських підприємств; неконтрольоване використання добрив з подальшим змивом дощовими і талими водами, а також зарегулювання річкового стоку.

Розробка методів кількісної оцінки поточного стану та прогнозування стоку сполук нітрогену та фосфору, а також визначення домінуючих джерел їхнього надходження є важливим завданням регулювання забруднення поверхневих вод біогенними елементами, а також управління евтрофікацією водних об’єктів.

Актуальність цього завдання для України у багато разів підвищилася фактом підписання угоди про асоціацію з ЄС і взятими нашою країною зобов'язаннями щодо впровадження основних законодавчих актів ЄС у галузі водної політики (Водної рамкової директиви, директиви про стічні води міст, директиви з нітратів та ін.).

Стан питання. До теперішнього часу винесення елементів з водозбірної площі в Україні переважно оцінювалось розрахунковим шляхом. Не заглиблюючись в усі сильні і слабкі сторони вказаного підходу, відзначимо, що його застосування дає можливість отримання оцінок лише a posteriori. Згідно з чинним регламентом гідрохімічних спостережень, отримані дані генеруються в межах кварталу або року у цілому і дають можливість лише відобразити картину забруднення, що вже склалася. У той час, як для розробки заходів попередження евтрофікації і прийняття управлінських рішень на перший план виходить необхідність прогнозування.

Серед існуючих підходів вирішення цього завдання відзначимо статистичний, балансовий методи або використання фізико-математичних моделей, які адекватно описують процес надходження у водний об'єкт сполук нітрогену і фосфору.

Вибір методології прогнозування залежить від необхідної точності, завчасності, домінуючих шляхів і характеру надходження досліджуваних речовин.

На останньому зупинимося більш детально. За характером надходження сполук нітрогену та фосфору виділяють точкові і дифузні (розподілені) джерела [13, 14]. До перших відносяться місця організованого скидання урбанізованих, промислових або сільськогосподарських вод. Кількість забруднювальних речовин від таких джерел має відносно стабільні показники, рівномірно розподілені у часі і законодавчо контролюється через державну статистичну звітність 2ТП-Водгосп. Основним заходом впливу на такі джерела є підвищення рівня очищення стічних вод і лімітування обсягів їх скидання.

Дифузні джерела, навпаки, дуже динамічні, зміни їхніх характеристик нестаціонарні, спостерігаються через довільні інтервали, що перемежовуються.

Величина навантаження від такого джерела тісно пов'язана з гідрометеорологічними умовами, в першу чергу, атмосферними опадами.

З посиленням природоохоронного законодавства і вдосконаленням технологій виробництва та очищення стічних вод у багатьох розвинених країнах світу забруднення від точкових джерел стало відходити на другий план у порівнянні з часткою дифузних джерел. Так, дослідження, проведені у басейні р. Дунай, показали, що 46% загального винесення нітрогену і 28% фосфору змиваються саме з поверхні водозбору [8].

Забруднення водних об'єктів від дифузних джерел багато в чому визначається функціонуванням водозборів як гідрологічних систем, що забезпечують основні шляхи транспортування речовин [4, 6]. Для аналізу і прогнозування поведінки таких систем, провідні позиції завоювало математичне моделювання, що дозволяє вирішувати діагностичні, прогнозні завдання, проводити оцінки можливих змін під впливом кліматичних змін і діяльності людини.

Мета роботи – на підставі огляду наявних на сьогоднішній день моделей надходження і транспорту біогенних елементів (сполук нітрогену та фосфору), а також оцінки досвіду їх застосування у різних країнах ***запропонувати найбільш оптимальну модель*** для економічних, фізико-географічних умов України, а також її інформаційних можливостей, і провести апробацію запропонованої моделі на окремому водозборі.

Сучасні технології прогнозування винесення елементів з водозбірної території. На сьогоднішній день існує безліч моделей для контролю якості водних ресурсів. За даними авторів [5, 19] вже в 2005 р. кількість моделей, які знайшли своє застосування на різних континентах, перевищило 7 десятків.

За типом опису процесу наявні моделі розділяються на концептуальні (статистичні, емпіричні), які описують тільки найбільш значущі взаємозв'язки [17], і фізичні, що ґрунтуються на фізичних, хімічних і біологічних уявленнях перебігу процесів [10]. Спочатку практика моделювання ґрунтувалася на моделях із зосередженими параметрами (0 мірних) з подальшим розвитком перейшли до одновимірних (1D), двовимірних (2D), тривимірних (3D) моделей [22].

За типом об'єкта, що моделюється, розрізняють моделі, які описують гідрологічні процеси на поверхні водозбору (watershed), або моделі, сфокусовані головним чином на процеси, що протікають у русловій мережі (receiving water models) [19].

Серед інших характеристик важливо відзначити часове розділення (від року до хвилин), площу охоплення (від поля до системи водозборів), перелік елементів, надходження яких моделюється, тощо [19].

Існують також комплексні моделі, що представляють пов'язану систему з кількох окремих моделей. Наприклад, BASINS (Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources) – розробка агентства по захисту навколишнього середовища США, включає 7 моделей: HSPF, AQUATOX, Pollutant Loading Estimator, SWAT, SWMM, WASP, GWLF [2].

Як правило, чим складніше модель, яка має детальнішу фізичну основу з великою кількістю описуваних процесів та значним числом просторових вимірів, тим більший обсяг вихідних даних і ресурсів (часових, фінансових, професійних) буде потрібно для її роботи. Відповідно, вибір найскладнішої і комплексної програми не завжди виявляється ефективним для розв’язання проблеми у конкретних умовах.

Для вирішення поставленого завдання необхідно визначити перелік параметрів, які необхідно отримати на виході, проаналізувати характеристики об'єкта дослідження, доступні вихідні дані, оцінити ресурси і на основі цього сформулювати критеріальну базу відбору моделі.

Обґрунтування вибору моделі. В якості основного об'єкта апробації моделі обрано водозбір р. Головесня, правої притоки р. Десна, що представляє собою неурбанізовану територію площею 30,4 км^2. На території басейну розташовані пости спостереження Придеснянської водно-балансової станції (ВБС), в результаті чого було накопичено багаторічний архів щоденних спостережень за опадами, температурою повітря та ґрунту, вологістю, швидкістю вітру, хмарністю, а також щоквартальними величинами сонячної радіації, відомостями щодо використання земель.

Критеріальною базою для вибору оптимального алгоритму оцінки змиву нітрогену і фосфору були:

- просторове охоплення – водозбір;
- часовий інтервал – як мінімум 1 день;
- опис гідрологічних процесів – моделювання поверхневого, латерального і ґрунтового стоку;
- опис процесів перерозподілу сполук нітрогену та фосфору у системі «тверда фаза – вода». У цьому випадку для вибору моделі відігравали роль наступні параметри: транспорт біогенних елементів, оцінка щоденного сумарного навантаження за нітрогеном і фосфором і їхньої загальної концентрації у воді, концентрація нітратних, амонійних, фосфатних іонів;
- можливість варіювати показниками землекористування і сільськогосподарською практикою (застосування добрив, полив, терміни посіву, збирання тощо).

Зазначеним вимогам задовольняли наступні програми [9,18–20]: індивідуальні –AnnAGNPS, HSPF, INCA, SHETRAN, SWAT, WAM (раніше WAMView) і системні – BASINS (включає SWAT), MIKE SHE, TOOLBOX (включає WAM), WMS.

Для оцінки необхідних професійних, трудових і фінансових ресурсів з імплементації зазначених моделей було проведено порівняння за такими параметрами: наявність досвіду роботи, витрати часу на апробацію, обсяг вихідних даних, можливість технічної підтримки, вартість [1, 18, 19] (табл. 1).

З огляду на відсутність апробації даних моделей на території пострадянських країн, тобто низький професійний потенціал, відсутність в Україні достатніх фінансових ресурсів і середній набір вихідних даних (відсутні або недостатні дані про фізичні та хімічні параметри води, які вимірюються безпосередньо на території водозбору), для подальшого аналізу було обрано моделі AnnAGNPS, INCA, SWAT.

Модель AnnAGNPS (Agricultural Non-Point Source Pollution Model) не описує ґрунтовий стік [9], що є істотним недоліком, оскільки для річок України ґрунтова складова досить істотна.

Модель INCA (Integrated Catchment Model) серед форм нітрогену описує лише найбільш важливі, $N\text{-}NH_4^+$ і $N\text{-}NO_3^-$ [14], а її просторова роздільна здатність у 1 піксель = 1 км^2 недостатня для малих водозборів [21].

Виходячи з наведених аргументів, вибір був зупинений на моделі SWAT (Soil and Water Assessment Tool).

Зазначена модель розроблена під керівництвом Д. Арнольда для Служби сільськогосподарських досліджень (ARS) міністерства сільського господарства США (USDA), активно підтримується на федеральному рівні і постійно розвивається. SWAT має фізичну основу та комплексно описує процеси, які відбуваються на водозборі та у водоприймачі (річка, озеро), хоча процеси гідродинаміки у ній істотно спрощені. SWAT, у першу чергу, орієнтована на аграрні регіони, а процеси на урбанізованій території представлені поверхово. Незаперечною перевагою моделі є наявність широко спектру можливостей підбору різних видів сільськогосподарських культур і рослинного покриву, практик

землеробства (застосування органічних і неорганічних добрив, полив, оранка тощо) [12].

Таблиця 1 **Порівняльна характеристика відібраних моделей**

Назва моделі	Досвід	Витрати часу на апробацію	Обсяг вихідних даних	Можливість технічної підтримки	Вартість
AnnAGNPS	○	◑	◑	◑	●
BASINS	○	○	○	●	●
HSPF	-	-	○	●	●
INCA	○	◑	◑	◑	◑
MIKE SHE	-	-	○	●	- (>3000$)
SHETRAN	-	-	○	●	◑
SWAT	○	◑	◑	◑	●
TOOLBOX	○	○	○	●	●
WAM	○	-	○	◑	◑
WMS	-	○	○	◑	- (5600$)

Примітка.

***Досвід**:*
- значний обсяг навчання або досвід у моделюванні (як правило, є потреба у професійному досвід зі складними водозбірними або/і гідродинамічними моделями)
○ посередній обсяг навчання (передбачається деякий досвід з базовими моделями якості води)
Витрати часу на освоєння:
- дуже високі
○ високі
◑ середні

Обсяг вихідних даних:
○ високий
◑ середній
Можливість технічної підтримки:
◑ середня
● висока
Вартість:
- значна
◑ безкоштовна з обмеженим доступом (за запитом, реєстрація тощо)
● безкоштовна у публічному доступі

Додатковими перевагами моделі SWAT у порівнянні з іншими моделями є:

- детальна і якісна документація (теоретична частина та вихідні дані);
- відсутність обмежень за величиною водозбору – підходить як для малих (<1 км^2), так і дуже великих басейнів;
- сумісність з сучасними ГІС пакетами (ArcGIS і безкоштовний MapWindow GIS);
- наявність зовнішньої програми автокалібрування SWAT-CUP, яка також знаходиться у публічному доступі;
- входить до складу системної моделі BASINS, що дозволяє використовувати SWAT у комплексі з іншими програмами для вирішення більш широкого кола завдань.

Завдяки всім вищевказаним характеристикам, а також балансу між вхідною інформацією і одержуваним результатом, SWAT міцно утримує перше у світі місце за частотою використання. Як показав аналіз публікацій за період 1992–2010 рр., модель SWAT застосовувалась у 46% випадків, INCA – 12%, AnnAGNPS – 9%, HSPF – 8%, решта (37 моделей) – 25% [21].

Обговорення результатів. Для просторової реалізації моделі підготовлено наступні матеріали: цифрова модель рельєфу басейну р. Головесня, отримана за даними SRTM [7]; цифрова карта типів ґрунтів [3], векторна полігональна карта землекористування за даними знімків Google Earth, дані про фізичні характеристики ґрунтів.

Як відомо, масоперенос речовин у межах водозбору залежить від

характеристик основного носія – водного стоку. У зв'язку з цим першочерговим завданням з налаштування моделі SWAT було отримання гідрографа стоку. Калібрування моделі було виконано на прикладі водозбору р. Головесня за даними щоденних спостережень ВБС. В якості тестового був обраний 2010 рік. Отриманий гідрограф стоку представлено на рис. 1.

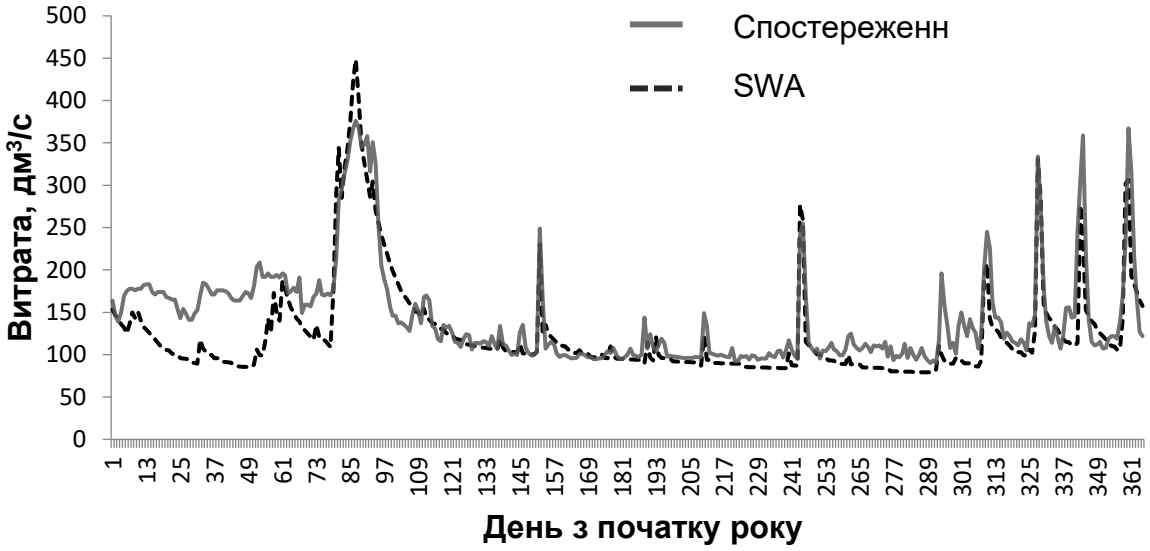

Рис. 1. **Хронологічний хід водного стоку р. Головесня за даними натурних спостережень та моделювання засобами SWAT (2010 р.)**

Ефективність моделювання гідрографа стоку оцінювали на підставі критерію Неша-Сатклiфа. Його величина для розрахункового року склала 0,6, що перевищує межу задовільної відповідності (0,5), але було трохи нижче межі доброї відповідності (0,65) [11]. Значення коефіцієнта парної кореляції склало 0,85, що свідчить про істотний зв'язок між реальними і змодельованими значеннями витрат води. Середнє відхилення склало 11,9%, що, в цілому, дещо перевищило допустимий показник варіабельності, який становить 10%. Основною причиною недостатньої точності є зимовий період, що обумовлено більшою кількістю чинників, які впливають на гідрологічний режим у період водопілля (танення снігу, рівномірність і ступінь промерзання ґрунту, мокрий сніг тощо).

Алгоритм моделювання загального стоку SWAT включає три складових, які залежать від умов стікання води: поверхневий стік, латеральний і підземний. Також враховуються процеси, пов'язані з евапотранспірацією.

Величина поверхневого стоку визначається за кривими емпіричної залежності між стоком і опадами, отриманими на експериментальних водозборах США:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{(R_{day} + 0.8S)} \quad , \qquad \textbf{(1)}$$

де Q_{surf} – поверхневий стік (мм); R_{day} – опади за день (мм); S – параметр утримання (мм H_2O), який розраховується за формулою:

$$S = 25{,}4\left(\frac{1000}{CN} - 10\right) \quad , \qquad \textbf{(2)}$$

де CN – номер залежності (curve number) «опади – поверхневий стік» у даний день. Параметр утримування є непостійним через зміну вмісту води у ґрунті, а також варіює при зміні типу ґрунту, характеру землекористування, нахилу.

Моделювання латерального стоку у SWAT засновано на кінематичній моделі нерозривності потоку [16]. Моделювання стоку реалізується у двох напрямках: у поперечному перерізі вниз по схилу і у горизонтальному до найближчого водоносного горизонту, який дренується річкою. Витрата латерального стоку, Q_{lat} (мм/день), розраховується за формулою:

$$Q_{lat} = 0{,}024 \cdot \left(\frac{2 \cdot SW_{ly,excess} \cdot K_{sat} \cdot slp}{\phi_d \cdot L_{hill}}\right), \quad \textbf{(3)}$$

де $SW_{ly,excess}$ – надлишок води у шарі ґрунту у стані повного насичення, K_{sat} – коефіцієнт фільтрації у момент насичення (мм/година), slp – зростання висоти від сегмента до сегмента, ϕ_d – пористість ґрунтового шару, який дренується, L_{hill} – довжина схилу (м).

Для опису процесу поповнення ґрунтових вод використовується функція експоненціального затухання [15]:

$$w_{rchrg,i} = (1 - \exp[-1/\delta_{gw}]) \cdot w_{perc} + \exp[-1/\delta_{gw}] \cdot w_{rchrg,i-1}\ , \quad \textbf{(4)}$$

де $w_{rchrg,i}$ – кількість води, яка надійшла у водоносний шар за день *i* (мм), δ_{gw} – час затримки або час дренування верхніх геологічних порід (доба), w_{perc} – кількість води, що просочилася з нижнього шару ґрунтового профілю за день *i* (мм), $w_{rchrg,i-1}$ – кількість води, що надійшла у водоносний шар за день *i-1* (мм).

Також оцінюється кількість води, яка надійшла в глибші горизонти, які не беруть участі у живленні річки.

Для імітації процесу сніготанення у SWAT варіювали такими параметри як температура випадіння опадів у вигляді снігу, температура початку танення снігу, швидкість танення, фактор запізнювання танення снігового покриву. У результаті ручного калібрування за вищевказаними параметрами було проведено порівняльний аналіз змодельованих запасів води у снігу та даних натурних спостережень. Встановлено, що модель достовірно описує кількість запасів води у снігу, а критерій Неша-Сатклiфа при цьому складає 0,96 (рис. 2).

Очевидно, для підвищення точності моделювання процесу формування стоку, у т.ч. і у період сніготанення, у першу чергу необхідна автокалібрація фільтраційних параметрів моделі (CN, коефіцієнт фільтрації ґрунту, діапазон активної вологи ґрунтів, δ_{gw} і ін.).

Висновки. Для оцінки надходжень біогенних елементів за рахунок розподілених джерел у світі отримали практичне підтвердження наступні програмні комплекси: AnnAGNPS, HSPF, INCA, SHETRAN, SWAT, WAM (раніше WAMView), BASINS, MIKE SHE, TOOLBOX, WMS та інші.

На підставі аналізу чутливості вказаних моделей до вхідних даних, вимог до професійних навичок користувачів, фінансових і часових характеристик оптимальною для України є ґрунтово-гідрологічна модель SWAT (Soil and Water Assessment Tool), яка має перше у світі місце за частотою використання.

Адаптацію програми SWAT для території України було проведено на прикладі малого водозбору р. Головесня (S = 30,4 км^2), правої притоки р. Десни. Вихідною інформацією для ручного калібрування моделі слугували матеріали спостережень Придеснянської воднобалансової станції за 2010 р.

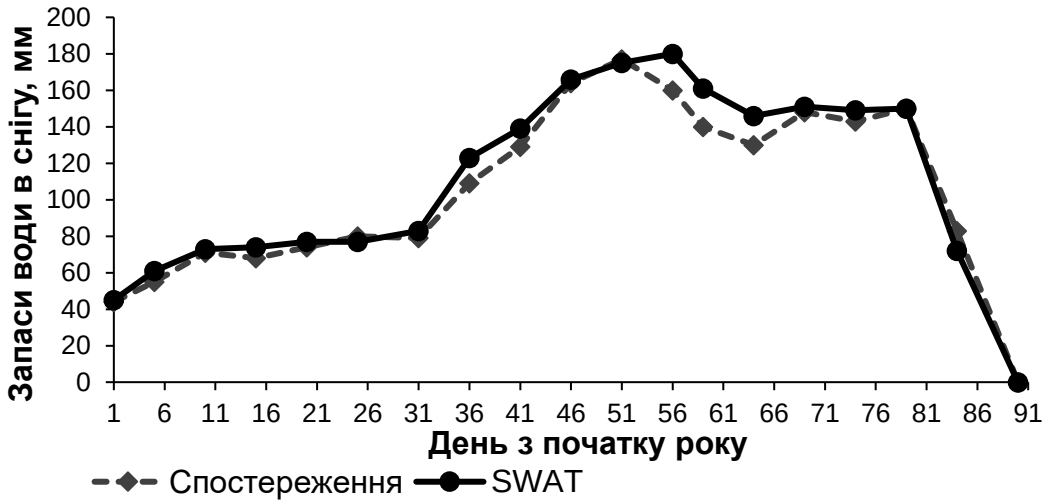

Рис. 2. **Хронологічний графік запасів воду у снігу за даними моделювання та натурних спостережень**

На першому етапі роботи у результаті ручного калібрування моделі отримано гідрограф стоку р. Головесня. Значення коефіцієнта парної кореляції між реальними і змодельованими значеннями витрат води складало 0,85, що свідчить про істотний зв'язку між зазначеними параметрами. У той же час ефективність виконаного розрахунку, оцінена за критерієм Неша-Сатклiфа, становила 0,6. Це перевищує межу задовільної відповідності (0,5), але не досягає значення категорії доброї відповідності. Найбільше відхилення розрахункових значень від реальних даних спостерігалося у період зимової межені, коли значення витрат, розрахованих моделлю, були занижені у середньому на 30%.

Перші отримані результати свідчать про прийнятність моделі SWAT для території України. Для поліпшення ефективності моделювання гідрографа стоку необхідно додатково задіяти зовнішній інструмент автокалібрування SWAT-CUP.

Список літератури

1. Офіційний сайт INCA. URL: http://www.reading.ac.uk/geographyandenvironmentalscience/Research/INCA/ges-INCA.aspx. **2.** Офіційний сайт Агентства по захисту навколишнього середовища США (EPA). URL: http://water.epa.gov/scitech/datait/models/basins/framework.cfm. **3.** Публічна кадастрова карта / Державна служба України з питань геодезії, картографії та кадастру. 2016. URL: http://map.land.gov.ua/kadastrova-karta. **4.** *Ханкс Р. Дж*. Моделирование баланса почвенных вод. Гидрогеологическое прогнозирование / Под ред. М.Г. Андерсона и Т.П. Берта. М.: Мир, 1988. С. 27-53. **5.** *Arheimer B. Olsson J*. Integration and Coupling of Hydrological Models with Water Quality Models: Applications in Europe. Swedish Meteorological and Hydrological Institute. 2001. **6.** *Black P.E*. Watershed functions. Water Resources Association. 1997. Vol. 33, № 1. P. 1-11. **7.** CGIAR Consortium for Spatial Information. SRTM 90m Digital Elevation Database v4.1. URL: http://srtm.csi. cgiar.org/SELECTION/listImages.asp. **8.** Environmental Programme for the Danube River Basin, Danube Integrated Environmental Study. Report Phase 1 // Commission of the European Communities. 1994, Jan. **9.** *Exbrayat J.-F., Breuer L., Viney N.R., Seibert J., Wrede S., Frede H.-G* Ensemble Predictions of Hydro-biogeochemical Fluxes at the Landscape Scale. 18th World IMACS/MODSIM Congress. Cairns, Australia. 13–17 July, 2009. **10.** *Heng H.H., Nikolaidis N.P*. Modeling of Nonpoint Source Pollution of Nitrogen at the Watershed Scale. Journal of the American Water Resources Association. 1998. Vol. 2. pp. 359-374. **11.** *Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., Veith T.L.* Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. American Society

of Agricultural and Biological Engineers, 2007. Vol. 50(3). pp. 885–900. **12.** *Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Williams J.R*. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2012. Texas Water Resources Institute. 2012. **13.** *Novotny V*. Diffuse (non-point) pollution – a political, institutional and fiscal problem. J. Water Pollut. Contr. Fed. 1988. Vol. 60(8). pp. 1404-1413. **14.** *Novotny V., Chesters G*. Handbook of non-point pollution. New York, NY: Van Nostrand Reinhold Co. 1981. 545 p. **15.** *Sangrey D*.A., *Harrop-Williams K.O., Klaiber J.A.* Predicting ground-water response to precipitation. ASCE J. Geotech. Eng. 1984. Vol. 110(7). pp. 957–975. **16.** *Sloan P.G., Moore I.D*. Modeling subsurface stormflow on steeply sloping forested watersheds. Water Resources Research. – 1984.Vol. 20(12). pp. 1815–1822. **17.** *Sloan W. T., Jenkins A., Eatherall A*. A simple model of stream nitrate concentrations in forested and deforested catchments in Mid-Wales. Journal of Hydrology, 1994. Vol. 158. pp. 61–78. **18.** *Srivastava P., Migliaccio K. W., Šimůnek J*. Landscape Models for Simulating Water Quality at Point, Field, and Watershed Scales. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 2007. Vol. 50(5). pp. 1683–1693. **19.** Total Maximum Daily Loads Model Evaluation and Research Needs. United States Environmental Protection Agency. 600/R-05/149. 2005, Nov. **20.** *Vanderkruk K., Owen K., Grace M., Thompson R*. Review of Existing Nutrient, Suspended and Metal Models Scientific review for Victorian Department of Sustainability and Environment. Australia. 2010. **21.** *Wellen C., Kamran-Disfani A.-R., Arhonditsis G.B*. Evaluation of the Current State of Distributed Watershed Nutrient Water Quality Modeling / Environ. Sci. Technol. 2015 Vol. 49. pp. 3278−3290. **22.** *Zhen-Gang Ji*. Hydrodynamics and Water Quality: Modeling Rivers, Lakes, and Estuaries. Canada: Wiley-Interscience. 2008. 675 p.

Обґрунтування математичної моделі для оцінки та регулювання забруднення поверхневих вод України біогенними елементами

Осипов В.В.

Виконано огляд існуючих моделей надходження і транспорту біогенних елементів з території водозбору, а також проведена оцінка досвіду їх застосування у різних країнах. Для використання в Україні запропоновано модель SWAT (Soil and Water Assessment Tool), що є найбільш оптимальною для економічних, фізико-географічних умов країни, а також з точки зору можливостей інформаційного забезпечення. Проведено апробацію запропонованої моделі на малому водозборі р. Головесня. Представлено результати калібрування моделі SWAT для показників водного стоку.

Ключові слова: *евтрофікація, нітроген, фосфор, моделювання, SWAT*

Обоснование математической модели для оценки и регулирования загрязнения поверхностных вод Украины биогенными элементами

Осипов В.В.

Выполнен обзор существующих моделей поступления и транспорта биогенных элементов с территории водосбора, а также проведена оценка опыта их применения в различных странах. Для использования в Украине предложена модель SWAT (Soil and Water Assessment Tool), являющаяся наиболее оптимальной для экономических, физико-географических условий страны, а также с точки зрения возможностей информационного обеспечения. Проведена апробация предложенной модели на малом водосборе р. Головесня. Представлены результаты калибровки модели SWAT для показателей водного стока.

Ключевые слова: *эвтрофикация, азот, фосфор, моделирование, SWAT*

Substantiation of mathematical model for estimation and regulation of surface waters pollution in Ukraine by nutrients

Osypov V.V.

Nowadays diffuse sources are a significant part of nutrient pollution. The processed-based watershed modeling is a powerful tool for management of nutrient loads. But this approach has not been developing in Ukraine. Therefore, the purpose of this study is to determine an optimal model for use on the territory of Ukraine

A review of existing models of nutrient emission (nitrogen and phosphorus compounds) has been performed, as well as an experience of their use in different countries was estimated. The model SWAT (Soil and Water Assessment Tool) has been proposed for use in Ukraine. This model is optimal for economic, physical and geographical conditions of the country, and from the point of view of the possibilities of information support.

SWAT model holds leading position in the field of nutrient pollution modeling because it combines a number of features of other models such as GIS compatibility, free access, supporting programs (e.g. SWAT-CUP), input-output balance, complex documentation, and others.

SWAT has been approved for the Golovesnya small river catchment (30,37 km^2). The result of manual runoff calibration is satisfactory (NS=0,6; pair correlation coefficient – 0,85; standard deviation – 11,9%). The most difficulties deal with cold period modeling due to a higher number of factors which influence on water flow formation and routing. High agreement with observations has been shown for the snowpack simulation (NS=0,96).

Key words: *eutrophication, nitrogen, phosphorus, modeling, SWAT*

Надійшла до редколегії 17.04.2017