

Полозенцева В. О., канд. техн. наук;

Юрченко А. І., завідувач лабораторії

Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», м. Харків, Україна

СУЧАСНІ МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ УТВОРЕННЯ ПОВЕРХНЕВОГО СТОКУ З СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ УГІДЬ ТА ЇХ ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ

Одним із ключових екологічних викликів сучасності є управління водними ресурсами в умовах змін клімату, інтенсифікації сільськогосподарського виробництва та деградації ґрунтів. Поверхневий стік із сільськогосподарських угідь є не лише джерелом втрати продуктивної вологи, а й чинником, що сприяє ерозії, змиву добрив і пестицидів, забрудненню водних ресурсів. Точне прогнозування обсягів та динаміки поверхневого стоку стає необхідною умовою сталого управління агроландшафтами.

У сучасній науковій практиці сформувався широкий спектр методів прогнозування поверхневого стоку: від простих емпіричних моделей до складних фізично-обґрунтованих або машинних систем прогнозу. Їх вибір залежить від доступності вхідних даних, мети дослідження, масштабів моделювання та технічних ресурсів.

Метою цієї роботи є огляд і порівняльний аналіз найсучасніших світових та вітчизняних методів прогнозування поверхневого стоку з сільськогосподарських угідь, а також оцінка можливості їх застосування в українських умовах.

У світовій практиці для прогнозування утворення поверхневого стоку найчастіше використовують глибокі неймережі (DAFormer, HydroGraphs), фізично обґрунтовані моделі (MIKE SHE, SWAT), гідрологічні системи (HEC-HMS) і емпіричні методи оцінки першого змиву (EMC) та гібридна модель PDBN [1–8].

Зазначені підходи є високотехнологічні та ґрунтуються на машинному навчанні, глибоких нейронних мережах, фізично обґрунтованому моделюванні та доменній адаптації даних. Зокрема, модель DAFormer демонструє високу точність прогнозів у регіонах з обмеженою кількістю вхідних даних [1].

Серед фізично обґрунтованих моделей варто відзначити MIKE SHE, яка охоплює повний гідрологічний цикл та успішно використовується в проектах

екологічної реабілітації в Данії, Індії, США та Китаї [3, 9–11].

У дослідженні, проведеному в штаті Вісконсин, США, модель HydroGraphs було використано для ідентифікації джерел забруднення поживними речовинами, що виникають внаслідок сільськогосподарської діяльності, та відстеження їх впливу на водні об'єкти. Модель дозволила ефективно виявити ключові джерела забруднення та оцінити їхній вплив на якість води [2].

Модель HEC-HMS, розроблена в США, є однією з найпоширеніших систем для моделювання гідрологічного стоку і також активно застосовується у Польщі та Чехії [12, 13], а також в українській практиці [14].

Інноваційним є також метод EMC і «першого змиву», що дозволяє оцінювати дифузне забруднення під час дощових подій, і знаходить застосування в міських та сільських басейнах Бразилії та Італії [15, 16].

PDBN дозволяє ефективно моделювати складні нелінійні взаємозв'язки між гідрологічними змінними, що особливо корисно для середньо- та довгострокового прогнозування стоку. Модель була створена у Китаї, де і набула широкого застосування [6].

Модель SWAT була розроблена в США для довгострокового моделювання гідрологічних та екологічних процесів у великих басейнах річок. Вона дозволяє оцінювати вплив змін у землекористуванні, кліматі та управлінні сільським господарством на водний баланс, ерозію ґрунтів, транспортування поживних речовин і пестицидів. Це одна з небагатьох моделей, яка була адаптована для умов України [17, 18].

В Україні застосовується широкий спектр підходів: емпіричні методи (метод В. М. Жука, А. І. Юрченка, коефіцієнтні методи), гідрологічні моделі (SCS-CN, SWAT), математичні моделі (детерміновані, стохастичні, гібридні), а також алгоритми машинного навчання (ANN, SVM, Random Forest, LSTM, CNN) [19–28].

Залежно від регіону застосовуються специфічні підходи: у степових регіонах основна мета – боротьба з ерозією та збереження вологи, у гірських районах – прогноз паводків і селів [14]. SCS-CN залишається найпопулярнішою моделлю на локальному рівні, тоді як SWAT широко використовується в рамках великих басейнів.

Емпіричні методи прогнозування поверхневого стоку залишаються важливим інструментом в Україні, особливо в умовах обмежених гідрологічних даних. Вони дозволяють швидко та ефективно оцінити водний режим сільськогосподарських угідь та приймати обґрунтовані рішення щодо управління водними ресурсами.

Таким чином, огляд іноземного досвіду у прогнозуванні утворення поверхневого стоку показує, що модель DAFormer демонструє високу адаптивність до регіонів з обмеженими вхідними даними. MIKE SHE забезпечує комплексне моделювання гідрологічного циклу, включаючи поверхневий та ґрунтовий стік, випаровування, інфільтрацію тощо. HEC-HMS активно застосовується у США та Європі як безкоштовна і доступна система для розрахунків стоку, а модель SWAT була успішно адаптована для умов України [17, 27].

Світові моделі відзначаються високою точністю, гнучкістю та здатністю до адаптації в умовах обмеженого доступу до даних, проте потребують складного налаштування і великих обчислювальних ресурсів. Вітчизняні методи простіші у впровадженні, проте іноді поступаються в точності.

Тому поєднання сучасних світових підходів із локальними українськими методами може дати синергетичний ефект. Адаптація таких моделей як DAFormer, MIKE SHE, HEC-HMS до умов України здатна значно підвищити якість управління водними ресурсами.

Висновки

Світовий досвід демонструє зростаючу роль складних фізичних і штучно-інтелектуальних моделей для прогнозування стоку. В Україні, попри обмежені ресурси, активно впроваджуються адаптивні локальні підходи, що враховують специфіку кліматичних умов і рельєфу. Найперспективнішим напрямом є інтеграція світових рішень (наприклад, DAFormer, MIKE SHE) з вітчизняними напрацюваннями і ГІС-технологіями для формування надійних регіональних моделей.

Література

1. Lukas Hoyer, Dengxin Dai, Luc Van Gool. DAFormer: Improving Network Architectures and Training Strategies for Domain-Adaptive Semantic Segmentation // Proceedings of the 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (June 18–24, 2022). – New Orleans, LA, USA: IEEE, 2022. – P. 9924–9935. URL: <https://doi.org/10.1109/CVPR52688.2022.00969>.
2. David L. Cole, Gerardo J. Ruiz-Mercado, Victor M. Zavala. A Graph-Based Modeling Framework for Tracing Hydrological Pollutant Transport in Surface Waters // Computers & Chemical Engineering. – 2023. – Vol. 179. – Art. 108457. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2023.108457>.

3. Jun-Tao, Zhang Hui-Min, Chang Bu-Hui. The Exploration Application of MIKE SHE Model in Qingtongxia Irrigation Area Water Recycle // *Advances in Engineering Research*. – Vol. 15. Proceedings of the 2nd Annual International Conference on Energy, Environmental & Sustainable Ecosystem Development (EESD 2016). – Atlantis Press, 2016. – P. 570–576. URL: <https://doi.org/10.2991/eesd-16.2017.79>.
4. Zhao H., Zhang J., James R. T., Laing J. Application of MIKE SHE/MIKE 11 Model to Structural BMPs in S191 Basin, Florida // *Journal of Environmental Informatics*. – 2012. – Vol. 19, issue 1. – P. 10–19. URL: [http://www.jeionline.org/index.php?journal=mys&page=article&op=viewFile&path\[\]=201200204&path\[\]=pdf_83](http://www.jeionline.org/index.php?journal=mys&page=article&op=viewFile&path[]=201200204&path[]=pdf_83). <https://doi.org/10.3808/jei.201200204>.
5. HEC-HMS Applications Guide / U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center. – 2008. URL: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>.
6. Zhaoxin Yue, Ping Ai, Chuansheng Xiong, Min Hong, Yanhong Song. Mid- to long-term runoff prediction by combining the deep belief network and partial least-squares regression // *Journal of Hydroinformatics*. – 2020. – Vol. 22, issue 5. – P. 1283–1305. URL: <https://doi.org/10.2166/hydro.2020.022>.
7. Singh P. Ganga Basin Case Study – SWAT Model / INRM Consultants Pvt. Ltd. – 2012. URL: <https://swat.tamu.edu/>.
8. Opher T., Ostfeld A., Friedler E. Modeling highway runoff pollutant levels using a data driven model // *Water Science and Technology*. – 2009. – Vol. 60, issue 1. – P. 19–28. URL: <https://doi.org/10.2166/wst.2009.289>.
9. LIFE Project Reports on Skjern Restoration / European Commission. URL: <https://ec.europa.eu/environment/life/>.
10. DHI India Project Overview (апрів проєктів). URL: <https://www.dhiindia.com/>.
11. Jaber F. H., Shukla S. MIKE SHE: Model Use, Calibration, and Validation // *Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)*. – 2012. – Vol. 55, issue 4. – P. 1479–1489. URL: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=42255&t=1&redir=&redirType=>
<https://doi.org/10.13031/2013.42255>.
12. Kanclerz J., Agaj T., Gizińska K. Comparison of Two Hydrological Models, the HEC-HMS and Nash Models, for Runoff Estimation in Michałówka River // *Sustainability*. – 2023. – Vol. 15, issue 10. – Art. 7959. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/10/7959>. <https://doi.org/10.3390/su15107959>.

13. Đukić V., Erić R. SHETRAN and HEC-HMS Model Evaluation for Runoff and Soil Moisture Simulation in the Jičinka River Catchment (Czech Republic) // *Water*. – 2021. – Vol. 13, issue 6. – Art. 872. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/6/872>. <https://doi.org/10.3390/w13060872>.
14. Kolinyk I., Chaskovskyy O., Mokrytska O., Storozhuk O., Kryshtapovych V. Principles of Software and Information for Modeling Hydrological River Basins of the Ukrainian Carpathians // *Computer Design Systems. Theory and Practice*. – Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2024. – Vol. 6, No. 3. – P. 154–159. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2024/dec/37439/2518.pdf>. <https://doi.org/10.23939/cds2024.03.154>.
15. Di Modugno M., Gioia A., Gorgoglione A., Iacobellis V., La Forgia G., Piccinni A. F., Ranieri E. Build-Up/Wash-Off Monitoring and Assessment for Sustainable Management of First Flush in an Urban Area // *Sustainability*. – 2015. – Vol. 7, issue 5. – P. 5050–5070. URL: <https://doi.org/10.3390/su7055050>.
16. Mangani G., Berloni A., Bellucci F., Tatàno F., Maione M. Evaluation of the Pollutant Content in Road Runoff First Flush Waters // *Water, Air, & Soil Pollution*. – 2005. – Vol. 160. – P. 213–228. URL: <https://doi.org/10.1007/s11270-005-2887-9>.
17. Osypov V., Osadcha N., Osadchyi V. SWAT Model Application for Simulating Nutrients Emission from an Agricultural Catchment in Ukraine // *Forum Geografic*. – 2016. – Vol. XV, Supplementary issue 2. – P. 30–38. URL: <https://forumgeografic.ro/wp-content/uploads/2016/s-2/Osypov.pdf>. <https://doi.org/10.5775/fg.2016.041.s>.
18. Osypov V., Osadcha N. SWAT Model Application for Simulating Nutrient Emission from Small Agricultural Catchment in the Desna River Basin (Ukraine) / *Project Management of Transboundary Rivers between Ukraine, Russia and the EU (MANTRA-Rivers)*. – Ukrainian Hydrometeorological Institute (UHMI), the State Service of Ukraine on Emergencies and National Academy of Science of Ukraine, 2017. – 23 p. URL: https://swat.tamu.edu/media/115742/g1-3-osypov.pdf?utm_source=chatgpt.com.
19. Сусідко М. М. Математичне моделювання процесів формування стоку як основа прогностичних систем // *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. – 2000. – Т. 1. – С. 32–40.
20. Самойленко В. М. Математичне моделювання в геоекології: навчальний посібник [електронна версія]. – К.: ВПЦ «Київський університет», 2003. – 233 с. URL: https://geo.knu.ua/wp-content/uploads/2021/06/samojlenko_mat_mod.pdf.

21. Лобода Н. С. Гідрологічні прогнози: конспект лекцій. – Одеса: ОДЕКУ, 2008. – 172 с. URL: http://eprints.library.odeku.edu.ua/8794/1/КЛ_Лобода%20Н.С._Гідрол_прогнози.pdf.
22. Жук В. М., Матлай І. І. Час поверхневої концентрації дощового стоку з лінійних в плані басейнів стоку при зміні похилу за степеневим законом // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2009. – № 655: «Теорія і практика будівництва». – С. 83–88. URL: <https://ena.lpnu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/524d9f91-123e-4b52-9995-31fabceb192b/content>.
23. Юрченко А. І. Методичні рекомендації щодо прогнозування надходження біогенних речовин та пестицидів з дифузних джерел сільськогосподарського походження до водних об'єктів // Інновації та науковий потенціал світу: матеріали III Міжнародної наукової конференції (м. Хмельницький, 10 листопада 2023 р.) / Міжнародний центр наукових досліджень. – Вінниця: ТОВ «УКРЛОГОС Груп», 2023. – С. 145–151. URL: <https://archive.mcnd.org.ua/index.php/conference-proceeding/issue/view/10.11.2023/44>.
<https://doi.org/10.36074/mcnd-10.11.2023>.
24. Белей О., Штаєр Л. Вплив поверхневого стоку на формування паводкових вод // International Science Journal of Engineering & Agriculture. – 2022. – Vol. 1, issue 3. – Р. 37–51. URL: <https://isg-journal.com/isjea/article/view/14/j-isjea-20220103.4>.
<https://doi.org/10.46299/j.isjea.20220103.4>.
25. Мисковець І. Я. Формування дощового стоку: теорія, методологія, розрахунки (на прикладі верхнього та середнього Подніпров'я): монографія. – Луцьк: ІВВ ЛНТУ, 2023. – 424 с. URL: https://lib.lntu.edu.ua/sites/default/files/2023-12/Монографія_Мисковець_2023_.pdf.
26. Кравчинський Р. Л., Хільчевський В. К., Корчемлюк М. В., Стефурак О. М. Моніторинг природних водних джерел Карпатського національного природного парку / За ред. В. К. Хільчевського. – Івано-Франківськ: «Фоліант». – 2019. – 124 с.
27. Осипов В. В., Спека О. С., Осадчий В. І., Осадча Н. М., Бончковський А. С. Прогнозування гідрографа водного стоку засобами SWAT (Soil and Water Assessment Tool) на прикладі басейну Десни // Доповіді Національної академії наук України. – Київ: Видавничий дім «Академперіодика», 2020. – № 9. – С. 98–107. URL: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2020.09.098>.
28. Приходькіна В. С. Особливості максимального стоку весняного водопілля в басейні р. Південний Буг та його розрахункові характеристики: дис. ... д-р. філософії:

103 «Науки про Землю» / Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України. – Київ, 2021. – 172 с. URL: https://old.uhmi.org.ua/spec_rada/docs/disertacia_prihodkina.pdf.