

СУЧАСНІ МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ МАКСИМАЛЬНОГО ТАЛО-ДОЩОВОГО СТОКУ РІЧОК

Д. В. Сіваєв, аспірант

Ж. Р. Шакірзанова, д-р геогр. наук, професор

Кафедра гідрології суші

sivaevevxxx1d@gmail.com

Актуальність. Сучасна гідрологічна наука переживає етап глибокої трансформації, спричиненої впливом кліматичних змін, зростанням екстремальності гідрометеорологічних умов та підвищенням вимог до точності прогнозів водного стоку. Підвищення температури повітря, зменшення частки снігового живлення, зміщення термінів танення снігу, збільшення кількості зимових відлиг і тало-дощових паводків – усе це суттєво ускладнює процеси формування стоку річок України та світу. У цих умовах математичне моделювання стає ключовим інструментом, що дозволяє науковцям і практикам здійснювати обґрунтовані прогнози водності, оцінювати ймовірність паводків і посух, визначати гідрологічні ризики та розробляти стратегії адаптації.

Математичні моделі, що застосовуються у гідрології, відрізняються за структурою, складністю, просторовою деталізацією та цільовим призначенням [1]. Одні моделі ґрунтуються на статистичних залежностях між гідрологічними та метеорологічними характеристиками, інші - описують фізичні процеси на основі рівнянь маси та енергії. Третя група моделей є інтегрованими комплексами, які охоплюють взаємодію поверхневих і підземних вод, аналіз землекористування, кліматичні сценарії та роботу гідротехнічних споруд. Кожна з моделей займає своє місце у системі гідрологічних прогнозів і використовується для різних масштабів і завдань.

Однією з моделей, яка традиційно застосовується в Україні для прогнозування характеристик весняного водопілля річок, є концептуальна модель «СЛОЙ-2», розроблена М.М. Сусідком та ін. [2]. Вона була створена для довгострокового прогнозування шарів стоку та максимальних витрат води весняного водопілля та ґрунтується на поділі водозбору на окремі територіальні елементи, що мають відмінні умови формування стоку [2]. Кожен елемент характеризується власними показниками снігозапасів, зволоження ґрунту, температурних умов і коефіцієнтів водовіддачі. Основна ідея моделі полягає у тому, що різні частини басейну по-різному реагують на надходження опадів та неодноразовість танення снігу, а їхня сукупна поведінка визначає інтегральний сезонний шар стоку.

Модель використовує температурні коефіцієнти танення снігу, запаси води у сніговому покриві, показники попереднього зволоження та промерзання ґрунтів, а також включає ряд емпіричних параметрів.

Простота структури моделі дозволяє здійснювати розрахунки у різних фізико-географічних умовах рівнинної України, що зробило «СЛОЙ-2» однією з базових моделей для гідрометеорологічних центрів у прогнозуванні весняних водопіль у басейнах Десни, Прип'яті та Дніпра. Попри свою обмежену можливість враховувати паводки змішаного походження та екстремальні тало-дошові процеси, модель і сьогодні є ефективною завдяки здатності забезпечувати надійні сезонні прогнози на 1-3 місяці вперед. Одним з важливих складових прогностичної системи є представлення прогностичних величин шарів стоку водопілля у картографічному вигляді. Прогнозування максимальних витрат води ведеться за прогнозованими шарами стоку при врахуванні морфометричних характеристик водозборів річок.

Суттєвий внесок у розвиток методів прогнозування максимального весняного стоку зроблено Одеською науковою школою теоретичної і прикладної гідрології. Комплекс моделей для різних регіонів України, розроблених під керівництвом Є.Д. Гопченка та Ж.Р. Шакірзанової [3], охоплює статистичні, статистико-динамічні та регресійні підходи до територіального довгострокового прогнозування максимальних витрат та шарів стоку весняного водопілля. Ці моделі використовують розширений набір метеорологічних показників - запаси води у сніговому покриві, температуру повітря, глибину промерзання та вологість ґрунтів. Особливого значення набувають регіональні поправочні коефіцієнти, запропоновані авторами [3], які дозволяють адаптувати середні багаторічні характеристики стоку до сучасних умов клімату

Ці коефіцієнти враховують тенденції останніх десятиліть, зокрема зниження весняного стоку та збільшення частоти тало-дошових паводків, що є наслідком тепліших зим. Завдяки цьому модель територіальних довгострокових прогнозів істотно покращує точність прогнозів максимального стоку весняного водопілля річок та забезпечує універсальність для різних регіонів України – від Полісся до Причорномор'я при картографічному представленні прогностичних величин максимального стоку річок. Крім прогностичних можливостей, ці моделі дозволяють проводити ймовірнісну оцінку гідрологічних ризиків і застосовуються під час гідротехнічного планування та експлуатації водогосподарських споруд при проходженні максимального річкового стоку у весняний, а в останній період й у зимовий сезони року.

Серед сучасних фізично обґрунтованих напіврозподілених моделей у глобальній гідрологічній практиці важливе місце займає модель SWIM (Soil and Water Integrated Model) [4]. Вона розроблена для моделювання процесів формування стоку, водного балансу ґрунтів, ерозійних процесів, транспорту поживних речовин та аналізу сценаріїв зміни клімату. Модель поєднує алгоритми гідрологічного моделювання з моделюванням росту рослинності, випаровування, інфільтрації та перколяції. На основі

цифрової моделі рельєфу SWIM поділяє річковий басейн на суббасейни, що дозволяє враховувати просторову неоднорідність кліматичних, ґрунтових та ландшафтних умов.

Перевага SWIM полягає у можливості застосовувати модель як для локальних басейнів площею 200-500 км², так і для великих річкових систем. Модель забезпечує добове моделювання стоку та широко використовується у дослідженнях впливу кліматичних змін на водний режим річок Європи, зокрема у роботах, присвячених аналізу змін паводкових величин і просторової узгодженості паводків [4]. Для України модель SWIM є перспективним інструментом для оцінки майбутньої водності басейнів Дніпра, Південного Бугу та Дністра.

Однією з найвідоміших і найпопулярніших моделей для гідрологічного моделювання водних екосистем є SWAT модель (Soil and Water Assessment Tool) [5]. Вона розроблена USDA та використовується у всьому світі для моделювання гідрографа водного стоку, оцінки ерозійних процесів, транспорту водорозчинних речовин та впливу землекористування. SWAT є детальною напіврозподіленою моделлю, яка поділяє басейн на суббасейни, а ті - на гідрологічні відповідні одиниці (HRU), що дозволяє враховувати різні типи ґрунтів, рослинності та рельєфу [5].

Модель SWAT має широкий спектр застосувань: від прогнозування паводкових піків до оцінки добових гідрографів стоку, моделювання маловодних періодів та оцінки заходів зі зменшення ризику ерозії. В Україні SWAT застосовується як науковими установами, так і екологічними організаціями, зокрема для моделювання стоку в басейнах Південного Бугу та Верхнього Дністра.

Для оперативного прогнозування паводків на великих територіях особливо цінною є Європейська система попередження про повені (EFAS), що працює у рамках Copernicus Emergency Management Service [6]. EFAS поєднує метеорологічні ансамблеві прогнози, супутникові дані та гідрологічні моделі, зокрема LISFLOOD, для створення ймовірнісних сценаріїв розвитку паводкової ситуації на горизонт 3-10 днів. Система дозволяє отримувати карти ризиків, повідомлення про можливі повені та дані для рятувальних служб [6]. Для України EFAS є важливим інструментом інтеграції у європейську систему управління паводковими ризиками, особливо у контексті директиви 2007/60/ЄС.

Окреме місце у світовій практиці займають моделі сімейства MIKE, розроблені Данським гідравлічним інститутом (DHI) [7]. Найбільш відома з них - MIKE 11, одномірна гідродинамічна модель, що використовує рівняння Сен-Венана для моделювання неусталених потоків у річкових руслах. MIKE дозволяє моделювати роботу водосховищ, шлюзів, ГЕС, урбанізованих ділянок річок і створювати прогнози паводків у реальному часі. Новіші моделі, такі як MIKE 21 та MIKE SHE, розширюють

можливості до двовимірного та тривимірного моделювання, що дозволяє відтворювати складні паводкові процеси на заплавах, враховувати підземний стік та взаємодію поверхневих та ґрунтових вод [7].

Висновки. Узагальнюючи, можна стверджувати, що сучасні математичні моделі є незамінним інструментом для прогнозування гідрологічних процесів в умовах змінного клімату. Концептуальні моделі, такі як «СЛОЙ-2» та регіональні моделі територіальних довгострокових прогнозів максимального стоку весняного водопілля річок, зберігають провідну роль у сезонних довгострокових прогнозах завдяки простоті та адаптованості до українських умов. Фізично обґрунтовані моделі SWIM, SWAT і MIKE забезпечують високу точність і гнучкість, дозволяючи моделювати як повені, так і маловодні періоди та складні просторові процеси у великих басейнах. Системи типу EFAS доповнюють їх, забезпечуючи оперативне прогнозування та раннє попередження.

Комплексне застосування різних моделей, у поєднанні з кліматичними сценаріями, супутниковими даними та ГІС-технологіями, є найбільш ефективним шляхом підвищення точності прогнозів та формування сучасної системи управління водними ресурсами України.

Перелік посилань

1. World Meteorological Organization (WMO). (2017). *WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals (WMO-No. 1203)*. Geneva: World Meteorological Organization. URL: <https://library.wmo.int/idurl/4/55797>
2. Сусідко М.М. Математичне моделювання процесів формування стоку як основа прогностичних систем. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. Наук. Збірник Київського національного університету ім.Тараса Шевченка, том 1. 2000. С.32-40.
3. Zhannetta Shakirzanova, Anhelina Dokus. Territorial long-term forecasting of hydrological characteristics of spring floods of lowland rivers, Editor(s): Sughosh Madhav, Shyam Kanhaiya, Arun Srivastav, Virendra Singh, Pardeep Singh, Ecological Significance of River Ecosystems, Elsevier, Chapter17. 2022, Pages 3250350. DOI: <https://doi.org/10.1016/B97800032308504502.0002000>
4. Krysanova, V., & Wechsung, F. (Eds.). (2016). *SWIM (Soil and Water Integrated Model): Model documentation and user manual*. Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK). URL: <https://www.pik-potsdam.de/en/institute/departments/computational-hydrology/models/swim>
5. United States Department of Agriculture (USDA). (2022). *SWAT: Soil and Water Assessment Tool — Theoretical Documentation, Version 2022*. Agricultural Research Service (ARS). URL: https://swat.tamu.edu/media/1230/swat_theoretical_manual_2022.pdf
6. European Commission, Joint Research Centre (JRC). (2021). *EFAS Technical Report: The European Flood Awareness System – System Overview and Operational Setup*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/12511>
7. Danish Hydraulic Institute (DHI). (2023). *MIKE 11 User Manual*. Hørsholm: DHI Water & Environment. URL: <https://manuals.mikepoweredbydhi.help>