

СИТУАЦІЙНО-ІНДУКТИВНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ЗАДАЧАХ ЕКСТРАПОЛЯЦІЙНОГО ПРОГНОЗУВАННЯ ЗА ДАНИМИ МОНІТОРИНГУ

Д.В. СТЕФАНИШИН

Анотація. Запропоновано підхід до екстраполяційного прогнозування явищ та процесів за даними моніторингу, що ґрунтується на ідеї ситуаційно-індуктивного моделювання. Згідно з цим підходом результати ситуаційного моделювання в межах вибіркового ряду динаміки, яким властива монотонність трендів або квазістаціонарність поведінки змінних моделей на відповідних часових інтервалах, формують підґрунтя для наступної побудови індуктивних моделей. Індуктивні моделі виконуються як моделі «рівнів» за результатами ситуаційного моделювання. На основі ситуаційних моделей в межах інтервалів часу, де ситуаційні моделі вважаються адекватними, здійснюється оперативне прогнозування (в режимі реального часу), а на основі індуктивних моделей, за допомогою яких у межах спостережених даних відслідковується еволюція ситуаційних моделей, виконується строкове прогнозування зі встановленням ситуаційних моделей для майбутніх часових періодів.

Ключові слова: екстраполяція, індуктивні та ситуаційні моделі, моделювання та прогнозування за даними моніторингу, оперативні та строкові прогнози.

ВСТУП

Прогнозування як процес наукового передбачення майбутніх станів систем процесів, явищ тощо покладено в основу більшості прикладних задач прийняття рішень, які розв'язуються в різних сферах життєдіяльності людини.

Розрізняють неформальні (якісні) та формальні (кількісні) методи прогнозування. Вважається, що кількісні прогнози, що ґрунтуються на математичному моделюванні, заслуговують на більшу довіру фахівців для прийняття зважених рішень [1, 2]. Тому розробленню формальних методів прогнозування з використанням математичного моделювання та кількісних оцінок приділяють особливу увагу.

Проблемами прогнозування займаються фахівці різних галузей знань (математики, економісти, інженери, екологи, політологи, соціологи), представники різних наукових напрямів та наукових шкіл. Із 70-х років минулого століття набула розвитку і окрема наукова дисципліна — прогностика [3], серед фундаторів якої були Д. Белл, Г.М. Добров, Г. Кан, В.О. Лисичкін, Дж. Мартіно, О. Хелмер. Значний внесок у розвиток кількісних методів прогнозування зробили також вітчизняні фахівці в галузі математичного моделювання та системного аналізу, зокрема, праці П.І. Бідюка, О.Г. Івахненка, М.З. Згуровського, М.М. Мойсеєва, Н.Д. Панкратової, В.С. Степашка та ін. [4–8].

Прикладні дослідження щодо кількісного прогнозування реальних систем, процесів, явищ тією чи іншою мірою передбачають використання

у моделюванні історичних, експериментальних або натурних даних — даних спостережень (моніторингу). Моніторинг, згідно з яким проводяться і систематичні спостереження за визначеними компонентами або параметрами об'єкта досліджень, спеціальним чином організовані в просторі та часі, а також комплекс методів оброблення й аналізу даних [9], відкриває принципово нові можливості для здобування знань та прогнозування поведінки досліджуваної системи, процесу, явища за отриманими даними спостережень на основі математичних моделей з метою прийняття відповідних рішень. Сучасні комп'ютеризовані й автоматизовані системи моніторингу (АСМ) дозволяють збирати необхідні дані у вигляді рядів динаміки для визначених параметрів у будь-яких обсягах, які можуть бути цілком достатніми для побудови адекватних математичних моделей за даними спостережень.

ДЕЯКІ ПРИНЦИПОВІ ЗАУВАЖЕННЯ ЩОДО СИТУАЦІЙНОГО ТА ІНДУКТИВНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Під ситуаційним моделюванням зазвичай розуміють спосіб моделювання, в основу якого покладено відтворення певних ситуацій (збігів умов і обставин функціонування системи) з метою розв'язання задач керування складними системами [10, 11]. Основна ідея ситуаційного моделювання полягає в тому, що повний опис нескінченної множини всіх можливих ситуацій функціонування реальної системи за певними правилами замінюється певною кількістю (скінченною множиною) узагальнених ситуацій, кожна з яких деякою мірою вірогідності відтворює один з можливих її станів. Ситуаційне моделювання набуло поширення в економіці, медицині, військовій справі, криміналістиці, політиці та в інших подібних сферах, а також у штучному інтелекті.

Зокрема, у штучному інтелекті розвиток логічного підходу до моделювання поведінки складних систем та процесів дав поштовх до створення ситуаційного числення — логічного формалізму, основними елементами якого є ситуації, дії та змінні [12]. Ситуаційне числення можна вважати математичною теорією ситуаційного моделювання. Найвагомий внесок у розвиток ситуаційного числення зробили такі відомі вчені в галузі штучного інтелекту, як Р. Рейтер, Дж. Маккарті, Р. Міллер і М. Шенехен. Згідно з цією теорією еволюція динамічної системи моделюється в розрізі її «пересування» по серії ситуацій, котрі є результатами різних дій. При цьому ситуації (Р. Рейтер) не відтворюють стани системи, а відображають історію певних подій як завершених послідовностей дій в певні періоди часу. Оскільки ситуації неможливо описати повністю, а лише деякі їх аспекти, то для опису еволюції системи використовується правило немонотонного виводу. Під час моделювання припускається (Дж. Маккарті), що на підставі минулих фактів, якими описують минулі ситуації, і загальних законів (або припущень), які задають виконання дій і виникнення подій в межах ситуацій, можна описати (передбачити) і деякі ситуації, що виникають у майбутньому.

Під індуктивним моделюванням розуміють насамперед новий напрям у моделюванні складних процесів і систем, який пов'язує із працями О.Г. Івахненка та його численних учнів і послідовників, що знайшов своє

теоретичне та практичне відображення в методі групового врахування аргументів [5, 6]. Це оригінальний метод моделювання за експериментальними даними, який відрізняється від інших методів побудови моделей за даними спостережень активним застосуванням принципів автоматичної генерації варіантів структур моделей, яка імітує процес біологічної селекції з попарним врахуванням послідовних ознак, неостаточних рішень і послідовної селекції за зовнішніми критеріями для побудови моделей оптимальної складності. Для порівняння і вибору кращих моделей застосовуються зовнішні критерії, що ґрунтуються на поділі вибірки на дві і більше частин, причому оцінювання параметрів і перевірка якості моделей виконуються на різних підвибірках. Замість традиційного дедуктивного шляху структурно-параметричної ідентифікації моделей за даними спостережень «від загальної теорії – до конкретної моделі» пропонується новий, індуктивний підхід «від конкретних даних – до загальної моделі». Згідно з цим підходом на підставі наявних даних спостережень висувається гіпотеза про можливий клас моделей, формується процедура автоматичної генерації тисяч і десятків тисяч альтернативних моделей у цьому класі та задається критерій вибору найкращої моделі з усіх генерованих. Оскільки найбільш трудомістка, рутинна робота виконується на ЕОМ, це дозволяє обійтись без обтяжливих апріорних припущень, з'являється можливість мінімізувати вплив суб'єктивних факторів, врахувати різні види апріорної невизначеності під час побудови моделі. Натепер метод групового врахування аргументів розглядають як одну з найбільш передових інформаційних технологій здобуття знань з даних спостережень, або як один з найбільш ефективних методів інтелектуального аналізу даних.

ПРОБЛЕМИ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗА ДАНИМИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ТА МЕТА РОБОТИ

Коли дані збиралися без застосування АСМ, то, на думку фахівців, обсяги необхідних для моделювання даних спостережень завжди вважалися недостатніми для побудови кращих, більш адекватних математичних моделей. Однак, як показує, наприклад, багаторічний досвід використання АСМ на гідроспорудах київського гідровузла [13], завдяки цій системі можна нагромадити надзвичайно багато даних, кількість яких може вважатися більш ніж достатньою для моделювання, але, як виявилось, велика кількість даних не завжди сприяє підвищенню якості традиційних математичних моделей, навіть найпростіших моделей регресійного типу, структура яких може дуже ускладнюватися. І чим складнішою виявляється структура математичної моделі, що будується за даними моніторингу, тим важче забезпечити її адекватність для цілей прогнозування.

У більшості практичних випадків прогнозування за даними моніторингу виконується у формі екстраполяцій з виявленням усталених тенденцій в розвитку системи або процесу та їх перенесенням на майбутнє методами, що ґрунтуються на аналізі часових рядів та казуальному (причинно-наслідковому, регресійному) моделюванні. Серед найбільш використовуваних математичних моделей виділяються різні статистично-імовірнісні моделі, за якими можуть виконуватися екстраполяції: тренди, регресії, функції

розподілу ймовірності тощо [1, 4, 14–16]. Такий підхід до прогнозування за даними спостережень поведінки систем в умовах усталених, еволюційних режимів розвитку та в разі обмежень, що не допускають різких змін у поведінці системи, біфуркацій і катастрофічних сценаріїв, може вважатися цілком виправданим [17].

Утім, як відомо, традиційні методи побудови статистичних моделей за даними спостережень не завжди відповідають граничним обмеженням, які на такі моделі накладаються [13, 14, 17]. Практика показує, що зі збільшенням кількості нагромаджених даних спостережень проблеми, пов'язані з розв'язанням оптимізаційної задачі, можуть виникати навіть у випадках використання відносно простих статистичних моделей. При цьому ускладнення структури статистичної моделі за рахунок врахування додаткових факторів та параметрів, нелінійних ефектів тощо можуть підвищувати її якість як інтерпретаційної моделі в межах спостережуваних даних, але погіршувати її якість як прогностичної моделі екстраполяції.

Мета роботи — презентація нового підходу до екстраполяційного прогнозування поведінки систем, явищ та процесів за даними моніторингу, що ґрунтується на ідеї комбінованого ситуаційно-індуктивного моделювання з формулюванням основних його положень та реалізацією на реальному прикладі.

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ СИТУАТИВНО-ІНДУКТИВНОГО ПІДХОДУ ДО МОДЕЛЮВАННЯ ЗА ДАНИМИ МОНІТОРИНГУ

Під ситуаційною моделлю надалі будемо розуміти модель, яка адаптована до певної ситуації (відповідні обставини адаптації назвемо прогнозним фоном) і яка може вважатися адекватною лише в ситуації, що розгортається протягом обмеженого періоду часу. Прогнозний фон характеризуватимемо як сукупність зовнішніх і/або внутрішніх умов, істотних для вибору структури відповідної ситуаційної моделі, яка розробляється за даними спостережень з метою прогнозування.

Ситуаційні моделі будуються на основі вибіркового ряду динаміки належним чином організованих актуальних (фактичних) даних спостережень для залежних і незалежних змінних моделей, де вибіркові ряди динаміки (кластери) відповідають деяким установам критеріям однорідності, які формулюються з урахуванням поведінки значень рядів динаміки, змінних на відповідних часових інтервалах:

- нестационарні коливання з монотонно зростаючим трендом; можуть також виділятися інтервали відносно повільного і відносно швидкого зростання трендів;

- нестационарні знакозмінні коливання з монотонно зростаючим трендом;

- нестационарні коливання з монотонно спадним трендом; можуть також виділятися інтервали відносно повільного і відносно швидкого спадання трендів;

- нестационарні знакозмінні коливання з монотонно спадним трендом;

- випадкові стаціонарні коливання значень ряду (з «нульовим» трендом).

Припускається, що побудовані на відповідних вибіркових рядах динаміки ситуаційні моделі можуть відображати окремі фазові стани динамічної системи на різних інтервалах часу. При цьому перехід від однієї ситуаційної моделі до іншої, які визначають сусідні фазові стани системи, може відбуватися немонотонно (рис. 1).

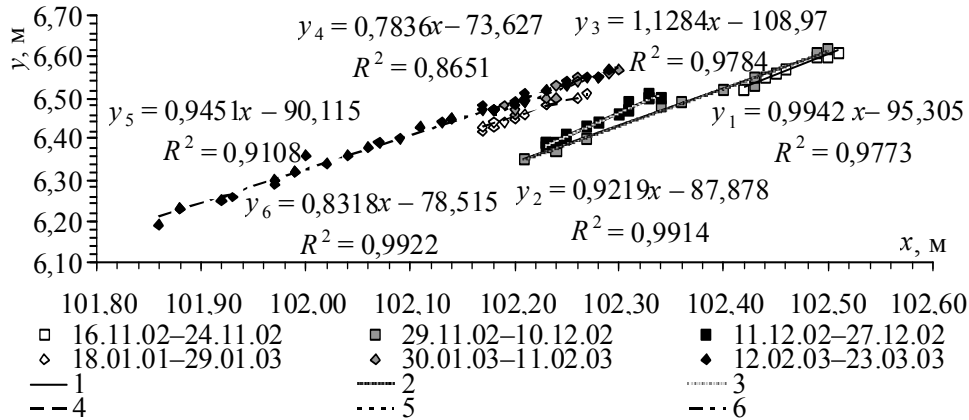


Рис. 1. Приклад побудови ситуаційних моделей у вигляді простих лінійних регресій (за даними [13])

За такої постановки задачі ситуаційного моделювання за даними моніторингу як рівняння зв'язку можуть використовуватися відносно прості залежності, що легко адаптуються до змін у рядах динаміки, пов'язаних у тому числі і зі змінами прогнозного фону, які можуть зумовлюватися факторами, що з тих чи інших причин не враховуються в ситуаційній моделі безпосередньо.

Під індуктивною моделлю будемо розуміти модель, отриману з узагальнення (ансамблю) кількох моделей (ситуаційних або індуктивних). По суті, у розгляданому випадку індуктивні моделі являють собою моделі «рівнів», які визначають поведінку залежних змінних за деяких фіксованих значень незалежних змінних. Індуктивні моделі будуються на основі рядів модельних даних, що являють собою результати статистичного оброблення актуальних даних і/або результати ситуаційного моделювання. Індуктивна модель, яка вибудовується на основі узагальнення сім'ї ситуаційних моделей і охоплює кілька кластерів актуальних даних, може відображати еволюцію відповідних ситуаційних моделей як еволюцію фазових станів динамічної системи в часі (рис. 2).

Індуктивні моделі можна будувати за результатами ситуаційного моделювання за весь період спостережень, або за результатами ситуаційного моделювання на кластерах одного виду. Структура індуктивних моделей визначається особливостями рядів динаміки результатів ситуаційного моделювання, що можуть бути нестационарними або стаціонарними (квазі-стаціонарними). У випадку стаціонарних рядів динаміки, поданих результатами ситуаційного моделювання, індуктивні моделі зазвичай виконуються у вигляді регресій, а у випадку нестационарних рядів за високих коефіцієнтів детермінації трендів їх можна виконувати у вигляді відповідних трендів. У більш складних випадках індуктивні моделі виражають як композиції трендів і регресій «залишків» вилучення трендів тощо. У разі потреби для побу-

дови як ситуаційних, так і індуктивних моделей можна враховувати транспортні лаги між змінними моделей та застосовувати прийоми адаптаційного моделювання.

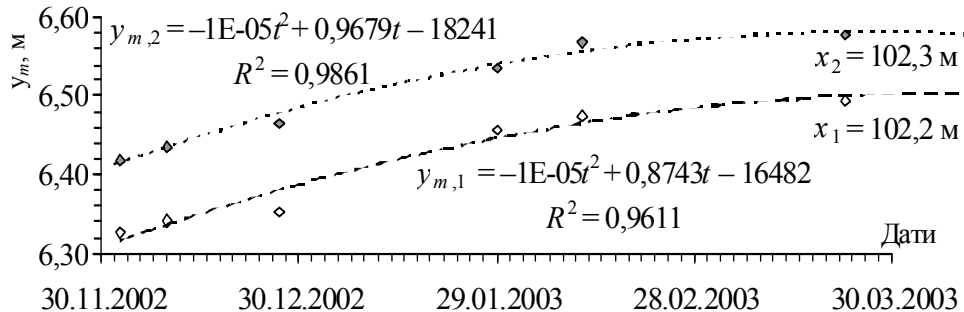


Рис. 2. Приклад побудови індуктивних моделей «рівнів» у вигляді трендів (за даними рис. 1)

ЕКСТРАПОЛЯЦІЙНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ НА ОСНОВІ СИТУАТИВНО-ІНДУКТИВНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЗА ДАНИМИ МОНІТОРИНГУ

Установлюються два основні види прогнозів-екстраполяцій на основі ситуативно-індуктивного моделювання: оперативні прогнози і строкові прогнози.

Оперативні (у режимі реального часу) прогнози-екстраполяції виконують на основі нових даних, які потребують ретельного коригування попередніх ситуаційних моделей (моделей минулого періоду). Можна виконувати також серію оперативних прогнозів у міру надходження нових даних.

Строкові прогнози-екстраполяції виконують на основі індуктивних моделей. Прогнозування зводиться до встановлення ситуаційних моделей, що можуть відповідати очікуваним ситуаціям (у майбутні періоди). Точність строкових прогнозів істотно підвищується, якщо індуктивні моделі будуються на основі ситуаційних моделей минулих періодів, дані яких належать спорідненим кластерам актуальних даних (з урахуванням сезонного фактора, характеру поведінки вибірових рядів динаміки і т. ін.).

Приклад прогнозування ймовірних втрат від повеней в басейні р. Тиса (Закарпатська область) за даними моніторингу збитків та витрат води

Ряди динаміки максимальних витрат води паводків на р. Тиса (заміряні на гідрометричному посту у створі Вилок) та збитків від руйнівних повеней в її басейні в межах Закарпатської області, що використовувалися під час моделювання та прогнозування ймовірних утрат, зображено на рис. 3. Маємо ряд динаміки збитків (рис. 3, б), який в цілому є нестационарним і характеризується загальною тенденцією до наростання збитків у часі на фоні стаціонарного, без вираженого тренда, ряду максимальних витрат води р. Тиса (рис. 3, а). Імовірні втрати визначалися як добутки значень збитків та емпіричних ймовірностей перевищення відповідних їм значень максимальних витрат води, що при цьому спостерігалися [18].

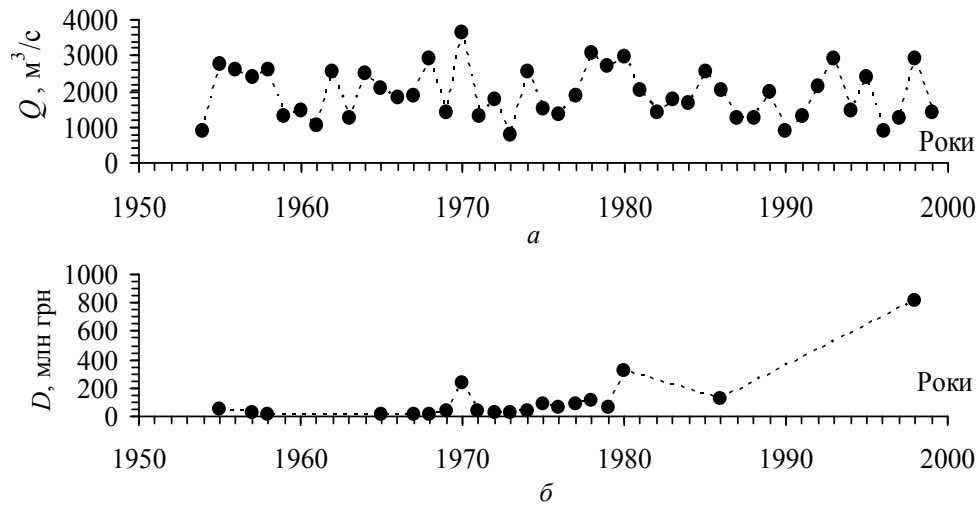


Рис. 3. Ряди динаміки: а — максимальних витрат води Q паводків на р. Тиса (гідрометричний створ Вилोक); б — збитків D від руйнівних повеней в басейні р. Тиса (Закарпатська область)

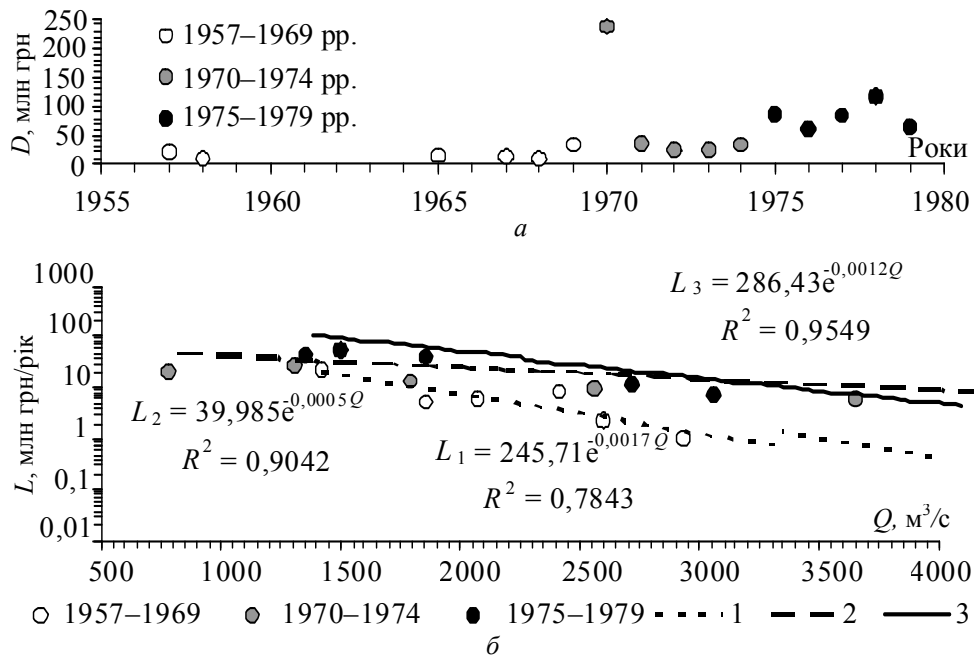


Рис. 4. Виділення модельних кластерів у ряду динаміки збитків (а) та ситуаційні моделі ймовірних втрат L (б) від максимальних витрат Q повеней в басейні р. Тиса (Закарпатська область) в інтервалі 1957–1979 рр.

Три модельні кластери в ряду динаміки збитків показано на рис. 4, а, результати ситуаційного моделювання залежності ймовірних втрат (ризиків збитків) від максимальних витрат води — на рис. 4, б, а результати індуктивного моделювання та прогнозування ймовірних втрат — на рис. 5 і 6.

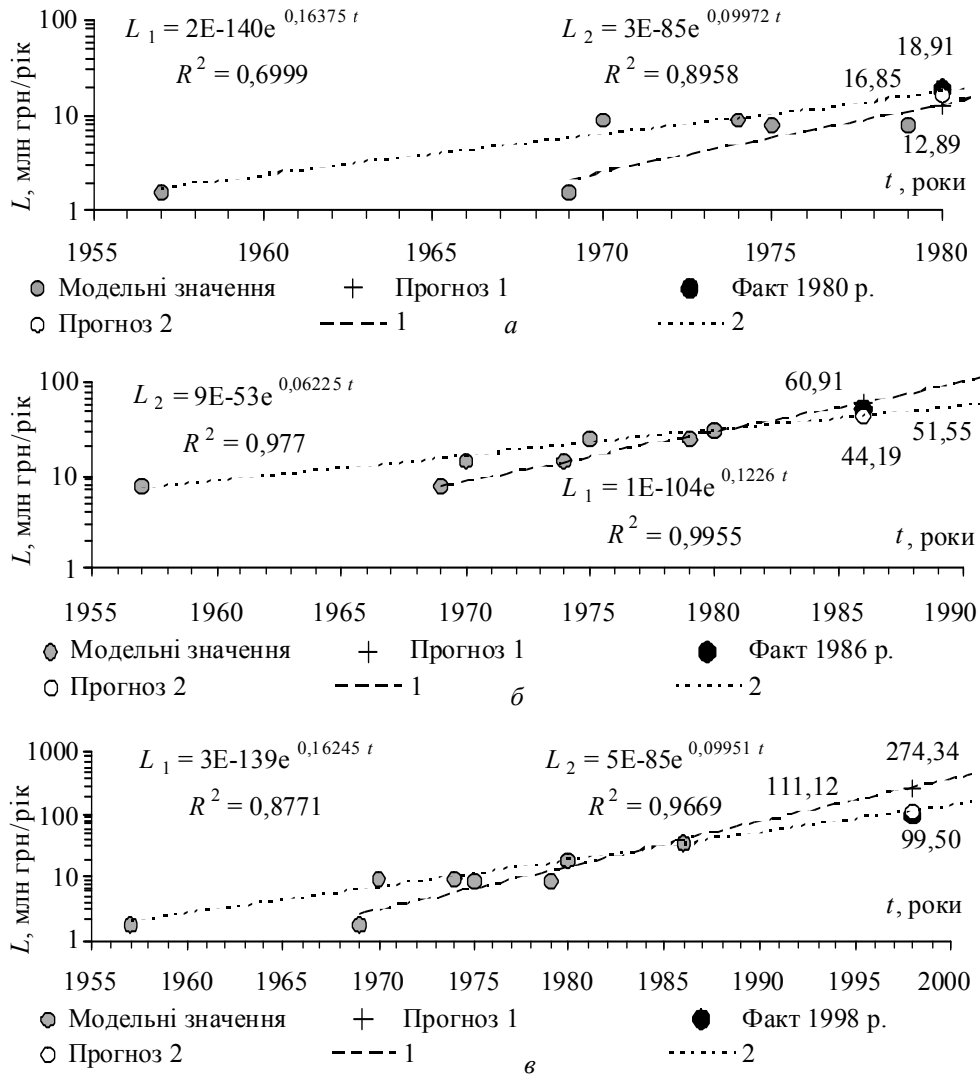


Рис. 5. Зіставлення фактичних значень імовірних втрат L від великих повеней 1980 р. (а), 1986 р. (б), 1998 р. (в) у басейні р. Тиса (Закарпатська область) з результатами їх ретроспективного прогнозування з використанням індуктивних моделей

Результати тестування адекватності індуктивних моделей імовірних втрат як функцій часу при визначених витратах води, що будувалися на підставі результатів ситуаційного моделювання, показано на рис. 5. Виконувалися по два ретроспективні прогнози ймовірних втрат унаслідок великих повеней 1980, 1986, 1998 рр., що завдали значних збитків (325, 127,9, 810 млн грн відповідно): схема 1 — як для останнього року на відповідному ситуаційному інтервалі; схема 2 — як для першого року на відповідному ситуаційному інтервалі. Оскільки результати ретроспективного прогнозування за схемою 2 точніше відповідали фактичним значенням імовірних втрат (відносні похибки прогнозів становили не більше як 11%, 15%, 12% відповідно), то надалі індуктивні моделі будували зі встановленням ситуаційних моделей наступних періодів за схемою прогнозу 2.

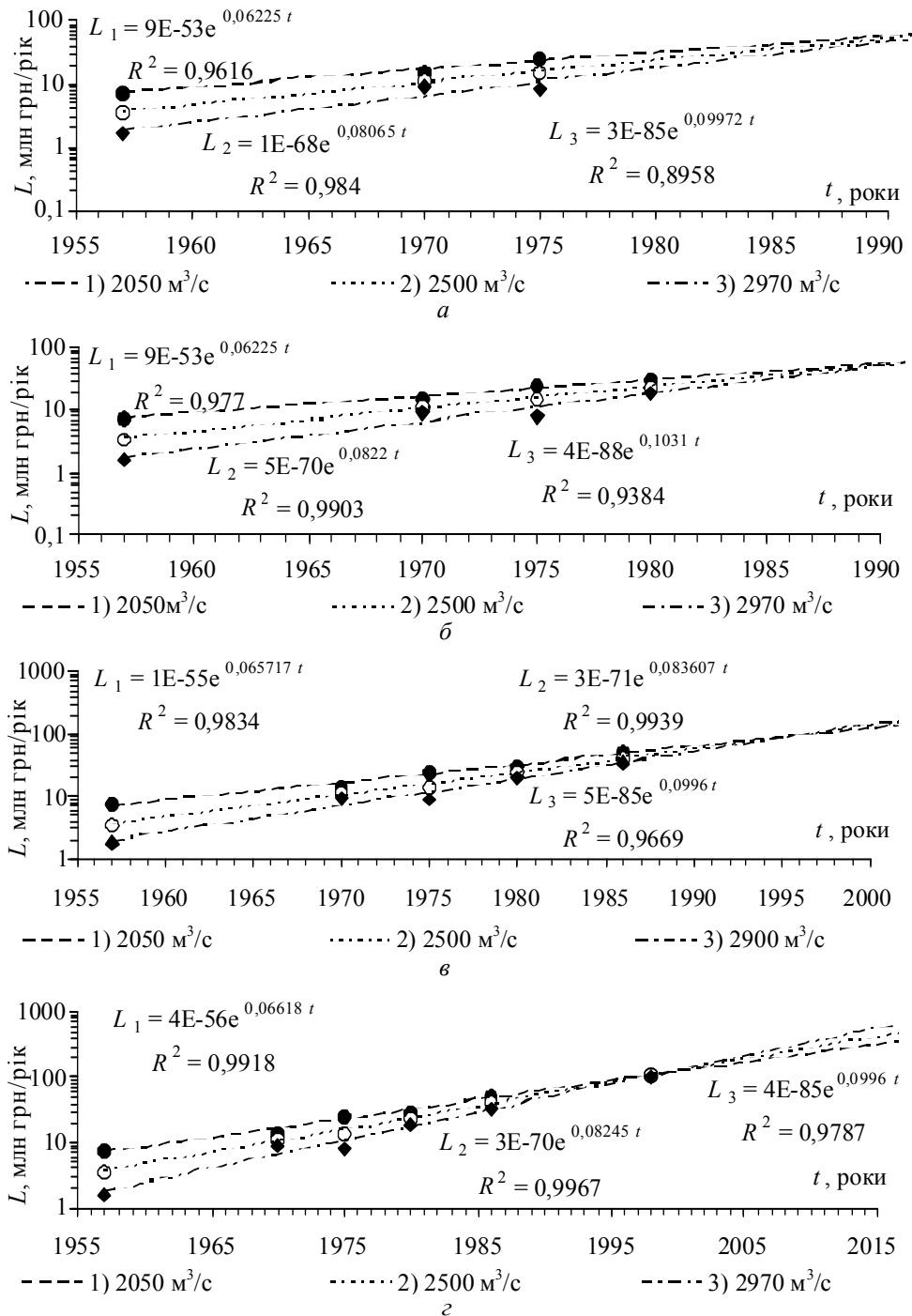


Рис. 6. Індуктивні моделі ймовірних втрат L від повеней за результатами ситуаційного моделювання в інтервалі 1957–1979 рр. (див. рис. 4 б, а) та в 1980 (б), 1986 (в), 1998 (з) рр. (рис. 7)

Строкові прогнози за допомогою індуктивних моделей на 1980 р. (рис. 5, а і б, а) виконувалися за результатами ситуаційного моделювання, наведеними на рис. 4, б. Під час прогнозування ймовірних утрат в 1986 і 1998 рр. відповідні результати, отримані за допомогою індуктивних моделей

(рис. 5, б, в та рис. 6, б, в), коригувалися з урахуванням фактичних значень ймовірних втрат на 1980 і 1986 рр. відповідно. Побудовані ситуаційні моделі показано на рис. 7 (моделі 4, 5), а результати прогнозування до 2015 р., отримані в ході ситуаційно-індуктивного моделювання за всіма наявними даними, — на рис. 3.

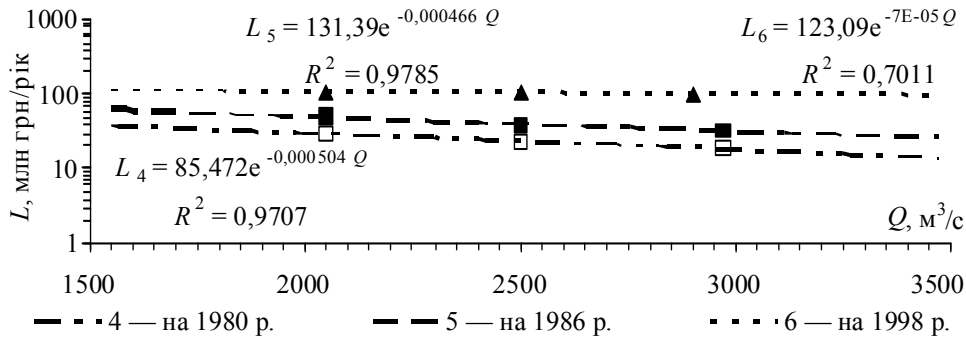


Рис. 7. Ситуаційні моделі ймовірних втрат L від максимальних витрат Q паводків у басейні р. Тиса (Закарпатська область), побудовані за допомогою індуктивних моделей на 1980 р. (рис. 6, а), 1986 р. (рис. 6, б) та 1998 р. (рис. 6, в)

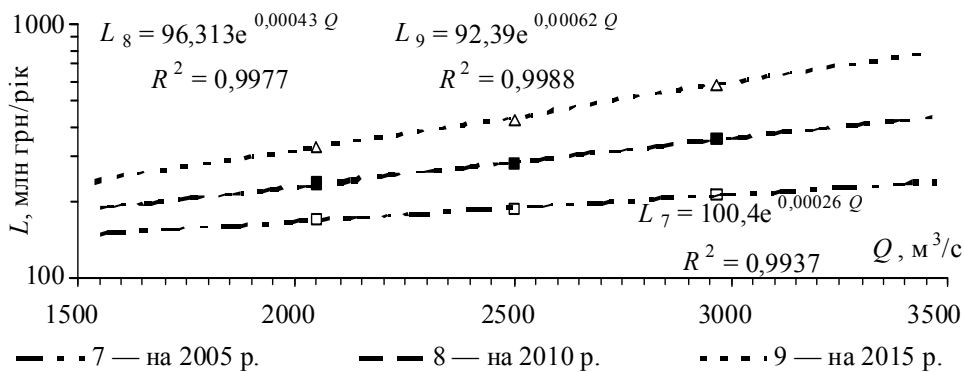


Рис. 8. Результати прогнозування ймовірних втрат L від максимальних витрат Q паводків у басейні р. Тиса (Закарпатська область) на 2005, 2010 та 2015 рр. за даними рядів динаміки, показаними на рис. 3

Розглянутий приклад показав принципову можливість екстраполяційного прогнозування за даними моніторингу на основі ситуаційно-індуктивного моделювання. Показано, що таке моделювання дозволяє реалізувати основні ідеї сучасного адаптаційного підходу до моделювання і прогнозування за даними спостережень, зокрема забезпечити постійне коригування індуктивних моделей у міру надходження нових даних для підвищення якості строкових прогнозів.

ВИСНОВКИ

Запропоновано підхід до екстраполяційного прогнозування за даними моніторингу, що ґрунтується на ідеї ситуаційно-індуктивного моделювання, згідно з яким результати ситуаційного моделювання в межах вибіркового ряду динаміки, які характеризуються монотонністю в трендах або квазістаціонарністю поведінки змінних моделей на відповідних часових інтервалах, фор-

мують підґрунтя для наступної побудови індуктивних моделей. Індуктивні моделі можна виконувати за результатами ситуаційного моделювання як моделі «рівнів». На основі ситуаційних моделей в межах інтервалів часу, де ситуаційні моделі вважаються адекватними, може виконуватися оперативне прогнозування з використанням індуктивних моделей, за допомогою яких у межах спостережених даних відслідковується еволюція ситуаційних моделей, — строкове прогнозування зі встановленням ситуаційних моделей майбутніх періодів. У подальших дослідженнях на реальних прикладах передбачається проаналізувати вплив на якість строкових прогнозів, виконаних за допомогою індуктивних моделей, результатів ситуаційного моделювання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Довгий С.О. Методи прогнозування в системах підтримки прийняття рішень / С.О. Довгий, П.І. Бідюк, О.М. Трофимчук, О.І. Савенков. — К.: Азимут-Україна, 2011. — 608 с.
2. Бернстайн П. Против богов: Укрощение риска / П. Бернстайн // Пер. с англ. — М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2000. — 400 с.
3. Горбатенко В.П. Еволюція прогностики як системи наукових знань про майбутнє / В.П. Горбатенко // Стратегічні пріоритети. — № 1(2). — 2007. — С. 11–17.
4. Бідюк П.И. Сравнение некоторых методов прогнозирования на нестационарных процессах / П.И. Бідюк, А.В. Федоров // Проблемы управления и информатики. — 2008. — № 2. — С. 130–139.
5. Ивахненко А.Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем / А.Г. Ивахненко. — К.: Наук. думка, 1982. — 296 с.
6. Ивахненко А.Г. Помехоустойчивость моделирования / А.Г. Ивахненко, В.С. Степашко. — К.: Наук. думка, 1985. — 216 с.
7. Згуровский М.З. Системный анализ / М.З. Згуровский, Н.Д. Панкратова. — К.: Наук. думка, 2011. — 900 с.
8. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа / Н.Н. Моисеев. — М.: Наука, 1981. — 487 с.
9. Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды / Ю.А. Израэль. — Л.: Гидрометеоиздат, 1979. — 376 с.
10. Клык Ю.И. Ситуационное управление большими системами / Ю.И. Клык. — М.: Энергия, 1974. — 134 с.
11. Поспелов Д.А. Ситуационное управление. Теория и практика / Д.А. Поспелов. — М.: Наука, 1986. — 284 с.
12. Рассел С. Искусственный интеллект: современный подход / С. Рассел, П. Норвиг. — 2-е изд. // Пер. с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2006. — 1410 с.
13. Стефанишин Д.В. Про один підхід до оцінки стану земляної греблі, що перебуває в постійній експлуатації, за даними регулярних п'езометричних спостережень / Д.В. Стефанишин // Гідроенергетика України. — 2012. — № 3. — С. 27–32.
14. Kuhn M. Applied Predictive Modeling / M. Kuhn, K. Johnson. — New York: Springer Science+Business Media, 2013. — 600 p.
15. Стефанишина-Гаврилюк Ю.Д. Використання нечіткої міри для подолання невизначеності довгострокових прогнозів на основі екстраполяцій / Ю.Д. Стефанишина-Гаврилюк, Д.В. Стефанишин // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2013. — № 4. — С. 99–110.
16. Brockwell P.J. Time series: Theory and methods / P.J. Brockwell, R.A. Davis // Second edition. Springer. — 1991. — 567 p.
17. Stefanyshyn D.V. A Method of Forecasting of Indexes of Dynamic System that evolves slowly, based on Time Series Analysis / D.V. Stefanyshyn // ICIM 2013. Proc. of 4th Int. Conf. on Inductive Modelling. — Kyiv, Ukraine, September 16–20, 2013. — P. 221–224.
18. Стефанишина-Гаврилюк Ю.Д. Прогнозування ризиків збитків від повеней на ріках за даними моніторингу / Ю.Д. Стефанишина-Гаврилюк, Д.В. Стефанишин, О.М. Трофимчук // Екологічна безпека та природокористування: зб. наук. праць. — К.: ІТІП НАНУ, КНУБА. — 2015. — Вип. 18. — С. 37–48.

Надійшла 01.09.2016