

ПРОГНОЗУВАННЯ ЕКЗОГЕННИХ ГЕОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ.

ЧАСТИНА 2. ЗАКОНОМІРНОСТІ РОЗВИТКУ ПОВЕРХНЕВИХ ПРОЯВІВ КАРСТУ ТА СЕЛІВ. ГЕОІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ПРОГНОЗУВАННЯ ЕКЗОГЕННИХ ГЕОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

© Е.Д. Кузьменко, О.М. Журавель, Т.Б. Чепурна, І.В. Чепурний, Л.В. Штогрин, 2011

Національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна

The article analyzes the processes of karst and mudflows formation based on the exogenous geological processes forecasting algorithm. There were revealed some regularities of karst and mudflows formation in space and time. They depend on the degree of spatial and temporal factors influence. Described in the paper are the processes and features of GIS creation that can predict landslides, karst and mudflows.

Keywords: exogenous geological processes, karst, mudflows, integral index, spatial and temporal forecast, geographic information system.

Вступ. У першій частині статті (яка опублікована у попередньому номері журналу) наведено теоретичні основи прогнозування екзогенних геологічних процесів (ЕГП) та експериментально обґрунтовано запропонований алгоритм прогнозування на прикладі зсувних процесів для території Івано-Франківської обл. Наступною задачею нашого дослідження постало питання пошуку закономірностей розвитку поверхневих проявів карсту та селевих процесів з метою побудови довгострокового прогнозу їх поширення й активізації, а також створення геоінформаційних систем (ГІС) прогнозування зсувів, поверхневих проявів карсту та селів на регіональному рівні як кінцевого етапу досліджень.

Закономірність активізації розвитку поверхневих проявів карсту. Ділянки, що уражені карстом, займають значну частину території України і щороку збільшуються, завдаючи значних збитків. Відповідно до “Національних доповідей про стан техногенної та природної безпеки в Україні” за 2006–2010 рр. [1–5], на території України зареєстровано понад 26 000 поверхневих і підземних карстопроявів. Основні регіони розвитку карсту – Автономна Республіка Крим (уражено 34,86 % території), Львівська (19,33 %), Тернопільська (9,36 %), Чернігівська (8,76 %), Івано-Франківська (7,87 %), Волинська (7,60 %), Хмельницька (2,91 %) області. Територія західних областей України, особливо її платформна частина і зона зчленування з Передкарпатським прогином, характеризується значним розвитком карстового процесу. На заході України карст інтенсивно розвинений у Передкарпатському та Закарпатському прогинах і в платформній частині. Відповідно за геострук-

турним положенням основної товщі порід, що знають карсту в Карпатському регіоні, виділено платформний і гірсько-складчастий класи карсту, які за речовинним складом порід поділяють на карбонатний, сульфатний, галогенний типи.

Дослідженням ЕГП і карстових процесів зокрема приділяється значна увага, про що свідчить велика кількість публікацій, серед яких слід відзначити роботи вітчизняних науковців: О.М. Адамєнка, В.Н. Андрейчука, А.М. Гайдіна, С.В. Гошовського, О.Б. Климчука, А.В. Лушика Г.І. Рудька, Я.М. Семчука та ін. Фундаментальними працями, у яких широко висвітлено проблему карсту як геологічного явища, є роботи Д.С. Соколова [6], Г.А. Максимовича [7], Н.А. Гвоздецького [8].

На цей час дослідження розвитку поверхневого карсту часто обмежуються констатацією форм розвитку та побудовою карт ураженості, які розглядають як прогнозні. Тому актуальним є питання дослідження зв'язку процесів карстоутворення з геологічними, гідрогеологічними, тектонічними, геоморфологічними, геофізичними, метеорологічними просторовими і часовими факторами, а також встановлення відповідних закономірностей для розробки системи довгострокового прогнозування.

Теоретичні та експериментальні дослідження щодо аналізу факторів прогнозування деформацій земної поверхні внаслідок розвитку карсту на регіональному рівні відображені у статтях [9, 10]. Умови механізму карстоутворення на стадії регіонального вивчення карсту можна схарактеризувати такими основними процесами: а) розширення первинних пор і каверн з утворенням мікропус-

тот у масиві, що зазнає карсту; б) проробка тріщинуватості, літогенетичної внутрішньопластової й тектонічної тріщинуватості порід, що зазнають карсту, з утворенням вибіркової порожнистості і макропорожнистості; в) проробка послаблених зон тектонічних порушень з утворенням зональної вибіркової системи пустот [6–8].

Для апробації методики оцінки ймовірності розвитку природних карстових процесів вибрано ділянку на території Львівської обл., в межах якої зареєстровано 3547 карстових воронкоподібних до них екзогенних форм прояву сульфатного і карбонатного карсту (рис. 1).

Досліджувана територія розміщується у межах великих геоструктурних регіонів – Східноєвропейської платформи та Передкарпатського прогину. Вона складена крейдяними, неогеновими і четвертинними породами. Верхньокрейдяні відклади поширені повсюдно, залягають на глибині від 40 до 200 м. У східній частині вони розміщуються під четвертинними утвореннями, у західному напрямку їхня покрівля занурюється на глибину понад 200 м. На крейдяних відкладах залягають неогенові породи, представлені в нижній частині глинистими пісками та пісковиками потужністю від 0 до 32 м (баранівський горизонт). Вище лежить нараєвський горизонт, складений літотамнієвими вапняками із прошарками пісків і пісковиків. У північно-східній частині горизонт виходить на земну поверхню або залягає під четвертинним покривом. На південному заході він занурюється на глибину до 200 м. Потужність горизонту від 1–3 м до декількох десятків метрів.

Горизонт гіпсоангідритів, разом із залягаючими в його покрівлі пелітоморфними та кристалічними вапняками, утворює тираську світу, яка є основним середовищем розвитку карсту території. У межах світи розрізняють два горизонти – дністровський, складений гіпсоангідритами, та ратинський, складений вапняками. Як зазначено у публікації [11], гіпсоангідритовий горизонт, потужністю від декількох метрів до 35–50 м, представлений гіпсами, а з наближенням до прогину вміст ангідритів у його складі збільшується, гіпсоангідритова товща стає одноріднішою в розрізі. Карбонатні та глинисті прошарки нечисленні й малопотужні. Горизонт пелітоморфних і кристалічних вапняків потужністю від декількох десятків сантиметрів до 25 м і більше звичайно залягає в покрівлі гіпсоангідритів. Відклади тираської світи перекриті карбонатно-глинистими відкладами косівської світи, що також належать до верхнього баденію. Поблизу межі з прогином вони представлені переважно глинистими відкладами, з пісковиками та карбонатними прошарками в нижній частині. Верхньобаденські відклади вгорі змінюються товщею сарматських мергелів і глин, потужність яких зростає до 30–50 м у напрямку

прогину. Поблизу межі з прогином сарматські відклади літологічно важко відрізнити від порід косівської світи, разом з якими утворюють глинисте покриття загальною потужністю до 80–100 м.

Територія характеризується наявністю великої кількості тектонічних порушень, що значно сприяє карстоутворенню, враховуючи їхню дренажну дію, а також підвищену тріщинуватість порід на ділянках, прилеглих до розломів. Іншою специфічною особливістю є складність розділення дністровського (гіпсоангідритового) і ратинського (надгіпсового) горизонтів тираської світи, що не дає змоги однозначно відносити поверхневий карстопрояв до сульфатного чи карбонатного типу карсту.

У гідрогеологічному відношенні досліджувана територія належить до Волино-Подільського артезіанського басейну платформного типу та Передкарпатського артезіанського басейну. Для артезіанського басейну в цілому характерне поширення карстово-тріщинних колекторів із локальним розвитком послідовно залягаючих водоносних горизонтів і комплексів. Під час карстоутворення в зонах тріщинуватості і послаблених зонах утворюються як глибинні (закарстовані тріщини, печерні системи), так і поверхневі (воронки, понори, гроти і тощо) карстові форми. Механізми цих процесів зумовлені різними чинниками. Пропонується [11–13], наприклад, пояснювати глибинну закарстованість тираської світи з погляду артезіанської теорії спелеогенезу, тобто в умовах напірного водоносного комплексу пустоти утворюються під дією висхідного руху вод із напірного підгіпсового водоносного горизонту в надгіпсовий.

Відповідно до наявності в геологічному розрізі карстованих гірських порід, на території досліджуваної ділянки виділяють такі райони: у межах Подільської височини – поширення змішаного та карбонатного карсту; в межах Передкарпатської височини – сульфатного карсту (рис. 1).

Район поширення карбонатного карсту займає крайню північно-східну частину досліджуваної ділянки і знаходиться в межах Волино-Малополіської акумулятивно-денудаційної рівнини. Геологічним середовищем для розвитку карсту є карбонатні породи верхньої крейди (шаруваті вапняки і мергелі маастрихту, кампану, сантону, коньяку і турону (всіх ярусів верхньої крейди)). Карст у крейдяно-мергельних відкладах верхньої крейди характеризується площинним поширенням. На цей час активізація карбонатного карстового процесу не спостерігається.

Район поширення змішаного карсту знаходиться на південний захід від вищеописаного і розміщується в межах структурно-денудаційної рівнини Подільської височини. Район характеризується практично суцільним площинним розвитком порід, що зазнають карсту. Вони розрізняють-

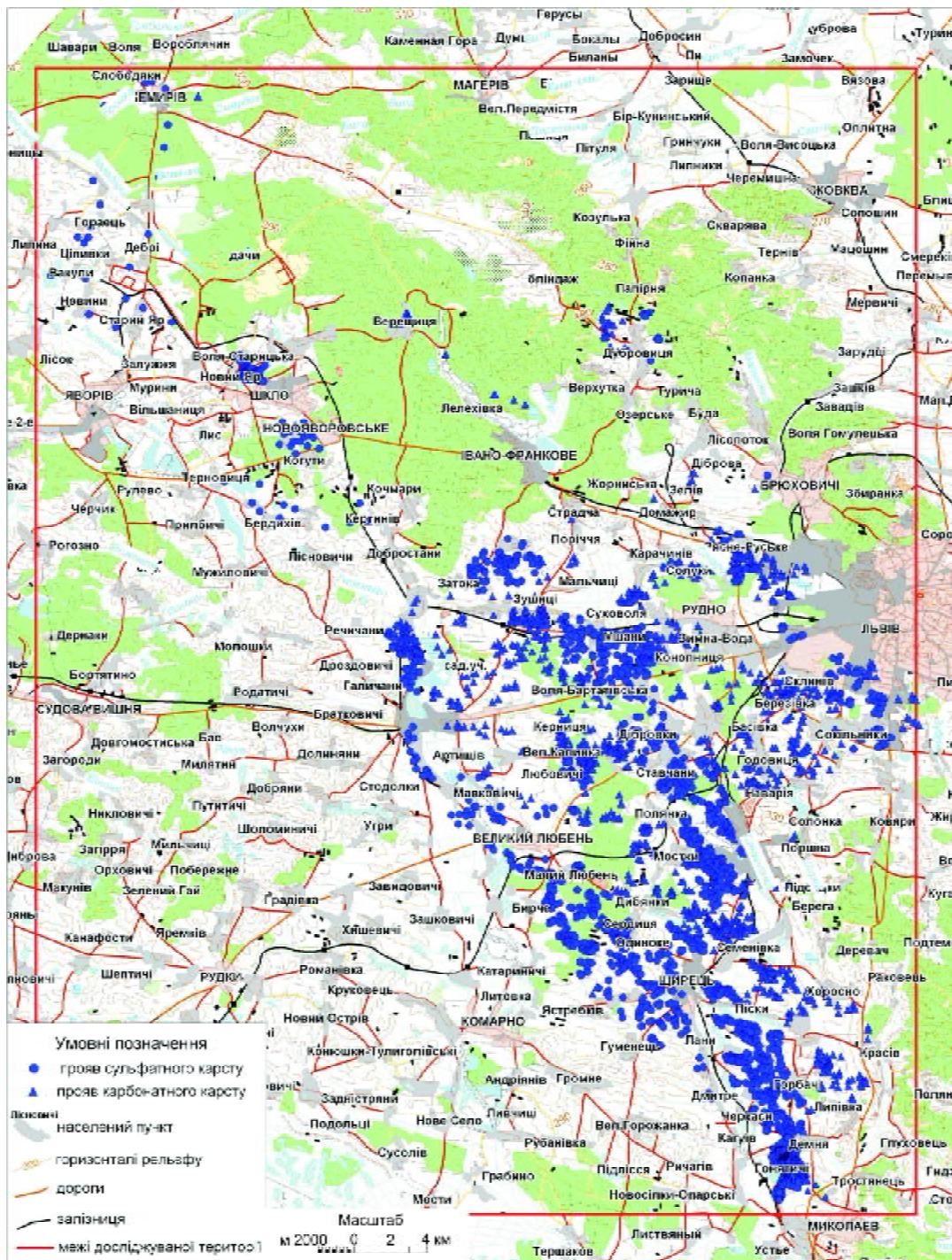


Рис. 1. Експериментальна ділянка досліджень із нанесеними карстовими воронками

ся за віком, літологічним складом, потужністю та іншими ознаками. Закарстовані породи крейдяного віку занурюються у південно-західному напрямку під неогенові відклади. За літологічним складом породи, що зазнають карсту, – це різні карбонатні (вапняки, мергелі, доломіти) і сульфатні (гіпси, ангідрити) відклади. Карбонатні породи здебільшого мають донеогеновий вік і, частково, неогеновий, сульфатні – неогеновий. Активне карстоутворення спостерігається у приповерхневій частині розрізів (50–300 м), які пов'язані із зоною активного водообміну та дією агресивних вод. Потужність окремих товщ, що

знають карсту, змінюється від 0,5 до 100 м. Карбонатні породи крейди часто містять значну кількість глинистих, піщаних і крем'янистих домішок. Хімічний склад гіпсоангідритових порід (95,0–99,5 % $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), невелика кількість домішок сприяє підвищенню (NaCl) або пониженню (глинисті часточки) їх розчинності.

У межах району поширення змішаного карсту переважають підрайони розвитку перекритого й відкритого карсту і, в значно меншій кількості, покритого карсту. Найбільші площі поширення простягаються смугою уздовж зони зчленування прогину з платфор-

мою. Тут відзначаються катастрофічні карстові провали.

Район поширення сульфатного карсту знаходиться в межах акумулятивно-денудаційної рівнини Передкарпатської височини, він досить великий, простежується вздовж структурної межі Східноєвропейської платформи та Більче-Волицької зони Передкарпатського прогину. Закономірності розвитку карсту в районі характеризуються фрагментарним, переривчастим поширенням порід, що зазнають карсту. Морфологія карсту різна – кари, воронки, западини, осідання, блюдця, улоговини, пониження, карстові долини, яри, озера, понори. Найрізноманітніші карстові форми – в активно розчинних сульфатних відкладах. На ділянках розвитку гіпсоангидритів кількість поверхневих форм карсту досягає 50–100 на 1 км². Живлення карстових вод відбувається за рахунок атмосферних опадів. Динаміка розвитку карсту добре спостерігається в зонах впливу сірчаних гірничодобувних підприємств, Язівського, Розвадівського, Роздольського, Подорожненського кар'єрів. Гідрогеологічні умови розвитку карсту в гіпсовій товщі закономірно змінюються в напрямку від платформи до прогину.

Для забезпечення всестороннього розгляду процесу утворення карстових провалів на експериментальній ділянці розглянуто максимально доступну кількість факторів. Виходячи з теоретичних уявлень про процес утворення карстових провалів, а також з об'єктивності впливу факторів у регіональному масштабі, для статистичної обробки розраховано кількісні характеристики в точках карстопроявів для ймовірних факторів карстоутворення:

- геологічні – літологічний склад четвертинних відкладів, геологія дочетвертинних відкладів, відстань до тектонічного порушення;
- геофізичні – значення гравітаційного поля в редукації Буге;
- геоморфологічні – абсолютна висота точки карстопрояву, кут нахилу земної поверхні, відстань до базису ерозії;
- гідрогеологічні – рівень ґрунтових вод, водопровідність четвертинних, неогенових відкладів; глибина водоупорів у товщі четвертинних і міоценових відкладів; наявність і тип першого від поверхні водоупору; потужність порід до першого від поверхні водоупору; потужність першого від поверхні водоупору; значення гідроізогіпс четвертинного та міоценового водоносних горизонтів; ізопотужності четвертинного та міоценового водоносних горизонтів; катіонний, аніонний склад і мінералізація підземних вод четвертинного водоносного горизонту;
- інженерно-геологічні – відстань до найближчого карстопрояву;

- техногенні – відстань до ділянок порушення геологічного середовища (кар'єрів, водозаборів), відстань до населеного пункту.

Таким чином, на основі наведеного вище твердження про умови розвитку карсту, аналізу літературних джерел і розглянутої класифікації карстових форм можна зробити висновки щодо інформативності вибраних факторів, що визначають просторове поширення карстових форм.

Геологічна будова території, літологічний склад порід геологічного розрізу є головними факторами, що визначають ураженість території карстом, оскільки він є геологічним процесом, розвиток якого строго пов'язаний з районами поширення розчинних гірських порід.

Оскільки мета статті – прогнозування провальньо-просадкових проявів карсту, важливо також урахувати як ініціювальні фактори літологічний склад, потужність четвертинних відкладів і перекиривних порід. Наявність у розрізі четвертинних відкладів з високими значеннями водопровідності (пісків, супісєй тощо) призводить до швидкої інфільтрації води і прискорює розвиток карсту. Потужність товщі перекиривних порід є чи не головним фактором, що контролює поверхневий прояв карсту.

Вплив тектонічних порушень на розвиток карсту проявляється передусім у їхній дренажній дії. Розломи створюють умови для інтенсивного руху вод між водоносними горизонтами, тим самим збільшуючи швидкість розчинення карстових порід.

Суттєво впливають на перебіг карстових процесів гідрогеологічні фактори. Вони визначають здебільшого швидкість розчинення карстових порід, обводненість, швидкість фільтрації підземних вод, агресивність підземних вод щодо порід, які зазнають карсту.

До геоморфологічних факторів можна віднести абсолютну висоту точки карстопрояву, кут нахилу земної поверхні, відстань до базису ерозії. З цих факторів слід відзначити суттєвий вплив річкових долин на перебіг карстових процесів, що пов'язано з різними гідродинамічними умовами, залежно від розміщення карстових зон відносно рівня базису ерозії.

Нині чи не найсуттєвіше впливають на активізацію карстопробальних явищ техногенні фактори, передусім порушення геологічного середовища гірничими кар'єрами, шахтами, водозаборами.

Під час розрахунку числових характеристик факторів для точок карстопроявів використано картографічний матеріал, який за потреби переводили засобами векторизації у цифровий формат ГІС MapInfo. Всі значення факторів знімали з електронних карт регіонального масштабу.

Отже, для попереднього статистичного аналізу факторів утворення провальньо-просадкових

проявів карсту взято 22 факторні характеристики: відстань до тектонічного порушення; R_i геологічних світ (горизонтів); R_i зон за літологією четвертинних відкладів; гравітаційне поле в редукції Буге; абсолютна висота точки карстопрояву; кут нахилу земної поверхні; відстань до базису ерозії; рівень ґрунтових вод; водопровідність четвертинних відкладів; водопровідність неогенових відкладів; R_i зон із різною потужністю водоупорів у товщі четвертинних відкладів; R_i зон із різною потужністю водоупорів у товщі міоценових відкладів; R_i зон типу першого від поверхні водоупору; потужність першого від поверхні водоупору; потужність порід до першого від поверхні водоупору; гідроізогіпси четвертинного водоносного горизонту; гідроізогіпси міоценового водоносного горизонту; потужність четвертинного водоносного горизонту; потужність міоценового водоносного горизонту; відстань до населеного пункту; відстань до ділянок порушення геологічного середовища (водозаборів, кар'єрів); відстань до найближчого карстопрояву.

Позначення R_i означає, що карти, з яких знімали значення факторних характеристик, побудовані за принципом районування, і для них розраховували коефіцієнт контрастності за формулою

$$R_i = \frac{N_i / \sum N}{S_i / \sum S}, \quad (1)$$

де N_i – кількість зареєстрованих поверхневих карстопроявів у межах певної зони (району); $\sum N$ – загальна кількість зареєстрованих карстопроявів у регіоні; S_i – площа певної зони (району); $\sum S$ – загальна площа території всього регіону.

Процедури, які виконуватимуться далі, мають забезпечити участь у розрахунку інтегрального показника карстопроальної небезпеки лише тих факторів, що закономірно пов'язані з механізмом утворення поверхневих карстопроявів і є відносно незалежними один від одного. Відбір факторів здійснювали у послідовності, яка описана в першій частині статті у запропонованому алгоритмі, а саме: 1) побудова законів розподілу параметрів з перевіркою їх на відповідність нормальному закону розподілу, або закону розподілу, що містить експоненту (тобто зведення до нормального закону розподілу логарифмуванням); 2) кластерний аналіз; 3) факторний аналіз.

Проведений аналіз на дослідження відповідності факторів нормальному закону розподілу дав можливість вилучити з подальших досліджень факторні характеристики “водопровідність четвертинних відкладів” і “кут нахилу земної поверхні”. Вони мають невелику градацію і навіть після логарифмування не відповідають нормальному закону розподілу (коефіцієнт Колмогорова–Смірнова для водопровідності четвертинних відкладів дорівнює 0,353, а кут нахилу земної поверхні – 0,192).

За результатами кластерного аналізу виявлено групи споріднених факторів. Очікувано пов'язаними між собою виявилися факторні характеристики в групі “гідроізогіпси четвертинного водоносного горизонту – гідроізогіпси міоценового водоносного горизонту – абсолютна висота точки карстопрояву – рівень ґрунтових вод”, а також група факторів “ R_i зон із різною потужністю водоупорів у товщі четвертинних відкладів – R_i зон із різною потужністю водоупорів у товщі міоценових відкладів – потужність порід до першого від поверхні водоупору”. Це підтвердилось результатами факторного аналізу. У результаті було замінено найближчі факторні характеристики “гідроізогіпси міоценового водоносного горизонту – абсолютна висота н. р. м.” їхньою різницею. Цей крок зроблений на підставі розгляду геологічної будови території. Водовмісними породами міоценового водоносного горизонту є породи, що зазнають карсту, – літотамнієві і ратинські вапняки та гіпсоангідрити. Отже, різниця між указаними факторами частково враховує глибину залягання карстових порід. У подальшому цей фактор називатимемо “глибина залягання міоценового водоносного горизонту”. Далі послідовно були вилучені факторні характеристики “гідроізогіпси четвертинного водоносного горизонту”, “рівень ґрунтових вод”, як близькі за фізичною суттю.

Друга група наблених факторних характеристик включала “ R_i зон із різною потужністю водоупорів у товщі четвертинних відкладів – R_i зон із різною потужністю водоупорів у товщі міоценових відкладів – потужність порід до першого від поверхні водоупору”. Вона вилучена повністю, тому що є спорідненою з фактором контрастності геологічних світ, яка має кращу градацію. Крім того, для водоупорів у товщі міоценових відкладів важко пояснити, чому водоупорні породи з більшою потужністю найбільш уражені карстом, враховуючи, що ними на переважній частині площі є косівські глини, які перебивають товщу, що зазнає карсту. Також було прийнято рішення про вилучення факторної характеристики R_i зон типу першого від поверхні водоупору через деяку близькість з R_i геологічних світ (горизонтів). Крім того, ці фактори є близькими і за фізичним змістом.

Гістограми фактичних розподілів імовірностей значень вибраних факторних характеристик та їх логарифмів відображають розподіли, наближені до нормального закону (рис. 2). За законом розподілу, що відрізняється від нормального, по вісі абсцис відкладені інтервали потрапляння логарифмів значень.

У результаті попередніх процедур відібрано 13 основних факторів. У табл. 1 наведено значення коефіцієнтів інформативності для кожно-

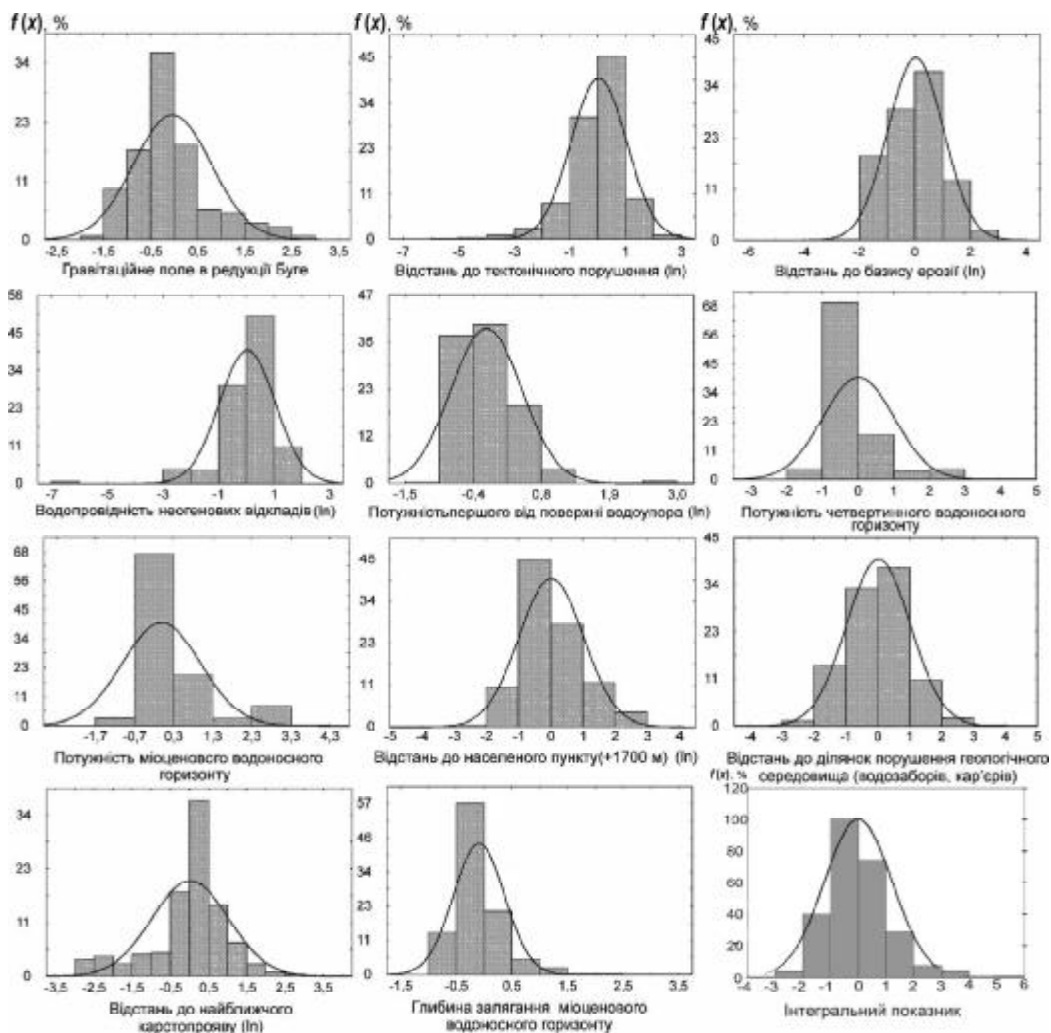


Рис. 2. Гістограми розподілу значень факторних характеристик (абсолютні значення, їх логарифми) інтегрального показника. По осі абсцис – інтервали, по осі ординат – відсоток потраплянь

го з групи вибраних факторів. Далі, за алгоритмом (див. рис. 1 першої частини статті), розраховані значення інтегрального показника. Розподіл імовірності цих значень вказує на високий ступінь його наближення до теоретичного нормального закону розподілу (рис. 2).

Алгоритм розрахунку часової функції інтегрального показника повністю повторює за етапами алгоритм, що запропонований в першій частині статті. Після детального статистичного аналізу як впливові фактори вибрано часові ряди кількості зареєстрованих нових карстових воронок, числа Вольфа, річної енергії землетрусів у районі дослідження, річної кількості атмосферних опадів, середньорічної температури повітря на 3 метеостанціях Львівської обласної території, середньорічного рівня ґрунтових вод (на території Передкарпаття Львівської обл.). Візуальний аналіз рис. 3, а, б не дає можливості визначити взаємопов'язані закономірні ритмічності прояву зазначених факторів на графіках. Тому далі послідовно реалізовані процедури: розрахунок автокореляційних функцій (АКФ) і функцій взаємної кореляції (ФВК) (рис. 4), а також побудовані періодограми для кар-

стовпроявів і всіх головних факторів (рис. 5). Розрахунок АКФ виконаний з метою визначення основних періодів гармонічних часових коливань карстовпроявної активності й факторів її активізації (див. рис. 4, а). Основні періоди для ряду кількості карстовпроявів становлять 5 і 10 років, для ряду сонячної активності – приблизно 10–11, для річної кількості опадів – 4 і 8–10, ряду рівнів ґрунтових вод 10 і 12–14 років. У рядах логарифмів енергії землетрусів і середньорічної температури не яскраво виражена періодичність у 8, 11–12 і 8–9, 11 років відповідно.

З аналізу корелограм розподілу ФВК між рядами активності карсту й часових факторів можна зробити висновок стосовно величини зміщення в часі рядів окремих факторів щодо ряду карстової активності, яку слід врахувати для досягнення максимальної синфазності основних гармонік усіх рядів (рис. 4, б). Так, для ряду числа Вольфа спостерігається зміщення на 3 роки назад стосовно ряду активності карсту, для ряду енергії землетрусів – 1 рік назад. Значення ФВК для пари рядів кількість карстовпроявів – річна кількість опадів показують, що ці ряди перебувають у протифазі.

Таблиця 1. Результати розрахунків коефіцієнтів інформативності факторів

| Фактор | Факторна характеристика | Ваговий коефіцієнт інформативності в розрахунках, % |
|---|---|---|
| Гравітаційне поле | Гравітаційне поле в редукції Буге | 11,3 |
| Тектонічні порушення | Відстань до тектонічного порушення (ln) | 6,8 |
| Поширення геологічних горизонтів | R_i геологічних свіг (горизонтів) | 6,2 |
| Літологічний склад четвертинних відкладів | R_i зон за літологією четвертинних відкладів | 6,2 |
| Базис ерозії | Відстань до базису ерозії (ln) | 6,6 |
| Водопровідність неогенових відкладень | Водопровідність неогенових відкладів (ln) | 7,6 |
| Поширення водоупорів | Потужність першого від поверхні водоупора (ln) | 11,7 |
| Четвертинний водоносний горизонт | Потужність четвертинного водоносного горизонту | 7,4 |
| Міоценовий водоносний горизонт | Потужність міоценового водоносного горизонту | 7,8 |
| Наявність населених пунктів | Відстань до населеного пункту (+1700) (ln) | 4,6 |
| Наявність ділянок порушення геологічного середовища | Відстань до ділянок порушення геологічного середовища (водозаборів, кар'єрів) | 9,7 |
| Найближчий поверхневий прояв карсту | Відстань до найближчого карстопрояву (ln) | 8,5 |
| Глибина рівня підземних вод | Глибина рівня підземних вод міоценового водоносного горизонту | 5,6 |

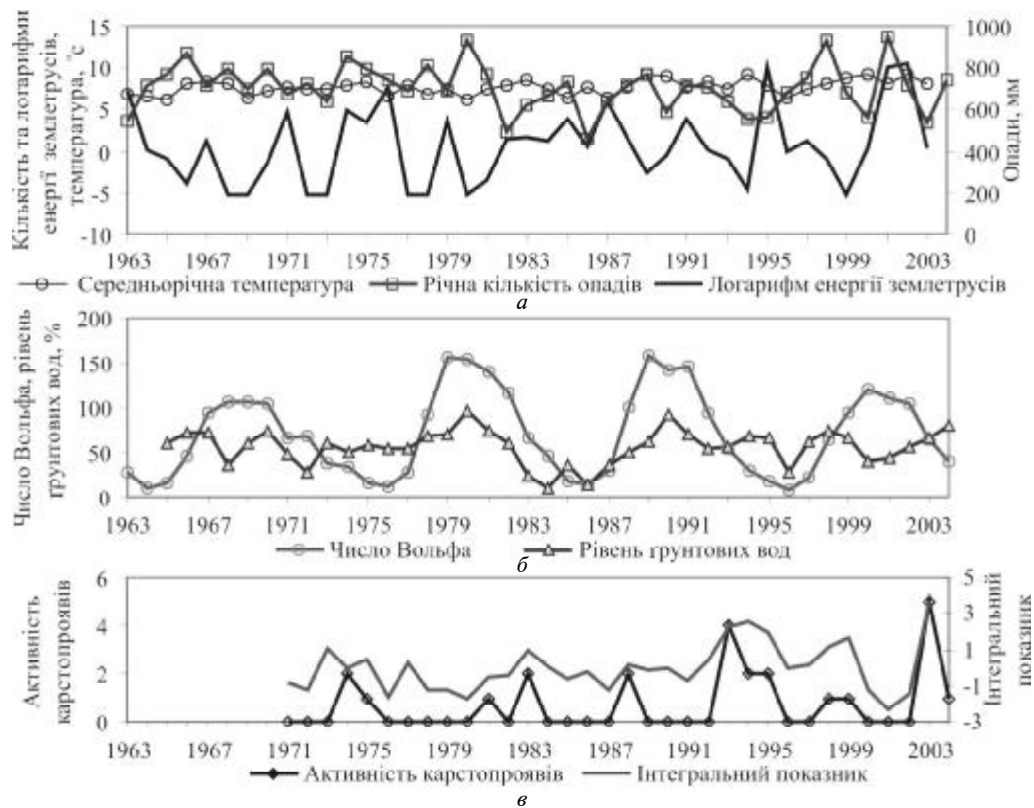
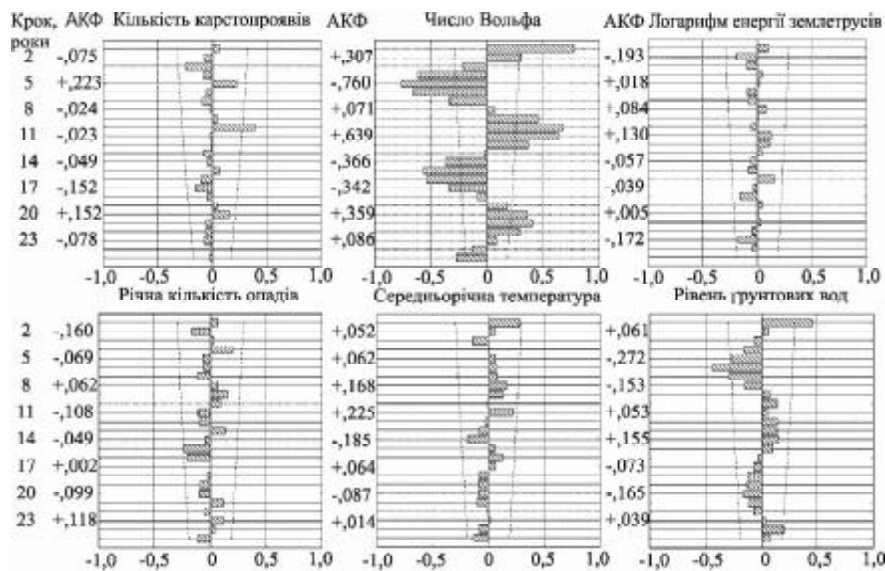
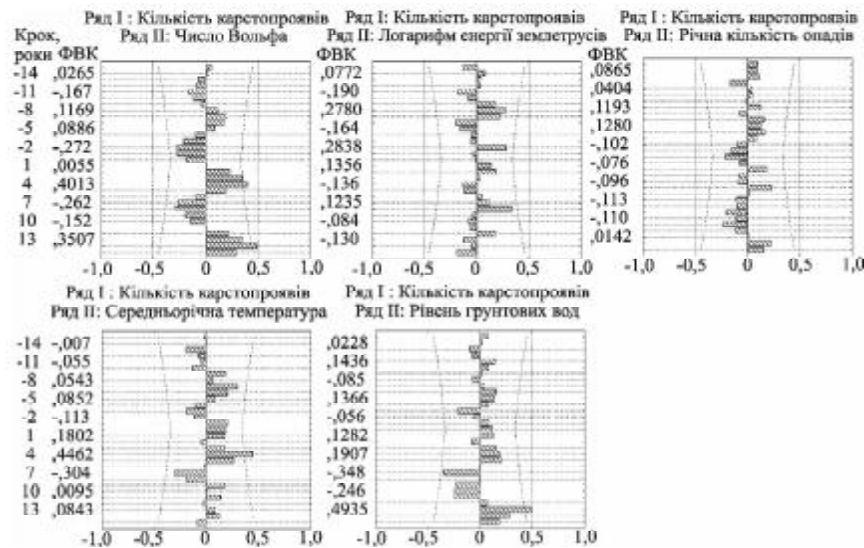


Рис. 3. Ряди активності карстопроявів, їх часових факторів та інтегрального показника. Пояснення у тексті



a



б

Рис. 4. АКФ (а) і ФВК (б) часових рядів факторів та активності карстопроявів

На рис. 5 зображено періодограми для досліджуваних часових рядів, за якими можна підтвердити й уточнити висновки, зроблені під час аналізу АКФ. Для ряду активності карстопроявів чітко виділяються 5- та 10–11-річні періодичні складові. Для ряду чисел Вольфа домінуючою є гармоніка 10 років, ряду річної кількості опадів – 5 і 10 років. Найбільший внесок у ряд логарифмів енергії землетрусів роблять періодичні складові 10–12 і 4–5 років, у ряд рівнів ґрунтових вод – 10–13 і 4–5 років. Для ряду середньорічної температури можна відзначити гармоніки з періодами 8, 5,5 і 4 роки. Отже, як за проявами карсту, так і за всіма факторами, крім сонячної активності, у часових рядах виявляються одиничні ритми в 5 років. За проявами карсту й всіма факторами відзначається ритм у 10–11 років (за температурою – 8 років на періодограмі, але 10 років – за АКФ). Гармоніки з цими періодами надалі вважаємо домінуючими.

Нижче наведено вагові коефіцієнти інформативності часових факторів утворення карстових провалів:

| Фактор | Коефіцієнт інформативності, % |
|------------------------------|-------------------------------|
| Активність карстопроявів | 17,0 |
| Число Вольфа | 20,1 |
| Логарифм енергії землетрусів | 9,8 |
| Річна кількість опадів | 20,6 |
| Середньорічна температура | 12,7 |
| Рівень ґрунтових вод | 19,7 |

Як видно, всі фактори відіграють приблизно однакову роль в ініціюванні карстопроальної небезпеки, відсутнє домінування якогось одного фактора, лише вагомість енергії землетрусів і середньорічної температури трохи менша.

Заключним етапом є розрахунок прогнозного інтегрального параметра, отриманого за підсумовуванням рядів нормалізованих значень

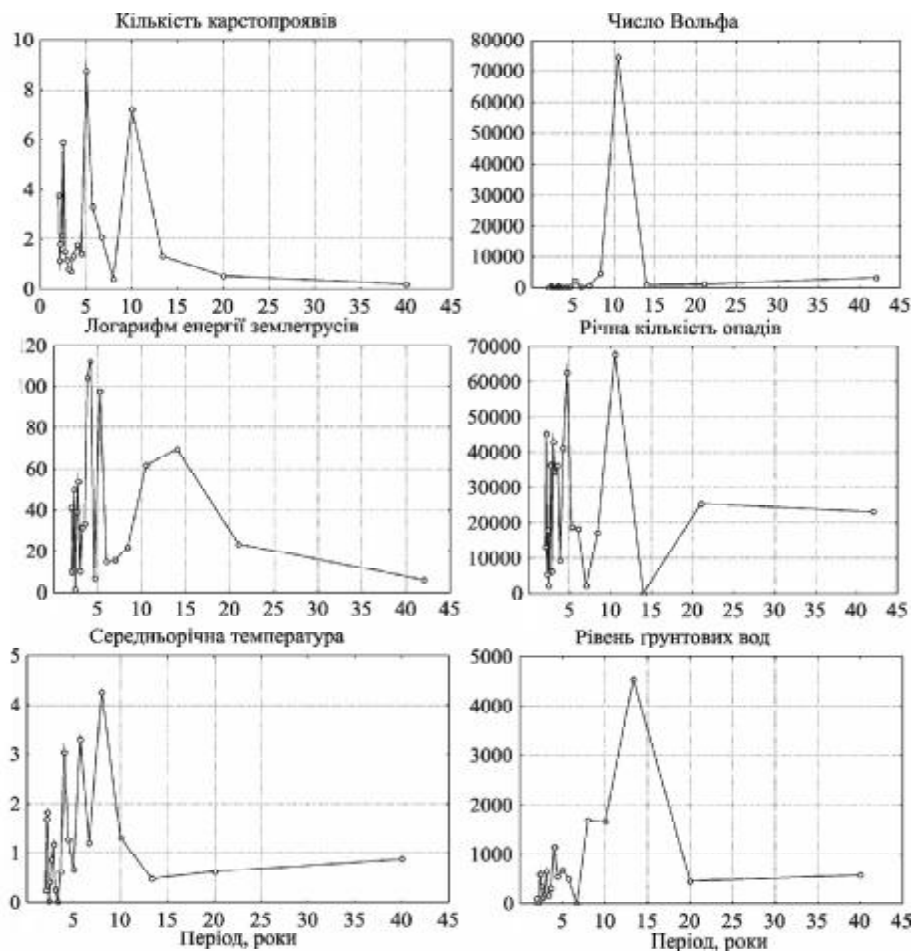


Рис. 5. Періодограми для часових рядів факторів і активності карстоутворення

факторів з урахуванням їх інформативності (див. рис. 3, в).

Візуальний аналіз графіків дає змогу відзначити їхню істотну кореляцію за розрахованого коефіцієнта кореляції 0,659. Чітко простежуються 5- і 10-річні ритми. З метою підвищення кореляції знята високочастотна завада осередненням часових рядів методом ковзаючого вікна. Попередньо було проведено оцінку зв'язку високочастотних компонентів кожного з рядів. З рядом карстопроявів кореляція відсутня, тому далі високочастотний компонент вважали завадою. Вікна осереднення підбирали емпірично: розраховано ряди, осереднені вікнами в 3–15 точок, для кожного варіанта осереднення розраховано коефіцієнт кореляції з рядом карстопроявів. За максимальним абсолютним значенням коефіцієнта кореляції вибрано такі варіанти згладжування: для чисел Вольфа – 9; для сейсмічної активності – 13; для кількості опадів – 5; для рівня ґрунтових вод – 11 точок у вікні; для середньорічної температури найкраща кореляція спостерігалася для неосередненого ряду. Розрахунок ФКП для згладжених рядів і наступна оцінка коефіцієнта кореляції з рядом карстопроявів дали позитивний результат – значення коефіцієнта кореляції збільшилося до 0,774.

Періодограми для рядів карстопроявів і всіх головних факторів підтверджують ці розрахунки.

Аналіз ФВК однозначно свідчить про наявність кореляції часових рядів карстопроявів і всіх запропонованих факторів. Фізично змістовним є факт затримки прояву карсту відносно карстоініціювальних факторів. Це зміщення враховано під час розрахунку та побудови графіка функцій комплексного інтегрального показника ФКП.

Прогнозні ряди ймовірності – активізації карстопроявів до 2020 р. обчислені різними способами (рис. 6). З огляду на фактичний ряд у 33 роки (1971–2003), прогноз виконано на $33/2 \approx 17$, тобто по 2020 р. Похибка прогнозу ± 1 рік. Прогнозні ряди, побудовані за різними методиками, збігаються між собою в ритмічності і в істотності значень ймовірності карстопроявів. Найменшу довіру викликають розрахунки за рядом Фур'є, тому що прогнозна частина графіка функції повторює фактичний графік з першого року спостережень, а саме експериментальний ряд порівняно короткий – усього 33 роки. Тут більшою мірою можна довіряти ритмам, меншою – ймовірностям. З урахуванням зроблених зауважень за результатами аналізу рядів можна стверджувати, що 2009–2011 рр. – це роки затишшя в карстоутворенні з ймовірністю виникнення воронок 0,2–0,3. Далі слідує активізація у 2012–2014 рр. з ймовірністю 0,78–0,93, зменшення активізації в 2015–2016 рр. і наступний пік активізації – в 2018–2019 рр. з ймовірністю 0,7–0,78.

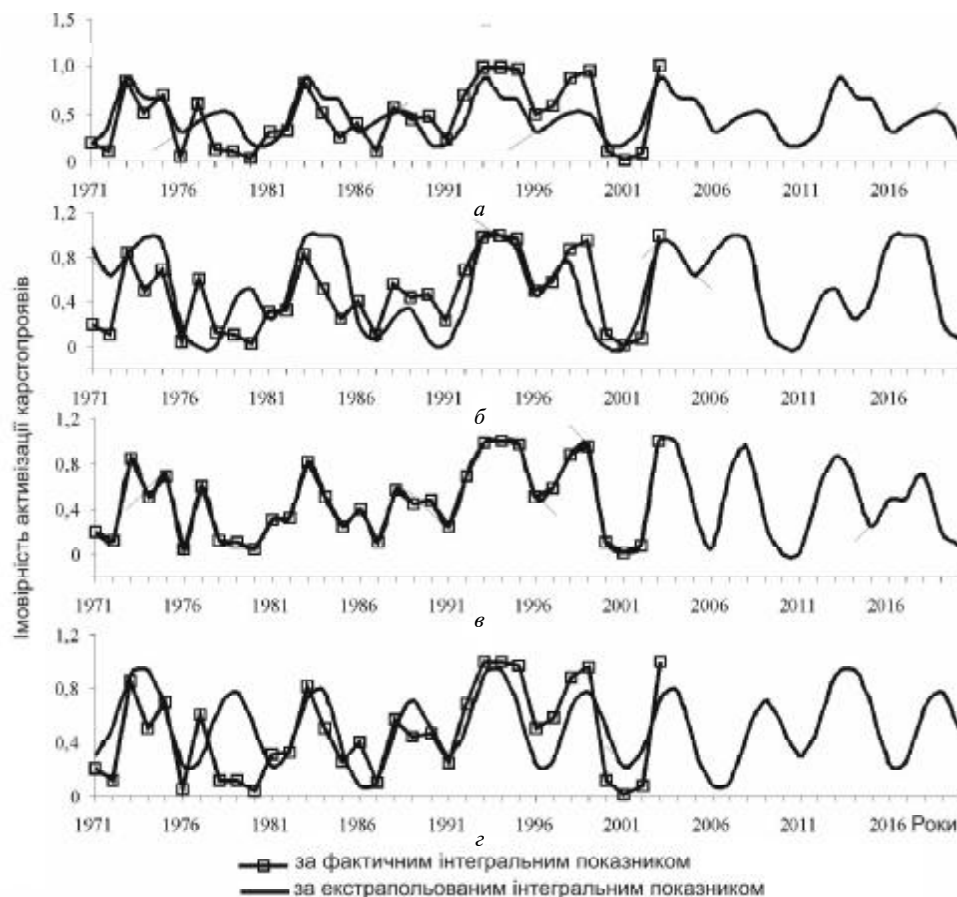


Рис. 6. Екстрапольовані ряди ймовірності карстопроявів з використанням різних процедур. Екстраполяція: а – за осередненою кривою; б – рядом Фур’є; в – за допомогою функції передбачення predict; г – лінійною комбінацією синусоїд

Просторово-часовий прогноз здійснено за формулою

$$P(x, y, t) = P_1(x, y) P_2(t) = P_1(\Pi_{\Sigma i}) P_2(\Phi_t), \quad (2)$$

де $P_1(x, y)$ – ймовірність розвитку карстопрояву у просторі; $P_2(t)$ – ймовірність розвитку карстопрояву на час t ; i – номер точки спостереження з координатами x, y ; $\Pi_{\Sigma i}$ – значення інтегрального показника просторових факторів; Φ_t – значення функції інтегрального показника часових факторів активізації карстопроявів.

У подальшому заплановано побудову карт ймовірності розвитку провалів на цій території на будь-який рік, що є основою ГІС прогнозування карстопроявів.

Наведені результати досліджень динаміки карстових процесів покладені в основу наукового відкриття під назвою “Закономірний зв’язок між величинами ймовірностей розвитку приповерхневого карсту в карбонатних і сульфатних породах і карстопровальної небезпеки при комплексному впливі природно-техногенних факторів” з наступною формулою відкриття: “Експериментально встановлений невідомий раніше закономірний зв’язок між величинами ймовірностей розвитку приповерхневого карсту в карбонатних і сульфатних породах і карстопровальної небезпеки при комплексному впливі природно-техногенних фак-

торів, який полягає в тому, що ймовірність активізації розвитку приповерхневого карсту в карбонатних і сульфатних породах з виникненням провалів на поверхні Землі визначається величиною ймовірності інтегрального показника карстопровальної небезпеки, визначеного за еталонними характеристиками статистичних розподілів просторово-часових карстоініціюючих факторів для даного району місцевості”. Автори відкриття (Кузьменко Е.Д., Рудько Г.І., Вдовина О.П., Чепурний І.В.) уперше виконали комплексні дослідження можливості врахування впливу основних просторових і часових факторів на розвиток провальнопросадкових проявів сульфатного і карбонатного карсту на поверхні Землі і показали можливість їх ймовірнісної характеристики залежно від факторних навантажень, що піддаються кількісній оцінці.

Закономірність активізації селищних процесів. За даними Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту (УкрНДГМІ), для температурного режиму території України в останні роки характерне підвищення сумарної річної температури повітря. Як наслідок, змінився характер опадів, які все частіше перетворюються на потужні інтенсивні зливи, що в Карпатському регіоні створюють потенційну загрозу виникнення селищ. Це також зумовлено тим, що каскади хмар,

сформованих над Атлантикою, затримуються гірським пасмом Карпат, і тому тут за короткий період часу кількість опадів може сягнути критичного рівня і спричинити інтенсивне стікання води. Збільшення кількості сходження селів останніми роками дало поштовх до детальнішого вивчення цього явища – умов його виникнення, динаміки та можливості передбачення.

Питанням прогнозу селів займалися як вітчизняні, так і закордонні вчені: А.М. Оліферов, Г.І. Рудько, С.М. Флейшман, Г.І. Херхеулідзе, Daniele De Wrachien (Італія), Martinez Coza (США) та ін. Слід також згадати М.М. Айзенберга, Б.Л. Величка, А.А. Ключіна, А.С. Тищенко, В.В. Яблонського, дисертації та наукові роботи яких присвячені дослідженням селів у Криму і Карпатах. Прогнозуванням та моделюванням селів в Україні активно займається УкрНДГМІ, у наукових працях якого пропонується методика ймовірнісного прогнозуванням селевих явищ для території Карпат. Про актуальність цього питання також свідчать щорічні звіти міжнародних селевих конференцій та симпозіумів (4-та Міжнародна конференція “Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита”, П’ятигорськ, Росія, 2008 р., Міжнародний симпозіум “Floods and Modern Methods of Control Measures”, Тбілісі, Грузія, 2009 р., 3-тя Міжнародна конференція “Debris Flow” Мілан, Італія, 2010 р.), де питанню прогнозування селів надається чи не найважливіше місце. Втім на сьогодні розробка методів прогнозування селів ґрунтується на загальних теоретичних і методологічних положеннях, головним недоліком яких є неврахування всього існуючого комплексу факторів впливу на процес селеутворення. Інакше кажучи, це питання потребує інтегрованого аналізу якісних і кількісних даних для простеження закономірностей та періодичності селеактивності. Такий аналіз, комплексна оцінка та інтерпретація інформації із застосуванням сучасних розрахунково-аналітичних, просторово-аналітичних і картографічних методів виконані в описаних нижче дослідженнях.

Головна мета дослідження – пошук закономірностей розвитку селів у часі й просторі залежно від факторів впливу для побудови просторово-часової прогнозної моделі ймовірності селеутворення. Для цього був застосований запропонований у першій частині статті алгоритм просторово-часового прогнозу ЕГП. Відбір факторів, верифікація та розрахунок еталонного інтегрального показника засновані на одночасному використанні апріорної інформації про природу і змістовну сутність явища селеформування, представлених у теоретичних закономірностях і вихідних статистичних даних, які характеризують процес і результати функціонування аналізованого явища.

З метою апробації методики оцінки ймовірності селесходження в регіональному масштабі обрано полігон досліджень площею 75×85 км у межах південно-західного селенебезпечного району території Українських Карпат (рис. 7). Такий вибір зумовлений наявністю на ділянці великої кількості селенебезпечних водотоків і 246 зафіксованих сходжень селів. До уваги взято селі дощового генезису, відповідно до генетичної класифікації Перова [14], оскільки цей вид селів трапляється найчастіше. В районах, де поширені як дощові, так і інші види селів, перші найбільше впливають на річний розподіл цього явища.

З погляду умов і факторів розвитку геодинамічних процесів Карпатський регіон займає особливе місце. Так, з 250 селенебезпечних струмків, що зафіксовані в Україні, 216 знаходяться в Карпатському регіоні [15].

У тектонічному відношенні ділянка досліджень розташована в зоні зчленування трьох великих тектонічних структур, а саме Закарпатського внутрішнього прогину, Складчастих Карпат і Передкарпатського прогину. Карпатська складчаста область, у межах якої найбільш поширена флішова формація, є основним середовищем розвитку селів. Зони розломів мають підвищену тріщинуватість, яка визначає річне винесення 600–3400 м³ на 1 км² матеріалу в сельові водотоки. Геодинамічні процеси в межах прогинів розвиваються в моласовій формації, яка складена галогенними, карбонатними та глинистими породами. Глиниста моласа представлена монтморилоніт-гідролюдистими глинами. У зонах перерізу тектонічних порушень глини змінюють свої властивості, що забезпечує перехід породи з твердого у в’язкопластичний стан, а за інтенсивних злив – у глинисті суспензії, що складають рідку частину селів.

Давні тектонічні рухи Карпат зумовили тектонічну порушеність і подрібненість гірських порід, зони брекчіювання, мілонітизації. Все це полегшує їх розмивання і поповнення паводків твердим матеріалом. Тому зони і ділянки великої подрібненості гірських порід є осередками накопичення пухкого матеріалу для селів. Новітні й сучасні тектонічні рухи, по-перше, підтримують контрастність рельєфу, його енергію і тим самим постійно впливають на живу силу паводків, по-друге, спричиняють землетруси і, як наслідок, – масове утворення обвалів, осипів, зсувів, лавин, роль яких у накопиченні матеріалу для твердої складової селю в межах водозбору значна. За результатами режимних геодезичних спостережень, проведених Інститутом геофізики імені С.І. Субботіна НАН України [16], з’ясовано, що з максимальною швидкістю (до 3 мм/рік) відбувається підняття Карпатської складчастої області. У напрямку до прогинів

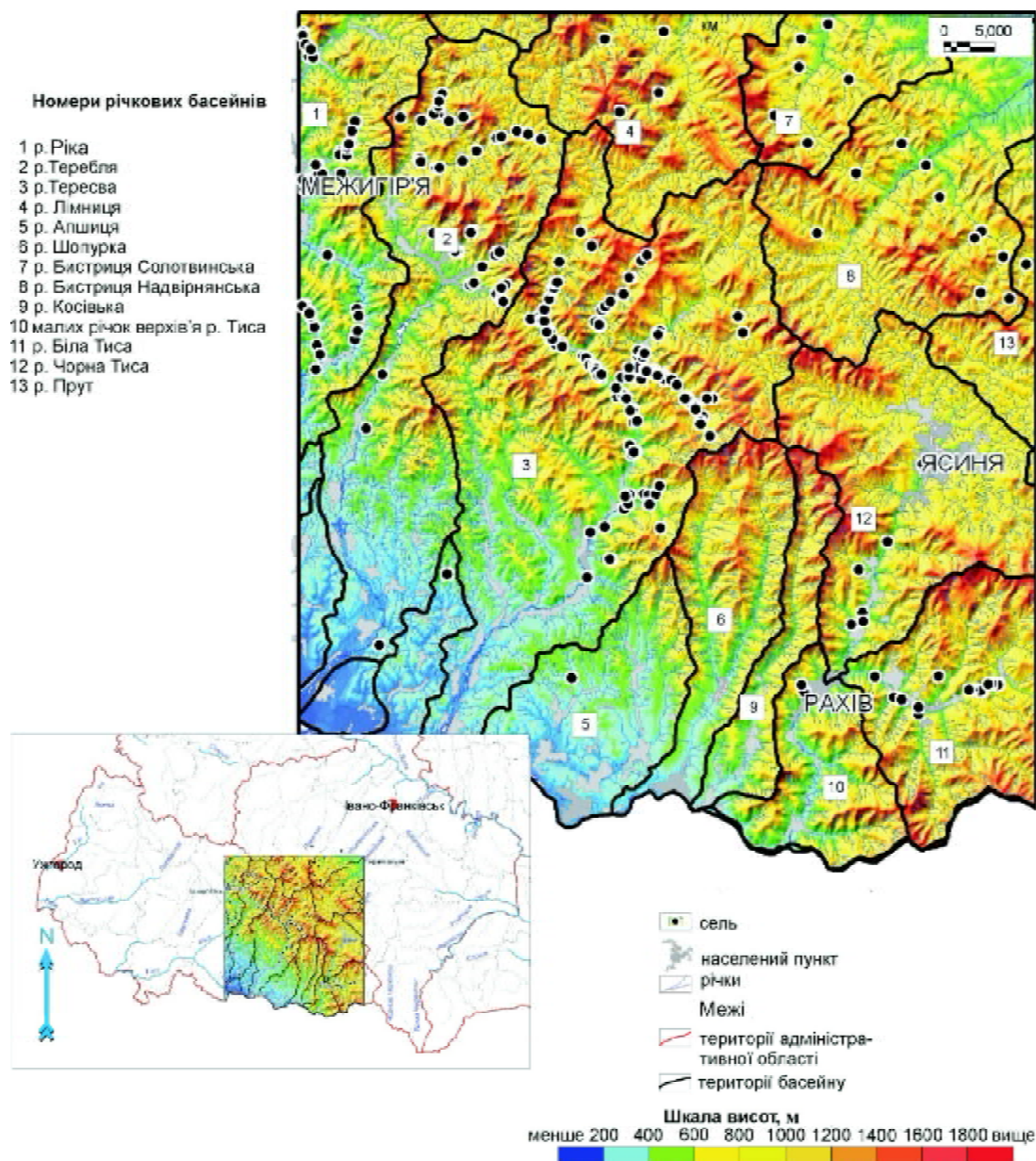


Рис. 7. Експериментальна ділянка досліджень із нанесеними селями

швидкість сучасних тектонічних рухів зменшується до 1,0, на платформі – до 0,5 мм/рік. У разі переважання лінійності ізолій швидкості сучасних тектонічних рухів паралельно до структур Карпат зафіксовано їхню блокову диференціацію. Сучасні тектонічні рухи визначають закономірності розвитку гідромережі та ЕГП, у тому числі селів. Крім того, вони зумовили формування похованих долин, а також визначили загальні тенденції ерозійної діяльності водотоків.

Абсолютні висотні позначки рельєфу ділянки змінюються від 200 (у долинній частині) до 1800 м і вище (на вододілах). Головні вододіли простягаються з південного заходу на північний схід. Сильно розчленований водотоками гірський рельєф і значні перепади висот сприяють формуванню селів унаслідок швидкого спрямованого накопичення води під час злив [17].

Гідрографічна мережа району робіт належить до басейнів річок: Терєбля, Терєсва, Тиса та частково Ріка, Свіча, Лїмниця, Прут, Бистриця. Загрозу значних збитків несуть селеві потоки, що здебільшого зосереджені в басейні р. Тиса, переважно в межах Чорногірського і Свидовецького масивів.

У зв'язку з інтенсивним вирубуванням лісів відзначається тенденція до збільшення селенебезпечних водокам'яних потоків у басейнах річок Терєбля і Ріка. У передгір'ях на річках Терєсва і Терєбля в окремі роки формуються селеві потоки водокам'яного типу, в Іршавській і Солотвинській улоговинах – грязекам'яні селі.

Середні річні температури повітря на вибраній ділянці змінюються від 7–10 °С на рівнинах до 5 °С – низькогір'ях, від 3 у середньогір'ях до 0,6 °С у верхньому ярусі гір. Стійкий сніговий

покрив тримається в січні – лютому, але сніг інколи випадає вже в листопаді та подекуди в горах тримається до квітня. Велика кількість води, вивільнена під час раптового танення снігу, нерідко стає головним джерелом рідкої фази селю.

Річна кількість опадів – від 600 мм на рівнинах до 1600 мм на вершинах гір. Сильні зливи не є рідкістю, досягаючи інтенсивності 0,8–1,2 мм/хв. За наявності певних геоморфологічних, геологічних та інших сприятливих умов вони також спричинюють селі. Формування селевих потоків у Карпатах може бути зумовлено двома типами дощів: локальними і фронтальними. Локальні пов'язані головне з конвективними рухами повітряних мас, вони захоплюють територію 20–30 км², тривають від 2 до 6 год, шари опадів – 20–40 мм за дощ. Фронтальні дощі охоплюють площі в декілька тисяч квадратних кілометрів, опадів випадає 50–100 мм і більше.

У межах Карпатського регіону виділяють три механізми розвитку селів: денудаційний (внаслідок вивітрювання та знесення його продуктів площинним зливом); гравітаційний (обвали, зсуви, осипання); акумуляційний (конуси акумуляції, конуси винесення, делювіальні, пролювіальні та колювіальні шлейфи) [18].

Для побудови моделі просторового поширення селів для полігону (рис. 7) взято до уваги фактори (табл. 2) з урахуванням описаних особливостей території. Їх відібрано на основі аналізу можливого факторного впливу на процеси селеутворення, характерного для цієї території.

Інформативні фактори відібрано у такій послідовності: простеження вагомих зв'язків за матрицею коефіцієнтів кореляцій; ієрархічна класифікація за кластерним аналізом із побудовою дендрограми, за факторним аналізом головних компонент.

Побудована в процесі кластерного аналізу дендрограма вказує на наявність окремих значною мірою споріднених факторів: відстань до вододілу – енергія рельєфу, абсолютна висота – кількість опадів, високий коефіцієнт кореляції між якими визначено на попередньому етапі аналізу. Така кластеризація має логічне пояснення – енергія рельєфу залежить від морфологічних параметрів вододілу, а кількість опадів прямо пропорційно змінюється з висотою.

Аналогічний взаємозв'язок простежено за матрицею факторних навантажень, де фактори абсолютна позначка і річна кількість опадів, а також відстань до вододілу, енергія рельєфу і абсолютна висота є парно залежними. Проекція змінних значень факторів на факторну площину вказує на більшу спорідненість між парами енергія рельєфу – відстань до вододілу, ніж між енергія рельєфу – абсолютна висота вододілу. Беручи до уваги

те, що фактор енергія рельєфу є вагомим за відстань до вододілу (тому що враховує ще й кут нахилу земної поверхні), відстань до вододілу і кількість опадів було вилучено з переліку факторів впливу. Слід наголосити, що фактори, які видаляються, потрібно вважати суто статистично дублюючими, оскільки їх характер відображають їм споріднені фактори.

У результаті аналізу лишилося 14 вагомих факторів, інформативність яких визначено у відповідності до наведеного в першій частині статті алгоритму і формули

$$V_j = \frac{\sum_i |r_{ij}|}{\sum_j \sum_i |r_{ij}|} 100\%, \quad (3)$$

де r_{ij} – значення коефіцієнта парної кореляції між i, j змінними в матриці коефіцієнтів кореляції.

Нижче наведено значення вагових коефіцієнтів інформативності (%) для факторів впливу на поширення селевих осередків:

| | |
|-------------------------------------|------|
| Абсолютна висота | 9,02 |
| R_i тектонічної зони | 8,61 |
| Абсолютна висота вододілу | 8,2 |
| R_i басейну | 8,23 |
| Відстань до лісу, м | 8,23 |
| Відстань до найближчого зсуву | 8,13 |
| R_i інженерно-геологічного району | 6,4 |
| R_i літофації | 9 |
| Відстань до тектонічного розлому | 6,99 |
| Кут нахилу земної поверхні | 6,91 |
| Відстань до вододілу | 7,56 |
| Відстань до дороги | 6,11 |
| Відстань до базису ерозії | 6,61 |

Важливим є той факт, що значення вагових коефіцієнтів несуттєво відрізняються один від одного (в межах 6,11–9,02). Це свідчить про відсутність домінуючих факторів, про однаковий “внесок” їх у формування селів і про необхідність урахування всіх наведених факторів.

Відсотковий розподіл вагових коефіцієнтів інформативності факторів впливу є логічним і відповідає уявленням про процеси селеутворення, а невеликі розбіжності їхніх числових значень підтверджує гіпотезу про їх комплексний однаково важливий вплив.

Значення інтегрального показника, закономірно пов'язаного з розподілом селів у просторі, розраховували за формулою

$$\Pi_{\Sigma_i} = \sum_{j=1}^k \Pi_{ij} V_j, \quad (4)$$

де Π_{ij} – нормалізовані значення просторових факторних характеристик; V_j – ваговий коефіцієнт інформативності j -го фактора для i -го прояву селів; k – кількість просторових факторів.

Таблиця 2. Фактори впливу на селеформування

| № п/п | Група факторів | Фактор | Кількісний показник фактора (факторна характеристика) |
|-------|-------------------------|---|---|
| 1 | Літолого-стратиграфічні | Літофаціальний тип підстильних гірських порід | Коефіцієнт ураженості літофаціальної зони |
| 2 | Інженерно-геологічні | Інженерно-геологічний район | Коефіцієнт ураженості в межах району |
| 3 | Геоморфологічні | Базис ерозії | Відстань до базису ерозії |
| 4 | | Вододіл | Відстань до вододілу |
| 5 | | | Абсолютна висота вододілу |
| 6 | | Висота | Абсолютна позначка |
| 7 | | Крутість схилу | Кут нахилу земної поверхні |
| 8 | | Рельєф | Енергія рельєфу |
| 9 | | Річковий басейн | Коефіцієнт ураженості басейну |
| 10 | Геоморфологічні | Сучасні геологічні процеси | Відстань до зсуву |
| 11 | Тектонічні | Тектонічна зона | Коефіцієнт ураженості тектонічної зони |
| 12 | | Тектонічні порушення | Відстань до тектонічного розлому |
| 13 | Ландшафтні | Рослинність | Відстань до межі лісу |
| 14 | Метеорологічні | Опади | Кількість опадів |
| 15 | Техногенні | Наявність населених пунктів | Відстань до населеного пункту |
| 16 | | Наявність шляхів | Відстань до дороги, шосе |

Як видно з рис. 8, розподіл значень інтегрального показника підпорядковується нормальному теоретичному закону розподілу, що підтверджує комплексний закономірний вплив досліджуваних факторів. Розрахований інтегральний показник є еталонним для будь-якої генетично спорідненої території.

Дослідження щодо активізації селів у часі проведені на території гірськокарпатського гідрогеологічного району. Розглянуто характер комплексного впливу часових факторів – метеорологічних, сейсмічних, гідрогеологічних і сонячної активності на процеси селевої активі-

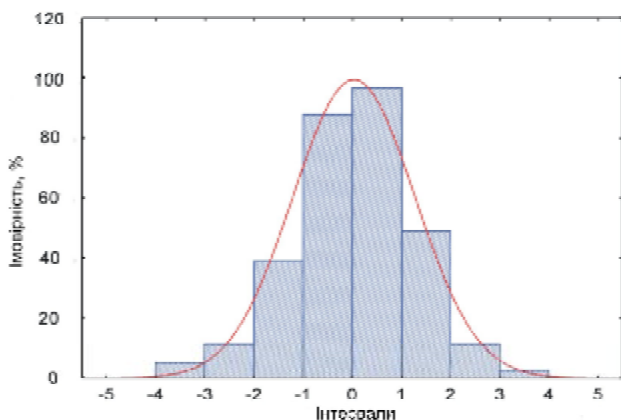


Рис. 8. Гістограма інтегрального показника утворення селів. По осі абсцис – інтервали, по осі ординат – відсоток потраплянь

зації. Для аналізу відібрані часові ряди факторів, зареєстровані в період 1953 – 2008 рр.

Комплексний еталонний показник розраховували відповідно до схеми, зображеної на рис. 1 першої частини статті. Бралась до уваги такі фактори: річна активність селів, середньорічна температура повітря, сонячна активність, середньорічний рівень ґрунтових вод, сумарна річна кількість опадів, сумарна річна енергія землетрусів. Побудова гістограм розподілу значень і кореляційний аналіз показали доцільність використання кожного з наведених факторів.

Для реалізації кореляційного аналізу першим етапом була побудова автокорелограм на основі АКФ з метою визначення основних періодів гармонійних часових коливань активності селів і факторів, які впливають на їх активізацію. Встановлено основні періоди для ряду активізації селів у 5, 10 років; ряду сумарної енергії землетрусів – 8, 11, річної кількості опадів – 3, 6, ряду сонячної активності (число Вольфа) – 10–11 років; ряду рівня ґрунтових вод – 18–21 рік; перегин кореляцій у часовому ряді середньорічної температури спостерігається на періоді в 10 років.

Аналіз корелограм, побудованих під час кроскореляції (ФВК), показав відставання реакції ряду активності селів від ряду енергії землетрусів на один рік, а від ряду рівня ґрунтових вод – на два роки.

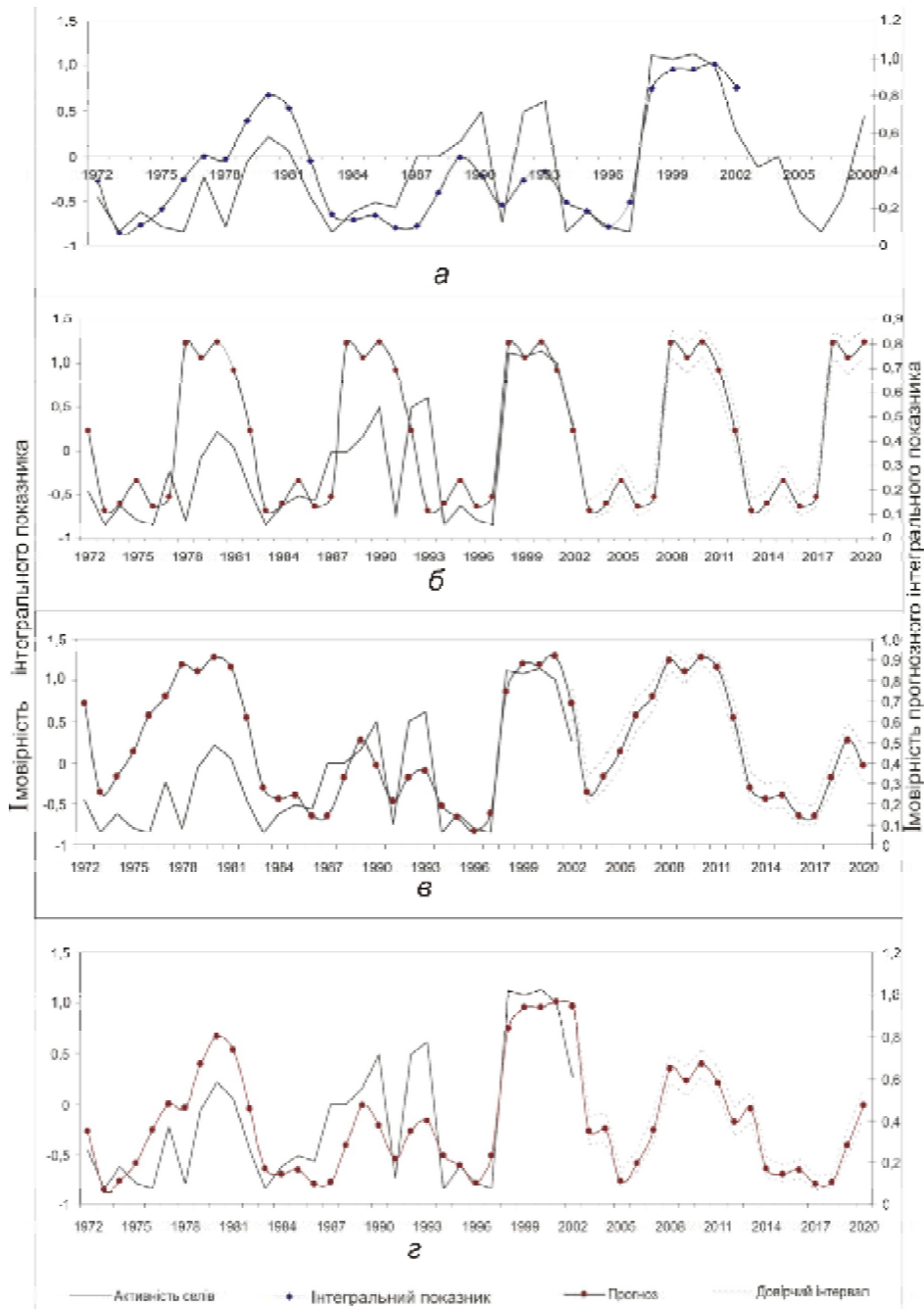


Рис. 9. Часові ряди: активності селів та інтегрального показника: а – 1972–2008 рр.; б–г – прогнози (б – осередненням ряду, в – аналізом Фур'є, г – багатoshаровим перцептроном)

За формулою (3) розраховано вагові коефіцієнти інформативності кожного з факторів:

| Фактор (часовий ряд) | Ваговий коефіцієнт інформативності, % |
|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Активізація селів | 24,02 |
| Число Вольфа | 13,73 |
| Сумарна річна кількість опадів | 19,12 |
| Середньорічна температура повітря | 13,1 |
| Середньорічний рівень ґрунтових вод | 16,01 |
| Річна енергія землетрусів | 14,02 |

Зазначені коефіцієнти використано для розрахунку та побудови ряду функцій комплексного показника та відповідного йому ряду ймовірності утворення селів (рис. 9, а).

Прогнозні ряди активізації селів зображені на рис. 9, б–г. Прогноз виконаний до 2020 р. різними методами, але всі ряди збігаються між собою в ритмічності та в екстремумах значень ймовірності селевої активності. Наступна активізація селів очікується: за прогнозом методом осереднення ряду – 2018–2020 рр. (імовірність 0,8); за методом Фур'є – 2019 р. (імовірність 0,5); за прогнозуванням нейронними мережами (багатoshаровим перцептроном) – 2020 р. (імовірність 0,5). Отже,

всі методи тою чи іншою мірою підтверджують активізацію селів у 2018–2020 рр.

Геоінформаційна система прогнозування ЕГП на регіональному рівні та її впровадження. Використання ГІС просторового прогнозування ймовірності виникнення чи активізації небезпечних ЕГП передбачається для вирішення різного кола завдань – від адміністративного управління до запобігання чи мінімізації наслідків надзвичайних ситуацій. Широке застосування передбачає і велике коло користувачів різного фахового спрямування і з різними навичками роботи з ГІС.

Накопичений досвід розробки ГІС прогнозування дає змогу запропонувати таку схему побудови.

1. Створення ГІС прогнозування починається відразу на стадії поступового аналізу всієї наявної інформації, придатної для розробки математично-статистичної моделі. На цьому етапі приводять картографічні дані до єдиного формату та масштабу, розробляють структуру атрибутивних даних, вибирають вид зображення картографічних об'єктів (лінійний, площинний чи у вигляді безперервних поверхонь). Цей етап досить важливий, оскільки ГІС використовують і як просторову базу даних, і як інструмент аналізу та набору вихідних даних для статистичних досліджень.
2. Після побудови математично-статистичної моделі проводять її аналіз з метою встановлення найоптимальнішої форми зображення в ГІС вибраних факторних характеристик (зсувної, карстопровальної або селевої небезпеки – картографічна база даних). Зазвичай факторні характеристики, що представлені у вигляді площинних об'єктів (геологічні, літолого-стратиграфічні, геоморфологічні, інженерно-геологічні, гідрогеологічні та інші таксони), не потребують жодних перетворень. Якщо на території досліджень наявні дві або більше зон із різними еталонними інтегральними показниками небезпеки ЕГП, слід розділити ті таксони, які одночасно належать декільком зонам.

Більших перетворень потребують факторні характеристики, які представлені безперервними величинами і можуть бути зображені як лінійні (ізолінії), площинні об'єкти (проміжки між ізолініями) або неперервні поверхні, наприклад: абсолютна висота, кут нахилу земної поверхні тощо. Для зручності використання та прискорення розрахунків значень ймовірності небезпеки карти таких факторів необхідно перебудувати у вигляді площинних об'єктів з фіксованими значеннями в абсолютних величинах (метрах, градусах), причому крок поділу має відповідати кроку для граничних

значень, який було використано для аналізу та побудови математичної моделі. Вказаний підхід значно скорочує час, потрібний для отримання фактичного значення факторної характеристики у вигляді, зручному для використання у функції інтегрального показника небезпеки ЕГП, і час для виконання розрахунку.

3. Після підготовки всіх необхідних картографічних матеріалів переходять до розробки програмно-розрахункового модулю визначення величини зсувної небезпеки у вибраній як базова ГІС і до розробки інтерфейсу користувача системи прогнозування.

Для прикладу розглянемо ГІС просторового прогнозування ймовірності виникнення чи активізації зсувних процесів на території Івано-Франківської обл., яку створено саме за наведеною схемою.

Як базову ГІС було вибрано повнофункціональну ГІС MapInfo корпорації Pitney Bowes Software Inc. Цей вибір обґрунтований такими міркуваннями: 1) MapInfo є базовою ГІС Міністерства екології та природних ресурсів України; 2) відносно невисока вартість програмного забезпечення (близько 2000 дол. США); 3) апаратно-платформна незалежність; 4) легкість освоєння для фахівців у предметних галузях; 5) наявність достатньої кількості картографічних матеріалів у форматі MapInfo і легкість конвертації з інших форматів; 6) зручність користування.

Відповідно, ГІС просторового прогнозування зсувної небезпеки розробляли з урахуванням можливості її використання фахівцями з мінімальними навичками роботи з операційною системою та ГІС MapInfo.

Після програмної реалізації в середовищі MapBasic процедур визначення значень для кожного із задіяних у моделі факторів і розрахунку комплексного інтегрального показника та величини ймовірності зсувної небезпеки було розроблено інтерфейс користувача.

Для досягнення максимального збереження звичного оточення користувача MapInfo і забезпечення повнофункціональності самої ГІС доступ до системи прогнозування здійснено за допомогою створення додаткового пункту меню “Utilities” – команда “Прогноз зсувної небезпеки”.

У системі реалізовано три варіанти просторового прогнозу:

- точковий прогноз;
- прогноз для лінійного об'єкта;
- площинний прогноз для вказаної території.

Прогноз побудований в режимі реального часу в середовищі ГІС MapInfo. Залежно від типу прогнозу користувач вказує відповідний об'єкт на карті або створює потрібний йому об'єкт на косметичному шарі. Передбачена можливість

введення точніших координат, ніж визначених при вказанні потрібної точки або об'єкта на карті та у випадку лінійних або площинних об'єктів завдання параметрів для відображення результатів моделювання.

Найпростішим для реалізації є варіант прогнозу ймовірності зсувної небезпеки у випадку точкового типу. Нижче наведена послідовність розрахунку величини зсувної небезпеки:

- в автоматичному режимі визначають фактичні значення зсувоініціювальних факторів, задіяних у моделі;
- відповідно до отриманої функції ймовірності комплексного показника розраховують величину ймовірності зсувної небезпеки;
- результат моделювання подають у вигляді точкового об'єкта, позначеного спеціальним символом у вікні карти з атрибутивною інформацією про величину ймовірності зсувної небезпеки та дати прогнозованої події.

Для отримання прогнозу для лінійних і площинних об'єктів моделювання алгоритм дещо інший.

Якщо слід визначити зсувну небезпеку вздовж існуючого або проектного лінійного об'єкта, користувач повинен вказати у відповідному вікні дискретність визначення (відстань між точками вздовж об'єкта) та вибрати тип подання результатів прогнозування. У випадку вибору опції "У зоні впливу" стають доступними для введення даних параметри для завдання розміру зони впливу та детальності побудов. Далі діє такий алгоритм: автоматично визначають координати початку лінії; з указаним кроком по вісі будують точки, у яких визначатимуться фактичні значення зсувоініціювальних факторів. Потім розраховують величини ймовірності зсувної небезпеки для кожної точки. Результати розрахунку зберігають у вигляді тимчасової таблиці MapInfo. Користувач отримує результат у вигляді графіку зміни величини зсувної небезпеки вздовж вибраного лінійного об'єкта.

Для площинних об'єктів і для прогнозу зсувної небезпеки в зоні впливу лінійного об'єкта (захисна зона, смуга відчуження тощо) використано однаковий підхід. Для лінійного об'єкта спершу автоматично будують буферну зону за вказаними користувачем параметрами. Далі алгоритм побудови ідентичний. Визначають координати мінімального описаного прямокутника, і користувачу надається можливість вказати назву об'єкта, уточнити координатні межі та задати параметри побудови прогнозованої карти. Вказані користувачем чи визначені автоматично координатні межі розширюють на 10 % відносно початкового розміру, але не більше ніж на 1 км. Таке розширення розмірів території прогнозування необхідно для усунення можливих крайових ефектів

у разі подання результатів у вигляді карти ймовірності виникнення або активізації зсувних процесів. Наступний крок – побудова регулярної мережі за вказаними користувачем параметрами, у кожному вузлі якої визначають фактичні значення факторних характеристик зсувної небезпеки. Після отримання всіх необхідних значень зсувоініціювальних факторів розраховують величини ймовірності зсувної небезпеки в цих точках. Результати побудови прогнозованої моделі представляють у вигляді карти рівнів зсувної небезпеки на задану територію.

Для зручності користування та з метою запобігання випадкового видалення необхідних картографічних шарів під час запуску системи прогнозування завантажуються згенерований програмою робочий набір MapInfo. У вікно карти виводять загальногеографічну карту області масштабу 1 : 200 000. Такі карти найбільш розповсюджені і не потребують наявності спеціальних дозволів для використання. Для зручності орієнтування на карту винесені назви населених пунктів та основних річок. Спеціальні картографічні шари, які можуть становити інтерес лише для фахівців, на карту не виводять, але вони доступні для перегляду та корегування за допомогою штатних засобів MapInfo.

На рис. 10 наведено результати побудови просторового прогнозу ймовірності зсувної небезпеки для території Івано-Франківської обл. у масштабі 1 : 200 000.

Розроблена ГІС просторового прогнозування ймовірності зсувної небезпеки повністю відкрита

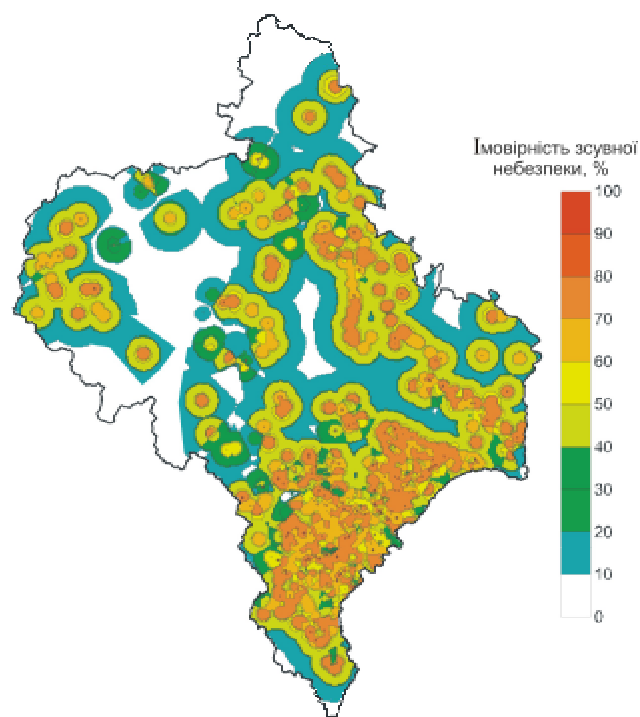


Рис. 10. Карта просторового прогнозу ймовірності зсувної небезпеки для території Івано-Франківської обл.

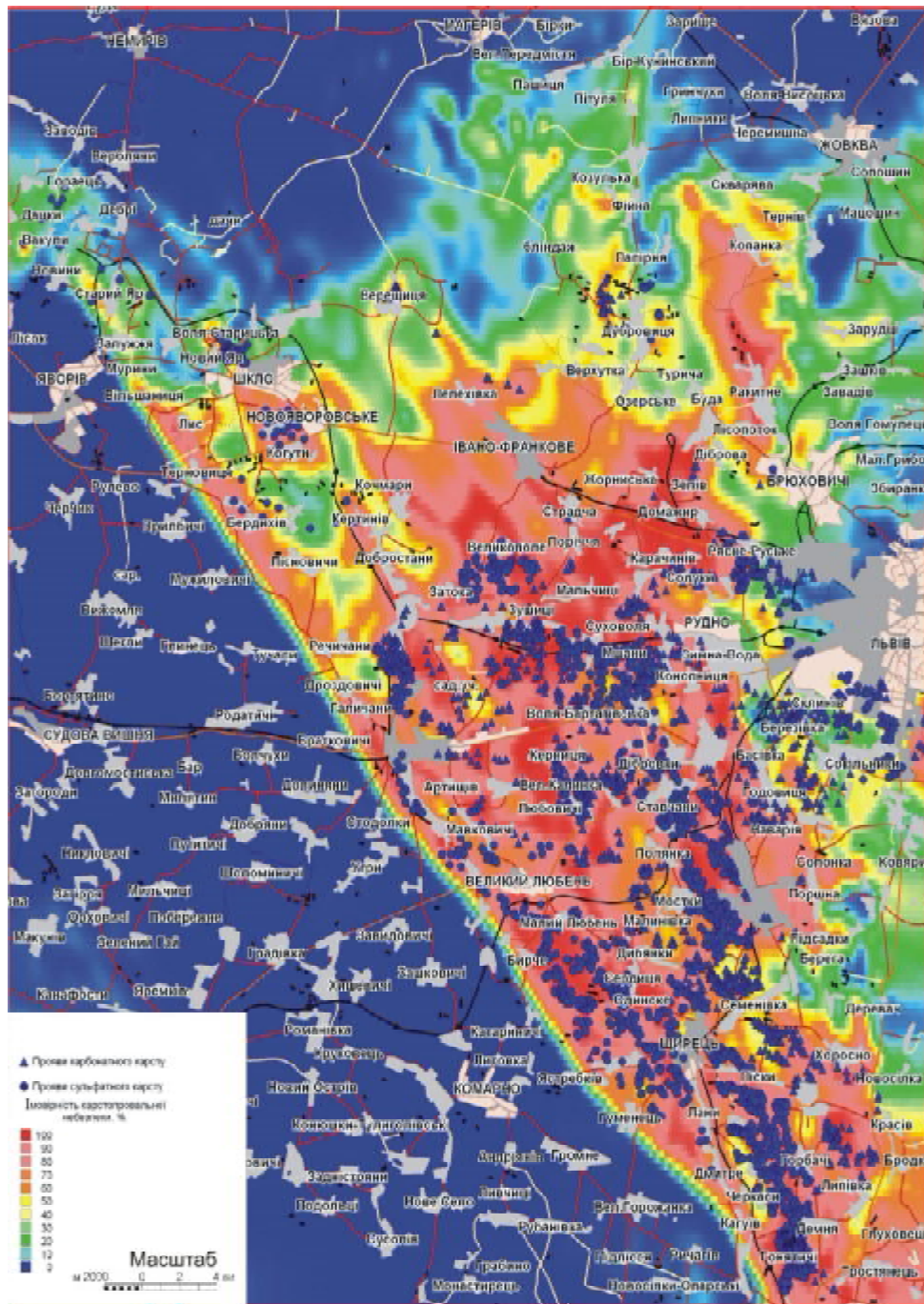


Рис. 11. Карта просторового прогнозу ймовірності розвитку провально-просадкових проявів сульфатного і карбонатно-го карсту на території Львівської обл.

для змін і доповнень використаних картографічних матеріалів. Користувач має змогу редагувати відповідні картографічні шари, уточнювати місцезнаходження меж різних об'єктів, створювати нові об'єкти, а також актуалізувати інформацію за даними дистанційного зондування Землі або наземних знімків і обстежень. Розрахунковий модуль закритий для змін від пересічного користувача, але може легко враховувати нову інформацію, що стосується уточнень математичної моделі ймовірності зсувної небезпеки. Такі уточнення виконує автор моделі або розробник системи.

ГІС ЕГП-карст створена для ділянки розвитку сульфатно-карбонатного карсту розміром 50×65 км на території Львівської обл. з метою прогнозування поверхневих проявів карстових процесів у відповідності до масштабу 1 : 100 000 (рис. 11). Просторова похибка 70 м. Період прогнозу 1971–2020 рр. (див. рис. 6).

Створено також ГІС для виявлення селевих осередків і прогнозування селевої активізації на ділянці розміром 75×85 км на території Карпатського регіону в масштабі 1 : 50 000 (рис. 12). Прогнозний період – по 2020 рік (див. рис. 9).

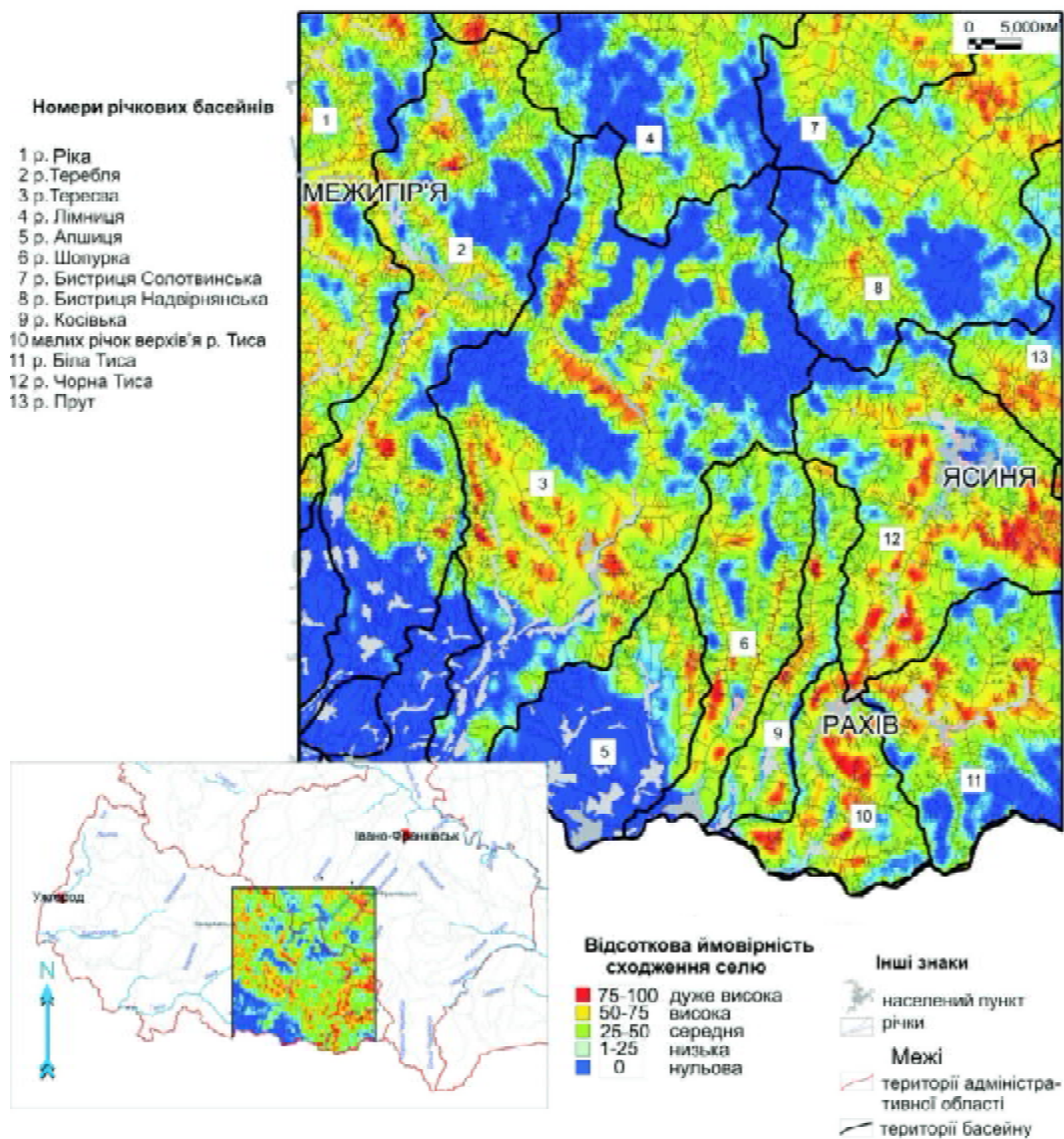


Рис.12. Карта просторового прогнозу ймовірності селєвої небезпеки на території Карпатського регіону

Висновки. У результаті проведених досліджень запропоновано та створено нову технологію просторово-часового прогнозування ЕГП (зсуви, карст, селі) на регіональному рівні. Виконано наукові розробки стосовно виявлення основних природних і техногенних факторів ЕГП залежно від конкретних умов їх локалізації. Запропоновано методичні основи реалізації комплексного підходу, що дістали подальший розвиток, стосовно прогнозування активізації зсувів, природного карсту, селів. Доведено до практичної реалізації у вигляді ГІС нову технологію оцінки небезпеки проявів ЕГП, яка дає змогу виконувати ймовірнісний просторово-часовий прогноз на територіях досліджень.

1. *Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2006 році.* — К.: ДП «Агентство «Чорнобильінформ», 2007. — 236 с.
2. *Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2007 році.* — К.: ДП «Агентство «Чорнобильінформ», 2008. — 230 с.

3. *Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2008 році.* — К.: ДП «Агентство «Чорнобильінформ», 2009. — 230 с.
4. *Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2009 році.* — К.: ДП «Агентство «Чорнобильінформ», 2010. — 252 с.
5. *Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2010 році.* — К.: ДП «Агентство «Чорнобильінформ», 2011. — 216 с.
6. *Соколов Д.С.* Основные условия развития карста. — М.: Госгеолтехиздат, 1962. — 321 с.
7. *Максимович Г.А.* Основы карстоведения. — В 2 т. — Пермь: Перм. книж. изд-во, 1969. — 529 с.
8. *Гвоздецкий Н.А.* Проблемы изучения карста и практика. — Москва: Мысль, 1972. — 391 с.
9. *Кузьменко Е.Д., Чепурний І.В., Козак П.І.* Довгостроковий часовий прогноз розвитку карсту на Передкарпатті // *Геоінформатика.* — 2008. — № 3. — С. 78–85.
10. *Кузьменко Е.Д., Вдовина О.П., Чепурний І.В.* Закономірність розвитку приповерхневого карсту в питаннях надійності експлуатації нафто- і газопроводів // *Розвідка та розробка нафт. і газ. родовищ.* — 2008. — № 4 (29). — С. 5–9.

11. *Климчук А.Б.* Роль спелеогенеза в формировании серных месторождений Предкарпатья. – Симферополь: ДИАЙПИ, 2008. – 64 с.
12. *Климчук А.Б., Андрейчук В.Н.* Геолого-гидрогеологические условия развития крупных гипсовых пещер запада Украины и их генезис // Пещеры. – Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1988. – С. 12–25.
13. *Климчук А.Б., Шестопалов В.М.* Крупные лабиринтовые пещеры в гипсах Западной Украины: спелеогенез в артезианских условиях // Геол. журн. – 1990. – № 5. – С. 93–104.
14. *Флейшман С.М., Перов В.Ф.* Селеопасные районы Советского Союза. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1976. – 308 с.
15. *Адаменко О.М., Рудько Г.И.* Основы экологической геологии. – Киев: Манускрипт, 1995. – 348 с.
16. *Геодинамика Карпат* / Под ред. С.С. Круглова. – Киев: Наук. думка, 1986.
17. *Ломтадзе В.Д.* Инженерная геология. Инженерная геодинамика. – Ленинград: Недра, 1977. – 479 с.
18. *Айзенберг М.М., Каганер М.С.* Гідролого-гідрографічна вивченість селєвих явищ на Україні. Селєві потоки на території України. – М.: Недра, 1959. – 145 с.

Надійшла до редакції 11.03.2011 р.

Е.Д. Кузьменко, О.М. Журавель, Т.Б. Чепурна, І.В. Чепурний, Л.В. Штогрин

**ПРОГНОЗУВАННЯ ЕКЗОГЕННИХ ГЕОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ.
ЧАСТИНА 2. ЗАКОНОМІРНОСТІ РОЗВИТКУ ПОВЕРХНЕВИХ ПРОЯВІВ КАРСТУ ТА СЕЛІВ.
ГЕОІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ПРОГНОЗУВАННЯ ЕКЗОГЕННИХ ГЕОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ**

У другій частині статті проаналізовано процеси формування карсту і селів на основі алгоритму прогнозування екзогенних геологічних процесів. Визначено закономірності розвитку карсту і селів у часі й у просторі залежно від міри впливу просторових і часових факторів. Описано процес і особливості створення геоінформаційних систем прогнозування зсувів, карсту, селів.

Ключові слова: екзогенні геологічні процеси, карст, селі, інтегральний показник, просторовий і часовий прогноз, геоінформаційна система.

Э.Д. Кузьменко, А.Н. Журавель, Т.Б. Чепурная, И.В. Чепурный, Л.В. Штогрин

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКЗОГЕННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.
ЧАСТЬ 2. ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ КАРСТА
И СЕЛЕВЫХ ПРОЦЕССОВ. ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ЭКЗОГЕННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Во второй части статьи дан анализ процессов формирования карста и селей на основе алгоритма прогнозирования экзогенных геологических процессов. Выявлены закономерности развития карста и селей во времени и пространстве в зависимости от степени влияния пространственных и временных факторов. Описаны процесс и особенности создания геоинформационных систем прогнозирования оползней, карста, селей.

Ключевые слова: экзогенные геологические процессы, карст, сели, интегральный показатель, пространственный и временной прогноз, геоинформационная система.