

ДОВГОСТРОКОВИЙ ЧАСОВИЙ ПРОГНОЗ РОЗВИТКУ КАРСТУ НА ПЕРЕДКАРПАТТІ

© Е.Д. Кузьменко, І.В. Чепурний, П.І. Козак, 2008

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна
Геолого-екологічний центр Львівської геолого-розвідувальної експедиції,
ДП “Західукргеологія”, Чернівці, Україна*

The long-term time forecast of sulfate cockpit activation throughout the Piedmont Carpathians has been accomplished. The leading factors-activators include: solar and seismic activity as well as meteorological and hydro-geological data. The backbone of this prognosis for the period up to 2020 is represented by the theory of rhythm among natural phenomena, their interconnection and stipulation.

Вступ. Території, що уражені карстом, займають значну площу і щороку збільшуються, завдаючи значних збитків. Зокрема, в Україні, згідно з [1], зареєстровано понад 26 000 поверхневих та 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 (7,6 %) та Хмельницька (2,91 %) області [2]. Тому проблема дослідження карстових явищ є надзвичайно актуальною. У поданій статті об'єктом досліджень є процеси розвитку карсту, а мета досліджень – аналіз динаміки активізації карсту в часовому довгостроковому режимі з подальшим прогнозом його розвитку. Розглянуто також часові фактори, які зумовлюють динаміку карстових явищ. Саме у взаємообумовленості та взаємовпливі карстових проявів та ініціюючих їх факторів надалі здійснено прогноз. Зауважимо, що йдеться про природний карст, тому що розвиток техногенного карсту передусім пов'язаний з часом введення у дію та експлуатацією промислових підприємств і споруд.

Стан досліджень. Карстові явища належать до екзогенних геологічних процесів (ЕГП). Їх прояви контролюються низкою природних і антропогенних чинників. Загальновизнане визначення основних умов утворення карсту наведено у праці [3]: “Як геологічний процес карст неухильно розвивається там, де існують одночасно чотири умови: розчинність гірських порід, їх водопроникність, наявність рухливих вод, їх розчинна здатність.”

У кожному окремому випадку сукупність основних умов розвитку карсту характеризується великою різноманітністю. Вона залежить від багатьох чинників і змінюється в часі, визначаючись для кожної області її геологічною історією. Наведені чотири умови виникнення та розвитку карсту є обов'язковими та необхідними, але про-

цес карстоутворення пов'язаний із супутніми природними процесами і явищами.

На цей час одним з основних напрямів прогнозування природних процесів, і ЕГП зокрема, є напрям, що ґрунтується на уявленнях про закономірність повторення більшості природних явищ для окремих територій чи для земної кулі в цілому [4–6]. Оскільки процес карстоутворення є багатофакторною системою, тобто проявляється під впливом деякої кількості природних та антропогенних чинників (метеорологічні, гідрологічні, сейсмічні, космічні), які мають власну ритмічність (закономірну повторюваність через деякий період часу), доцільним є виявлення часових закономірностей карстоутворення за допомогою теорії ритмічності природних процесів.

Технологічна схема довгострокових регіональних прогнозів ЕГП, яка переважно зберігається як базова на цей час (рис. 1), запозичена



Рис. 1. Технологічна схема довгострокових регіональних прогнозів екзогенних геологічних процесів (ЕГП)

із праць [4, 5]. Сучасні роботи відрізняються різноманітністю методів аналізу основних факторів. Наприклад, у публікації [6] запропоновано залежно від вхідних даних використовувати один або кілька аналізів з такого комплексу: кореляційно-регресійний аналіз, гармонічний і спектральний аналіз, аналіз інтегрованих кривих аномалій, аналіз по частинах 11-річного сонячного циклу, адаптивні моделі (авторегресії – проінтегрованого ковзного середнього, експоненціально-зваженого ковзного середнього, регресивні та ймовірнісні адаптивні моделі). Проте конкретні приклади часового прогнозування ЕГП стосуються насамперед зсувів і селів, щодо карсту наведені загальні міркування без зазначення конкретних карстоініціювальних чинників. У вітчизняній літературі останніх років низку монографій і підручників з питаннями щодо прогнозування ЕГП опублікували О.М. Адаменко, А.М. Гайдін, С.В. Гошовський, Г.І. Рудько, проте для поверхневого природного карсту прогноз в працях цих учених не поширюється далі просторових карт ураженості [7–10]. Те саме можна зауважити і щодо звітів геологічних підприємств, в яких зазвичай наведено каталоги карстових проявів (узагальнених надалі в ДНВП “Гео-

інформ України”) та карти ураженості із зазначенням умов розвитку карсту (відкритий, покритий, перекрытий). Отже, ні у наукових працях, ні у виробничих звітах не здійснено часового довгострокового прогнозу розвитку карсту. Таке завдання поставили перед собою автори статті, і, як видно нижче, успішно його вирішили.

Фактичний матеріал. Для досліджень, результати яких наведено у статті, як полігон було вибрано ділянку території Західного регіону України, де розвинутий карбонатний, сульфатний і соляний карст (рис. 2).

Карбонатний карст істотно поширений у межах крейдових та неогенових відкладів південно-західної окраїни Східноєвропейської платформи (понад 11 тис. км²) у вигляді давніх безстічних понижень, воронок, карстових полів, ярів, понорів та ін. Окремі ознаки активізації карсту пов’язані з гідротехнічним будівництвом, експлуатацією водозаборів, розробкою кар’єрів.

Сульфатний карст поширений у зоні контакту Передкарпатського прогину та платформи на площі понад 2,5 тис. км². У зоні повного та часткового прорізання карстуючої товщі водотоком інтенсивно розвивається природний карст. За техногенної зміни гідрогеологічних умов і форму-

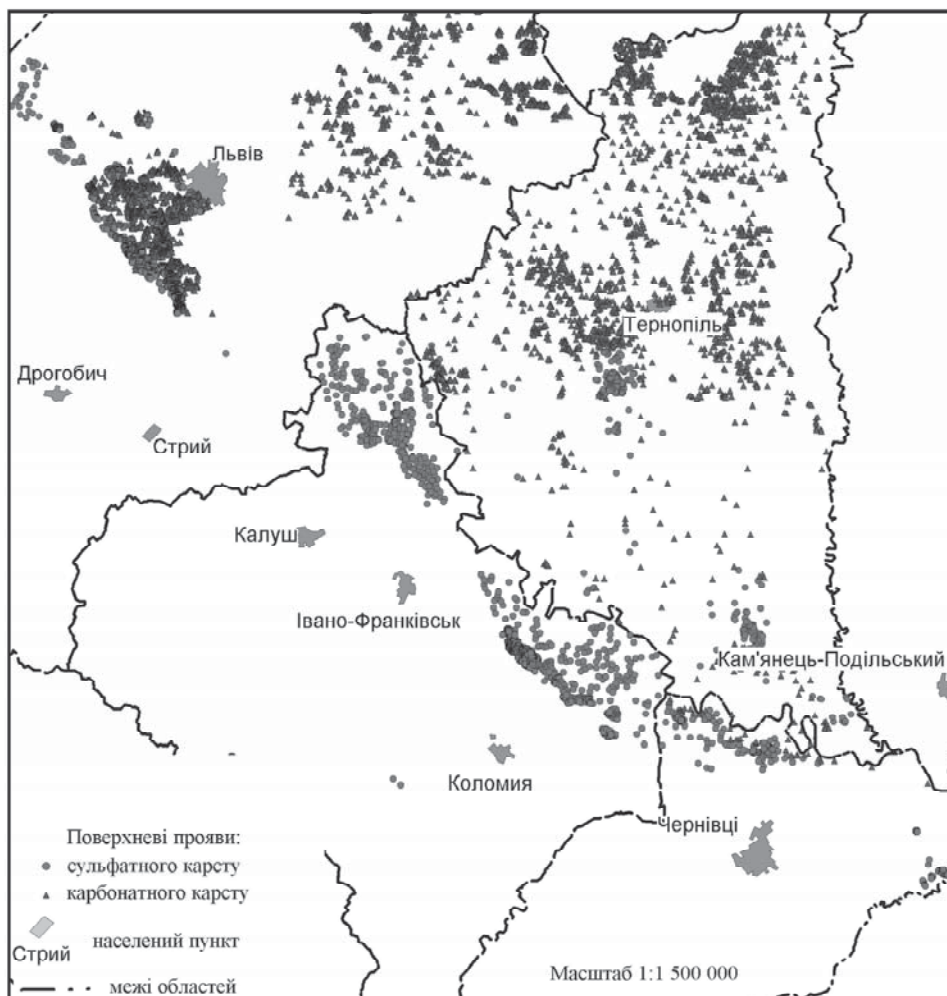


Рис. 2. Карта-схема карстопроявів Західного регіону України

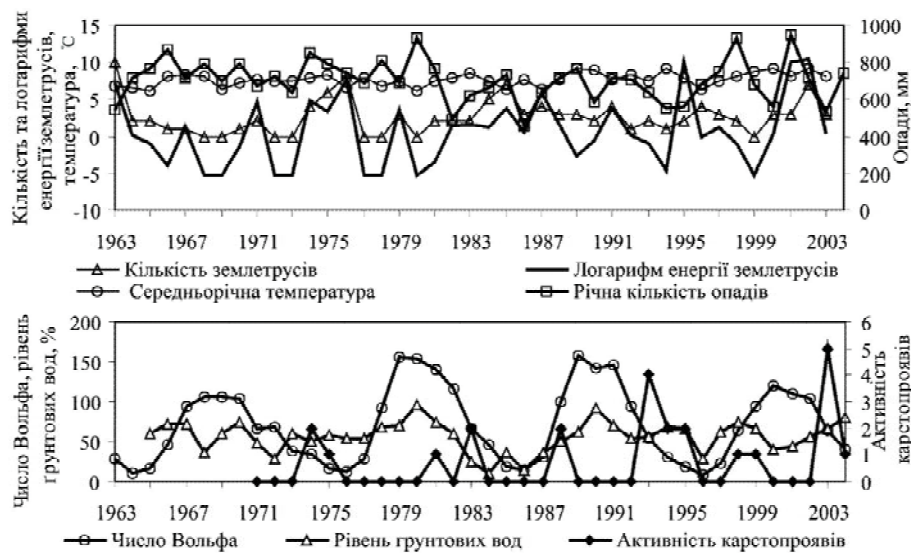


Рис. 3. Часові ряди активності карстопроявів та чинників активізації карсту

вання ділянок агресивного руху підземних вод від зон живлення до зон розвантаження відбувається розмивання існуючих та заповнених глиною порожнин з катастрофічним утворенням техногенно зумовлених воронк.

Соляний карст широко розвинутий у Закарпатському та Передкарпатському прогінах і пов'язаний з соляними відкладами міоцену. За природного розвитку карстопрояви представлені блюдцеподібними пониженнями, за техногенної активізації – воронками, понорами, нішами, просадками над шахтними полями.

Таким чином, умови розвитку карбонатного, сульфатного та соляного карсту є різними, тому різними є процеси їх утворення. Для подальших досліджень автори обмежились одним із згаданих типів, а саме сульфатним карстом. Порооди сульфатів кальцію – гіпси та ангідриди простягаються 300-кілометровою смугою в межах Львівської, Івано-Франківської, Тернопільської та Чернівецької областей, ширина якої з північного заходу на південний схід збільшується з 10 до 30 км. Зазначена територія належить до інженерно-геологічного району акумулятивно-денудаційної рівнини Передкарпатської височини, чи Передкарпаття. Оскільки процес карстоутворення в сульфатних породах має значну швидкість розвитку в часі та характеризується досить високою частотою утворення нових карстових воронк і провалів, слід очікувати виразних часових закономірностей розвитку карстового процесу та чинників, що його зумовлюють. На рис. 3 наведений часовий ряд активізації поверхневого сульфатного карсту в період за 1971–2004 р., який відображає фактичний матеріал, використаний для подальших досліджень. На цей же рисунок винесені ряди карстоініціювальних факторів, які пропонуються для подальшого аналізу.

Часові карстоініціювальні фактори. Для виявлення часового розподілу розвитку сульфатного

карсту на території досліджень використовували річні ряди активізації карсту та факторів, що його зумовлюють: річної кількості опадів; середньорічної температури; сонячної активності (ряд чисел Вольфа); енергії землетрусів. На зв'язок ЕГП із зазначеними факторами в загальних рисах вказують автори праць [4–6]. У публікації [6] виділено три типи зон розвитку карсту: а) епізодичної дії карстових вод на породи, що піддаються дії карсту; б) постійної дії на межиріччях; в) постійної дії в приріччях, на узбережжях озер. На території досліджень трапляються всі три типи зон, проте переважають перші два. Зони першого типу розміщуються над іншими та охоплюють гідродинамічні зони аерації й періодичного насичення порід, що піддаються дії карсту. Тому режим карстопроявів тут збігається з режимом атмосферних опадів. Зони другого типу збігаються з гідродинамічною зоною постійного насичення карстових порід. Режим карстової активності визначається змінами витрат карстових вод, які прямо корелюють із п'езометричним режимом цих вод. Останній же узгоджується з режимом атмосферних опадів. На зв'язок розчинності карбонатних порід з температурою підземних вод вказано у багатьох джерелах, зокрема у праці [3]. Температура цих вод корелює з температурою повітря. Крім того відзначається зв'язок сейсмічності із зсувними, обвальними та селевими процесами [4, 5]. Проте логічним є висновок, що сейсмічні процеси причетні до переходу покритого карсту в відкритий, тобто спричинюють провальні явища, порушуючи рівновагу гірського масиву внаслідок коливань шару порід приповерхневої зони. Це очевидно, тому сейсмічність також вибрана нами як один з чинників. Отже, із карстоініціювальних довгострокових факторів виділяємо чотири: кількість опадів, рівень ґрунтових вод, температура повітря, енергія землетрусів. Окремо стоїть питання про число Вольфа, яке характеризує сонячну ак-

тивність. В літературі, починаючи з відомої монографії А. Чижевського [11] донині, відзначають зв'язок сонячної активності з природними процесами, що відбуваються на поверхні Землі. Є всі підстави вважати, що сонячна активність пов'язана як з активністю ЕГП, так і з факторами, що їх ініціюють. Зокрема, на це вказано у працях [4–6] і в багатьох інших. Зв'язок сонячної активності з метеорологічними факторами на кількісному рівні ретельно досліджено у праці [12], а сонячної активності із зсувами та землетрусами – у статтях [13–15]. Проте природа зазначених зовнішніх зв'язків залишається невиясненою, хоч існує низка гіпотез щодо цих причин. Більше того, тісного універсального зв'язку сонячної активності із жодним фактором ЕГП також немає: є кореляція з певним знаком, що відповідає фізичним уявленням про процес, але вона не завжди суттєва. Тому пропонуємо розглядати сонячну активність як один з рівноправних факторів ЕГП, яка справедлива для факторів вищезазначених. Зауважимо, що всі згадані часові фактори є загальнодоступними, тобто їх отримання не потребує спеціальних фахових досліджень.

Методична послідовність досліджень. Завданням, на вирішення якого спрямовані наведені дослідження, є регіональний довгостроковий прогноз виникнення активізації карстових процесів, який дає змогу обґрунтувати на основі комплексних досліджень дії основних відомих часових факторів на кількісному ймовірнісному рівні час утворення карстових форм.

Оцінка комплексної дії сукупності природних часових факторів на процеси карстоутворення відображається у величині комплексного інтегрального показника факторів з подальшим визначенням розподілу ймовірності цього показника в часі, екстраполяцію якого розглянуто як прогнозний розподіл ймовірності активізації карсту. Послідовність досліджень така:

- створення бази даних часових річних рядів утворення поверхневих карстових форм згідно з існуючими каталогами та карстоініціувальними факторами;
- нормалізація часових рядів з метою переведення фізичних оцінок факторів у безрозмірні формалізовані показники послідовним нормуванням значень часових факторів відносно середніх по рядах і відносно середньоквадратичних відхилень;
- розрахунок і побудова функцій автокореляції часових рядів кожного фактора для оцінки його ритмічності;
- розрахунок та побудова функцій взаємної кореляції часових рядів вибраних факторів з рядом карстопроявів для оцінки та обґрунтування оптимального зміщення рядів факторів у часі відносно ряду карстопроявів;

- визначення вагових коефіцієнтів кожного з факторів для оцінки ступеня інформативності факторів;
- розрахунок інтегрального показника всіх часових факторів, а також карстового ряду;
- розрахунок і побудова часового ряду розподілу ймовірності інтегрального показника вибраних факторів, за допомогою якого оцінюють прогнозну ймовірність активізації карсту екстраполяцією отриманого часового ряду ймовірності.

Наведений алгоритм ми з успіхом застосовували під час довгострокового прогнозування зсувів [16].

До комплексу часових факторів крім їх фізичного обґрунтування, що наведено вище, висунені такі вимоги: ритми факторів узгоджуємо з ритмами прояву карстових форм з можливим зміщенням одного відносно одного; коефіцієнт інформативності факторів приблизно однаковий. Джерелом інформації для проявів карсту є державний кадастр карсту; дані стосовно сонячної активності доступні в Internet; інформація щодо річної кількості опадів та середньорічної температури є в каталогах спостережень метеостанцій, а щодо сейсмічної активності – у відповідних бюлетенях, які видають щорічно.

Нормалізація кількості карстопроявів і кожного з досліджуваних факторів в їх часових рядах зводиться до розрахунку безрозмірного ряду контрастності кожного параметра, нормованого за середньоквадратичним відхиленням:

$$X_{ij}^{\text{норм}} = \frac{X_{ij} - \bar{X}_j}{\sigma_{ij}}, \quad (1)$$

де $X_{ij}^{\text{норм}}$ – нормалізоване значення j -го параметра в i -му році; X_{ij} – значення j -го параметра в i -му році; \bar{X}_j – середньоарифметичне значення j -го параметра за всі роки спостережень; σ_{ij} – середньоквадратичне відхилення значень параметра за весь період спостережень.

Процедури автокореляційного аналізу та розрахунку функцій взаємної кореляції стандартні.

Розрахункова формула для вагових коефіцієнтів (коефіцієнтів інформативності) – формула зведеного загального коефіцієнта кореляції, для j -го фактора має вигляд

$$R_{\text{зв},j} = \frac{\sum_j |r_{i,j}|}{\sum_j \sum_i |r_{i,j}|} 100\%, \quad (2)$$

де $r_{i,j}$ – значення коефіцієнта парної кореляції між i -, j -змінними в матриці коефіцієнтів кореляції факторних характеристик.

Оскільки нормовані ряди значущих факторів представлені безрозмірними величинами приблизно однаково щодо інформативних показників контрастностей, визначених за формулою (1), оцінку

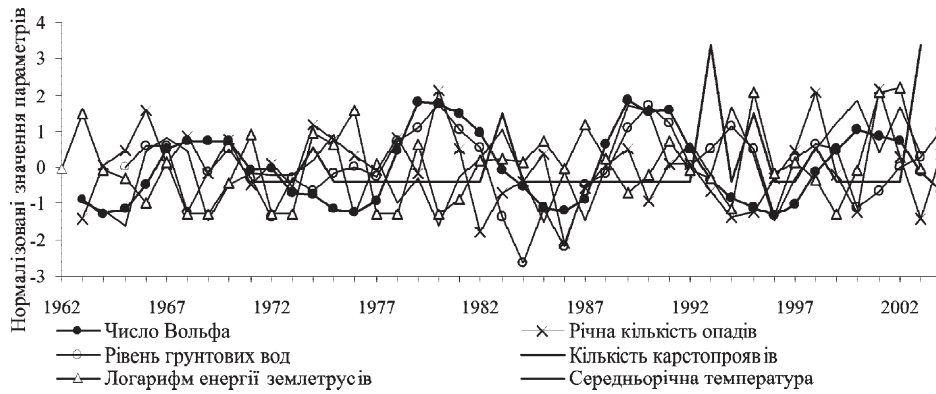


Рис. 4. Нормалізовані часові ряди активності карстопроявів та ініціувальних факторів

інтегральної дії факторів, що ініціюють зсувний ризик, визначаємо за функцією комплексного показника факторів:

$$\Phi_i = \sum_{j=1}^m X_{ij}^{\text{норм}}, \quad (3)$$

де m – кількість факторів; i – рік у ряді спостережень; j – порядковий номер фактора.

Функція Φ_i – інтегральний показник карстопроявів. У загальному випадку j -му фактору присвоюємо знак “плюс” за додатної кореляції із карстовою небезпекою та знак “мінус” – за від’ємної кореляції.

Ймовірність виникнення карсту визначаємо як імовірність відхилення Φ_i від свого математичного очікування. Відповідно до функції Лапласа, ця ймовірність $P = \lambda(\delta_a)$, де аномальне значення

$$\delta_a = \frac{\Phi_i}{\delta_\Phi}. \quad (4)$$

Оскільки нижню аномальну межу Φ_a прийнято брати для критерію трьох сигм, тобто

$$\Phi_a = 3\delta_\Phi = \pm 3\sqrt{m}, \quad (5)$$

то $\delta_\Phi = \sqrt{m}$, де m – кількість параметрів.

Результати експериментальних досліджень. Як зазначено вище, для практичної реалізації часового довгострокового прогнозу активізації сульфатного карсту вибрана територія його значного поширення, яка в інженерно-геологічному районуванні відповідає району акумулятивно-денудаційної рівнини Передкарпатської височини. Відмінність часових рядів, показаних на рис. 3, 4 в однакових одиницях виміру контрастностей кожного з факторів, дає можливість для подальших лінійних операцій з факторами.

На рис. 5 подано результати автокореляційного аналізу, виконаного з метою визначення основних періодів гармонічних часових коливань активності карсту та факторів його активізації. Основні періоди для ряду кількості карстопроявів становлять 5 і 10 років, для ряду сонячної активності – приблизно 8–12 років, для річної кількості опадів – 4 та 8–10 років, у ряді рівнів ґрунтових вод – 10 і 12–14 років. Відсутність чіткої періо-

дичності відзначається в рядах логарифмів енергії землетрусів середньорічної температури, хоча існує деяка періодичність у 8, 11–12 років та 8–9, 11 років відповідно.

На рис. 6 зображено періодограми для досліджуваних часових рядів, які дають змогу підтвердити та уточнити висновки, зроблені в процесі аналізу автокореляційних функцій (АКФ). Як видно, для ряду активності карстопроявів чітко виділяють 5- і 10-річні періодичні складові. Для ряду чисел Вольфа домінує гармоніка 10 років, ряду річної кількості опадів – 5 і 10 років. Найбільший внесок в ряд логарифмів енергії землетрусів дають періодичні складові 10–12 років та 4–5, в ряд рівнів ґрунтових вод – 10–13 та 4–5 років. Для ряду середньорічної температури виявлено гармоніки з періодами 8; 5,5 і 4 роки. Отже, по всіх факторах у часових рядах відзначаються однакові ритми у 5 та 10 років. Гармоніки з цими періодами надалі вважаємо домінуючими.

Аналіз розподілу функції взаємної кореляції між рядами активності карсту та часових факторів (рис. 7) дає змогу дійти висновку щодо величини зміщення в часі рядів окремих факторів відносно ряду карстової активності, що потрібно враховувати для досягнення максимальної синфазності основних гармонік усіх рядів. Так, для ряду чисел Вольфа спостерігається зміщення на 3 роки назад відносно ряду активності карсту, а для ряду енергії землетрусів – 1 рік назад. Значення функції взаємної кореляції для пари рядів кількість карстопроявів – річна кількість опадів показують, що ці ряди знаходяться в протифазі.

Значення вагових коефіцієнтів для кожного з часових параметрів наведені нижче:

| Параметр | 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 |

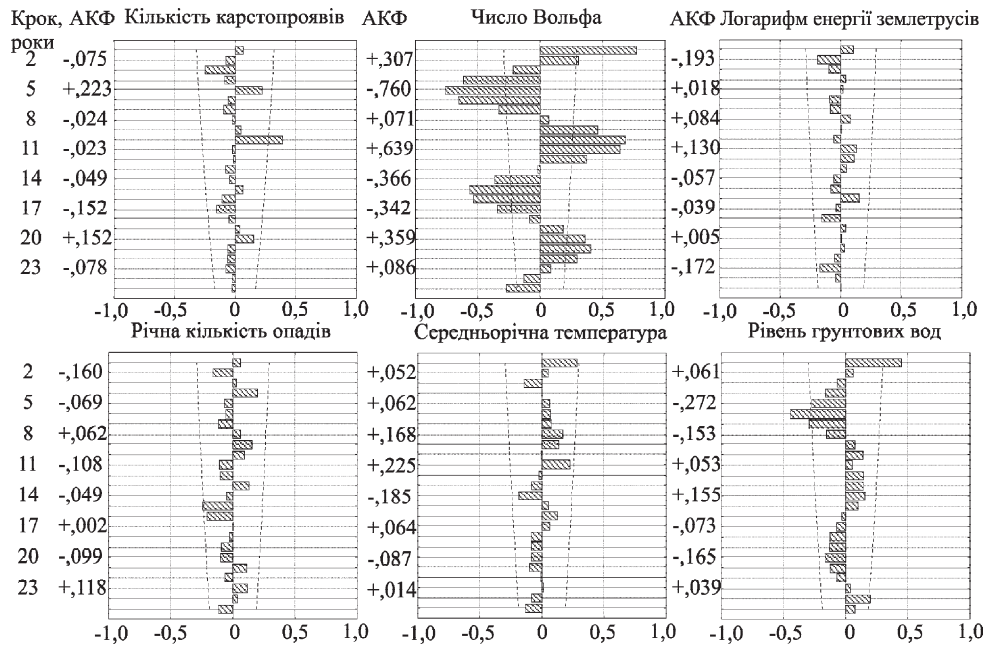


Рис. 5. Автокореляційні функції (АКФ)

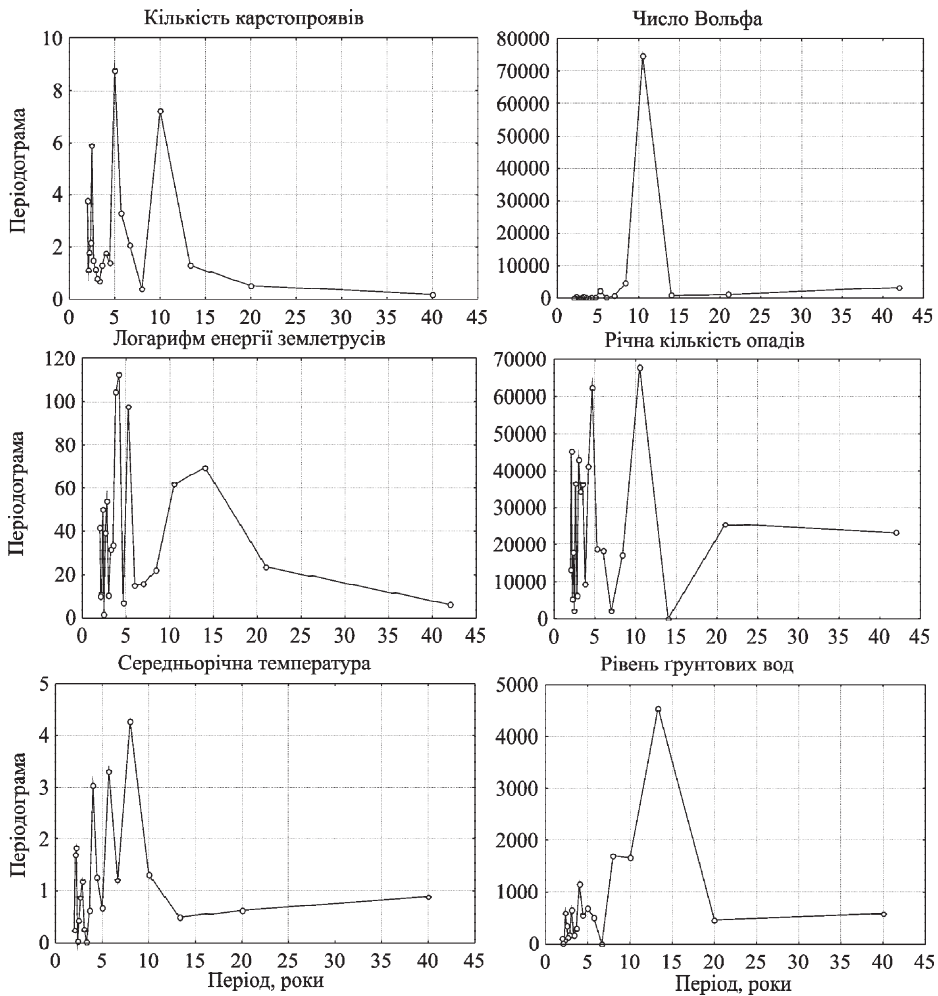


Рис. 6. Періодограми для часових рядів

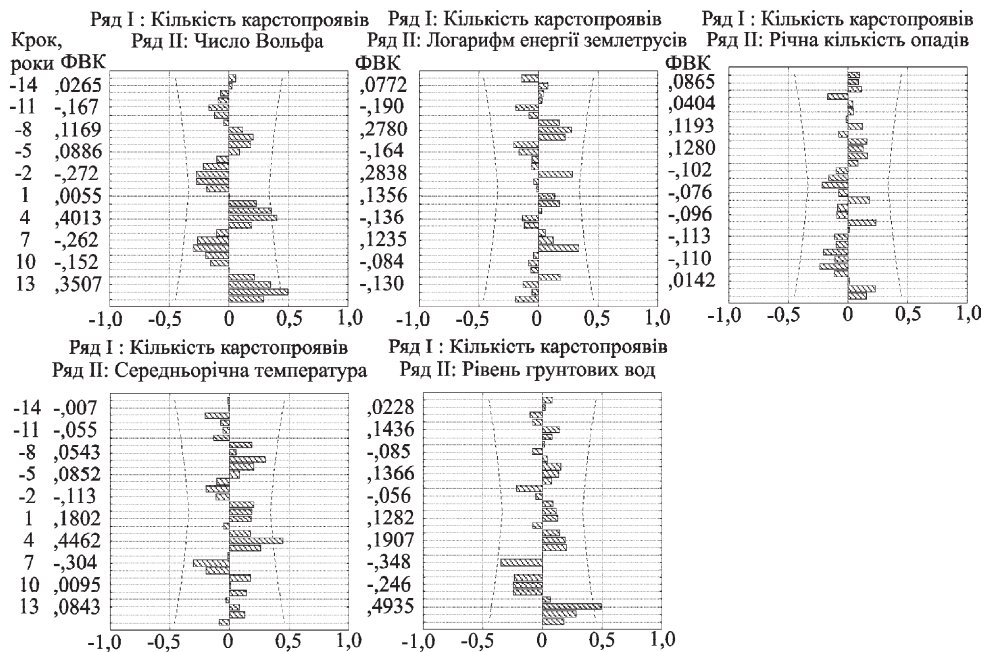


Рис. 7. Функції взаємної кореляції (ФВК)

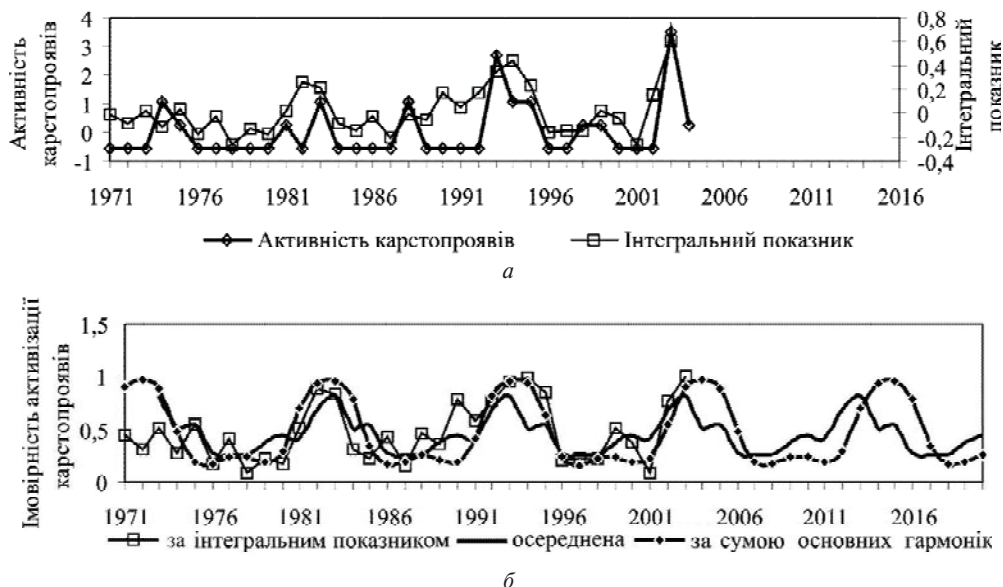


Рис. 8. Фактичні ряди активності карстопроявів та інтегрального показника (а) і ряди ймовірності карстопроявів (б)

Як видно, всі фактори відіграють приблизно однакову роль в ініціюванні карстопроальної небезпеки, відсутнє домінування якогось одного з них, лише вагомість енергії землетрусів та середньорічної температури є дещо меншою.

Заключним етапом є розрахунок прогнозного інтегрального параметра, отриманого сумуванням рядів нормалізованих значень параметрів з урахуванням їх інформативності. На рис. 8 зображено графіки обчисленого інтегрального показника з нанесеним рядом карстопроявів та ймовірності активізації карсту, а також прогнозні ряди активізації карстопроявів до 2020 р., розраховані двома способами. Перший спосіб полягає в осередненні значень ймовірності карстопроявів за головною гармонікою в 10 років. Другий спосіб ґрунтується

на аналізі Фур'є, прогнозна крива побудована як сума основних гармонік інтегрального показника, у цьому випадку це гармоніки з періодами 10 та 5 років. Зважаючи на фактичний ряд у 33 роки (1971–2003), прогноз зроблено на $33/2 \approx 17$, тобто по 2020 р. Похибка прогнозу ± 1 рік. Прогнозні ряди, побудовані за різними методиками, збігаються між собою у ритмічності та значеннях ймовірності карстопроявів. За результатами аналізу рядів можна стверджувати, що 2007–2011 рр. є роками затишшя в карстоутворенні з ймовірністю виникнення воронки 0,2–0,3; починаючи з 2012–2013 рр. процеси розвитку карсту та його проявів активізуються і досягнуть максимуму в 2014–2015 рр. за ймовірності 0,95; далі почнеться спад активності із затишшям у 2018–2020 рр.

Висновки. Активний розвиток і значне поширення поверхневих карстових проявів на території Західного регіону України вказує на необхідність довгострокового регіонального прогнозу цих процесів у часі. Для створення ефективного прогнозу потрібно мати тривалі часові ряди спостереження активізації карстопроявів та факторів активізації.

Часовий прогноз активізації карстових процесів здійснено на основі теорії про комплексний вплив ініціювальних чинників, які успішно застосовували для часового прогнозу зсувів, як карстоініціювальні чинники. Згідно з літературними даними та нашими уявленнями про перебіг карстового процесу, взято космічні (числа Вольфа), сейсмічні (енергія землетрусів), метеорологічні (річна кількість опадів і середньорічна температура) й гідрогеологічні (коливання рівня ґрунтових вод).

Часовий довгостроковий прогноз розвитку ЕГП, і карсту зокрема, має ґрунтуватися на гіпотезі про закономірну повторюваність природних процесів. У такому разі за результатами статистичного аналізу можна стверджувати про наявність ритмічності як у ряді активізації карстопроявів, так і в космічних, метеорологічних, сейсмічних і гідрогеологічних групах факторів.

Найближчим часом масової активізації проявів природного сульфатного карсту на Передкарпатті, згідно з нашим прогнозом, слід вважати 2014–2015 рр.

1. *Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2005 році.* – К.: ДП “Агентство “Чорнобильінформ”, 2006. – 242 с.
2. *Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2006 році.* – К.: ДП “Агентство “Чорнобильінформ”, 2007. – 236 с.
3. *Соколов Д.С.* Основные условия развития карста. – М.: Госгеолтехиздат, 1962. – 321 с.
4. *Методы* долговременных региональных прогнозов экзогенных геологических процессов / Под ред. А.И. Шеко, В.С. Круподерова. – М.: Недра, 1984. – 167 с.

5. *Долговременные прогнозы* появления экзогенных геологических процессов / Под ред. В.Т. Трофимова. – М.: Наука, 1985. – 152 с.
6. *Методические рекомендации* по составлению долгосрочных прогнозов экзогенных геологических процессов в системе государственного мониторинга геологической среды / А.И. Шеко, Г.П. Постоев, В.С. Круподеров, В.И. Дьяконова, И.В. Мальнева, С.И. Парфенов, А.А. Бондаренко, Л.В. Круглова. – М.: ВСЕГИНГЕО, 1999. – 78 с.
7. *Адаменко О.М., Рудько Г.И.* Основы экологической геологии. – Киев: Манускрипт, 1995. – 211 с.
8. *Рудько Г.И., Гошовський С.В.* Екологічна безпека техноприродних геосистем (наукові та методичні основи). – К.: ЗАТ “Нічлава”, 2006. – 464 с.
9. *Гайдін А.М., Рудько Г.И.* Сульфатний карст та його техногенна активізація (на прикладі Карпатського регіону України). – К.: Тов-во “Знання” України, 1998. – 76 с.
10. *Адаменко О.М., Рудько Г.И.* Екологічна геологія: Підручник. – К.: Манускрипт, 1998. – 349 с.
11. *Чижевский А.П.* Земное эхо солнечных бурь. – М.: Мысль, 1976. – 368 с.
12. *Герман Дж.Р., Голдберг Р.А.* Солнце, погода и климат. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 320 с.
13. *Гошовский С.В., Кузьменко Э.Д., Блинов П.В. и др.* Долгосрочный прогноз оползней в Закарпатском регионе. 1. Пространственное распределение оползней. Ритмичность как теоретическая основа временного прогнозирования // Геоинформатика. – 2004. – № 2. – С. 42–49.
14. *Гошовский С.В., Кузьменко Э.Д., Блинов П.В. и др.* Долгосрочный прогноз оползней в Закарпатском регионе. 2. Временной прогноз. Обоснование периода массовой активизации // Там же. – 2004. – № 3. – С. 64–72.
15. *О цикличности* карпатских землетрясений и их связи с солнечной активностью / Э.Д. Кузьменко, Е.И. Крыжанівський, Р.С. Пронишин, А.Н. Карпенко, И.В. Чепурный // Геофиз. журн. – 2007. – 29, № 4. – С. 66 – 76.
16. *Прогноз* розвитку зсувних процесів як фактор забезпечення надійності експлуатації трубопроводів / Е.Д. Кузьменко, Є.І. Крижанівський, О.М. Карпенко, О.М. Журавель // Розвідка та розробка нафт. і газ. родовищ. – 2005. – № 4(17). – С. 24–35.

Надійшла до редакції 03.03.2008 р.