

ПРОГНОЗУВАННЯ ЕКЗОГЕННИХ ГЕОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

**ЧАСТИНА 1. ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕКЗОГЕННИХ  
ГЕОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ. ЗАКОНОМІРНОСТІ АКТИВІЗАЦІЇ ЗСУВІВ**

© 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 presents a prediction algorithm of exogenous geological processes, which considers a full range of impacts. The algorithm is built on the stages of logic-statistical analysis involving GIS technologies. To validate the effectiveness of this algorithm experimentally it was developed a mathematical model for predicting landslides in Ivano-Frankivsk region.

**Keywords:** exogenous geological processes, factors of landslides formation, integral index, spatial prediction.

**Вступ.** Сталий соціально-економічний розвиток окремих регіонів і навіть держав має пряму залежність від проявів геологічних та інших природних процесів. За даними Міністерства надзвичайних ситуацій України протягом 2010 р. виникло 108 надзвичайних ситуацій природного характеру, при цьому кількість надзвичайних ситуацій геологічного характеру збільшилася на 71,4% порівняно з 2009 р. [1]. Збитки, завдані ними, зросли майже вдвічі (за попередніми даними їх суму оцінено в 933,8 млн грн), у тому числі внаслідок надзвичайних ситуацій геологічного характеру протягом 9 місяців 2010 р. – близько 156,8 млн грн. Для зменшення негативних наслідків і впливів проявів екзогенних геологічних процесів (ЕГП) потрібно створювати прогнозні моделі, що дасть змогу передбачити їх поширення й активізацію.

Прогнозування та моделювання ЕГП є результатом науково обґрунтованого передбачення їх проявів у просторі та часі під дією природних і техногенних факторів. Прогноз має відповідати на три основні питання: де, коли і якої потужності (розмірів, інтенсивності) може проявитись той чи інший генетичний тип ЕГП.

Поняття інтенсивності проявів ЕГП є одним із найважливіших в інженерній геодинаміці. Як стандартний кількісний показник оцінки інтенсивності прояву ЕГП прийнято ураженість території зазначеним процесом, яку оцінюють за площинним або лінійним коефіцієнтом ураженості. Якщо на ділянці поширено декілька генетичних типів чи різновидів досліджуваного процесу, то коефіцієнт ураженості визначають диференційовано.

На цей час технології створення прогнозних моделей суттєво відрізняються від простих реалізацій підрахунку щільності проявів ЕГП на

певній території їхнього розвитку. Найбільш обґрунтованим і водночас технологічним є прогнозування, в основі якого лежить виявлення впливових факторів різної природи та встановлення математичних закономірностей їх зв'язків з активізацією ЕГП.

Практичною реалізацією розробки математично формалізованого алгоритму прогнозу розвитку ЕГП є створення автоматизованих постійно діючих моделей, що реалізуються на основі оперативної обробки результатів поточних натурних спостережень та забезпечують прийняття керівних рішень щодо захисту територій у разі можливої активізації ЕГП, а також застосування заходів щодо забезпечення нормального функціонування об'єктів, які розташовані в зоні впливу ЕГП.

Нижче розглянуто питання розробки системи прогнозування на регіональному, локальному та об'єктовому рівнях. Регіональний рівень прогнозування відповідає масштабам 1 : 200 000–1 : 50 000. Результати прогнозу передають територіальним підприємствам для врахування під час планування заходів щодо діагностики, а також планування досліджень ЕГП локального рівня. Локальний рівень досліджень відповідає масштабам 1 : 5 000–1 : 200, їх виконують для порівняно невеликих ділянок та зазвичай окремих генетичних типів ЕГП. Розробку об'єктивного рівня прогнозування здійснюють з метою прогнозування поведінки конкретного ЕГП з можливим розрахунком рівня небезпеки для прилеглих народногосподарських комплексів.

Згідно з термінологічною характеристикою, до основних ЕГП відносять зсуви, карст, селі [2]. Саме прогнозування цих явищ є головною метою досліджень, результати яких наведені у статті.

**Теоретичні передумови прогнозування ЕГП на регіональному рівні.** Відповідно до задач регіонального просторового та часового прогнозу ЕГП, теоретичні основи були створені протягом десятиріч, причому продуктивними виявились 1970–1980-ті роки [3–8]. В останні десятиліття світова література збагатилась яскравими роботами українських учених [9–13].

Для просторового прогнозу ЕГП головним завданням є визначення зони можливого розвитку, а також спрямованості процесу та інтенсивності його прояву. Такі оцінки формують з урахуванням впливу різноманітних постійних у часі природно-техногенних факторів на стійкість території. Прогноз розподілу ЕГП у часі ґрунтується на даних режимних спостережень за їхньою інтенсивністю та пов'язується з часовими рядами природних факторів. У табл. 1 наведено перелік факторів, які на цей час рекомендується використовувати у просторово-часовому прогнозі [6].

Одночасне їх використання є ідеалом, якого ніхто з наших попередників не досягнув.

Нижче перелічені основні недоліки існуючих методів прогнозу, з нашої точки зору:

- залучення до прогнозу обмеженої кількості факторів, які не є повною сукупністю природно-техногенних процесів, що ініціюють ЕГП;
- відсутність виявлення закономірностей на рівні законів розподілу та ймовірностей для окремих факторів у їх зв'язку з ЕГП;
- окремий просторовий або часовий прогноз (просторово-часовий прогноз тільки декларували);
- відсутність кількісної оцінки просторово-часового прогнозу на ймовірнісному рівні.

На цей час нами розроблені на рівні системного аналізу теоретичні передумови прогнозування основних ЕГП, які дали змогу позбутись ука-

заних недоліків. При цьому дотримувались такої послідовності:

- обґрунтування вибору природно-техногенних факторів, що ініціюють ЕГП;
- доведення просторового зв'язку ЕГП з кожним із відомих або запропонованих факторів;
- розробка методики оцінки регіонального розподілу ЕГП з урахуванням інтегральної дії просторових факторів;
- доведення зв'язку часового розподілу ЕГП з кожним із часових факторів;
- розробка методики оцінки розподілу активізації ЕГП з урахуванням інтегральної дії просторових факторів;
- розробка методики оцінки просторово-часового розподілу ЕГП.

У загальному формулюванні завданням, на вирішення якого спрямоване певне дослідження, є регіональний прогноз виникнення або активізації ЕГП, який дає змогу на основі комплексних досліджень дії основних відомих просторових і часових факторів на кількісному ймовірнісному рівні обґрунтувати можливість утворення ЕГП та ймовірність їх подальшої активізації.

Алгоритм досліджень є єдиним для всіх видів ЕГП і полягає у послідовності реалізації дій. Подальший опис алгоритмів подано у відповідності до нумерації етапів на рис. 1.

1. Бази даних ЕГП, їхніх координат та розподілу в часі, які створюють відповідно до державного кадастру (ДНВП “Геоінформ України”) або регіональних геологічних фондів, містять дані щодо ЕГП, які відбуваються на прогнозній території. Згідно з поставленим завданням регіонального прогнозу, зазначені території відповідають географічним і геологічним регіонам, кожен з яких охоплює різні інженерно-геологічні райони.

2. Комплекс просторових і часових факторів вибирають з таких міркувань: забезпечення презентативності всіх груп факторів; залежність час-

**Таблиця 1. Класифікація факторів, що зумовлюють розвиток екзогенних геологічних процесів, відповідно до довгострокових регіональних прогнозів**

Група факторів	Фактори визначають
<p>I. Постійні</p> <p>Геологічна будова (тектоніка, стратиграфія, літологія); геоморфологічні умови (загальний характер рельєфу, морфологія і морфометрія, генезис і вік)</p>	Генетичні особливості ЕГП і інтенсивність їх прояву (ураженість)
<p>II. Повільнозмінні</p> <p><i>Незалежні (основні):</i> сучасні тектонічні рухи (горизонтальні, вертикальні); кліматичні.</p> <p><i>Похідні:</i> геокріологічні; гідрогеологічні; рослинність, ґрунти</p>	Загальну тенденцію розвитку ЕГП
<p>III. Швидкозмінні</p> <p><i>Незалежні (основні):</i> метеорологічні умови (атмосферні опади, температура та ін.); гідрологічні умови (витрати і рівні води в ріках, рівні води і режим хвиль в озерах і т. п.); сейсмічні умови (землетруси); господарська діяльність (вируб лісів, підризування схилів, лісові пожежі та ін.)</p>	Режим похідних факторів і режим активізації ЕГП
<p><i>Похідні:</i> поверхневий стік (схилувий по тимчасових і малих водотоках й ін.); вологість і льодянистість гірських порід; сезонне промерзання і відтаювання; міцнісні і деформаційні властивості гірських порід</p>	Режим активізації ЕГП

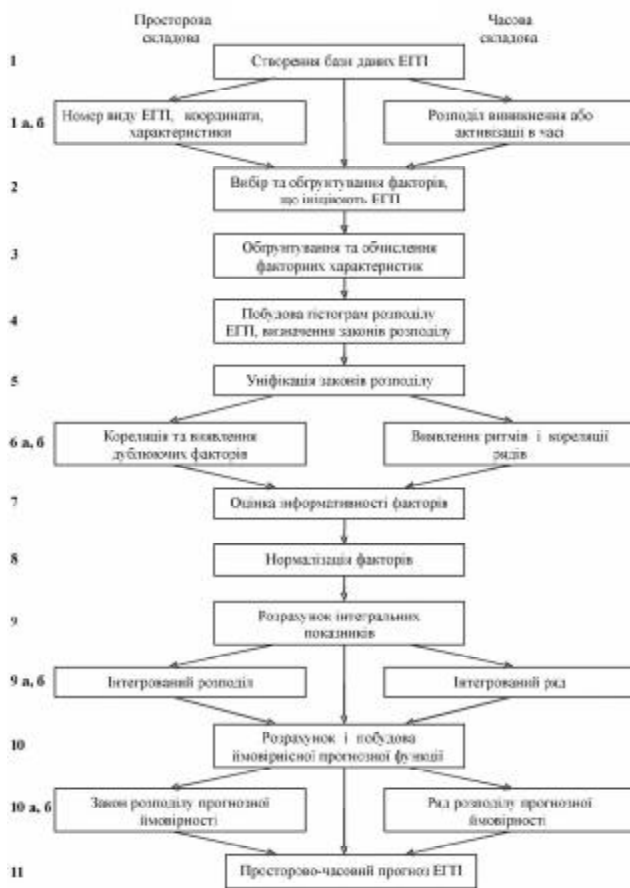


Рис. 1. Алгоритм просторово-часового прогнозу ЕГП

тоти зустрічальності ЕГП від розподілу характеристик факторів. Розподіл факторів підпорядковується одному із статистичних законів; фактори включають одноразовий значний вплив один на один, ритми часових факторів узгоджуються з ритмами ЕГП; коефіцієнт значущості (інформативності) факторів в їх просторових і часових розподілах приблизно однаковий; фактори є об'єктивними, відповідають регіональному рівню та загальнодоступні для користувача. У такий спосіб здійснюється системний підхід. Не враховують фактори, зміна яких є короткостроковою або відповідає локальному рівню вивчення ЕГП і які не є стійкими для характеристики активності ЕГП від ділянки до ділянки (рівень підземних вод для всіх горизонтів, елементи залягання гірських порід), а також специфічні фактори, характерні, наприклад, для морських берегових ділянок (абразія, характеристика пляжу, азимут берегової лінії, висота берегового виступу). Типовий перелік груп: просторових факторів – літолого-стратиграфічні, геоморфологічні, тектонічні, ландшафтні, метеорологічні, техногенні; часових факторів – космічні, метеорологічні, сейсмічні.

3. Обґрунтування вибору кількісних факторних просторових характеристик здійснюють за двома критеріями: а) наявність літературних даних щодо зв'язку між ЕГП та певною факторною

характеристикою; б) наші уявлення про можливість такого зв'язку з точки зору фізики явища. У подальших пунктах підрозділу ці характеристики конкретизовано. Щодо часових характеристик, то частина їх є однаковою для всіх ЕГП: сонячна активність (характеризується числом Вольфа); річна кількість опадів; середньорічна температура повітря; сейсмічна активність (сумарна річна енергія землетрусів); інші характеристики підбирають відповідно до досліджуваного процесу.

Значення просторових факторних характеристик знімають з карт для кожного з видів ЕГП, що прогнозується. Перелік картографічних матеріалів для визначення цих характеристик відповідає переліку факторів, які контролюють небезпеку для кожного з ЕГП. Часові ряди активізації зсувів та супроводжувальних факторів для довгострокового прогнозу (десятки років) будують річними.

4. Закон розподілу визначають відповідно до гістограм розподілу кожного з видів ЕГП у регіоні досліджень, на якій по ординаті відкладають частоту утворення або активізацію процесу, по абсцисі – кількісний факторний показник.

Вимога до гістограм – підпорядкованість одному з обґрунтованих у геології законів розподілу – нормальному, логнормальному, гамма-закону, екстремальному, експоненціальному. Сукупність останніх чотирьох законів полягає в тому, що всі вони містять експоненту, тому їх логарифми розподілені за нормальним законом. Наявність таких законів засвідчує нерівномірний вплив зовнішніх факторів, що формують величини факторних характеристик. Відповідність емпіричних розподілів теоретичним законам логнормального, гамма-розподілу, екстремального, експоненціального розподілів дає змогу розглядати ці величини не як результат суми (як за нормального розподілу), а як добуток діючих факторів, оскільки нормальним апроксимується розподіл логарифмів. Інакше кажучи, невідповідність розподілу величин теоретичному закону нормального розподілу пояснюється залежністю цих величин як від первинних, так і від вторинних ознак. Це явище є закономірним для геологічних ознак [8, 10–12].

5. Закони розподілу проявів ЕГП уніфікують за лінійними перетвореннями у такий спосіб, щоб розподіли ймовірності перетворених величин відповідали нормальному теоретичному закону. Для цього достатньою є процедура логарифмування розподілів, які відрізняються від нормального. Тоді закон розподілу для кожного фактора стає нормальним, а статистичні характеристики, що потрібні для подальших розрахунків, визначають саме для цього закону стосовно всіх відповідних розподілів.

Закони розподілу визначають прямим способом для факторів, характеристики яких встанов-

люють кількісно у фізичних одиницях. Для літофаціальних типів підстиляючих гірських порід та інженерно-геологічних районів запропоновано розраховувати кількісну характеристику, яка визначає їх зв'язок з ЕГП, а саме так званий коефіцієнт контрастності  $R_i$ , який має фізичний зміст коефіцієнта ураженості території [11]:

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

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

Далі для літофацій будують гістограму змінення частоти зустрічальності проявів ЕГП залежно від  $R_i$  літофацій і визначають розподіл. Для інженерно-геологічних районів виконують процедуру районування окремих районів відповідно до величини коефіцієнта контрастності та розраховують значення функції ймовірності ураженості ЕГП для кожного інженерно-геологічного району.

Пункти ба та бб виконують паралельно, з тим щоб далі застосовувати спільні процедури аналізу.

ба. Значущість факторів і виявлення дублюючих факторів з метою виключення останніх з розрахунків підтверджують побудовою дендрограми евклідових відстаней між окремими факторами. Вихідні дані для розрахунків – результати кластерного аналізу, виконаного способом зваженого парного усереднення. Додатковим є факторний аналіз, у результаті якого обчислюють матрицю факторних навантажень параметрів проявів ЕГП. На наш погляд, розрахунок доцільно здійснювати способом головних компонент з обертанням факторних осей із застосуванням процедури “варімакс”. У цьому випадку з'являється також можливість оцінити ступінь незалежності внеску окремих параметрів у сумарну дисперсію досліджуваного геологічного явища, яке контролюється вибраними факторами.

бб. Відносно часового прогнозу на сьогодні перспективним вважають прогноз часу активізації ЕГП, заснований на уявленні про закономірну повторюваність природних явищ, у тому числі ЕГП на земній кулі чи окремих її частинах. Таку закономірну повторюваність проявів природних явищ через визначені інтервали часу називають ритмічністю, причому під ритмом розуміють відрізок часу між двома періодами активізації ЕГП, які закономірно повторюються. У роботах [5, 7] встановлено зв'язок ЕГП з окремими часовими факторами для певних територій, проте аналізу узагальненого впливу факторів на розвиток ЕГП на рівні встановлених універсальних закономірностей у цих та інших роботах немає.

Визначення основних періодів квазігармонійних часових коливань активізації ЕГП, а також параметрів, які ініціюють цю активізацію, тобто встановлення ритмів, слід виконувати за допомогою автокореляційного аналізу. Процедура стандартна. Розрахунок автокореляційних функцій дає змогу в більшості випадків виявити періоди, що відповідають основним гармонікам. За потреби для виявлення всіх гармонік та оцінки їх вкладу в формування коливань проводять спектральний аналіз.

Розрахунок, побудова та аналіз функцій взаємної кореляції дають змогу встановити зв'язок ритмів ЕГП та їх головних факторних характеристик, а також оцінити величини зміщень у часі окремих факторів з метою досягнення синфазності основних гармонік усіх рядів, які були проаналізовані. При цьому припускається відставання за фазою проявів ЕГП порівняно з факторами, що їх ініціюють. Синфазності досягають зміщенням рядів факторів на величину їх випередження рядом ЕГП.

7. Коефіцієнти інформативності (значущості) визначають з метою підтвердження правильності вибору факторів та встановлення інформативності кожного з них. Розрахункова формула – це відома формула для зведеного загального коефіцієнта кореляції.

Розрахунок матриці коефіцієнтів кореляції є проміжним етапом, який дає можливість пересвідчитись додатково, що знак кореляційного зв'язку між факторами та ЕГП очікуваний. Значення коефіцієнтів інформативності мають бути приблизно однаковими, що вказує на їх рівноцінність у підготовці прояву ЕГП, принаймні жоден фактор не має домінувати. Фактори з інформативністю, що наближається до нуля, з розгляду виключають.

8. Процедура нормалізації має за мету трансформацію факторних характеристик, виражених у фізичних величинах, які отримано з аналізу карт або рядів їх розподілу (метр відстані, метр висоти, міліметр суми опадів, градус нахилу поверхні, джоуль енергії землетрусів тощо), у безрозмірні показники контрастності, з якими далі можна проводити математичні операції. Зазначена нормалізація кожного з досліджуваних факторів зводиться до розрахунку безрозмірного масиву або ряду контрастності кожного  $j$ -го параметра, нормованого за середньоквадратичним відхиленням. Далі для просторового варіанта позначатимемо контрастність символом  $\Pi_{ij}$ , для часового –  $X_{ij}$ .

9. Інтегральний показник факторних характеристик є параметром, який містить інтегральну інформацію щодо дії всіх факторів, які ініціюють ЕГП. Процедури його розрахунку для варіантів просторового та часового розподілу ЕГП за єдиної ідеології мають деякі відмінності.

9а. Інтегральний показник просторових факторних характеристик для кожного  $i$ -го прояву ЕГП розраховують за формулою

$$\Pi_{\Sigma_i} = \sum_{j=1}^k \Pi_{ij} V_j, \quad (2)$$

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

Розподіл інтегрованого показника  $\Pi_{\Sigma_i}$  просторового розподілу є уніфікованою гістограмою частоти його зустрічальності для всіх проявів певного виду ЕГП, яка, згідно з попереднім аналізом, має підпорядковуватися нормальному закону.

9б. Суму часових факторів, що ініціюють зсувний ризик, оцінюють за функцією комплексного показника часових факторів:

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

де  $m$  – кількість часових факторів;  $i$  – рік спостережень.

Інакше її можна назвати інтегральним фактором зсувного ризику ЕГП. У загальному випадку  $j$ -му фактору присвоюють знак “плюс” за прямою кореляцією із безпекою ЕГП, знак “мінус” – за умови оберненої кореляції.

Розподіл інтегрального часового показника  $\Phi_i$  є рядом цього показника. Сумування проводять для синхронізованих (суміщених) рядів згідно з п. 6б.

10. Об'єктивною кількісною оцінкою можливості виникнення або активізації ЕГП є ймовірність його прояву. Для просторової складової цю процедуру виконують за розрахунком еталонної функції ймовірності, а для часової складової – за розрахунком еталонного ймовірнісного ряду.

10а. Еталонну функцію ймовірностей для просторового розподілу інтегрованого показника  $\Pi_{\Sigma_i}$ , розрахованого за формулою (2), обчислюють за відомою формулою, що описує диференціальну криву нормального закону розподілу ймовірностей випадкової величини  $f(\Pi_{ij})$ . Далі всі значення функції ймовірності перераховують так, щоб її максимальне значення дорівнювало одиниці, адже максимум функції відповідав умові здійснення ЕГП. Тоді ймовірність утворення або активізації ЕГП у будь-якій точці вибраної експериментальної ділянки можна оцінити за формулою

$$f(\Pi_{ij}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Pi_{ij}^2}{2}} \cdot \max(f(\Pi_{ij}))^{-1}, \quad (4)$$

де  $\max(f(\Pi_{ij}))$  – поправка за виконання умови, що максимум ймовірності графіка дорівнює одиниці.

10б. Розрахунок еталонного ймовірнісного ряду – це задача встановлення ймовірнісної закономірності розподілу ЕГП під дією часових факторів на кількісному рівні. В процесі розв'язання цієї задачі послідовність міркувань така. Дисперсію суми випадкових некорельованих величин (у цьому випадку проявів ЕГП) обчислюють за формулою

$$D = \sum_{i=1}^m D_i. \quad (5)$$

Оскільки величини контрастності нормалізовані відносно стандарту, дисперсія кожного з факторів дорівнює одиниці, тоді

$$D_{\Phi} = m D(\gamma_i) = m, \quad (6)$$

де  $\gamma_i$  – контрастність;  $m$  – кількість факторів.

Стандарт  $\sigma_0 = \sqrt{m}$ . Нижню аномальну межу  $\Phi_a$  визначають відповідно до сигмової межі, яка враховує дисперсію параметрів. У практиці подібних досліджень нижню аномальну межу  $\Phi_a$  прийнято брати для критерію трьох сигм [13], тобто

$$\Phi_a = 3\sigma_{\Phi} = \pm 3\sqrt{m}. \quad (7)$$

Це означає, що нормальна випадкова величина відхиляється за абсолютним значенням від свого математичного очікування не більше ніж на  $3\sigma$ . Згідно з розрахунками для функції Лапласа, можна стверджувати, що вказане відхилення не перевищує  $3\sigma$  з ймовірністю 0,997 [14]. Якщо застосувати  $2\sigma$ -й або  $\sigma$ -й критерій, то відповідна ймовірність дорівнюватиме 0,955 або 0,623. У монографії [15] за аномалію  $\Phi_a$  прийнято всі значення, які перевищують  $3\sigma$ , тобто інтерпретація повертається до якісного рівня.

Сформулюємо задачу інакше: за відомого розподілу  $\Phi_i$  та відомого  $\sigma_{\Phi}$  визначити ймовірність відхилення  $\Phi$  від свого математичного очікування. Цю ймовірність розглядатимемо як оцінку вірогідності часового прогнозу ЕГП. Тоді в практиці для кожної  $i$ -ї точки слід вважати аномальними значення

$$\sigma_a = \frac{\Phi_i}{\sigma_{\Phi}} \quad (8)$$

і розглядати їх як аргумент, відповідно до функції Лапласа  $P = \lambda(\sigma_a)$ . Розподіл значень цієї функції називатимемо критерієм ймовірності прогнозу. Для екстраполяції в майбутній час графіка розподілу інтенсивності ЕГП і відповідної ймовірності їх реалізуємо процедуру продовження (екстраполяції) рядів. Можливе використання методик: екстраполяція за Фур'є; з використанням усереднення ряду інтегрального показника; з використанням нейронних мереж.

11. Результуюча функціональна формула, яка характеризує ймовірність виникнення або активі-

зації ЕГП  $P(x, y, t)$  у просторі (точка на поверхні Землі з координатами  $x, y$ ) і в часі  $t$ , матиме вигляд

$$P(x, y, t) = P_1(x, y) P_2(t) = P_1(\Pi_x) P_2(\Phi_i), \quad (9)$$

де  $P_1(x, y)$  – імовірність розвитку ЕГП у просторі;  $P_2(t)$  – імовірність розвитку ЕГП на час  $t$ ;  $i$  – номер точки спостереження з координатами  $x, y$ ;  $\Pi_x$  – значення інтегрального показника просторових факторів;  $\Phi_i$  – значення функції інтегрального показника часових факторів активізації ЕГП [16].

#### **Закономірність активізації зсувних процесів.**

У відповідності до національних доповідей про стан техногенної та природної безпеки в Україні за останні роки продовжують розвиватися небезпечні зміни геологічного середовища і виникати надзвичайні ситуації, спричинені активізацією ЕГП. Серед них особливе місце займає активізація зсувних процесів. Аналіз динаміки розвитку зсувів свідчить про їх невинне поширення, зокрема: станом на 01.01.2007 р. – 21 800 тис. зсувів; на 01.01.2008 р. – 23 072 тис. зсувів; на 01.01.2010 р. – 23 116 тис. зсувів, з них 1679 – активні [1, 17, 18].

На сьогодні просторовий прогноз зсувів обмежений побудовою карт ураженості територій, які в подальшому використовують для розрахунку ризиків. Такий рівень прогнозування не задовольняє вимоги щодо надання вихідних даних для розробки протизсувних заходів, оскільки не містить обґрунтування зсувонебезпеки відповідно до її факторів, а тому слід вважати доцільним розробку та створення системи просторового прогнозування зсувних процесів на кількісному ймовірнісному рівні з урахуванням факторів зсувонебезпеки.

Питання дослідження зсувних процесів у Карпатському регіоні та прогнозування зсувів найповніше висвітлені в роботах Г.І. Рудька, зокрема в його докторській дисертації [19] і монографіях, де розділи щодо вивчення зсувів належать Г.І. Рудьку [20–24]. Детальний аналіз зсувних процесів 1998–1999 рр. наведено у звітах Державного інформаційного геологічного фонду України [25, 26]. Наповнення геологічного блока урядової інформаційної системи з питань надзвичайних ситуацій здійснювали переважно фахівці цієї організації [27, 28]. Значну увагу в останні роки приділяють геофізичним методам дослідження зсувонебезпечних схилів на локальному рівні прогнозування. Ці роботи виконують ДГП “Укр-геофізика”, ДГП “Геосервіс”, ДРГП “Північгеологія” та інші організації.

Кількісне прогнозування зсувів на регіональному рівні найдетальніше розглянуто в роботі [19], в якій акцентовано увагу на двох основних методах прогнозу – геологічних аналогій і математичного моделювання. Для умов південно-східної частини Передкарпаття застосовано довгостроковий прогноз пластичних зсувів методом

гармонічного аналізу та прогноз структурних зсувів, розвинутих у глинах міоценового віку, за побудови взаємкореляційної функції, яка відбиває взаємозв'язок зміщення зсувів і показника факторів, що впливають на стійкість зсувного схилу. В інших роботах наведено результати районування територій досліджень за ураженістю зсувними процесами з урахуванням тих чи інших факторів, різних підходів до виділення окремих територій. Наприклад, польські вчені [29] виконали районування території залежно від ураженості зсувними процесами. Основними характеристиками при цьому були вибрані гідрогеологічні особливості. Такі дослідження важливі для внесення в кадастри зсувів, але не достатні для вирішення завдання прогнозування.

Отже, можна стверджувати, що існуючі методики створення регіональних прогнозних моделей не повною мірою відповідають сучасним вимогам щодо керування природним середовищем. Для забезпечення органів державного управління достовірною інформацією слід розробити прогнозну модель регіонального рівня, яка б давала оцінку зсувної небезпеки на імовірнісному рівні та на основі комплексної інтегральної оцінки всіх вибраних, статистично обґрунтованих зсувоініціювальних факторів. Для цього треба проводити дослідження факторів зсувної небезпеки статистичними методами із застосуванням геоінформаційних технологій [16, 30].

З метою перевірки теоретичних положень і одержаних висновків щодо комплексного впливу виявлених параметрів на розподіл зсувів здійснено дослідження у межах територій Закарпаття, Карпат, Передкарпаття, Південного берега Криму. Далі наведено результати експериментальних випробувань у межах окремої адміністративної одиниці регіонального рівня – Івано-Франківської обл.

Івано-Франківська обл. розміщується на південному заході України. Вона межує з Львівською, Тернопільською, Чернівецькою та Закарпатською областями, на крайньому півдні на протязі 50 км межа області є державним кордоном України з Румунією.

Площа Івано-Франківської обл. 13,9 тис. км<sup>2</sup> (2,3 % території України). Межі області завдяки своєрідній конфігурації території та особливостям природних рубежів (гірські хребти, ріки) дуже звивисті і мають велику загальну протяжність – приблизно 760 км.

У геоморфологічному відношенні Івано-Франківська обл. розміщується на території Східноєвропейської платформи, Передкарпатського прогину та Карпат. Стратиграфо-генетичні комплекси відкладів Східноєвропейської платформи характеризуються “спокійними”, майже горизонтально залягаючими осадовими породами протерозойського, палеозой-

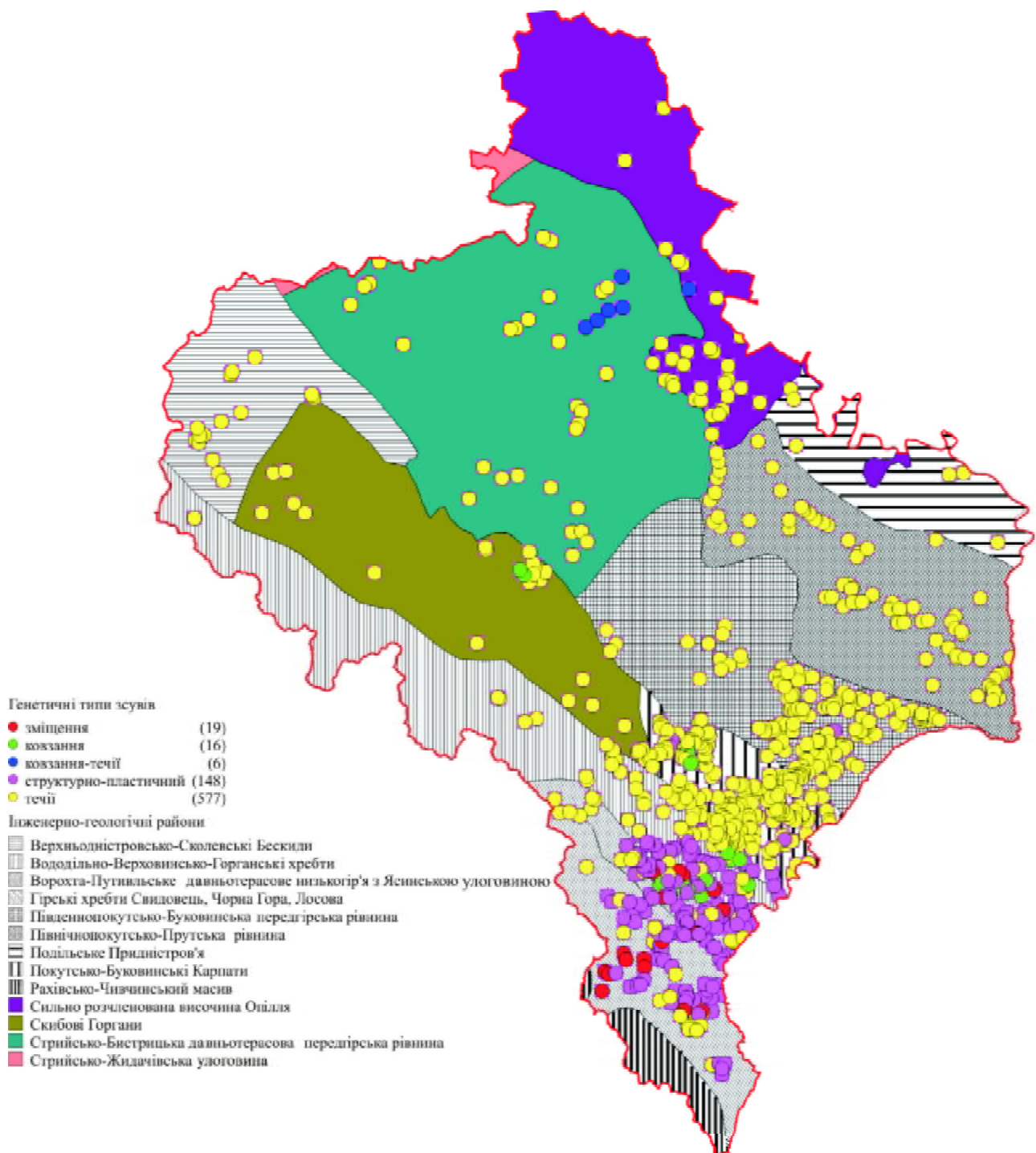


Рис. 2. Тематична карта розподілу зсувів різного генезису по інженерно-геологічних районах на території Івано-Франківської обл.

ського, мезозойського і кайнозойського віку. Четвертинні відклади в межах південно-західної околиці платформи поширені майже повсюдно, особливо елювіальні та елювіально-делювіальні утворення. З останніми пов'язані й більшість зсувів, які розвиваються на схилах річок і струмків. Потужність основних зсувних порід передусім контролюється потужністю делювіальних відкладів і змінюється від 2–3 до 10–15 м.

Стратиграфо-генетичні комплекси відкладів Карпатської гірської області характеризуються різноманітним набором осадових, магматичних і

метаморфічних порід протерозойського, палеозойського, мезозойського і кайнозойського віку. Осадові породи, переважно у вигляді двохкомпонентного флішу, зім'яті в різноамплітудні складки, що спричинює утворення зсувів.

На території Івано-Франківської обл. зафіксовано 790 зсувів, з них до Державного кадастру внесено 766 (рис. 2).

Для побудови регіональної просторової моделі зсувної небезпеки було використано описаний вище системний підхід до емпірично-статистичних досліджень. Методи математичної статистики

використовують з метою виявлення особливостей впливу як кожного з досліджуваних факторів різної природи на зсувні процеси на досліджуваній території, так і їх комплексного впливу.

За просторового регіонального прогнозу зсувних процесів, тобто для вирішення завдань досліджень закономірностей просторового розподілу зсувів, головним завданням є визначення зони можливого їхнього виникнення й розвитку, а також спрямованості процесу та інтенсивності його прояву на досліджуваній території. Такі оцінки ґрунтуються на врахуванні впливу на стійкість території в різних природно-техногенних факторів. Під час проведення досліджень були використані такі факторні характеристики: кількість опадів, кут нахилу земної поверхні, абсолютна висота зсуву, відстань до розлому, відстань до вододілу, відстань до лісу, відстань до тальвегу, відстань до населеного пункту, відстань до дороги, відстань до ріки, контрастності по зонах – дочетвертинних відкладів, ґрунтів, гідрогеологічних, ландшафтних, тектонічних, літофаціальних зон, інженерно-геологічного районів.

За формулою (1) були розраховані коефіцієнти контрастності для всіх задіяних у дослідженні

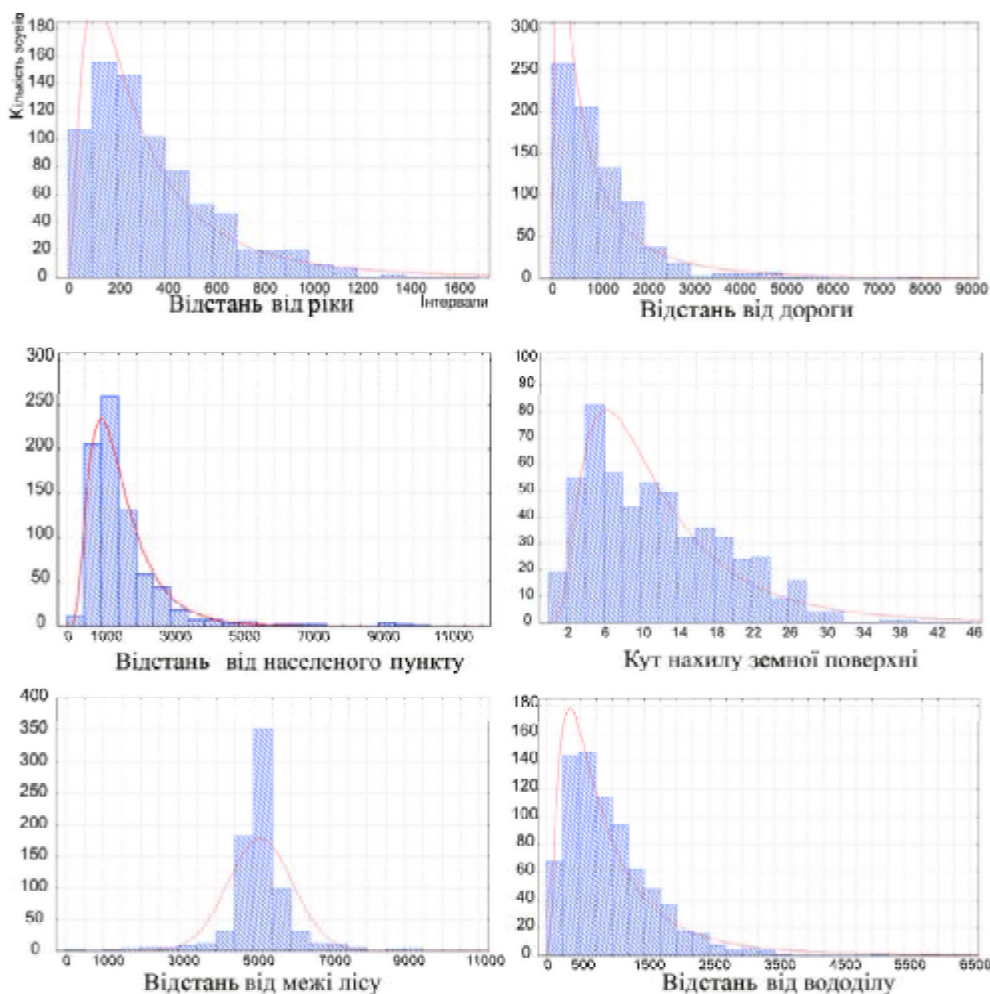


Рис. 4. Фактичний розподіл абсолютних значень факторних характеристик та їх теоретичних аналогів (по осі абсцис – інтервали попадання, по осі ординат – частота)

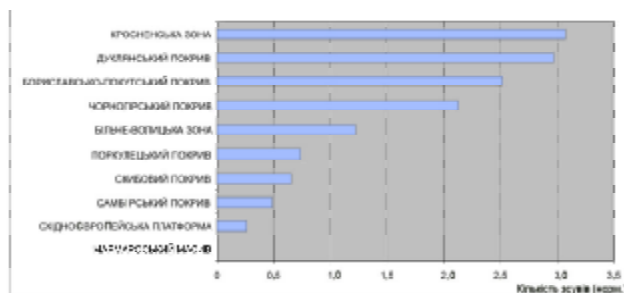


Рис. 3. Гістограма ранжування структурно-тектонічних зон Прикарпаття за схильністю до зсувонебезпеки

таксономічних одиниць різних типів і на підставі отриманих значень проведено ранжування (рис. 3).

Виконано перевірку на відповідність нормальному закону розподілу для факторів зсувонебезпеки, значення яких виражають безперервними величинами. На рис. 4 зображені гістограми розподілів імовірностей деяких факторів, визначених безпосередньо за відповідними електронними картами у точках, де зафіксовані зсуви.

Гістограма розподілу абсолютної висоти над рівнем моря на рис. 5, а потребує більшої уваги і додаткових пояснень. Аналіз рисунку дає підстави для перевірки гіпотези про наявність щонай-



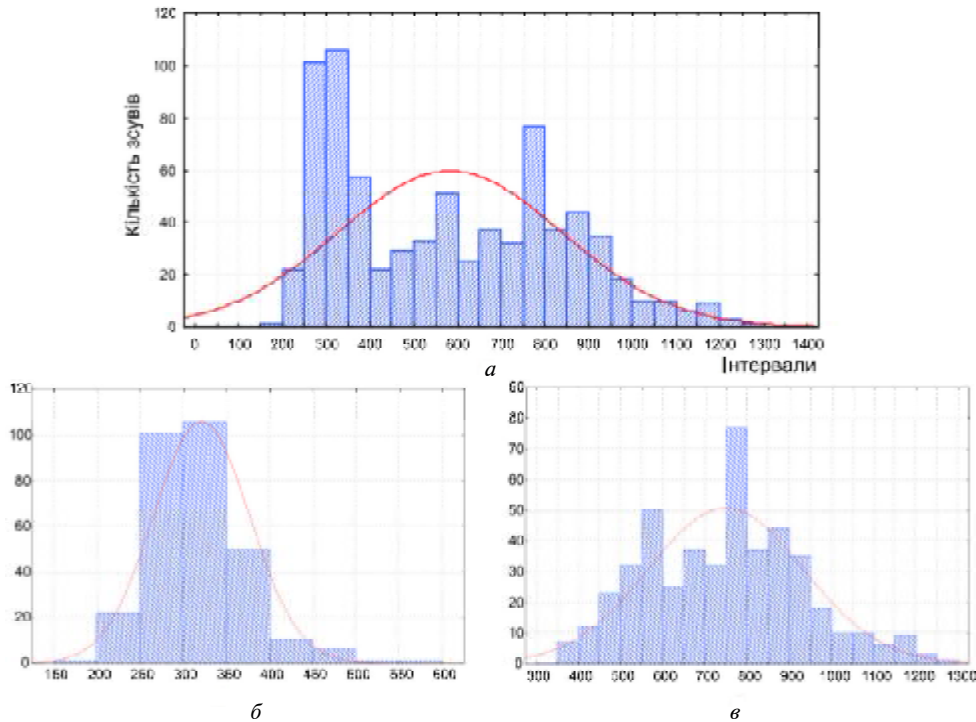


Рис. 5. Фактичний розподіл імовірності абсолютної висоти зсуву: *a* – всі зафіксовані зсуви; *б* – зона А – 33Н-1; *в* – зона Б – 33Н-2 (по осі абсцис – інтервали попадання, по осі ординат – частота)

менше двох зон з різними законами розподілу. Для перевірки цієї гіпотези на рис. 5, *б*, *в* показано гістограми розподілу абсолютної висоти для зсувів у межах інженерно-геологічних областей А-4 і Ж-1 (*б* – перша зона зсувонебезпеки) і за їх межами (*в* – друга зона зсувонебезпеки).

Подібна картина спостерігається і з розподілом ще одного фактора зсувної небезпеки – середньорічної кількості опадів. Пояснення цього факту не становить жодних складнощів – загальноприйнятим є факт тісного зв'язку між абсолютною висотою над рівнем моря і кількістю опадів. Крім того, це свідчить про правомірність поділу території Івано-Франківської обл. на дві зони зсувної небезпеки із власними функціями ймовірності. Наведені далі результати кластерного та факторного аналізів також підтверджують висунуту гіпотезу.

Для виявлення дублюючих факторів з метою зменшення їх загальної кількості та уникнення “подвійної ваги” був проведений кластерний аналіз з побудовою дендрограм евклідових відстаней між окремими факторами для виділених раніше зон зсувної небезпеки 33Н-1 та 33Н-2 (рис. 6). За результатами аналізу було вилучено фактор коефіцієнта контрастності дочетвертинних відкладів, тому що він робив найбільший внесок у дендрограми, що не підтверджується ні фізичним трактуванням явища, ні іншими видами аналізу. Результуюча дендрограма показана на рис. 6.

У табл. 2 наведено результати факторного аналізу факторних характеристик зсувної небез-

пеки для 33Н-1 і 33Н-2, аналіз яких дав змогу виявити головні причини основної мінливості зафіксованих величин факторних характеристик зсувної небезпеки та оцінити ступінь незалежності внеску окремих факторів.

Аналіз даних табл. 2 підтверджує відомий факт про те, що основна дисперсія в геологічних процесах створюється кількома першими факторами. Чим вище рівень незалежності параметрів, тобто вони мають різну природу, тим більший їх внесок у дисперсію інших факторів. У наведеному випадку сумарна дисперсія перших 4 факторів становить майже 60 % для 33Н-1 та 70 % для 33Н-2, що свідчить про досить незалежний вплив окремих факторів на рівень зсувної небезпеки.

Це дає підстави стверджувати, що статистично доведено різну природу впливу окремих факторів на зсувні процеси, а також істотний вплив кожного з них.

Коефіцієнти інформативності (власні вагові коефіцієнти) кожного із задіяних у моделі факторів зсувної небезпеки розраховано за формулою

$$R_{\text{при}} = \frac{\sum_j |r_{i,j}|}{\sum_i \sum_j |r_{i,j}|} 100\%, \quad (10)$$

де  $r_{i,j}$  – значення коефіцієнта парної кореляції між змінними  $i, j$  в матриці коефіцієнтів кореляції (табл. 3).

Важливим є той факт, що значення вагових коефіцієнтів несуттєво відрізняються один від од-

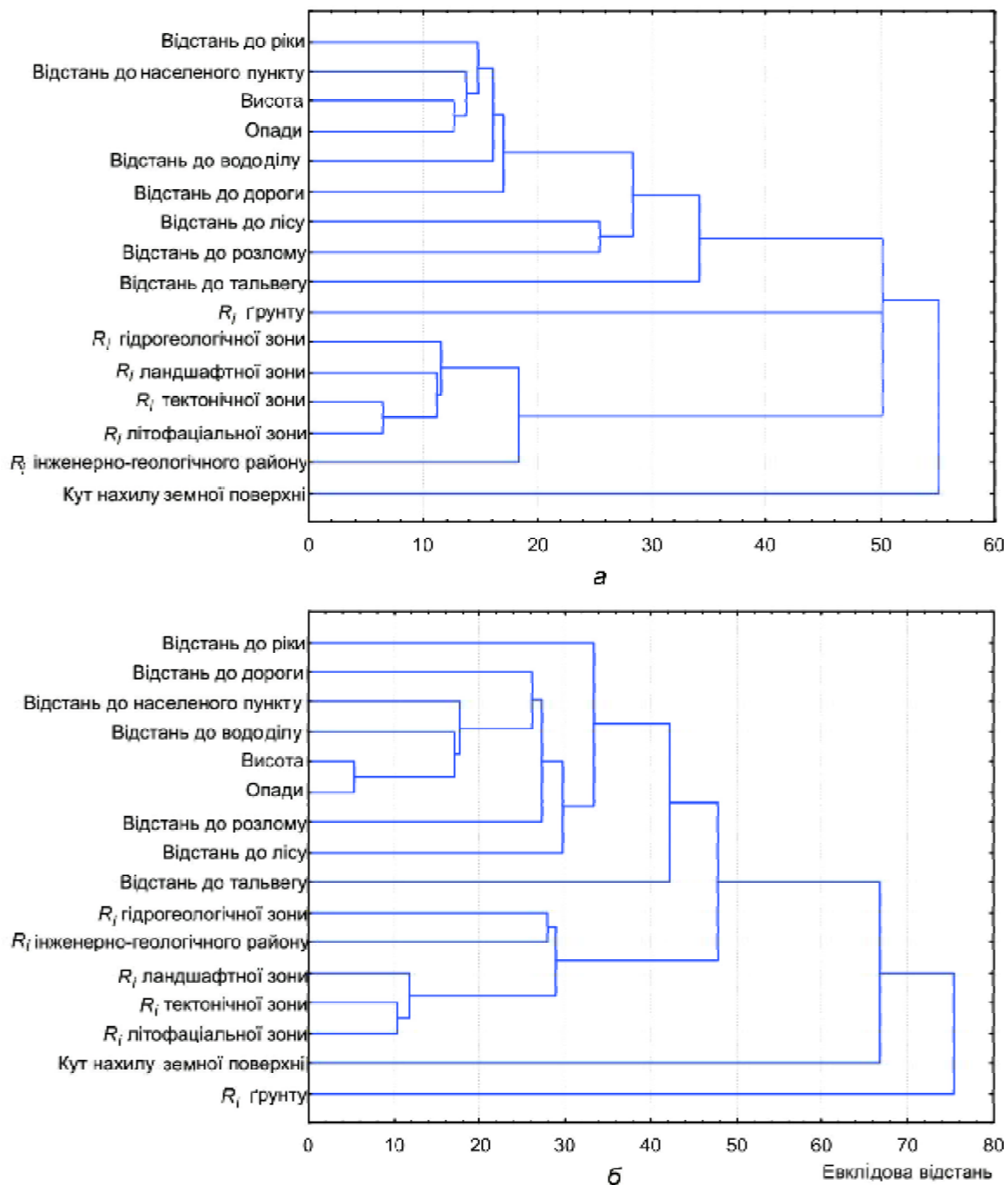


Рис. 6. Дендрограми результатів кластерного аналізу для факторів зсувної небезпеки по територіях: а – зона 33Н-1; б – 33Н-2

ного. Це засвідчує відсутність домінуючих факторів, однаковий “внесок” їх у формування зсувів і необхідність урахування всіх факторів, наведених у табл. 3.

Враховуючи отримані коефіцієнти інформативності кожного з факторів, за формулою (2) обчислено комплексний інтегральний показник. Функціональні залежності ймовірності зсувної небезпеки від комплексного інтегрального показника такі:

- для території 33Н-1

$$\text{Імов. 33Н-1} = e^{-(-25,8456 \times (\text{Інт.пок.})^2)} \cdot 100\%, \quad (11)$$

- для території 33Н-2

$$\text{Імов. 33Н-2} = e^{-(-28,57804 \times (\text{Інт.пок.})^2)} \cdot 100\%. \quad (12)$$

Як зазначено вище, процеси, що призводять до утворення зсувів, мають комплексний характер впливу – у розумінні одночасного різнобічного впливу просторових факторів і умов, які визначаються часовими характеристиками.

Для території Передкарпаття виконано часовий прогноз. Розглянуто характер комплексного впливу часових факторів – метеорологічних, сейсмічних, сонячної активності на періодичний процес прояву зсувної активності. Для аналізу

Таблиця 2. Матриця факторних навантажень основних факторів зсувної небезпеки, розрахованих способом головних компонент

Факторна характеристика	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4	Фактор 5	Фактор 6
<b>ЗЗН-1</b>						
Відстань до ріки	-0,06797	0,020176	<b>0,961072</b>	0,086659	-0,024255	0,022384
Відстань до дороги	0,073813	0,030471	0,022237	0,011754	<b>-0,988505</b>	-0,00884
Відстань до населеного пункту	0,112044	0,046516	0,056488	-0,06275	-0,11238	0,004387
Відстань до тальвегу	-0,03589	-0,02788	0,079384	<b>0,990223</b>	-0,011633	0,005733
Відстань до лісу	0,097805	0,193366	-0,02176	-0,0046	-0,009003	<b>-0,95875</b>
Відстань до вододілу	0,128234	-0,06408	-0,10457	-0,04287	-0,029358	-0,00763
Відстань до розлому	0,526848	0,675393	0,071463	-0,00487	0,0371655	0,064652
$R_i$ ґрунту	-0,21709	-0,01804	0,032376	0,02719	0,0196272	-0,02755
$R_i$ гідрогеологічної зони	-0,64042	-0,30231	-0,03328	0,101147	0,0918955	0,206643
$R_i$ ландшафтної зони	<b>-0,82073*</b>	0,250806	0,114987	0,018444	0,0541036	0,102807
$R_i$ тектонічної зони	<b>-0,82123</b>	-0,14671	-0,03469	0,013102	0,0502029	0,118349
$R_i$ інженерно-геологічного району	<b>-0,86306</b>	-0,17119	0,088652	0,020085	0,0414242	-0,04491
Висота	-0,12548	<b>-0,86661</b>	0,091764	0,08755	-0,002995	0,236625
Кут нахилу земної поверхні	0,081561	0,104746	0,171802	0,038867	-0,032633	-0,04341
Опади	0,065544	<b>-0,91941</b>	-0,08223	-0,03104	0,0639805	0,104465
<b>ЗЗН-2</b>						
Відстань до ріки	-0,02406	0,017209	0,137744	0,024382	-0,0461	-0,00351
Відстань до дороги	0,088778	-0,01915	0,084559	0,02549	0,0265473	<b>0,971737</b>
Відстань до населеного пункту	0,577815	-0,19494	0,238032	-0,07559	-0,146689	0,380024
Відстань до тальвегу	-0,02419	-0,00115	0,130477	-0,00153	-0,054045	0,027885
Відстань до лісу	-0,087	0,060713	0,027991	-0,0477	-0,056571	-0,10184
Відстань до вододілу	0,078437	-0,03627	-0,00555	0,024698	<b>0,9762171</b>	0,019507
Відстань до розлому	-0,01018	-0,00901	0,004035	<b>0,980371</b>	0,0237975	0,02041
$R_i$ гідрогеологічної зони	0,045632	0,200716	-0,04364	0,087526	0,015826	-0,03718
$R_i$ ландшафтної зони	-0,13626	-0,03106	0,012243	0,153294	0,0048224	-0,0273
$R_i$ літолого-фаціальної зони	0,202832	<b>0,710241</b>	-0,02122	-0,13288	-0,014102	-0,10399
$R_i$ інженерно-геологічного району	-0,07838	<b>0,864392</b>	0,016551	0,055324	-0,046531	0,013787
Висота	0,392762	-0,00447	0,451596	0,09414	-0,201366	0,129581
Кут нахилу земної поверхні	-0,00125	0,00583	<b>0,927471</b>	-0,00411	0,0122997	0,094401
Опади	<b>0,897574*</b>	0,070334	-0,03606	-0,00222	0,1562348	0,054993

\* Жирним шрифтом виділено істотні значення факторних навантажень.

Таблиця 3. Результати розрахунків коефіцієнта інформативності факторів

Фактор	Ваговий коефіцієнт інформативності, %
<b>ЗЗН-1</b>	
Відстань до населеного пункту	11,07
Відстань до тальвегу	10,24
Відстань до лісу	10,34
Відстань до вододілу	9,27
Відстань до розлому	10,12
$R_i$ ґрунту	10,08
$R_i$ ландшафтної зони	9,32
$R_i$ інженерно-геологічного району	11,06
Висота	8,38
Кут нахилу земної поверхні	10,12
<b>ЗЗН-2</b>	
Відстань до ріки	5,91
Відстань до дороги	7,37
Відстань до населеного пункту	10,20
Відстань до тальвегу	5,71
Відстань до лісу	8,07
Відстань до вододілу	5,35
Відстань до розлому	5,36
$R_i$ гідрогеологічної зони	6,94
$R_i$ ландшафтної зони	7,06
$R_i$ літолого-фаціальної зони	6,23
$R_i$ інженерно-геологічного району	5,77
Висота	10,01
Кут нахилу земної поверхні	7,22
Опади	8,80

Таблиця 4. Матриця парних коефіцієнтів кореляції між часовими факторами, ФКП та активізацією зсувів

Фактор	Номер фактора					
	1	2	3	4	5	6
Активізація зсувів (1)	1,0	0,23	-0,17	-0,12	0,20	<b>0,34</b>
Число Вольфа (2)	0,23	1,0	0,18	<b>0,42</b>	-0,02	<b>0,84</b>
Атмосферні опади (3)	-0,17	0,18	1,0	-0,24	-0,18	<b>0,40</b>
Температура повітря (4)	-0,12	<b>0,42</b>	-0,24	1	-0,02	<b>0,50</b>
Сумарна енергія землетрусів (5)	0,20	-0,02	-0,18	-0,02	1,0	<b>-0,26</b>
Інтегральний показник (ФКП) (6)	<b>0,34</b>	<b>0,84</b>	<b>0,40</b>	<b>0,50</b>	<b>-0,26</b>	1

\* Жирним шрифтом позначено істотні значення коефіцієнта кореляції.

Таблиця 5. Результати розрахунку інформативності кожного з часових параметрів

Фактор	Ваговий коефіцієнт інформативності, %
Число Вольфа	23,8
Річна кількість атмосферних опадів	21,6
Температура повітря	22,6
Активізація зсувів	20,2
ln(сумарної енергії землетрусів)	11,8

відібрані часові ряди параметрів, зареєстровані в період 1963–2008 рр.

Подальші процедури попереднього аналізу часових рядів з метою створення комплексного прогнозного показника – індикатора зсувної активності – виконано відповідно до схеми рис. 1.

Автокореляційний аналіз з побудовою автокореляційних функцій (АКФ) проведено для визначення основних періодів гармонійних часових коливань активності зсувів і факторів, які впливають на їх активізацію. Встановлено такі періоди, роки: коливань ряду сонячної активності – 9–12, 19–22; річної кількості опадів – 3–5, 7, 9–10, 13, 18–21; середньорічної температури – 5–11, 15–18, 22; річної енергії землетрусів – 4, 8, 10, 12, 17, 20, 23; активізації зсувів – 6, 8–10, 22, 23. Спільна періодичність 8–12 і 17–23 роки простежується для всіх факторів, вона кратна ритмам сонячної активності.

Аналіз функції взаємної кореляції (ФВК) дає змогу встановити величини зміщень у часі рядів окремих факторів з метою досягнення максимальної синфазності основних гармонік усіх рядів, які були проаналізовані. Ряди числа Вольфа і ряди активізації зсувів, річної кількості опадів, температури корелюють між собою без зміщень у часі,

а для ряду сумарної енергії землетрусів спостерігається зміщення на 1 рік назад відносно ряду числа Вольфа.

У табл. 4 наведено кореляційну матрицю часових параметрів, у табл. 5 оцінено внесок кожного із задіяних часових факторів у формуванні функції комплексного показника (ФКП), а також зв'язок їх із зсувною активністю.

На рис. 7 зображено прогнозний ряд активізації зсувів по 2025 р.

Завдяки розрахованим часовим рядам інтегрального показника та ймовірності зсувів виявлена закономірність прояву зсувної активності (раніше зареєстрованої в 1969, 1977–1979, 1991–1992, 1998–2000, 2004, 2007–2008 рр.), що підтверджується як результатами статистичних аналізів ряду активності зсувів, так і ритмами розрахункового комплексного (інтегрального) показника. Отже, виходячи з вищевказаного, найімовірніша активізація зсувів очікується в 2019–2021 рр.

Наведені результати досліджень зсувних процесів покладені в основу наукового відкриття під назвою “Закономірний зв'язок між величинами ймовірностей виникнення зсуву і зсувної небезпеки при комплексній взаємодії природно-техно-

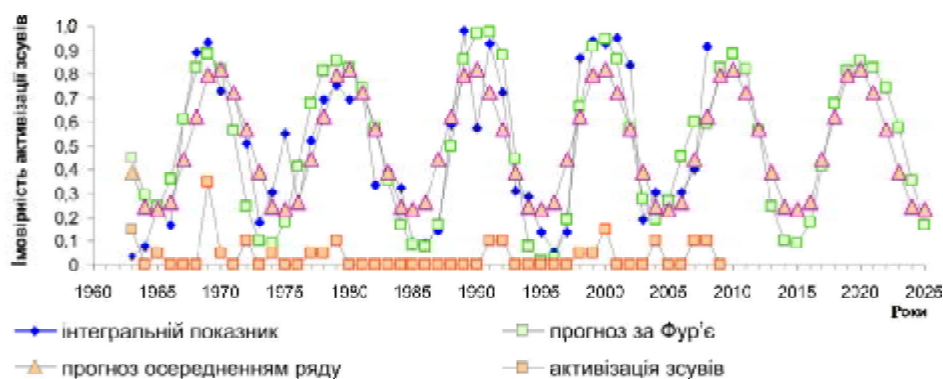


Рис. 7. Часові ряди інтегрального показника і прогнозні часові ряди активізації зсувів

генних факторів” з такою формулою відкриття: “Експериментально встановлений невідомий раніше закономірний зв’язок між величинами ймовірностей виникнення зсувів і зсувної небезпеки при комплексному впливі природно-техногенних факторів, який полягає в тому, що ймовірність виникнення (активізації) зсувного процесу визначається величиною ймовірності інтегрального показника зсувної небезпеки, визначеного за еталонними характеристиками статистичних розподілів просторово-часових зсувоініціюючих факторів для даного району місцевості” [30]. Автори відкриття (Кузьменко Е.Д., Крижанівський Є.І., Карпенко О.М., Журавель О.М.) уперше виконали комплексні дослідження щодо можливості врахування впливу основних відомих просторових і часових факторів на розвиток зсувних процесів і показали можливість їх оцінки на кількісному ймовірнісному рівні, що слугувало підґрунтям для створення геоінформаційної системи прогнозування зсувних процесів.

**Висновки до першої частини статті.** Прояви екзогенних геологічних процесів спостерігаються на всій території України. Особливого поширення вони набули останніми роками як результат дії атипичних природних і техногенних факторів. Актуальність цього питання дала поштовх для проведення досліджень, описаних у статті.

Запропоновано й експериментально обґрунтовано на прикладі зсувів алгоритм прогнозування ЕГП. Для території Івано-Франківської обл. проаналізовано процес утворення зсувів та виокремлено фактори впливу на цей процес. За допомогою ймовірнісно-статистичних методів виявлено закономірності розвитку зсувів залежно від особливостей впливу просторових і часових факторів. Виконано підготовку математичної моделі прогнозування зсувів для її реалізації в геоінформаційному середовищі, що матиме розвиток в другій частині статті.

1. *Аналіз виникнення надзвичайних ситуацій в Україні за 2010 рік: за даними Міністерства надзвичайних ситуацій України* – <http://www.mns.gov.ua/orinfo/4968.html>
2. *Ломтадзе В.Д.* Инженерная геология. Инженерная геодинамика. – Л.: Недра, 1977. – 479 с.
3. *Гулакян К.А., Кюнтцель В.В., Постоев Г.П.* Прогнозирование оползневых процессов. – М.: Недра, 1977. – 135 с.
4. *Емельянова Е.П.* Основные закономерности оползневых процессов. – М.: Недра, 1978. – 308 с.
5. *Емельянова Е.П.* Сравнительный метод оценок устойчивости склонов и прогноза оползней. – М.: Недра, 1971. – 104 с.
6. *Кюнтцель В.В.* Закономерности оползневого процесса на европейской территории СССР и его региональный прогноз. – М.: Недра, 1980. – 213 с.
7. *Шеко А.И., Постоев Г.П., Круподеров В.С. та ін.* Методические рекомендации по составлению долгосрочных прогнозов экзогенных геологических процессов

в системе государственного мониторинга геологической среды. – ВСЕГИНГЕО, 1999. – 78 с.

8. *Методы долговременных региональных прогнозов экзогенных геологических процессов* / Под. ред. А.И. Шеко и В.С. Круподерова. – М.: Недра, 1984. – 167 с.
9. *Демчишин М.Г.* Современная динамика склонов на территории Украины (инженерно-геологические аспекты). – Киев: Наук. думка, 1992. – 253 с.
10. *Ерыш И.Ф., Саломатин В.Н.* Оползни Крыма. Ч. 1. История отечественного оползневедения. – Симферополь: Апостроф, 1999. – 249 с.
11. *Ерыш И.Ф., Саломатин В.Н.* Оползни Крыма. Ч. 2. Методы изучения оползней. – Симферополь: Апостроф, 1999. – 175 с.
12. *Рудько Г.И., Ерыш И.Ф.* Оползни и другие геодинамические процессы горноскладчатых областей Украины (Крым, Карпаты). – Киев: Задруга, 2006. – 624 с.
13. *Гошовський С.В., Рудько Г.І., Блінов П.В.* Інженерно-геологічний аналіз, моніторинг та захист територій від зсувів. – Львів: ЗУГЦ, 2004. – 152 с.
14. *Никитин А.А.* Теоретические основы обработки геофизической информации. – М.: Недра, 1986. – 163 с.
15. *Смирнов Н.В., Душин-Барковский И.В.* Краткий курс математической статистики для технических приложений. – М.: Физматиз, 1959. – 436 с.
16. *Кузьменко Е.Д., Крижанівський Є.І., Карпенко О.М., Журавель О.М.* Прогноз розвитку зсувних процесів як фактор забезпечення надійності експлуатації трубопроводів // Розвідка та розробка нафт. і газ. родовищ. – 2005. – № 4(17). – С. 24–35.
17. *Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2006 році.* – К.: ДП “Агентство «Чорнобильінформ»”, 2007. – 236 с.
18. *Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2008 році.* – К.: ДП “Агентство «Чорнобильінформ»”, 2009 – 230 с.
19. *Рудько Г.И.* Геодинамика и прогноз опасных геологических процессов Карпатского региона: Автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Киев, 1991. – 65 с.
20. *Адаменко О.М., Рудько Г.И.* Основы экологической геологии (на примере экзогеодинамических процессов Карпатского региона Украины). – Киев: Манускрипт, 1995. – 211 с.
21. *Адаменко О.М., Рудько Г.И.* Екологічна геологія – К.: Манускрипт, 1998. – 348 с.
22. *Рудько Г.І., Якимів І.* Закономірності та екологічний ризик розвитку небезпечних геологічних процесів Карпатського регіону України. – Івано-Франківськ: Факел, 1999. – 139 с.
23. *Адаменко О.М., Рудько Г.І., Ковальчук І.* Екологічна геоморфологія. – Івано-Франківськ: Факел, 2000. – 411 с.
24. *Гірські автомобільні дороги* / Під ред. В.О. Герасимчука. – Ужгород: Закарпаття, 2000. – 269 с.
25. *Яковлев Е.О., Красноок Л.М., Лескова Г.В. та ін.* Прогнозна оцінка можливої активізації зсувного процесу на території Закарпатської області у 2000 р.: звіт про наук.-досл. роботу – К.: ДІГФ “Геоінформ”, 2000. – 73 с.
26. *Климчук Л.М., Красноок Л.М., Лескова Г.В. та ін.* Зведений регіональний прогноз можливої активізації зсувного процесу на території Закарпатської області на

- протязі 1999 – 2010 рр.: звіт про наук.-досл. роботу. – К.: ДІГФ “Геоінформ”, 1999. – 36 с.
27. *Климчук Л.М., Шестопалов В.М., Красноок Л.М. та ін.* Узагальнення матеріалів інженерно-геологічного довивчення території України з метою підготовки геологічного забезпечення протизсувних заходів та УІАС НС на державному рівні: звіт про наук.-досл. роботу. – К.: ДНВП “Геоінформ України”, 2009. – 284 с.
28. *Климчук Л.М., Красноок Л.М., Кузьменко Е.Д. та ін.* Узагальнення матеріалів моніторингу екзогенних геологічних процесів по території України з використанням ГІС-технологій.: звіт про наук.-досл. роботу. – К.: ДНВП “Геоінформ України”, 2009. – 262 с.
29. *Danuta Ilcewicz-Stefaniuk, Michal Stefaniuk.* Landslide processes in the Vistula River Valley. Materials of proceed. 33rd Int. Geol. Congr., 6–14th aug. 2008, Oslo, Norway. – Oslo, 2008. – CD ROM.
30. *Кузьменко Э.Д., Крыжановский Е.И., Карпенко А.Н., Журавель А.М.* Закономерная связь между величинами вероятностей возникновения оползней и оползневой опасности при комплексном воздействии природно-техногенных факторов. Науч. открытие. Диплом № 310 / Научные открытия: сборник кратких описаний научных открытий, научных идей, научных гипотез. – 2006. – Москва: МААНОИ, 2007. – С. 64–65.

*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 1. ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕКЗОГЕННИХ ГЕОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ.  
ЗАКОНОМІРНОСТІ АКТИВІЗАЦІЇ ЗСУВІВ**

Запропоновано алгоритм прогнозування екзогенних геологічних процесів, який передбачає врахування повного комплексу факторів впливу. Алгоритм побудовано на етапах логічно-статистичного аналізу із залученням геоінформаційних технологій. Для експериментального обґрунтування і підтвердження дієвості алгоритму виконано побудову математичної моделі прогнозування зсувів для території Івано-Франківської обл.

**Ключові слова:** екзогенні геологічні процеси, зсувоутворювальні фактори, інтегральний показник, просторовий прогноз.

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

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКЗОГЕННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
ЧАСТЬ 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКЗОГЕННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ. ЗАКОНОМЕРНОСТИ АКТИВИЗАЦИИ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ**

Предложен алгоритм прогнозирования экзогенных геологических процессов, который предусматривает учет полного комплекса факторов влияния. Алгоритм построен на этапах логически-статистического анализа с привлечением геоинформационных технологий. Для экспериментального обоснования действенности алгоритма выполнено построение математической модели прогнозирования оползней для территории Ивано-Франковской обл.

**Ключевые слова:** экзогенные геологические процессы, оползнеобразующие факторы, интегральный показатель, пространственный прогноз.