

## ПРОГНОЗ РОЗВИТКУ ЗСУВНИХ ПРОЦЕСІВ ЯК ФАКТОР ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТРУБОПРОВОДІВ

*Е.Д.Кузьменко, Є.І.Крижанівський, О.М.Карпенко, О.М.Журавель*

*ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 504761;*

*e-mail: g b g @ n u n g . e d u . u a*

*Предлагается разработанная авторами аналитическо-информационная система прогнозирования развития оползневых процессов, основанная на использовании установленной закономерности вероятности развития оползней при комплексном воздействии природно-техногенных факторов. Система может использоваться как фактор обеспечения надежной эксплуатации трубопроводов.*

*The analytical information system of forecasting of development of landslips developed by authors which is based on use of the established law of probability of development of landslips at complex influence natural and technogenic factors is offered. The system can be used as the factor of maintenance of reliable operation of pipelines.*

У зсувонебезпечних умовах трубопроводи зазнають впливу механічної дії внаслідок виникнення напруг та переміщення гірських порід і ґрунтів. Це стосується насамперед газо- і нафтопроводів, що прокладені в гірській місцевості, наприклад, у Карпатах. Статистичні дані свідчать про появу або активізацію в останнє десятиріччя в Карпатах та прилеглих прогінах близько 6000 зсувів, частина з яких територіально пов'язана з розташуванням газосховищ, компресорних станцій, трубопроводів [1, 2]. Тому актуальною є задача просторово-часового прогнозу зсувних процесів, елементи якого викладені в роботах [3, 4]. Розвиток цих досліджень у плані встановлення невідомої раніше закономірності розподілу зсувів під дією просторових і часових факторів, яка є теоретичною основою створення системи прогнозу зсувів, є предметом даної статті.

Під час дослідження зсувів розглядають їх просторовий та часовий прогноз.

У просторовому прогнозі зсувних процесів, тобто просторового розподілу зсувів, головним завданням є визначення області можливого їх виникнення та розвитку, а також направленості процесу й інтенсивності його прояву на території досліджень. Такі оцінки формуються з урахуванням впливу різноманітних природно-техногенних факторів на стійкість території.

Прогноз розподілу зсувів у часі базується на даних режимних спостережень за їх інтенсивністю та пов'язується з часовими рядами сонячної активності, метеорологічних факторів, сейсмічності території.

Теоретичні основи просторового та часового прогнозу розроблялись нашими попередниками впродовж довгого періоду часу і викладені в ряді підручників і монографій [5-9]. Основними недоліками цих прогнозів, з нашої точки зору, є:

– залучення до прогнозу обмеженої кількості факторів, що не представляють повну сукупність природно-техногенних процесів, які ініціюють зсуви;

– відсутність виявлених закономірностей на рівні законів розподілу ймовірностей для окремих факторів;

– окремі просторовий або часовий прогноз (просторово-часовий прогноз тільки декларувався);

– відсутність кількісної оцінки просторово-часового прогнозу на ймовірнісному рівні.

Авторами даної статті на рівні системного аналізу розроблені теоретичні передумови прогнозування зсувів, які дали змогу позбутись вказаних недоліків. При цьому дотримувалась наступна послідовність.

1. Доведення зв'язку просторового розподілу зсувів із кожним з відомих та запропонованих факторів.

2. Розробка методики оцінки регіонального розподілу зсувів з урахуванням інтегральної дії просторових факторів.

3. Доведення зв'язку часового розподілу зсувів із кожним із часових факторів.

4. Розробка методики оцінки розподілу активізації зсувів з урахуванням інтегральної дії часових факторів.

5. Розробка методики оцінки просторово-часового розподілу зсувів.

Наведений далі перелік просторових факторів, залучених до аналізу, вибраний з таких міркувань: забезпечено представництво всіх груп факторів; фактори виключають вплив один на одного; коефіцієнт інформативності факторів приблизно однаковий; фактори є об'єктивними, відповідають регіональному рівню прогнозу та є загальнодоступними для користувача; кількісні показники кожного із факторів змінюються закономірно. Істотність впливу кожного окремого просторового фактора на процес зсувоутворення обґрунтовано.

Розрахунок інтегрованого показника, який визначає просторовий розподіл зсувів, проводиться наступним чином. Спочатку виконуються необхідні процедури статистичного аналізу з метою розрахунку інформативності кожного параметра. Визначаються статистичні характеристики відповідних розподілів і виконується процедура нормалізації по кожному з парамет-

рів, у результаті чого отримуються нормалізовані значення параметра  $P_{ij}$ , де  $i$  – номер точки спостереження,  $j$  – номер параметра. Значення інтегрального показника  $P \sum_i$  розраховується за формулою:

$$P \sum_i = \sum P_{ij} \times V_j, \quad (1)$$

де  $V_j$  – ваговий коефіцієнт інформативності  $j$ -го параметра.

Стосовно часового прогнозу на даний час перспективним вважається прогноз часу активізації зсувних процесів, що ґрунтується на уявленні про закономірну повторюваність більшості природних явищ, у тому числі зсувів, на території Земної кулі чи її окремих частин. Таку закономірну повторюваність проявів зсувів через визначені інтервали часу, яка викликана дією сукупності природних та антропогенних факторів, називають ритмічністю, причому під ритмом розуміють відрізок часу між двома періодами активізації зсувного процесу, які закономірно повторюються. У роботі [8] детально описані встановлені ритми зсувної активності та зв'язки їх з сонячною активністю та метеорологічними факторами для окремих територій. Недолік часового прогнозу тут полягає в окремому розгляді часових факторів, а також в ігноруванні сейсмічності гірських районів.

Тому наступним завданням наших досліджень є обґрунтування методики одночасового обліку всіх ініціюючих зсуви часових факторів, що зумовлюють їх взаємовплив. Як показано далі, достатньо інтегрального врахування наступних факторів для встановлення закономірного їх зв'язку з рядами активізації зсувів: 1) сонячна активність (ряд чисел Вольфа); 2) інтенсивність атмосферних опадів; 3) температура повітря; 4) сейсмічність. Розробка та використання інтегрального підходу в часовому аналізі активності зсувів дали змогу встановити розподіл зсувів під дією часових факторів.

Розробка методики часового прогнозу тут реалізована в наступній послідовності: уніфікація (нормалізація) зсувоутворюючих факторів у їх часових рядах, розрахунок інтегрованих показників часових факторів, визначення ритмів аномалій шляхом розрахунку кореляційних функцій і спектрів інтегрованих показників та активності зсувів, визначення часу наступних активізацій за екстрапольованими рядами.

Нормалізація кожного з досліджуваних часових факторів зводиться до розрахунку безрозмірного ряду контрастності кожного  $j$ -го параметра, нормованого за середньоквадратичним відхиленням

$$X_{ij}^{норм} = \frac{X_{ij} - X_j}{\sigma_{ij}}, \quad (2)$$

де:  $X_{ij}^{норм}$  – нормалізоване значення  $j$ -го параметра в точці спостереження в  $i$ -тому році;  $X_j$  – середньоарифметичне значення  $j$ -го параметра за всі роки спостережень;  $\sigma_{ij}$  – серед-

ньоквадратичне відхилення значень параметра за весь період спостережень.

Оскільки нормовані ряди представлені безрозмірними величинами приблизно рівноінформативних показників контрастностей, оцінка суми факторів, що ініціюють зсувний ризик, визначається за функцією комплексного показника факторів

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

де  $m$  – число факторів.

Функція  $\Phi_i$  названа нами інтегральним фактором зсувного ризику. Аналітично обґрунтована процедура переходу від цього фактора до параметра ймовірності зсувів [10, 11].

За екстраполяції в майбутній час графіка розподілу інтенсивності зсувів та відповідних факторів реалізується процедура продовження кривих: а) за Фур'є; б) з використанням осереднених гармонік.

Просторова-часова ймовірність зсувної активності розраховується як добуток просторової та часової ймовірності в будь-якій точці в межах території, для якої реалізована процедура встановлення закономірності розподілу зсувів.

З метою перевірки теоретичних положень та отриманих висновків про комплексний вплив виявлених параметрів на розподіл зсувів був проведений ряд додаткових досліджень у межах спеціально обраної ділянки (рис. 1). Розміри ділянки 50 x 100 км; на її території зареєстроване й описано 1142 зсуви.

Експериментальна ділянка розташована на території Українських Карпат і характеризується різноманітним набором гірських порід переважно осадового походження палеозойського, мезозойського й кайнозойського віку. Досліджувана територія є однією з найбільш нестійких у гідродинамічному відношенні. Це зумовлено її плановим розміщенням у зоні впливу тектонічно активної молоді Карпатської гірськоскладчастої області. Крім того, тут спостерігається досить високий рівень техногенного навантаження, яке з кожним роком зростає. Висока щільність зсувів дає можливість провести ряд статистично достовірних досліджень, спрямованих на експериментальну перевірку теоретичних передумов про комплексний вплив визначальних факторів на розподіл зсувів.

Для досліджень відібрано 11 основних параметрів відповідно до теоретичного обґрунтування їх істотного впливу на процеси зсувоутворення. Критерієм добору факторів активізації зсувних процесів є фізичні передумови, які ґрунтуються на наших уявленнях про механізм утворення зсувів. Формальним підтвердженням оптимальності обраного набору параметрів є методи статистичного аналізу. На рис. 2 зображено гістограми розподілів ймовірностей значень 10 параметрів, визначених безпосередньо за відповідними електронними картами у точках, де зафіксовані зсуви. Для окремих літофаціальних зон (параметр літофації) та інженерно-геологічних районів запропонована кількіс-

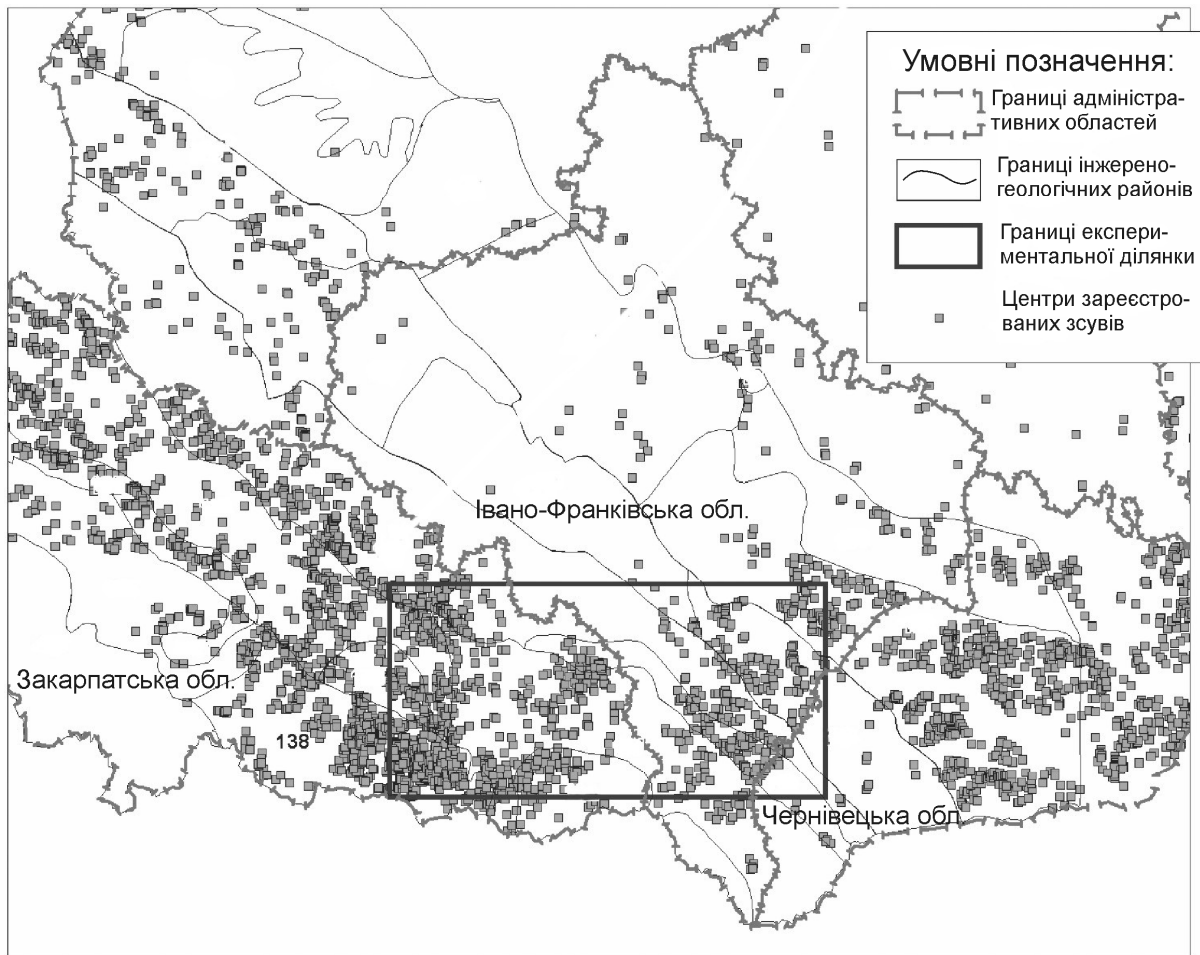


Рисунок 1 — Схема розташування Карпатських зсувів

на характеристика, яка визначає їх зв'язок зі зсувними процесами –  $R_i$  "коефіцієнт контрастності" (або "коефіцієнт ураженості території"):

$$R_i = \frac{N_i / \sum N_i}{S_i / \sum S_i}, \quad (4)$$

де:  $N_i$  – кількість зареєстрованих зсувів у межах певної зони (району) згідно з літофаціальним або інженерно-геологічним районуванням;  $\sum N_i$  – загальна кількість зареєстрованих зсувів у регіоні;  $S_i$  – площа певної зони (району);  $\sum S_i$  – загальна площа території всього регіону.

Наведений показник характеризує ступінь ураженості зсувами для конкретної території: менше 1 – знижена ураженість, більше 1 – підвищена ураженість. Завдяки кількісному показнику коефіцієнта контрастності з'явилася можливість ранжування окремих зон за ступенем ураженості й розрахувати для конкретного параметра значення функції імовірності ураженості зсувами в конкретній точці території через функцію Лапласа [12].

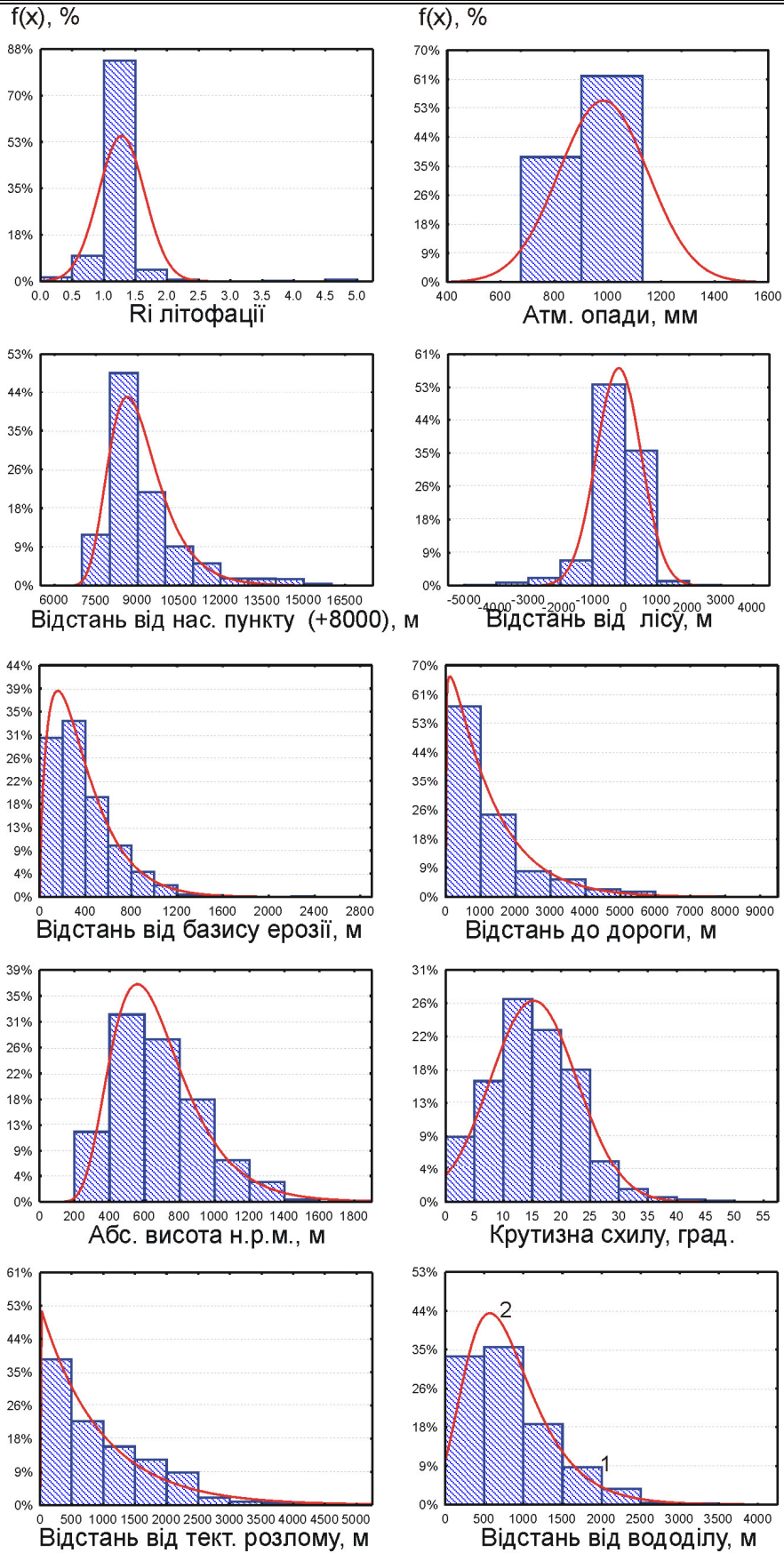
Для інженерно-геологічних районів виконана процедура ранжування залежно від їх внеску в суму значень коефіцієнтів контрастності (щільності розподілу зсувів) для експериментальної ділянки (рис. 3).

З метою проведення подальших аналізів і процедур з використанням непараметричного D-критерію Колмогорова-Смірнова визначені найбільш імовірні теоретичні закони розподілу параметрів для зареєстрованих зсувів на експериментальній ділянці.

Наступним обов'язковим етапом є лінійні перетворення значень параметрів таким чином, щоб розподіли імовірностей перетворених величин відповідали нормальному теоретичному закону. Після процедури логарифмування розподілів результуючих значень параметрів (крім параметрів, розподіли яких відповідають нормальному закону) останні будуть розподілені нормально.

Не наводячи деталі аналізу, зазначимо основне: гістограми, що зображені на рис. 2, 3 відповідають таким законам розподілу: нормальний, гама, екстремальний, логнормальний. Тут важливо, що всі закони (крім нормального) містять експоненціальну функцію, тобто мають певну ідентичність, а саме лінеаризують однаковим шляхом.

У табл. 1 наведені значення парних коефіцієнтів кореляції між параметрами зсувоутворення. Деякі з них досягають досить високих значень, що може свідчити про тісний причинно-наслідковий зв'язок між окремими парами параметрів. Але, виходячи з теорії множинної кореляції, наявність істотних значень парного



1 – гістограма фактичного розподілу ймовірності значень параметра;  
 2 – крива вірогідного теоретичного закону розподілу ймовірності значень параметра

Рисунок 2 — Графіки фактичних розподілів імовірностей абсолютних значень параметрів та їх теоретичних аналогів



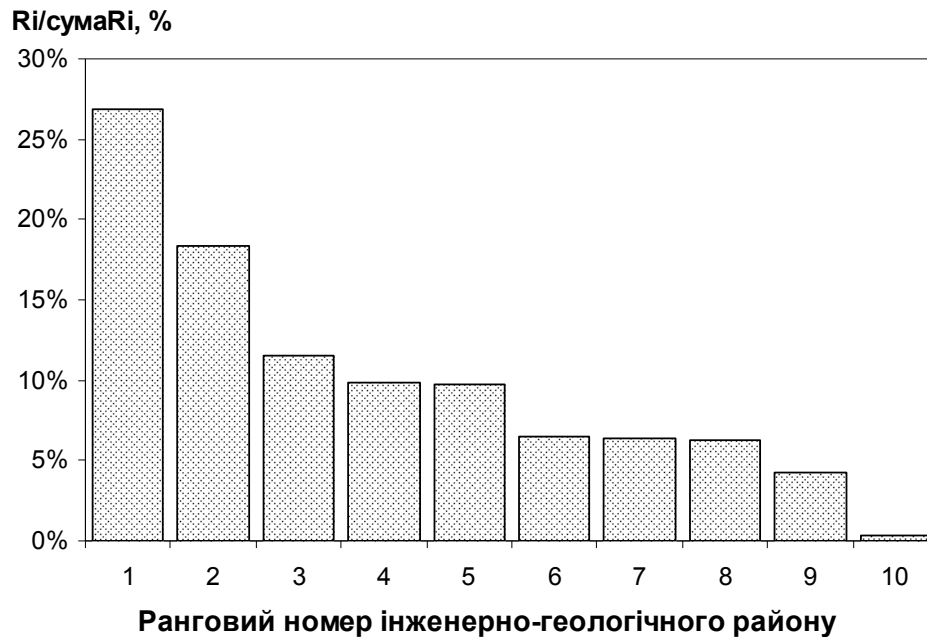


Рисунок 3 — Ранжування інженерно-геологічних районів залежно від внеску в суму коефіцієнтів контрастності (щільності розподілу зсувів) для експериментальної ділянки

Таблиця 1 — Матриця парних коефіцієнтів кореляції між параметрами зсувоутворення

Параметр	Номера параметрів										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ri літофації (1)	1	<u>0.19*</u>	<u>-0.15</u>	0.03	0.05	0.04	0.05	-0.03	<u>-0.13</u>	0.04	0.02
Ri інж.-геол. району (2)	<u>0.19</u>	1	<u>-0.76</u>	0.05	-0.04	0.04	<u>-0.10</u>	<u>0.21</u>	<u>-0.66</u>	<u>-0.24</u>	<u>-0.24</u>
Атм. опади (3)	<u>-0.15</u>	<u>-0.76</u>	1	<u>-0.13</u>	0.01	-0.01	<u>0.19</u>	<u>-0.22</u>	<u>0.73</u>	<u>0.30</u>	<u>0.21</u>
Відстань від базису ерозії (4)	0.03	0.05	<u>-0.13</u>	1	0.06	-0.07	-0.04	0.06	0.01	<u>0.18</u>	<u>-0.24</u>
Відстань від дороги (5)	0.05	-0.04	0.01	0.06	1	0.00	<u>0.50</u>	<u>-0.27</u>	<u>0.33</u>	<u>0.17</u>	<u>-0.12</u>
Відстань від тект. розламу (6)	0.04	0.04	-0.01	-0.07	0.00	1	-0.07	0.04	-0.01	-0.06	0.05
Відстань від нас. пункту (+8000) (7)	0.05	<u>-0.10</u>	<u>0.19</u>	-0.04	<u>0.50</u>	-0.07	1	<u>-0.56</u>	<u>0.49</u>	<u>0.21</u>	-0.03
Відстань від лісу (8)	-0.03	<u>0.21</u>	<u>-0.22</u>	0.06	<u>-0.27</u>	0.04	<u>-0.56</u>	1	<u>-0.38</u>	<u>-0.24</u>	-0.07
Абс. висота н.р. м (9)	<u>-0.13</u>	<u>-0.66</u>	<u>0.73</u>	0.01	<u>0.33</u>	-0.01	<u>0.49</u>	<u>-0.38</u>	1	<u>0.41</u>	0.00
Крутість схилу (10)	0.04	<u>-0.24</u>	<u>0.30</u>	<u>0.18</u>	<u>0.17</u>	-0.06	<u>0.21</u>	<u>-0.24</u>	<u>0.41</u>	1	<u>0.11</u>
Відстань від вододілу (11)	0.02	<u>-0.24</u>	<u>0.21</u>	<u>-0.24</u>	<u>-0.12</u>	0.05	-0.03	-0.07	0.00	0.11	1

\* – підкреслені істотні значення коефіцієнта кореляції

коефіцієнта кореляції випадковими величинами може бути пояснена впливом схованих інших факторів; компенсація такого впливу може помітно понизити реальний зв'язок між досліджуваною парою параметрів.

Тому важливим етапом подальшого аналізу є виявлення «дублюючих» факторів з метою зменшення їх загальної кількості та уникнення «подвійної ваги». Для цього застосована процедура кластерного аналізу з побудовою дендограм евклідових відстаней між окремими факторами, а також факторний аналіз у варіанті методу головних компонент. За результатами кластерного і факторного аналізів зроблено висновок, що всі обрані фактори є відносно незалежними, несуть різну за своєю природою інформацію щодо процесів зсувоутворення і по-

винні бути задіяні в прогнозуванні просторового розподілу зсувів.

Далі необхідно оцінити внесок (коефіцієнт інформативності) окремих параметрів у процес розвитку зсувів. Для цього виконується наступна процедура.

З метою розрахунку сумарного показника зсувної небезпеки були виконані розрахунки власних вагових коефіцієнтів для кожного з факторів, які були названі нами коефіцієнтами інформативності (раніше – наведеними загальними коефіцієнтами кореляції)  $Rnp_i$ :

$$Rnp_i = \frac{\sum_j |r_{i,j}|}{\sum_i \sum_j |r_{i,j}|} \cdot 100\%, \quad (5)$$

Таблиця 2 — Результати розрахунків інформативності кожного параметра на основі використання матриці парних коефіцієнтів кореляції

Параметр	Ваговий коефіцієнт інформативності в розрахунках, %
Ri літофації	8.01
Ri інж-геол. району	10.17
Ln(відстань від базису ерозії)	7.73
Ln(відстань до дороги)	9.03
Ln(відстань до вододілу)	7.73
Ln(відстань до тект. розламу)	7.95
Ln(відстань до нас. пункту +8000)	10.88
Відстань до лісу	9.60
Крутість схилу	8.97
Ln(абс. висота н.р.м.)	11.16
Річна кількість атм. опадів	8.75

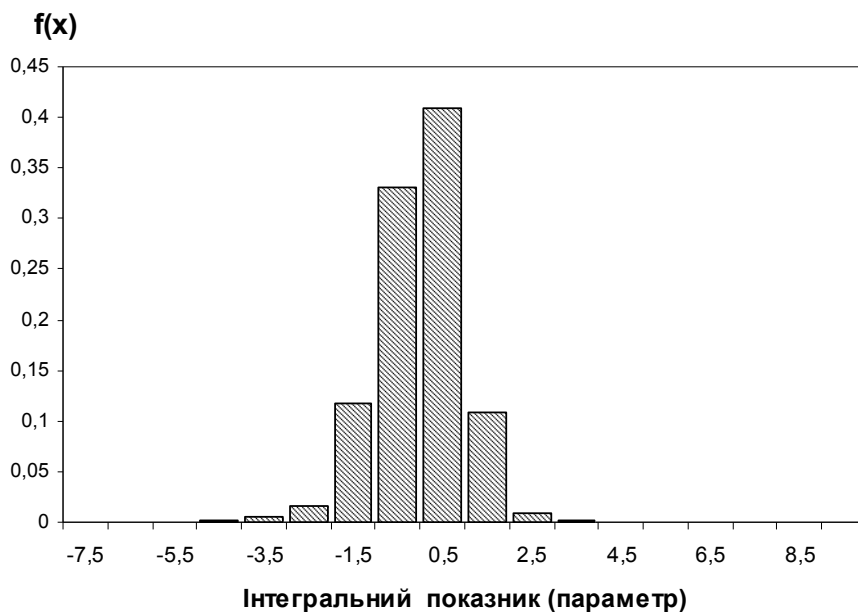


Рисунок 4 — Гістограма інтегрального показника зсувоутворення, розрахованого з урахуванням всіх просторових параметрів та їх вагових коефіцієнтів інформативності

де  $r_{i,j}$  - значення коефіцієнта парної кореляції між  $i, j$  змінними в табл. 5 матриці коефіцієнтів кореляції.

У табл. 2 наведено результати розрахунків оцінки ступеня інформативності кожного з параметрів (або вагових коефіцієнтів) у % щодо всіх розглянутих змінних.

Наступним найбільш важливим етапом є розрахунок інтегрального показника, закономірно пов'язаного з розподілом зсувів. Після визначення статистичних характеристик відповідних розподілів кожного фактора й виконання процедури нормалізації по кожному з них, у результаті якої одержуємо нормалізоване значення параметра  $\Pi_{ij}$ , де  $i$  – номер точки спостереження,  $j$  – номер параметра. Значення сумарного показника  $\Pi\Sigma_i$  розраховується за формулою (1).

Для одержаної вибірки інтегрального показника зсувної небезпеки, розподіл ймовірностей якого підкоряється нормальному закону (рис. 4), розраховуються значення середнього арифметичного й середньоквадратичного відхилення. Як правило, середнє повинно слабко відрізнятися від нуля, середньоквадратичне відхилення — від одиниці. Розподіл, зображений на рис. 4, з високим ступенем вірогідності відповідає нормальному теоретичному розподілу ймовірності нормалізованих значень випадкової величини (D-критерій Колмогорова-Смирнова = 0,016).

Після цього, з використанням відомої формули, яка описує диференційну криву нормального закону розподілу ймовірностей випадкової величини ( $f(\Pi_{ij})$ ), з перерахунком усіх значень функції ймовірностей таким чином, щоб її максимальне значення рівнялося б одиниці,

оцінюються ймовірності зсувоутворення в будь-якій точці обраної експериментальної ділянки:

$$f(\Pi_{ij}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{\Pi_{ij}^2}{2}} \cdot \max(f(\Pi_{ij}))^{-1}, \quad (6)$$

де  $\max(f(\Pi_{ij}))^{-1}$  – введення виправлення для виконання умови, що максимум ймовірності кривої дорівнює 1.

У цьому випадку оптимальні умови для утворення зсувів наступають тоді, коли значення ймовірності розподілу комплексного інтегрального показника, який враховує вплив факторів різної природи, досягає свого максимуму.

У запропонованому нами алгоритмі використовуються еталонні дані безпосередньо по ділянках, де виявлені й зареєстровані зсуви. З використанням характеристик розподілу інтегрального показника еталонної вибірки оцінюється ймовірність (або – ступінь близькості) розрахованого інтегрального показника в будь-якій точці на місцевості. Ця ймовірність є критерієм зсувної небезпеки. Запропонований алгоритм і розроблене програмне забезпечення є основою побудови прогнозних карт зсувоутворення з комплексу визначальних параметрів у системі прогнозування активізації зсувних процесів.

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

На прикладі гірської частини Українських Карпат розглянуто характер комплексного впливу часових факторів — метеорологічного, сейсмічного і числа Вольфа (сонячної активності) на періодичний процес прояву зсувної активності. Для аналізу відібрані часові ряди параметрів, зареєстровані в період 1963 – 2002 р. (Гірські Карпати та Закарпаття).

На рис. 5 зображено часові ряди нормалізованих значень метеофакторів, числа Вольфа та сейсмічної активності (у вигляді річної сумарної виділеної енергії всіх зареєстрованих землетрусів).

Основні процедури попереднього аналізу часових рядів з метою створення комплексного прогнозного показника – індикатора зсувної активності наступні:

- виявлення певних періодичностей на автокореляційних функціях (АКФ) рядів окремих параметрів і порівняння їх з виявленими періодами активізації зсувів у регіоні;

- проведення спектрального аналізу часових рядів з метою виділення основних гармонік часових коливань;

- аналіз взаємодіяючих функцій (ФВК) окремих параметрів з рядом зсувної активності для встановлення зміщення рядів у часі;

- суміщення рядів параметрів з рядами зсувної активності на величини їх відставання (випередження) та розрахунок матриці коефіцієнтів парної кореляції;

- розрахунок вагових коефіцієнтів інформативності для кожного параметра;

- підсумовування зміщених часових рядів нормалізованих значень параметрів пропорційно їх внескам (коефіцієнтів інформативності) з метою розрахунку інтегрального показника зсувної активності;

- побудова продовження часового ряду інтегрального показника з метою складання часової прогнозної моделі активізації зсувів.

Автокореляційний аналіз проведено з метою визначення основних періодів гармонійних часових коливань активності зсувів і параметрів, що впливають на їх активізацію. Встановлено основні періоди приблизно в 10 років тільки для ряду сонячної активності (число Вольфа); для інших факторів основна гармоніка видимої періодичності становить: для річної кількості опадів 18 років, для ряду активізації зсувів 18-19 років, для ряду сумарної енергії землетрусів 17-20 років; відсутність такої періодичності спостерігається лише в часовому розподілі середньорічної температури. Подальші статистичні дослідження показали, що ряд середньорічної температури повітря не є інформативним стосовно ряду активності зсувів Закарпаття, і цей параметр може бути виключений з прогнозних розрахунків.

Аналіз ФВК дає змогу встановити величини зміщень у часі рядів окремих факторів з метою досягнення максимальної синфазності основних гармонік всіх рядів, які були проаналізовані. Так, для ряду числа Вольфа спостерігається зміщення на 1 рік назад стосовно ряду активності зсувів. Також встановлено, що зміщення "назад" на 6 років необхідно виконати для рядів активності землетрусів і сумарної річної енергії землетрусів з метою можливого їх використання в розрахунку інтегрального прогнозного часового показника активності зсувів для гірської частини Карпат.

Рисунок 6 ілюструє приклад розрахованого прогнозного часового інтегрального параметра, одержаного шляхом додавання рядів нормалізованих значень параметрів з урахуванням їх коефіцієнтів інформативності у період спостережень 1963–2002 рр. для Закарпаття. Потім, з використанням функції Лапласа, розраховані значення ймовірності активізації зсувів  $f(x)$  за даними інтегрального показника й згладжені значення ряду ймовірності.

У табл. 3 наводиться внесок кожного із задіяних часових факторів у формуванні функції комплексного показника, а також їх зв'язок із зсувною активністю.

Зображені прогнозні графіки ймовірності  $f(x)_{\text{прогноз}}$  і  $f(x)_{\text{прогноз.ср.}}$  з високою точністю описуються рівнянням математичної моделі (мат. модель  $\cos(x)$ ) (рис. 6).

Завдяки розрахованим часовим рядам інтегрального показника та ймовірності зсувів виявлена закономірність прояву катастрофічної зсувної активності (раніше зареєстрованої в 1974, 1980, 1998–2000 рр.) у 19 років, що підтверджується як результатами статистичних аналізів ряду активності зсувів, так і ритмами розрахун-

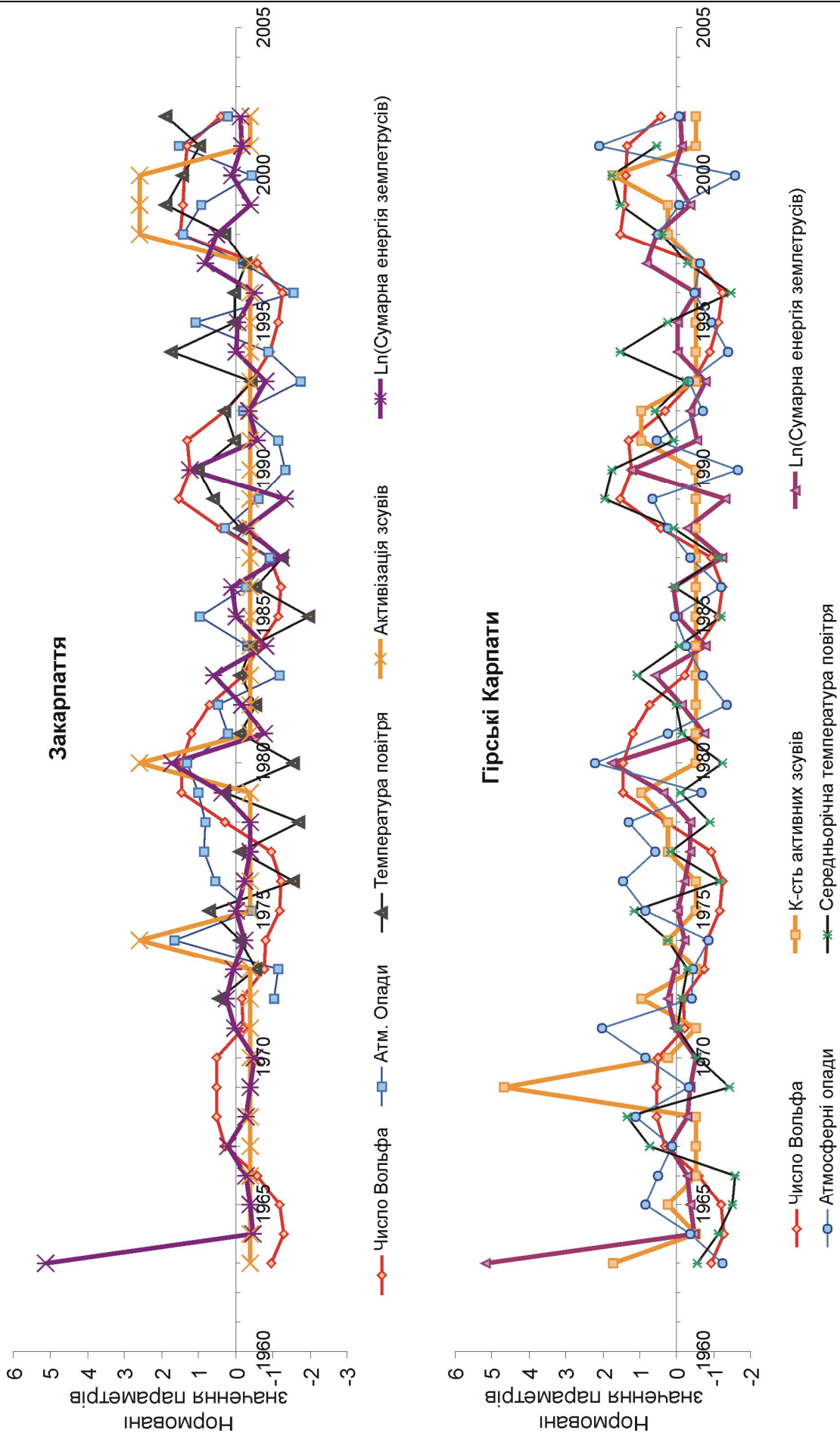


Рисунок 5 — Часові ряди нормалізованих значень метеофакторів, числа Вольфа й сейсмічної активності для Закарпаття та Гірських Карпат

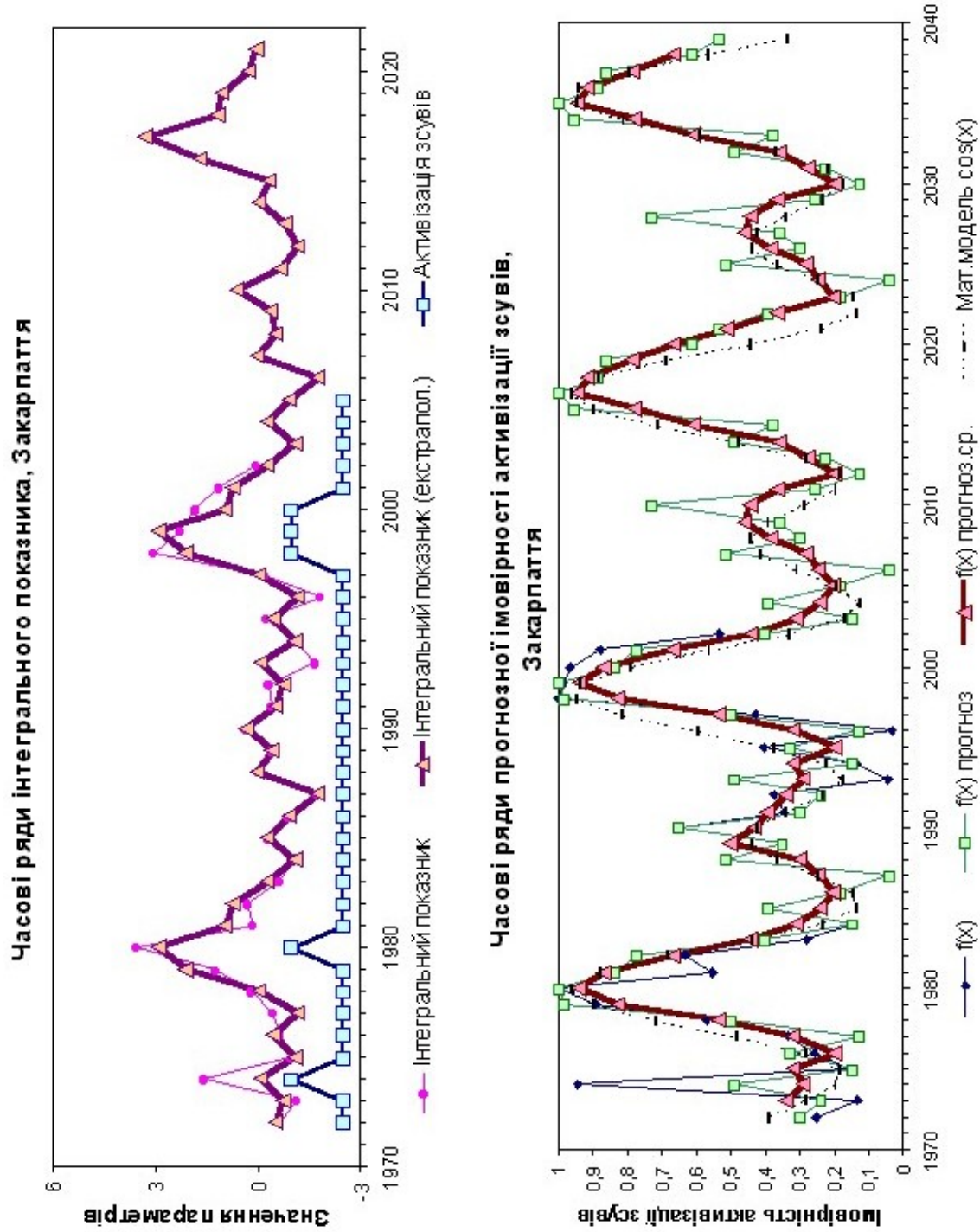


Рисунок 6 — Часові ряди розрахованого інтегрального показника та прогнозованих модельних рядів імовірності активізації зсувів для території Закарпаття до 2040 р.

Таблиця 3 — Матриця парних коефіцієнтів кореляції між часовими параметрами, ФКП та активізацією зсувів

Параметр	Номера параметрів					
	1	2	3	4	5	6
Число Вольфа (1)	1.00	0.24	0.42	0.08	<b>0.44</b>	<b>0.80</b>
Атмосферні опади (2)	0.24	1.00	-0.17	0.22	<b>0.45</b>	<b>0.56</b>
Температура повітря (3)	0.42	-0.17	1.00	-0.29	0.11	<b>0.43</b>
Сумарна енергія землетрусів (4)	0.08	0.22	-0.29	1.00	-0.10	<b>0.44</b>
Активізація зсувів (5)	<b>0.44*</b>	<b>0.45</b>	0.11	-0.10	1.00	<b>0.40</b>
Інтегральний показник (ФКП) (6)	<b>0.80</b>	<b>0.56</b>	<b>0.43</b>	<b>0.44</b>	<b>0.40</b>	1.00

\* – підкреслені істотні значення коефіцієнта кореляції

кового комплексного (інтегрального) показника. Також можлива підвищена активність (менш ймовірна) з періодичністю в 10 років (рис. 5).

Таким чином, виходячи з описаних вище результатів статистичних досліджень, можна зробити висновок, що навіть за сприятливого сполучення просторових факторів значна активізація зсувів настає тільки в певні моменти часу, що є свідченням комплексного впливу просторових і часових факторів на процеси зсувоутворення.

Заключним етапом прогнозу є розрахунок комплексної просторово-часової оцінки ймовірності поширення зсувних процесів шляхом перемножування відповідних ймовірностей просторового й часового прогнозу в певній точці місцевості на певний час. Такий прогноз є обґрунтованим, виходячи з теоретичних положень й експериментально доведених фактів про комплексний інтегральний вплив факторів різної природи на процес розвитку зсувних явищ.

Закономірність розподілу зсувів, що теоретично й експериментально доведена під час проведення дослідницьких робіт для різних регіонів України, є значним внеском в уявлення про природу й механізм утворення й розвитку зсувних процесів. Результати досліджень знайшли практичну реалізацію в розробці аналітичної геоінформаційної системи комплексного просторово-часового прогнозування зсувних процесів. Система базується на використанні алгоритмів, опис яких наведено вище, і дає змогу виконувати просторовий, часовий або просторово-часовий прогноз розвитку й активізації зсувних процесів.

Представлена система є:

а) аналітичною, тому що вона дає кількісні ймовірнісні характеристики прогнозу, що ґрунтуються на функціонально-емпіричних закономірностях і зв'язках;

б) геоінформаційною, тому що вона реалізована в середовищі ГІС MapInfo і для її функціонування на будь-якій території достатньо мати базовий набір електронних картографічних матеріалів.

Ієрархічна послідовність прогнозу при цьому така.

1. Побудова середньо- або дрібномасштабних регіональних карт із урахуванням рельєфу, геологічної будови, антропогенного наванта-

ження, тектоніки, метеофакторів. При цьому визначається ймовірність зсувів для заданої території.

2. Локальний прогноз активізації зсуву в конкретній точці в межах заданої точності з урахуванням особливостей території прогнозування.

Критерієм підбору факторів активізації зсувних процесів є фізичні передумови, які обґрунтовані нашими уявленнями про механізм утворення зсувів. Формальним підтвердженням є методи статистичного аналізу, приклад їх застосування був детально розглянутий вище.

На рис. 7 зображено приклад використання аналітичної геоінформаційної системи прогнозування зсувонебезпеки в процесі проектування газо- або нафтопроводу. Створена система дає можливість оцінити різні варіанти прокладання газо- або нафтопроводу, оцінити зсувонебезпеку навколо нього, обрати найбільш безпечний і економічно доцільний варіант прокладання трубопроводу, заощади витрати праці і коштів на проведення обстежень траси майбутнього трубопроводу. Проектанту достатньо побудувати на екрані трасу майбутнього трубопроводу і задати розмір зони навколо нього для оцінки зсувонебезпеки. Застосування даної геоінформаційної системи для існуючих газо-нафтогонів дасть змогу виділити зони підвищеної зсувонебезпеки, зосередити зусилля на вивчені цих територій та оцінці ефективності запроєктованих запобіжних заходів на стадії розробки. Створена система може бути адаптована для будь-якої території та специфічних задач будь-якої галузі народного господарства.

Наявність електронних версій карт факторів зсувної небезпеки дає можливість в автоматизованому режимі визначати ймовірність зсувної небезпеки в будь-якій точці площі досліджень, у будь-який час як в перспективі, так і в ретроспективі. Зміна ситуації веде до автоматичного перерахування інформації. Середній час одержання ймовірнісного значення в точці карти близько 30 с.

Похибка просторової прив'язки визначається масштабом використаних карт для визначення просторових факторів. Загальнодоступними є карти масштабу 1 : 200 000, за умови додаткового опрацювання нових фондових матеріалів можливий просторовий прогноз у мас-



штабі 1 : 50 000. Зазначеним масштаб відповідає похибка в ± 0,7 мм карти, що відповідає ± 140 м та ±35 м на місцевості. Деталізацію доцільно

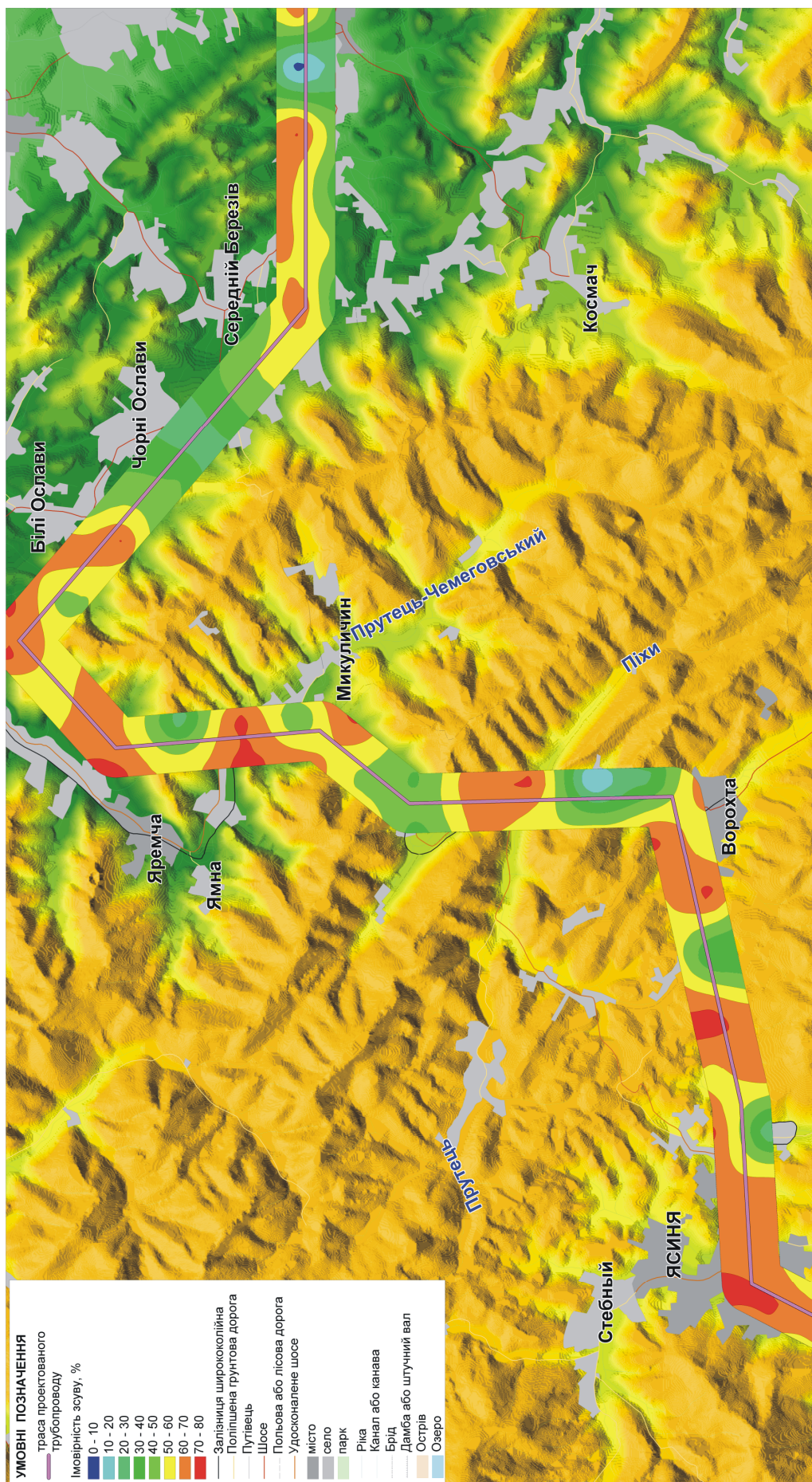


Рисунок 7 — Приклад використання геоінформаційної системи прогнозування зсувонезбезпеки при проєктуванні траси трубопроводу

виконувати комплексом дистанційних геофізичних методів згідно з методиками, запропонованими, наприклад, у [3, 13].

Похибка часового прогнозу визначається детальністю задіяних часових рядів. Для довгострокових прогнозів визначаються середньорічні фактори, тобто похибку становитиме  $\pm 0,5$  року.

### Висновки

1. У результаті проведення досліджень встановлена невідома раніше закономірність імовірності розвитку зсувів за комплексної дії природно-техногенних факторів на прикладі Карпатського регіону України.

2. Зазначена закономірність полягає в тому, що ймовірність виникнення чи активізації зсувних процесів на місцевості визначається величиною ймовірності інтегрального показника зсувної небезпеки, що визначається на основі врахування сукупності фактичних, прийнятих за еталонні, характеристик статистичних розподілів просторово-часових домінуючих факторів активізації зсувних процесів у даному районі місцевості.

3. Застосування виконаних досліджень із встановлення закономірності розподілу зсувних процесів полягає в розробці аналітичної комп'ютерної системи прогнозування зсувів, апробованої на окремих територіях Карпатського регіону.

4. Таке прогнозування доцільно виконувати в подальшому як на територіях діючих нафто-газопроводів, так і трасах проектування їх прокладки. Деталізацію ділянок прогнозування зсувонебезпеки доцільно виконувати комплексом дистанційних геофізичних методів.

5. Розроблену систему планується включити до складу урядової інформаційно-аналітичної системи по надзвичайних ситуаціях кількісного прогнозування активізації екзогенних геологічних процесів на окремих територіях України. Вона є важливою частиною заходів щодо запобігання аварійних ситуацій при будівництві й експлуатації інженерних споруд, захисту населення від стихійних лих.

6. Ефективність впровадження залежить від масштабів її використання — у проектних, науково-дослідних організаціях, виробничих структурах, територіальних управліннях по надзвичайних ситуаціях, місцевих адміністраціях; вона може бути корисна і на загальнодержавному рівні.

### Література

1. Гошовський С.В., Рудько Г.І., Преснер Б.М. Екологічна безпека техно-природних геосистем у зв'язку з катастрофічним розвитком геологічних процесів. — К.: ЗАТ «Ніч лава», 2002. — 624 с.

2. Рудко В.П. Забезпечення безаварійної роботи газопроводів у зсувонебезпечних гірських районах: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.15.13 / Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. — Івано-Франківськ, 2005. — 19 с.

3. Прогнозування та попередження зсувів на гірських трасах газопроводів / Крижанівський Є.І., Рудко В.П., Саломатін В.М., Шкіца Л.Є. // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. — 2004. — № 3. — С. 5-9.

4. Кузьменко Э.Д., Карпенко А.Н., Журавель А.М. Аналитическая геоинформационная система пространственно-временного прогнозирования оползневых процессов // Материали VI Міжнародної наук. конф. «Моніторинг небезпечних геологічних процесів та екологічного стану середовища. — Київ, 2005. — С. 16-18.

5. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Инженерная геодинамика. — Л: Недра, 1977. — 479 с.

6. Гулакян К.А., Кюнтцель В.В., Постоев Г.П. Прогнозирование оползневых процессов. — М.: Недра, 1977. — 135 с.

7. Емельянова Е.П. Основные закономерности оползневых процессов. — М.: Недра, 1978. — 308 с.

8. Кюнтцель В.В. Закономерности оползневых процессов на европейской территории СССР и его региональный прогноз. — М.: Недра, 1980. — 213 с.

9. Методические рекомендации по составлению долгосрочных прогнозов экзогенных геологических процессов в системе государственного мониторинга геологической среды / Шеко А.И., Постоев Г.П., Круподеров В.С., Дьяконова В.И., Мальнева И.В., Парфенов С.И., Бондаренко А.А., Круглова Л.В. — М.: ВСЕГИНГЕО, 1999. — 78 с.

10. Долгосрочный прогноз оползней в Закарпатском регионе. 1. Пространственное распределение оползней. Ритмичность как теоретическая основа временного прогнозирования / Гошовский С.В., Кузьменко Э.Д., Блинов П.В., Карпенко А.Н., Штогрин Л.В. // Геоинформатика. — 2004. — № 2. — С. 40-49.

11. Долгосрочный прогноз оползней в Закарпатском регионе. 2. Временной прогноз. Обоснование периода массовой активизации / Гошовский С.В., Кузьменко Э.Д., Блинов П.В., Карпенко А.Н., Штогрин Л.В. // Геоинформатика. — 2004. — № 3. — С. 64-72.

12. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Краткий курс математической статистики для технических приложений. — М.: Физматиз, 1959. — 436 с.

13. Обґрунтування вибору геофізичних, геологічних та геоморфологічних параметрів для оцінки зсувонебезпечності і методика їх комплексної інтерпретації / Е.Д.Кузьменко, Д.Н.Ляшук, В.Д.Чебан, Л.В.Штогрин // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. — Зб. наук. праць. — Київ, 2005. — С.333-349.