

**СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ГЕОЛОГО-ГЕОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ,
УЗГОДЖЕНИХ ІЗ ЗСУВОНЕБЕЗПЕКОЮ ЛОКАЛЬНОГО РІВНЯ****І.В.Крив'юк***ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 504761
e-mail: kuzmenko@ivf.ukrpack.net, gbg@nung.if.ua*

Представлено результати статистичного аналізу геолого-геофізичних параметрів, узгоджених із зсувонебезпекою локального рівня. Визначено основні закони розподілу даних параметрів та доведено можливість їх використання для комплексної інтегрованої кількісної інтерпретації з розрахунком функції комплексного показника та подальшим прогнозом зсувної небезпеки на ймовірнісному рівні.

Представлены результаты статистического анализа геолого-геофизических параметров, согласованных с оползневой опасностью локального уровня. Определены основные законы распределения данных параметров и доказана возможность их использования для комплексной интегрированной количественной интерпретации с расчетом функции комплексного показателя и дальнейшим прогнозом оползневой опасности на вероятностном уровне.

Results of the statistical analysis of the geology-geophysical parameters coordinated with sliding dangers on a local level are presented. Basic laws of distribution of the given parameters are certain and the opportunity of their use for the complex integrated quantitative interpretation with calculation of function of a complex parameter and the further forecast sliding dangers on probabilistic level is proved.

Упродовж останніх десятиріч зберігає актуальність питання дослідження зсувних процесів, про що свідчать події останньої активізації зсувів в 1998-2001 та 2008 р. як загалом по Україні, так і в Карпатському регіоні. При цьому під загрозою опинилися магістральні нафто- і газопроводи [1-2]. Тому, слід розглядати питання не просто констатації факту зсувних процесів, а їх прогнозування та попередження. Саме цим проблемам присвячена стаття.

В роботі [3] вказано на необхідність комплексного підходу при дослідженні зсувних процесів геолого-геофізичними методами на локальному об'єктовому рівні та запропоновані параметри, які слід використовувати при інтерпретації. Проте вибір таких параметрів здійснено, виходячи із загальних міркувань. В наведеній публікації цей недолік усувається за допомогою статистичного аналізу фактичного матеріалу з багатьох ділянок геолого-геофізичних досліджень.

Комплексна інтегрована кількісна інтерпретацію геолого-геофізичних даних передбачає розрахунок функції комплексного показника (ФКП) зсувних чинників (параметрів) і дає можливість оцінити зсувонебезпечність на ймовірнісному рівні [4]. Теорія розрахунку ФКП базується на підпорядкуванню задіяних параметрів нормальному закону розподілу. Тому постає питання про приведення можливих законів розподілу зазначених параметрів до нормального закону. Це можна зробити так. У геології обґрунтованими є такі закони розподілу: нормальний, логнормальний, гамма-закон, експоненціальний, екстремальний (таблиця 1). Особливість останніх чотирьох законів полягає в тому, що всі вони містять експоненту, тому логарифми їх аналітичних виразів можуть бути розподілені за нормальним законом. Отже, для уніфікації законів розподілу зсувних парамет-

рів (приведення до нормального закону розподілу) достатньою є процедура логарифмування розподілів, які відрізняються від нормального.

Тому доцільним постає питання проведення комплексного статистичного аналізу задіяних до розрахунку ФКП параметрів для декількох ділянок, з метою доведення їх підпорядкованості класичним законам розподілу та виявленню певних закономірностей в їх функціях розподілу. Подібні статистичні дослідження фізичних властивостей порід були проведені Кузьменком Е.Д. для родовищ сірки [5].

Для статистичного аналізу взято такі параметри: коефіцієнт анізотропії природного імпульсного електромагнітного поля Землі χ , еквівалентний електричний опір зсувних порід $\rho_{екв}$, електричний опір підстелених порід $\rho_{під}$, глибина поверхні ковзання h та абсолютні залишкові значення природних потенціалів $|\Delta U_{зали}|$. Надалі дані параметри будемо називати ефективними, оскільки саме вони безпосередньо відображають зсувонебезпеку збільшенням або зменшенням своєї величини.

Ефективні параметри перевірені на підпорядкованість одному з вищезазначених законів розподілу. Наявність таких законів свідчить про нерівномірний вплив зовнішніх чинників, що формують величини факторних характеристик. Відповідність емпіричних розподілів теоретичним законам логнормального, гамма, екстремального, експоненціального розподілів дає змогу розглядати ці величини не як результат суми (як за нормального розподілу), а як добуток діючих чинників, оскільки нормальним апроксимується розподіл логарифмів. Інакше кажучи, невідповідність розподілу величин теоретичному закону нормального розподілу пояснюється залежністю цих величин як від первинних, так і вторинних ознак. Це явище є закономірним для геологічних ознак [6].

Таблиця 1 – Рівняння теоретичних законів розподілу імовірності значень випадкових величин

Закон розподілу	Рівняння
Нормальний	$f(x) = \frac{1}{\delta \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2 \cdot \delta^2}\right)$
Логнормальний	$f(x) = \frac{1}{x \cdot \delta \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(\ln(x) - \mu)^2}{2 \cdot \delta^2}\right)$
Гамма	$f(x) = \left(\frac{x}{b}\right)^{c-1} \cdot \exp\left(-\frac{x}{b}\right) \cdot \left(\frac{1}{b} \cdot \Gamma(c)\right)$
Експоненціальний	$f(x) = \lambda \cdot \exp(-\lambda \cdot x)$
Екстремальний	$f(x) = \frac{1}{b} \cdot \exp\left(-\frac{x-a}{b}\right) \cdot \exp\left(-\exp\left(-\frac{x-a}{b}\right)\right)$

Таблиця 2 – Перелік зсувонебезпечних ділянок, взятих для статистичного аналізу

Ділянка	Методи геолого-геофізичних досліджень	Ефективні параметри, взяті для статистичного аналізу	Етапи обробки даних	Площа	Сітка спостережень
Буковець-1	ПЕМПЗ МЕЗ	χ $\rho_{екв}, \rho_{нід}, h$	а, б, в	520×240 м	Нерегулярна
Буковець-2	ПЕМПЗ МЕЗ	χ $\rho_{екв}, \rho_{нід}, h$	а, б, в	400×200 м	Нерегулярна
Колочава	ПЕМПЗ МЕЗ	χ $\rho_{екв}, \rho_{нід}, h$	а, б, в	400×360 м	Нерегулярна
Колочава-Горб	ПЕМПЗ МЕЗ	χ $\rho_{екв}, \rho_{нід}, h$	а, б, в	340×320 м	Нерегулярна
Міжгір'я	ПЕМПЗ МЕЗ	χ $\rho_{екв}, \rho_{нід}, h$	а, б, в	320×90 м	Нерегулярна
Нижнє Перевальна	ПЕМПЗ МЕЗ ПЕП	χ $\rho_{екв}, \rho_{нід}, h$ $ \Delta U_{зхл} $	а, б, в	400×100 м	Нерегулярна
Перевальна	ПЕМПЗ МЕЗ ПЕП	χ $\rho_{екв}, \rho_{нід}, h$ $ \Delta U_{зхл} $	а, б, в	325×250 м	Нерегулярна
Репінне	ПЕМПЗ МЕЗ	χ $\rho_{екв}, \rho_{нід}, h$	а, б, в	420×260 м	Нерегулярна
Синевір	ПЕМПЗ МЕЗ ПЕП	χ $\rho_{екв}, h$ $ \Delta U_{зхл} $	а, б, в	400×400 м	Нерегулярна
Тереблянська	ПЕМПЗ МЕЗ ПЕП	χ $\rho_{екв}, \rho_{нід}, h$ $ \Delta U_{зхл} $	а, б, в	4000 м (1 профіль)	10 м 40 м 10 м

Примітка: в стовпчику 5 буквами а-в позначено наступне:
 а - обробка вхідних даних;
 б - обробка даних з вилученими ураганними значеннями;
 в - обробка регуляризованих даних

Статистичний аналіз проведено для даних, одержаних з десяти зсувонебезпечних ділянок, що знаходяться в Міжгірському районі Закарпатської області (Кросненська тектонічна зона Флішових Карпат) (таблиця 2). Опис пробурених свердловин показує приблизно однакову

літолого-стратиграфічну характеристику розрізу для даних ділянок – даний чинник підвищує достовірність закономірностей розподілу ефективних параметрів, якщо такі будуть встановлені.

Визначення закону розподілу ефективних параметрів виконана за допомогою критерію Колмогорова-Смірнова, який рекомендується літературою, коли вибірка даних має значний об'єм, а ймовірний теоретичний закон розподілу не обов'язково повинен бути нормальним [7]. Розраховується так звана D-статистика для кількох законів, яким може відповідати вибірка, а також критичне значення D-статистики. Теоретичний закон розподілу приймається для досліджуваної вибірки, якщо значення D-статистики менше критичного.

Статистична обробка ефективних параметрів проведена за допомогою сучасних пакетів програм статистичного аналізу даних в три етапи:

1) обробка вхідних даних проведена з метою визначення наближеного закону розподілу ефективних параметрів та виявлення і вилучення з подальшої обробки ураганних значень. Послідовність обробки така: обчислення основних статистичних оцінок (середньоквадратичне відхилення, математичне очікування), статистична оцінка рівня завад і його відношення до рівня корисного сигналу, обчислення законів розподілу, визначення довірчого інтервалу $\pm 3\sigma$, де σ – середньоквадратичне відхилення випадкової величини, яке приймається в якості середньої похибки. Йому відповідає рівень ймовірності $P(3\sigma) = 0.997$. Значення даних, що виходять за ці межі, є ураганними і вважаються малоімовірними. Поодинокі ураганні значення не беруться до уваги при подальшій обробці, для групових значень (кілька значень за профілем) присвоюються числові значення на рівні $\pm 3\sigma$;

2) обробка даних з вилученими ураганними значеннями проведена з метою встановлення дійсної підпорядкованості ефективних параметрів одному з вище наведених законів розподілу;

3) обробка регуляризованих даних проведена з метою встановити чи впливає процедура регуляризації (з етапами інтерполяції та екстраполяції) на регулярну квадратну сітку на підпорядкованість ефективних параметрів певному закону розподілу і, якщо впливає, то яким чином. Процедура регуляризації виконуються тому, що дослідження різними геофізичними методами, як правило, проводяться за різними сітками спостережень, а для комплексної кількісної інтерпретації потрібна єдина уніфікована сітка.

В таблиці 3, для прикладу, наведені дані статистичного аналізу ефективних параметрів тільки для двох ділянок досліджень, в зв'язку з значним об'ємом одержаних результатів. Дана таблиця зручна для виявлення впливу вилучення ураганних значень та процедури регуляризації на закон розподілу ефективних параметрів.

Аналізуючи одержані результати статистичного аналізу ефективних параметрів, можна зробити наступні висновки:

1) вилучення ураганних значень:

- призводить до зменшення середньоарифметичного значення, середньоквадратичного відхилення та розрахованих значень критерію Колмогорова-Смірнова;

- для χ , h та $|\Delta U_{\text{зав}}|$ не впливає на зміну підпорядкованим законам розподілу;

- три рази з десяти для $\rho_{\text{екв}}$ та один раз з десяти для $\rho_{\text{ніо}}$ закон розподілу, що стояв на другому місці, став на перше.

Отже, можна зробити висновок, що вилучення ураганних значень, має позитивний вплив на достовірність визначення закону розподілу.

2) процедура регуляризації даних:

- в двадцяти двох випадках з тридцяти восьми процедура регуляризації не вплинула на зміну закону розподілу, але в семи випадках з них розраховане значення критерію Колмогорова-Смірнова перевищило критичне значення даного критерію;

- в чотирьох випадках закон розподілу, що стояв на другому місці, став на перше;

- в шістнадцяти випадках суттєво змінився закон розподілу ефективних параметрів по відношенню до нерегуляризованих даних;

Отже, майже в половині випадків регуляризація даних впливає на зміну закону розподілу і даний вплив можна трактувати двоюко – з одного боку збільшення числа значень вибірки завжди позитивно позначається на достовірності визначення закону розподілу, а з другого боку, дане збільшення відбувається «штучно», за рахунок процедур інтерполяції та екстраполяції, а не на основі реальних даних, одержаних за допомогою геофізичних досліджень.

Перейдемо безпосередньо до визначення законів розподілу по кожному з ефективних параметрів. За основу взято дані з вилученими ураганними значеннями.

В таблиці 4 наведено згруповані дані статистичного аналізу по кожному з ефективних параметрів (цифрами позначено закони розподілу відповідно до таблиці 3). Аналізуючи дану таблицю, можна зробити такі висновки:

- коефіцієнт анізотропії імпульсного електромагнітного поля χ чітко підпорядковується логнормальному закону розподілу;

- для інших ефективних параметрів не має чіткої підпорядкованості якомусь одному закону розподілу. Так, для еквівалентного опору зсувних порід $\rho_{\text{екв}}$ та опору підстелених порід $\rho_{\text{ніо}}$ чітко виділяється підпорядкованість двом законам розподілу – логнормальному та екстремальному, з невеликою перевагою першого. Дані щодо глибини поверхні ковзання h вже підпорядковуються чотирьом законам розподілу – логнормальному, нормальному, гама та екстремальному, і знову ж таки з невеликою перевагою першого. Щодо абсолютних залишкових значень природних потенціалів $|\Delta U_{\text{зав}}|$, то в даному випадку важко встановити якусь закономірність через наявність даних лиш по чотирьох ділянках, хоча і в даному випадку слід відмітити наявність гама-розподілу в трьох випадках, а також появу у двох випадках експоненціального закону, який до цього зустрічався тільки раз (ділянка Міжгір'я, ефективний параметр $\rho_{\text{ніо}}$).

Таблиця 3 – Дані статистичного аналізу ефективних параметрів по всіх ділянках досліджень

Ефективний параметр	Середньоарифметичне значення	Середньоквадратичне відхилення	Закон розподілу 1 – нормальний 2 – логнормальний 3 – гамма 4 – експоненціальний 5 – екстремальний	Розраховане значення критерію Колмогорова-Смірнова для законів розподілу					Критичне значення критерію Колмогорова-Смірнова (на 95% імовірнісному рівні)	
				1	2	3	4	5		
Буковець-1										
χ	a	2,010	1,601	2*	0,186	0,072	0,102	0,274	0,105	0,058
	б	1,966	1,418	2*	0,170	0,069	0,093	0,280	0,102	0,058
	в	1,937	1,047	2*	0,130	0,034	0,063	0,313	0,040	0,028
$\rho_{екв}$	a	74,098	18,868	5, 2, 3	0,132	0,085	0,102	0,457	0,067	0,107
	б	74,023	18,635	5, 2, 3	0,131	0,084	0,100	0,458	0,066	0,107
	в	78,803	19,820	≈5	0,168	0,133	0,146	0,479	0,110	0,028
$\rho_{тюд}$	a	140,776	60,046	2, 5	0,167	0,095	0,122	0,357	0,102	0,107
	б	140,229	58,134	2, 5	0,166	0,094	0,120	0,358	0,099	0,107
	в	140,183	44,858	≈2	0,095	0,046	0,060	0,408	0,049	0,028
h	a	5,057	1,635	1	0,104	0,156	0,129	0,392	0,139	0,107
	б	5,057	1,635	1	0,104	0,156	0,129	0,392	0,139	0,107
	в	5,159	1,337	1*	0,032	0,086	0,063	0,397	0,090	0,028
Нижнє Перевальна										
χ	a	0,861	0,715	2, 3, 5	0,176	0,076	0,084	0,164	0,114	0,134
	б	0,850	0,677	2, 3, 5	0,164	0,076	0,082	0,168	0,111	0,134
	в	0,864	0,379	5, 2, 3	0,092	0,030	0,041	0,326	0,027	0,070
$\rho_{екв}$	a	465,360	978,975	2	0,323	0,195	0,259	0,338	0,310	0,194
	б	402,141	612,639	2	0,311	0,192	0,256	0,301	0,302	0,194
	в	569,225	648,702	2*	0,191	0,090	0,117	0,159	0,174	0,068
$\rho_{тюд}$	a	101,265	43,460	2, 5, 3, 1	0,165	0,123	0,139	0,427	0,131	0,194
	б	100,516	40,873	2, 5, 3, 1	0,158	0,123	0,139	0,429	0,130	0,194
	в	1,692	0,895	3, 5	0,076	0,083	0,058	0,207	0,059	0,068
h	a	1,763	1,155	2, 5, 3, 1	0,166	0,107	0,114	0,248	0,132	0,194
	б	1,754	1,123	2, 5, 3, 1	0,167	0,109	0,114	0,249	0,131	0,194
	в	1,692	0,895	3, 5	0,076	0,083	0,058	0,207	0,059	0,068
$ \Delta U_{зл} $	a	11,168	7,785	5, 1, 3	0,091	0,166	0,095	0,159	0,041	0,121
	б	11,168	7,785	5, 1, 3	0,091	0,166	0,095	0,159	0,041	0,121
	в	10,362	5,682	5	0,075	0,103	0,074	0,193	0,063	0,068

Примітка: в стовпчику 4 позначено наступне:

- 1) цифри 1-5, яким відповідають відповідні закони розподілу, розташовані в порядку зростання розрахованого значення критерію Колмогорова-Смірнова;
- 2) символ ≈ означає найбільш наближений закон розподілу за розрахованим значенням критерію Колмогорова-Смірнова до критичного значення даного критерію, а символ * – підпорядкування вказаному закону розподілу на 99% рівні довіри

Таблиця 4 – Згруповані дані статистичного аналізу ефективних параметрів (дані з вилученими ураганними значеннями)

Ділянка	Ефективний параметр				
	χ	$\rho_{екв}$	$\rho_{тюд}$	h	$ \Delta U_{зл} $
Буковець-1	2*	5, 2, 3	2, 5	1	–
Буковець-2	≈2	5, 2, 3, 1	2, 5	3, 5, 1, 2	–
Колочава	2	≈2	1*	2, 5, 3	–
Колочава-Горб	≈2	≈2	5, 3, 2	1	–
Міжгір'я	2	2	2, 5, 3, 4	2, 5, 3, 1	–
Нижнє Перевальна	2, 3, 5	2	2, 5, 3, 1	2, 5, 3, 1	5, 1, 3
Перевальна	3, 2, 5, 1	3, 5, 2, 1	5, 2, 3	5, 2, 3, 1	2*
Репінне	2	5, 2, 3	5, 2, 3	5, 2, 3	–
Синевір	2	5, 2, 3	–	2, 3, 5, 1	3, 4
Тереблянська	2, 3, 5	2, 3, 5, 1	2, 3, 5	3, 1, 2, 5	3, 5, 4, 2, 1

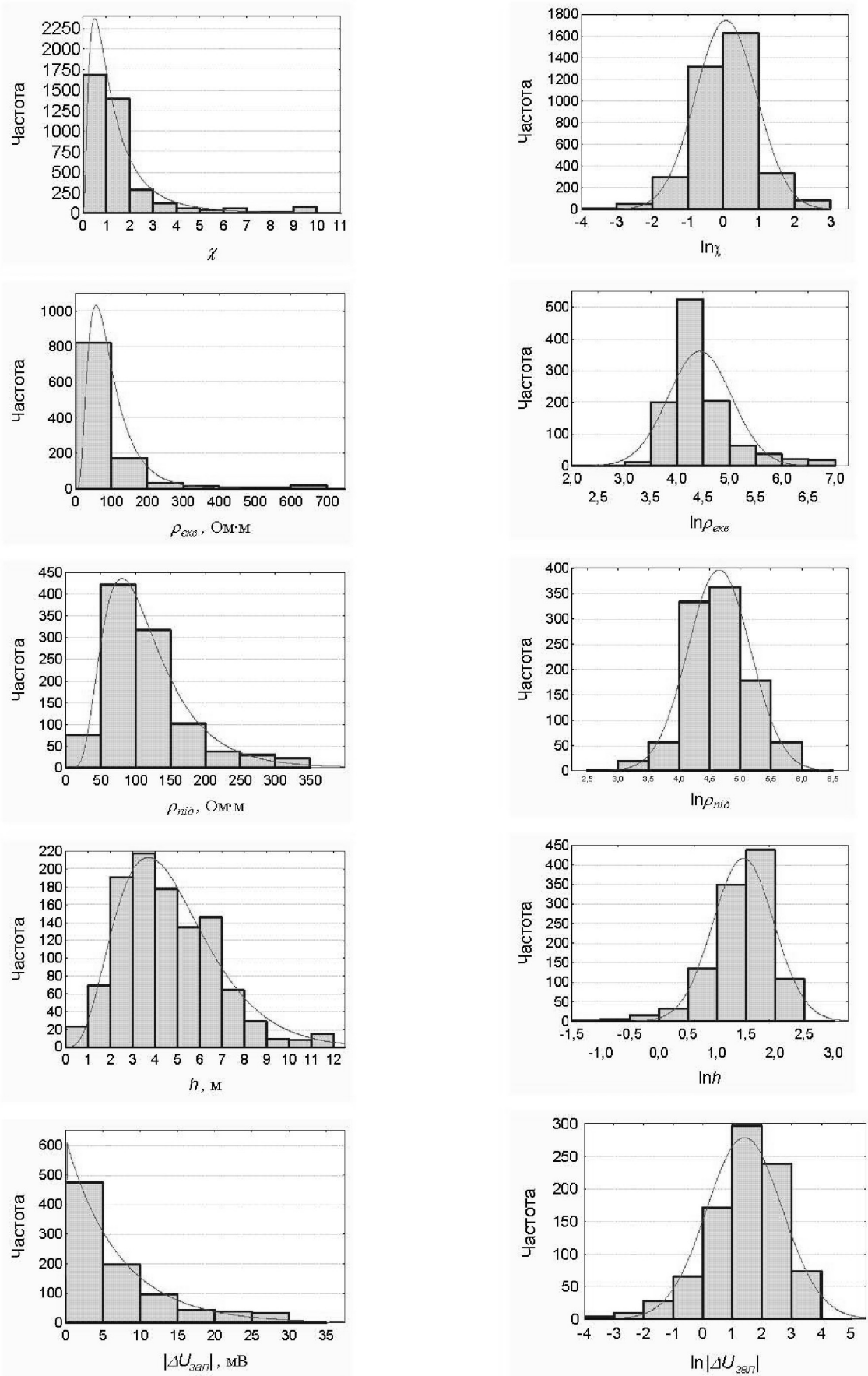


Рисунок 1 – Графіки фактичних розподілів імовірностей загальних значень ефективних параметрів та їх теоретичних аналогів

Таблиця 5 – Результат загального статистичного аналізу ефективних параметрів

Ефективний параметр	Середньоарифметичне значення	Середньоквадратичне відхилення	Закон розподілу 1 – нормальний 2 – логнормальний 3 – гамма 4 – експоненціальний 5 – екстремальний	Розраховане значення критерію Колмогорова-Смірнова для законів розподілу					Критичне значення критерію Колмогорова-Смірнова (на 95% імовірнісному рівні)
				1	2	3	4	5	
χ	1,530	1,666	≈ 2	0,238	0,089	0,132	0,136	0,148	0,022
$\rho_{\text{екв}}$	106,714	111,031	≈ 2	0,287	0,143	0,206	0,282	0,183	0,041
$\rho_{\text{міо}}$	117,696	62,179	≈ 2	0,154	0,060	0,088	0,300	0,069	0,043
h	4,747	2,143	≈ 3	0,098	0,096	0,063	0,288	0,065	0,041
$ \Delta U_{\text{зал}} $	7,178	7,047	3, 4	0,157	0,075	0,045	0,046	0,123	0,047

Узагальнюючи вище зазначене, можна виділити групу з трьох законів розподілу, яким підпорядковуються майже всі вибрані для статистичного аналізу ефективні параметри – логнормальний, екстремальний, гамма- (закони розподілу розташовані в порядку спадання їх значущості).

Проведемо загальний статистичний аналіз ефективних параметрів. Для цього, для кожного з ефективних параметрів створимо загальний масив, у який занесемо дані по всіх ділянках. Оскільки, створені таким чином масиви являють собою нову вибірку, то спочатку здійснено статистичну обробку даних масивів з метою виявлення і вилучення ураганих значень, а потім статистичний аналіз з метою визначення закону розподілу загальних значень ефективних параметрів. Результати статистичного аналізу таких даних наведені в таблиці 5 і вони підтвердили вище зазначені висновки.

Для прикладу, на рисунку 1 наведено гістограми фактичних розподілів імовірностей загальних значень проаналізованих параметрів та графіки їх теоретичних аналогів. Після процедури логарифмування загальних значень ефективних параметрів останні будуть розподілені нормально.

Висновки

1. Кожний із ефективних параметрів сформований внаслідок добутку багатьох діючих чинників і залежать як від первинних, так і вторинних ознак.

2. Наведені в статті ефективні параметри є прийнятливими для характеристики зсувонебезпечних ділянок та ідентичними з точки зору інформативності, оскільки підпорядковуються загальноприйнятним класичним законам розподілу.

3. Всі вищезазначені закони розподілу (крім нормального) містять експоненту, що дає можливість переходу до нормального закону розподілу через процедуру логарифмування. Це дає змогу використовувати дані параметри для комплексної інтегрованої кількісної інтерпретації з розрахунком ФКП та подальшим прогнозом зсувної небезпеки на ймовірнісному рівні.

Література

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

2 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 нафтових і газових родовищ. – 2005. – № 4 (7). – С. 24-35.

3 Кузьменко Э.Д. Об использовании некоторых электрических параметров при прогнозе оползневых явлений / Кузьменко Э.Д., Вдовина Е.П., Чебан В.Д. // Научный вестник НГА Украины. – 2002. – №4. – С. 89 – 91.

4 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.

5 Петрофизика серных месторождений Предкарпатья / [Кузьменко Э.Д., Баграмян Е.А., Петрик Л.А. и др.] – М.: НИИТЭХИМ, 1989. – 67 с.

6 Карасев Б.В. Статистический подход к изучению природы и некоторых закономерностей распределения вещества Земли / Б.В. Карасев // Пути познания Земли: Сб.– М.: Наука, 1971.– С. 131-138.

7 Смирнов Н.В. Краткий курс математической статистики для технических приложений / Н.В. Смирнов, И.В. Дунин-Барковский. – М.: Физматгиз, 1959. – 436 с.

Стаття поступила в редакційну колегію
30.10.08

Рекомендована до друку професором
Е. Д. Кузьменком