

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗСУВІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ГЕОФІЗИЧНИХ МЕТОДІВ

Обґрунтовано доцільність використання комплексної інтегрованої кількісної інтерпретації геолого-геофізичних даних під час прогнозування зсувних процесів із застосуванням геофізичних методів. Такий підхід передбачає прогнозування зсувних процесів на кількісному ймовірнісному рівні з використанням функції комплексного показника ефективних параметрів, узгоджених із зсувною небезпекою. Виділено основний комплекс геофізичних методів дослідження зсувних процесів: метод вертикального електричного зондування, метод природного імпульсного електромагнітного поля Землі та метод природного електричного поля. Цей комплекс за необхідності деталізації можна доповнювати додатковими методами: заломлених хвиль, радіохвильового просвічування та еманційної зйомки. Наведено детальний алгоритм проведення комплексної інтегрованої кількісної інтерпретації геолого-геофізичних даних. Обґрунтовано необхідні для комплексної інтерпретації геолого-геофізичні параметри, принципи трансформації вхідних та вихідних параметрів у ефективні. Геолого-геофізичні параметри узгоджено із зсувонебезпекою на кількісному рівні.

Ключові слова: комплексна інтегрована кількісна інтерпретація; функція комплексного показника; критерій імовірності розвитку зсувів; геолого-геофізичні дані; ефективні параметри.

Вступ та постановка проблеми

Беззаперечно, ефективність боротьби зі зсувами, як і з будь-якими іншими екзогенними геологічними процесами, значною мірою залежить від можливості обґрунтованого з наукової точки зору передбачення (прогнозування) цих процесів.

Сьогодні геофізичні методи досліджень мають основне значення при просторовому прогнозуванні зсувонебезпеки на локальному рівні.

Традиційна методика інтерпретації даних геофізичних методів дослідження зсувних процесів полягає у складанні результативних карт окремо по кожному параметру та в їх візуальному аналізі. При використанні в межах ділянки досліджень декількох методів звичайно виконується зіставлення даних на описовому візуальному, тобто якісному рівні. При цьому підтвердження аномалій за різними методами розглядається як запорука вірогідного прогнозу, якщо кожна з цих аномалій фізично узгоджується із зсувонебезпекою [Горяинов и др., 1987; Геофізичний..., 2001].

В загальному випадку, порівняння карт результативних параметрів показує, що однозначності в їх інтерпретації немає. Аномалії за різними методами далеко не завжди узгоджуються між собою, внаслідок чого вірогідність прогнозу зсувонебезпеки оцінити неможливо. Причину ми бачимо в тому, що зсувонебезпека часто відображається в геофізичних полях слабкими сигналами, які є співвимірними з фоном завад, що виникають завдяки різним геологічним факторам, а також унаслідок похибок вимірювання.

Це призвело до необхідності комплексного підходу до аналізу геолого-геофізичної інформації. Тоді при просторовому прогнозуванні активізації зсувних процесів обов'язково слід застосовувати комплексну інтегровану кількісну інтерпретацію геолого-геофізичних даних з розрахунком функції комплексного показника (ФКП) зсувних факторів, що в подальшому дає можливість оцінити зсувонебезпеку на ймовірнісному рівні.

Комплексна інтегрована кількісна інтерпретація геолого-геофізичних даних

Для комплексної інтегрованої кількісної інтерпретації геолого-геофізичних даних при просторовому прогнозуванні активізації зсувних процесів необхідно мати дані як мінімум трьох геофізичних методів досліджень зсувів [Вахромеєв, 1978]. З урахуванням інформативності та витрат на проведення польових робіт, основним комплексом, на нашу думку, слід вважати такі методи: вертикального електричного зондування (ВЕЗ), природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПЕМПЗ), природного електричного поля (ПЕП) (інколи, при якісній оцінці, метод ПЕМПЗ може виконувати самостійну функцію). Такий комплекс за необхідності деталізації можна доповнювати додатковими методами: заломлених хвиль (МЗХ), радіохвильового просвічування (РХП) та еманційної зйомки (ЕЗ).

Вилучення з цього комплексу деякого методу чи додавання нового в принципі не змінює методики подальшої обробки та інтерпретації геолого-геофізичних даних – це питання повинно вирішуватись індивідуально, враховуючи конкретні інженерно-геологічні умови.

Серед параметрів, які визначають зсувонебезпеку, пропонується розглядати такі групи: вхідні, вихідні та ефективні параметри (рис. 1).

До групи вхідних параметрів (вхідних геолого-геофізичних даних) належать усі можливі параметри, які отримані безпосередньо за даними польових спостережень, первинної обробки чи кількісної інтерпретації даних окремих методів. Для оцінки зсувонебезпеки слід використовувати такі вхідні параметри, об'єднані у три групи:

1) геофізичні – інтенсивності імпульсного електромагнітного випромінювання за різної орієнтації антени J_x та J_y , потенціал природного електричного поля U , питомий електричний опір ρ_i та потужність h_i геоелектричних горизонтів, швидкість пружних коливань V , напруженість вторинного

електромагнітного поля РХП H_z , інтенсивність випромінювання еманцій радону Rn ;

2) геологічні – потужність потенційно зсувних порід за даними буріння h_δ ;

3) геоморфологічні – альтитуда точок денної поверхні H .

До вихідних параметрів належать ті, що отримані з простих шляхом певних арифметичних

перетворень чи трансформацій вхідних даних: коефіцієнт анізотропії χ за даними ПЕМПЗ, залишкові аномалії ПЕП $\Delta U_{зал}$, сумарна поздовжня провідність $S_{сум}$, потужність зсувної товщі h , еквівалентний опір зсувної товщі $\rho_{екв}$, опір підстелених порід $\rho_{нід}$, коефіцієнт інверсії опорів $K_{інв}$, залишкові аномалії еманцій радону $Rn_{зал}$, кут нахилу денної поверхні α та поверхні ковзання β .

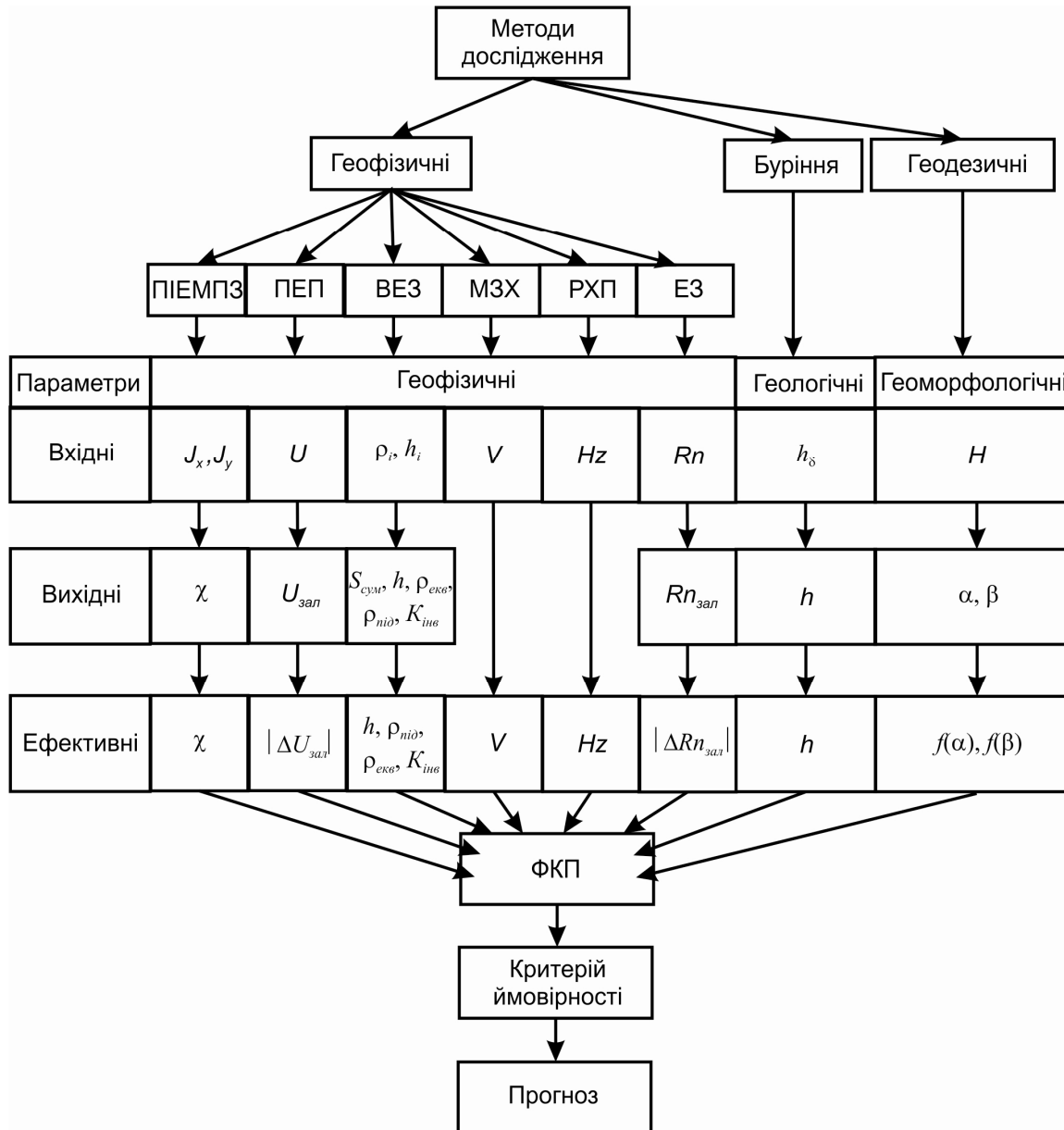


Рис. 1. Узагальнена схема комплексної інтерпретації геофізичних даних під час дослідження зсувонебезпечних ділянок:

J_x, J_y – інтенсивності ПЕМПЗ за різної орієнтації антени; U – потенціал ПЕП, ρ_i, h_i – опір і потужність за даними інтерпретації ВЕЗ; V – швидкість пружних коливань для поверхні ковзання МЗХ; H_z – напруженість вторинного електромагнітного поля РХП; Rn – інтенсивність випромінювання еманцій радону; h_δ – потужність пластів за даними буріння; H – абсолютна відмітка денної поверхні; χ – коефіцієнт анізотропії за даними ПЕМПЗ; $U_{зал}$ – залишкові аномалії ПЕП; $S_{сум}$ – сумарна поздовжня провідність зсувної товщі; h – потужність зсувної товщі; $\rho_{екв}$ – еквівалентний опір зсувної товщі; $\rho_{нід}$ – опір підстелених порід; $K_{інв}$ – коефіцієнт інверсії опорів; $Rn_{зал}$ – залишкові аномалії еманцій радону; α, β – кути нахилу денної поверхні та поверхні ковзання; $|\Delta U_{зал}|$ – абсолютні значення $U_{зал}$; $|\Delta Rn_{зал}|$ – абсолютні значення $Rn_{зал}$; ФКП – функція комплексного показника.

Із зсувонебезпекою пов'язуються ефективні параметри, які безпосередньо її відображають збільшенням чи зменшенням своєї числової величини. До класу ефективних параметрів належать ті параметри, які з фізичного погляду, а також за результатами статистичного обґрунтування, виявились найефективнішими для прогнозу зсувонебезпеки. Під час обґрунтування ефективних параметрів витримується принцип представлення в комплексній інтерпретації незалежних параметрів (один параметр у групі від одного методу) для того, щоб не надавати окремому методу чи параметру вагової переваги під час формування ФКП. Ефективні параметри не повинні бути комплексними, тобто складатись з комбінацій простих параметрів, які самі по собі можуть відігравати роль ефективних. Для переводу вихідних параметрів у ефективні деякі з них потребують певних трансформацій. До ефективних параметрів належать:

1) геофізичні – коефіцієнт анізотропії χ за даними ПЕМПЗ, абсолютні залишкові значення природних потенціалів $|\Delta U_{зал}|$, еквівалентний опір зсувної товщі $\rho_{екв}$, опір підстелених порід $\rho_{нід}$, коефіцієнт інверсії опорів $K_{інв}$, швидкість пружних коливань для поверхні ковзання V , напруженість вторинного електромагнітного поля H_z РХП, абсолютні залишкові значення еманцій радону $|\Delta Rn|$;

2) геологічні – потужність зсувних порід h ;

3) геоморфологічні – функція густини ймовірності зсуву залежно від кута нахилу денної поверхні $f(\alpha)$.

Доцільним є такий алгоритм проведення комплексної інтегрованої кількісної інтерпретації геолого-геофізичних даних, запропонований у працях [Кузьменко и др., 2002; Кузьменко, 2003] та систематизований і удосконалений у [Крив'юк, 2012] (рис. 1):

1. Підготовка вхідних геолого-геофізичних даних:

1.1) трансформація вхідних геолого-геофізичних даних;

1.2) первинна статистична обробка вхідних геолого-геофізичних даних;

1.3) регуляризація та бланкування вхідних геолого-геофізичних даних.

2. Узгодження геолого-геофізичних параметрів із зсувонебезпекою на кількісному рівні:

2.1) визначення ефективних параметрів за даними геолого-геофізичних досліджень:

2.1.1) обчислення функції ймовірності зсуву залежно від кута нахилу денної поверхні $f(\alpha)$;

2.1.2) розрахунок потужності потенційно зсувної товщі h та визначення положення прогновної поверхні ковзання;

2.1.3) визначення еквівалентного опору $\rho_{екв}$ потенційно зсувної товщі, опору підстелених порід, що мають за покрівлю поверхню ковзання $\rho_{нід}$, коефіцієнта інверсії опорів $K_{інв}$ та сумарної позовжньої провідності $S_{сум}$;

2.1.4) визначення коефіцієнта анізотропії електромагнітного поля χ за даними ПЕМПЗ;

2.1.5) визначення абсолютних залишкових значень природних потенціалів $|\Delta U_{зал}|$;

2.1.6) визначення граничної швидкості пружних коливань V для поверхні ковзання;

2.1.7) визначення абсолютних залишкових значень еманцій радону $|\Delta Rn|$;

2.1.8) визначення напруженості вторинного електромагнітного поля H_z радіохвильового просвічування;

2.2) регуляризація та бланкування ефективних параметрів.

3. Кінцева обробка та інтерпретація геолого-геофізичних даних:

3.1) визначення законів статистичного розподілу ефективних параметрів та коригування останніх;

3.2) кореляційно-регресійний аналіз вихідних і ефективних параметрів;

3.3) підтвердження ефективних параметрів, узгоджених із зсувною небезпекою;

3.4) розрахунок функції комплексного показника (ФКП);

3.5) оцінка внеску параметрів, визначених на основі інтерпретації даних геолого-геофізичних досліджень, у формування ФКП;

3.6) розрахунок критерію ймовірності розвитку зсувів (КІРЗ);

3.7) визначення довірчої нижньої границі критерію ймовірності та виділення аномальних зон, які відповідають зсувній небезпеці;

3.8) трансформування розподілу критерію ймовірності зсувів у тривимірну модель.

Підготовка вхідних геолого-геофізичних даних

Основна мета підготовки вхідних геолого-геофізичних даних – створення каталогу вхідних даних у структурі комп'ютерних файлів. Остаточним результатом підготовки є масиви даних у вигляді (x, y, z, f) , де f – параметр, який буде використовуватись для комплексної інтерпретації, а величини координат x, y, z змінюються в межах паралелепіпеда моделі з постійними кроками $\Delta x, \Delta y, \Delta z$.

Трансформація вхідних геолого-геофізичних даних. Для потреб комплексної тривимірної інтерпретації геолого-геофізичні дані необхідно представити в уніфікованому електронному вигляді. Це означає, що різнопланові параметри як геологічної, так і геофізичної змістовності повинні бути трансформовані належно, а саме: формалізовані геологічні параметри та геофізичні параметри у цифровому вигляді по єдиній регулярній просторовій сітці дискретизації фіксуються у вигляді масивів (баз) даних.

Зібрані геофізичні матеріали здебільшого представлені електронними таблицями довільної структури, інколи у вигляді карт і графіків. Геологічна інформація переважно існує на паперових носіях у варіантах графіків, карт, розрізів.

Стисло наведемо послідовність операцій підготовки даних для подальшого їх використання з метою проведення первинної обробки.

1. Сканування геолого-геофізичних графіків, карт, розрізів. Результати сканування записуються у вигляді окремих файлів.

2. Надалі алгоритм підготовки розгалужується залежно від типу матеріалів.

2.1. Графіки. За допомогою процедур оцифрування, що вбудовані в сучасні картографічні пакети програм (Surfer, Easy Trase), представляються у вигляді файлів $(x, f(x))$ з довільним кроком по x .

2.2. Карти. По відсканованому зображенню “наводяться” ізолінії параметра, кожній ізолінії присвоюється її ознака. У результаті отримуємо набір значень параметра $f(x, y)$ по нерегулярній сітці значень (x, y) .

2.3. Геолого-геофізичні розрізи. По відсканованому зображенню наводяться границі геологічних шарів або границі зміни геофізичного параметра у вигляді замкнених полігонів, кожному з яких присвоюється його ознака. Ознакою можуть бути, наприклад, модельні значення густини або електричного опору порід, що складають шар, або якимось позначена (номер, колір) геологічна характеристика тощо.

Процедура “підняття” границь на геолого-геофізичному розрізі або ізолінії на карті здійснюється переважно вручну. Автоматизовані процедури існують, але здебільшого вони не відповідають вимогам “розпізнавання” окремих об’єктів. Цей етап є найважчим з погляду витрат часу та ретельності виконання.

У результаті виконання вказаних операцій отримується весь комплекс даних у вигляді електронних таблиць довільної структури по нерегулярній сітці.

Первинна статистична обробка вхідних геолого-геофізичних даних проводиться з метою визначення законів їх розподілу, виявлення та вилучення з подальшої обробки ураганих значень. Обробляють за допомогою сучасних пакетів програм статистичного аналізу (Statistica, Microsoft Excel). Послідовність обробки така: розрахунок основних статистичних оцінок (дисперсія, середньоквадратичне відхилення, математичне очікування), статистична оцінка рівня завад і його відношення до рівня корисного сигналу, визначення закону розподілу та довірчого інтервалу.

Визначення закону розподілу вхідних геолого-геофізичних даних найдоцільніше проводити на основі критерію нормальності за альтернативи логнормального закону (критерій Жукова) [Жуков, 2008]. Після цього визначається довірчий інтервал $\pm 3\sigma$, де σ – середньоквадратичне відхилення випадкової величини, яке приймається як середня похибка. Йому відповідає рівень ймовірності $P(3\sigma)=0.997$. Значення даних, що виходять за ці межі, є ураганні та вважаються мало-ймовірними. Поодинокі ураганні значення не беруться до уваги під час подальшої обробки, для

групових значень (кілька значень по профілю) присвоюються числові значення на рівні $\pm 3\sigma$.

Регуляризація та бланкування вхідних геолого-геофізичних даних. Процедури фільтрації та регуляризації (з етапами інтерполяції та екстраполяції) на регулярну квадратну сітку виконуються після коригування вихідних даних відповідно до визначених меж $\pm 3\sigma$. Це необхідно, тому що дослідження різними геофізичними методами, зазвичай, проводяться по різних сітках спостережень, а для комплексної кількісної інтерпретації потрібна єдина уніфікована сітка. По завершенні регуляризації повторно оцінюють закон розподілу та відбраковують чи обмежують параметри відповідно до інтервалів $\pm 3\sigma$.

Щоб зменшити наслідки процедури екстраполяції, а також врахувати те, що польові дослідження на більшості ділянок проводяться по непрямокутній сітці спостережень, дані бланкуються відповідно до фактичної сітки спостережень по області досліджень.

Регуляризацію та бланкування даних виконують пакетом “Surfer”.

Узгодження геолого-геофізичних параметрів із зсувонебезпечкою на кількісному рівні

Процедура визначення ефективних параметрів наведена нижче відповідно до [Кузьменко та ін., 2009; Крив’юк, 2012].

Обчислення функції ймовірності зсуву залежно від кута нахилу денної поверхні $f(\alpha)$. Кут нахилу поверхні ковзання β , без сумніву, значно впливає на зсувонебезпеку ділянки. Однак на практиці зручніше використовувати кут нахилу денної поверхні α , який для консеквентних зсувів приблизно дорівнює куту нахилу поверхні ковзання. У деяких геофізичних організаціях [Чебан, 2002], а також у схемах розрахунків стійкості зсувів [Ломтадзе, 1977], для оцінки зсувонебезпеки використовується параметр $tg\alpha$. Однак для значних кутів (70–80 градусів), коли $tg\alpha$ зростає (а отже, і зростає зсувонебезпека) і прямує при 90 градусах до максимального значення, ймовірність зсувів прямує до нуля, оскільки при куті нахилу денної поверхні 90 градусів зсувів не може бути, а більшість зсувів спостерігаються при кутах 15–40 градусів. Тому саме функція густини ймовірності зсувів $f(\alpha)$, на наш погляд, об’єктивніше відображає зсувонебезпеку залежно від кута нахилу денної поверхні. Ця функція визначається сумою теоретичних законів статистичного розподілу та розраховується для кривої закону розподілу кількості зсувів за кутами нахилу денної поверхні, що визначений на основі аналізу гістограм такого розподілу для всіх зсувів, які наводяться у відповідних кадастрах для окремих територій [Кузьменко та ін., 2004].

Розрахунок потужності потенційно зсувної товщі h та визначення положення прогностичної поверхні ковзання. До геологічних параметрів належить, насамперед, потужність h зсувних (або потенційно зсувних) порід. Ця потужність визна-

час силу тяжіння зсувних порід, сумарна складова якої, що спрямована по схилу, переміщує маси цих порід донизу по поверхні ковзання. Отже, чим більша потужність, тим більша зсувонебезпека (за незмінності всіх інших параметрів).

Найточнішим методом визначення h треба вважати сейсморозвідку МЗХ. Точність методу ВЕЗ нижча. У 2001 р. проведено дослідні роботи методом високочастотного зондування становленням електромагнітного поля у ближній зоні, який дає точніші результати порівняно з ВЕЗ завдяки більшій роздільній здатності методу [Чебан, 2002].

Для простеження поверхонь ковзання потенційно зсувних порід за даними ВЕЗ будуються та аналізуються геоелектричні розрізи, беручи до уваги диференціацію їх за електричними опорами. При цьому вводяться корективи за рельєф денної поверхні, тобто напрямку зондувань при побудовах розрізів задається перпендикулярним до денної поверхні. Потужність визначається за даними ВЕЗ як сума потужностей геоелектричних горизонтів h_i , що складають розріз. Визначення положення границі ковзання проводиться з урахуванням літолого-стратиграфічних даних буріння свердловин, якщо такі дані є наявні для досліджуваної ділянки.

Для оцінки потужності як параметра зсувонебезпеки треба проаналізувати її кореляцію з електричним опором. Ця кореляція повинна бути обернена.

Визначення еквівалентного опору $\rho_{екв}$ потенційно зсувної товщі. За даними кількісної інтерпретації ВЕЗ визначаються такі вихідні параметри, як h_i і ρ_i . Вони є основою для розрахунку комплексного параметра еквівалентного електричного опору ($\rho_{екв}$) зсувних товщ. Цей параметр визначається за формулою:

$$\rho_{екв} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} h_i}{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{h_i}{\rho_i}}, \quad (1)$$

де i – порядковий номер потужностей шарів h зсувної товщі та відповідного їм еквівалентного опору ρ .

Проаналізувати зв'язок $\rho_{екв}$ із зсувонебезпекою можна на прикладі загальновідомої для теригенних порід формули, яка визначає зв'язок електричного опору та фізичних параметрів гірської породи:

$$\rho = K_C \cdot K_{II} \cdot K_O \cdot K_\Phi \cdot \rho_\Phi, \quad (2)$$

де K_C – коефіцієнт провідності скелету гірської породи; K_{II} – коефіцієнт поверхневої провідності; K_O – коефіцієнт, що характеризує об'єм порового і тріщинуватого простору; K_Φ – коефіцієнт флюїдонасичення; ρ_Φ – питомий електричний опір флюїду (водного розчину), що заповнює пори і тріщини.

Значення ρ_Φ та K_C для певної ділянки досліджень є сталим. Усі інші коефіцієнти правої частини формули співвідносяться із станом зсувонебезпеки так: чим більша зсувонебезпека, тим менші значення вказаних величин. Причина тут потрійна. По-перше, зволоженість ґрунту сприяє зменшенню міцності порід і збільшує вагу потенційно зсувних порід унаслідок зростання густини вологих порід, по-друге, зменшується коефіцієнт зчеплення, по-третє, зменшується кут внутрішнього тертя. Інакше кажучи, чим більша зсувонебезпека, тим менше значення еквівалентного опору. Одним з критеріїв “ефективності” еквівалентного опору є обернений зв'язок його з h по всіх зсувних товщах ділянок.

Визначення опору підстелених порід, що мають за покрівлю поверхню ковзання, $\rho_{нід}$. Цей параметр визначається з геоелектричних розрізів, одержаних за методом ВЕЗ, на які нанесено поверхню ковзання, тому його зараховано до вихідних параметрів. $\rho_{нід}$ відображає пов'язані із зсувонебезпекою характеристики підстеленого шару порід, що має за покрівлю поверхню ковзання. Зменшення $\rho_{нід}$ свідчить про зволоження та глинистість гірських порід, що призводить до зменшення коефіцієнта зчеплення та кута внутрішнього тертя, що своєю чергою призводить до зменшення сил, які втримують схил у рівновазі, і як наслідок – до зростання зсувонебезпеки.

Визначення коефіцієнта інверсії опорів $K_{інв}$. Якщо позначити позірний опір горизонту вище від поверхні ковзання ρ_e , то коефіцієнт інверсії опорів $K_{інв} = \rho_e / \rho_{нід}$. За відсутності зсувів, коли підстелені породи є глинами, $K_{інв} > 1$. Проте на зсувних ділянках $K_{інв}$ повинен бути меншим за одиницю. З фізичного погляду це може пояснюватись такими причинами: 1) збільшенням опору $\rho_{нід}$ завдяки кольматації порід уздовж поверхні ковзання (по покрівлі поверхні ковзання) під час зсуву; 2) зниженням ρ_e за рахунок вивітрювання зволжених зсувних порід; 3) зниженням ρ_e під час еродованості (розущільнення) зволжених зсувних порід. Отже, можна зазначити, що інверсія опорів характерна для ділянок, де зсув відбувся чи має відбутися найближчим часом. Коефіцієнт інверсії повинен зменшуватись зі зростанням зсувонебезпеки, враховуючи фізичне його трактування.

Отже, за даними методу ВЕЗ визначаються чотири ефективні параметри: h , $\rho_{екв}$, $\rho_{нід}$ та $K_{інв}$. Відповідно до принципів комплексної інтерпретації, для розрахунку ФКП повинні бути задіяні по одному незалежному параметру з кожного методу для того, щоб не надавати окремому методу чи параметру вагової переваги під час формування ФКП. Параметр h є фізично несумісний з параметрами $\rho_{екв}$, $\rho_{нід}$ та $K_{інв}$. Щодо залучення під час розрахунку ФКП останніх трьох, слід дотримуватись таких принципів. Параметр $\rho_{екв}$, відповідно до принципу його визначення, відображає характеристики, пов'язані із зсувонебезпекою, порід

усієї зсувної товщі. Оскільки при зародженні зсувів усі підготовчі процеси відбуваються в шарі динамічних деформацій [Кузьменко та ін., 2009; Чебан, 2002], то в такому випадку параметр $\rho_{екв}$ є малоінформативним; інша річ, коли процес зсувоутворення охопив уже всю масу порід, що розташовані вище від поверхні ковзання. Отже, $\rho_{екв}$, як і $K_{инв}$, слід вважати ефективними тільки для ділянок, на яких зсув відбувся чи має відбутися найближчим часом. Ці параметри пов'язані один з одним, тому їх одночасне задіяння до розрахунку ФКП є недоречним. Для надання переваги якомусь із них необхідно проаналізувати їх кореляційний зв'язок із параметром $S_{сум}$, а також оцінити їх внесок у формування ФКП. Параметр $\rho_{нід}$ може бути інформативним як при зародженні зсувів, так і в процесі їх розвитку, проте знову ж таки в останньому випадку слід вибрати найефективніший параметр із пари $\rho_{нід} - K_{инв}$. Що стосується параметрів $\rho_{екв}$ та $\rho_{нід}$, то вони є також фізично несумісні, оскільки відображають характеристики різних горизонтів, і можуть бути залучені до розрахунку ФКП одночасно.

Визначення сумарної поздовжньої провідності $S_{сум}$. Серед параметрів ВЕЗ присутній також складовий комплексний параметр сумарної поздовжньої провідності $S_{сум}$, який розраховується для порід зсувної товщі:

$$S_{сум} = \sum \frac{h_i}{\rho_i} \quad (3)$$

Цей параметр пов'язаний із зсувонебезпекою за якісним принципом "більше-більше", причому є доволі виразним. Він не може використовуватись як ефективний в силу комплексності, проте він є зручним для визначення ефективності параметрів інших методів шляхом оцінки кореляційного зв'язку.

Визначення коефіцієнта анізотропії електромагнітного поля χ за даними ПЕМПЗ. При дії механічних напружень на гірські породи, що є необхідною умовою виникнення зсувних процесів, генеруються електромагнітні імпульси. Саме на дослідженні цих імпульсів базується метод ПЕМПЗ [Вороб'єв, 1980]. Величину механічних напружень у товщі порід оцінюють за допомогою вимірювання інтенсивності випромінювання електромагнітного поля (кількості імпульсів за одиницю часу в заданому частотному діапазоні). Вимірювання проводяться при двох орієнтаціях антени – уперек та по падінню схилу. З метою виключення впливу завад ефективним параметром імпульсного електромагнітного поля доцільно вважати не саму інтенсивність випромінювання, а коефіцієнт анізотропії χ [Хархалис, 1994]:

$$\chi = \frac{J_x}{J_y} \quad (4)$$

де J_x – сигнал, виміряний при орієнтації антени вперек схилу; J_y – сигнал, виміряний при орієнтації антени по падінню схилу.

Доцільність застосування коефіцієнта анізотропії χ обґрунтована, по-перше, зменшенням синхронних у часі сигналів завад завдяки діленню J_x на J_y при визначенні χ , по-друге, збільшенням корисного сигналу, по-третє, виконанням вимоги представництва одного методу при комплексній інтерпретації одним параметром. При зародженні зсувів, які візуально ще не спостерігаються, основним напрямком розвитку деформацій є напрямком по падінню схилу. Отже, з збільшенням небезпеки зсувів повинен значно зростати параметр J_y і меншою мірою зростати або лишатись незмінним параметр J_x – відповідно повинен зменшуватись коефіцієнт анізотропії χ , який ми вважаємо ефективним параметром, що узгоджується зі зсувонебезпекою.

Визначення абсолютних залишкових значень природних потенціалів $|\Delta U_{зал}|$. Основним джерелом виникнення природних потенціалів на зсувонебезпечних схилах є фільтрація підземних вод у породах, що залягають вище від дзеркала ковзання. За нашою гіпотезою, електричні потенціали, що супроводжують фільтраційні потоки, виникають унаслідок двох основних причин. Перша – це наявність потенціалів течії. Другою причиною є механо-електричні перетворення, які реалізуються при зміні механічних напружень у гірських породах, що вміщують фільтраційний потік, за рахунок зміни тиску по потоку. Механізм виникнення потенціалу течії, запропонований Гельмгольцом, і пов'язується з виникненням подвійного електричного шару при адсорбції важких іонів із водного розчину стінками фільтраційного каналу. Переміщення вільних іонів внутрішньої оболонки подвійного шару еквівалентне електричному струму і приводить до виникнення природних потенціалів течії [Семенов, 1980]. Виникнення потенціалу тиску (напору) пов'язується з існуванням дифузійних потоків заряджених дефектів структури кристалічної решітки, що утворюються внаслідок порушення термодинамічної рівноваги за наявності зовнішніх сил тиску. Цей механізм фізично та аналітично обґрунтований у роботі [Іванов і др., 1991]. Сумарне фільтраційне електричне поле розглядається як суперпозиція поля течії U_1 та поля тиску U_2 :

$$U = U_1 + U_2 = (\lambda_1 + \lambda_2)\Delta P \quad (5)$$

де ΔP – приріст гідравлічного напору; λ_1 і λ_2 – коефіцієнти фільтраційно- та механо-електричного перетворення.

Щодо знаків коефіцієнтів слід зауважити, що λ_1 має від'ємний знак у зонах інфільтрації (ділянки, що прилягають до водорозділів, де зсувів немає) і додатний знак у зонах розвантаження (ексфільтрації). По шляху фільтрації потенціал зростає. Коефіцієнт λ_2 завжди додатний.

Оскільки аномалії розташовані на схилах, то слід розглядати фонові аномалії, що пов'язані з загальним збільшенням гео- та гідростатичного тиску вниз по схилу, і локальні аномалії, що пов'язані з аномальною фільтрацією, яка зумовлює

зсувні процеси. У той же час відзначаються локальні аномалії, які узгоджуються з аномальним механічним напруженням гірських порід (додатні аномалії) або з фільтраційними потоками (від'ємні аномалії зон інфільтрації). Тому під час опрацювання карт розподілу ПЕП перший етап трансформації потенціалів полягає у вилученні регіональної аномалії. Ця аномалія диктується рельєфом. Для усунення впливу рельєфу на результати досліджень методом ПЕП розраховуються залишкові аномалії по кожній ізогіпсі денної поверхні. Спочатку розраховуються для кожної ізогіпси середні значення $\Delta U_{\text{сеп}}$, потім залишкові:

$$\Delta U_{\text{зал}} = \Delta U_i - \Delta U_{\text{сеп}}, \quad (6)$$

Кожна із залишкових аномалій “працює на зсув”, тобто виконує функцію прогнозу. Для комплексної інтерпретації їх слід враховувати з однаковим знаком, тобто за абсолютною величиною. Абсолютні значення залишкових потенціалів $|\Delta U_{\text{зал}}|$, що визначені за цією методикою, є ефективними параметрами, узгодженими зі зсувонебезпекою – чим більше $|\Delta U_{\text{зал}}|$, тим більша зсувонебезпека.

Визначення граничної швидкості пружних коливань V для поверхні ковзання. Дослідження на декількох Карпатських ділянках показали, що поверхня ковзання виділяється як перша заломлююча границя, а гранична швидкість кореспондується зі швидкістю пружних хвиль у зоні покрівлі підстелених порід. Зменшення зчеплення зсувних і підстелених порід визначається насамперед літологією, тобто збільшенням вмісту глинистого матеріалу, а також їх пористістю та водонасиченістю. Отже, фактори, які “працюють на зсув”, ведуть до зниження швидкості пружних хвиль V – чим менша V , тим більша зсувонебезпека. Отже, гранична швидкість пружних коливань V є ефективним параметром МЗХ.

Визначення абсолютних залишкових значень еманцій радону $|\Delta Rn|$. Досвід робіт виробничих організацій з застосування еманційної зйомки на зсувонебезпечних схилах дає підставу стверджувати, що аномалії еманцій радону відповідають наявним чи прогнозним зонам розвитку зсуву. Поясненням цьому є наявність ослаблених тріщинуватих зон у підстелених породах. Встановлено наявність на зсувонебезпечних схилах аномалій двох типів. Перший тип – це аномалії, узгоджені з положенням відомих зсувів. Ці аномалії додатні для сухих зон і від'ємні для вологонасичених порід. Другий тип аномалій узгоджений з напруженим станом гірських порід і характеризується додатними значеннями. Отже, обидва типи аномалій (високих та низьких значень еманції радону) знаходять фізичне пояснення та пов'язані зі зсувними процесами. Тому їм треба надати однакову вагу для використання при подальшій процедурі комплексної інтерпретації. Для цього необхідно виконати три послідовні процедури: 1) розрахувати середні значення

еманації по ізолініях рельєфу; 2) розрахувати залишкові значення еманцій:

$$Rn_{\text{зал}} = Rn_i - Rn_{\text{сеп}}; \quad (7)$$

3) виділити абсолютні величини залишкових значень еманції $|Rn_{\text{зал}}|$. Процедура проведення розрахунків аналогічна розрахункам для абсолютних залишкових значень природних потенціалів $|\Delta U_{\text{зал}}|$.

Отже, абсолютні залишкові значення $|\Delta Rn|$ є ефективним параметром, який узгоджується зі зсувонебезпекою.

Визначення напруженості вторинного електромагнітного поля Hz за даними РХП. Радіохвильові методи засновані на вивченні поглинання радіохвиль під час їх поширення в гірських породах. Вивчення геологічної будови приповерхневих частин геологічного розрізу (до глибин 20–30 м) засноване на використанні полів радіочастот (діапазон від 10 до 30 кГц), що поширюються уздовж поверхні землі та індукують в провідних об'єктах вторинні струми. Підвищення тріщинуватості та водонасиченості порід зсувної товщі проковує збільшення напруженості вторинного електромагнітного поля Hz. Таким чином зростання зсувонебезпеки призводить до збільшення аномалій Hz.

Регуляризація та бланкування ефективних параметрів. Цей етап комплексної інтегрованої кількісної інтерпретації геолого-геофізичних даних проводиться аналогічно до етапу проведення регуляризації та бланкування вхідних геолого-геофізичних даних.

Кінцева обробка та інтерпретація геолого-геофізичних даних

Визначення законів статистичного розподілу ефективних параметрів та коригування останніх проводиться за методикою, аналогічною до визначення закону розподілу вхідних геолого-геофізичних даних.

Кореляційно-регресійний аналіз вихідних і ефективних параметрів полягає в пошуку кореляційних парних зв'язків між окремими параметрами. Розраховуються парні коефіцієнти кореляції для окремих груп вихідних та ефективних параметрів і будуються матриці та графіки парних залежностей між ними.

Підтвердження ефективних параметрів, узгоджених із зсувною безпекою. Немає сумнівів, що надійним параметром, який визначає зсувонебезпеку, є параметр сумарної поздовжньої провідності $S_{\text{сум}}$. Тому для кожного параметра необхідно оцінити його зв'язок з $S_{\text{сум}}$ на рівні парної та часткової кореляції.

Метод часткової кореляції дозволяє провести “очистку” парного коефіцієнта кореляції від впливу інших параметрів, які входять у систему випадкових величин. Тобто проводиться аналіз “чистого” зв'язку між залежною та незалежною величинами при фіксованих значеннях інших незалежних величин. Розрахунок коефіцієнтів часткової парної кореляції між парами величин (залежною та незалежною) дозволяє виявити істинний ступінь

тісноти кореляційного зв'язку без його спотворення одночасним впливом інших незалежних величин системи. Якщо всі величини незалежні, то парні та часткові коефіцієнти кореляції будуть рівними. Отже, порівняння цих коефіцієнтів дозволяє на якісному рівні оцінити ступінь залежності величин, для яких розраховано коефіцієнти кореляції.

По знаках кореляції між параметрами оцінюється фізична змістовність зв'язків між ними щодо відображення зсувонебезпеки на якісному рівні. Якщо така фізична змістовність присутня, то це означає, що кожний параметр містить регулярний сигнал, який корелює з тим чи іншим знаком із зсувонебезпекою.

Розрахунок функції комплексного показника. Методика розрахунку ФКП для зсувонебезпечних ділянок наведена в працях [Чебан, 2002; Кузьменко та ін., 2009; Крив'юк, 2012] та полягає в такому.

Спочатку за значеннями ефективних параметрів кожного методу підраховується контрастність аномалії сигналу γ_{ji} за формулою

$$\gamma_{ji} = \frac{A_{ji} - \bar{A}_j}{\sigma_j}, \quad (8)$$

де A_{ji} – значення j -го ефективного параметра в i -й точці ділянки досліджень; \bar{A}_j – середнє значення j -го ефективного параметра на ділянці досліджень; σ_j – середньоквадратичне відхилення (стандарт).

$$\bar{A}_j = \frac{\sum_{i=1}^n A_{ji}}{n}, \quad (9)$$

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_{ji} - \bar{A}_j)^2}{n-1}}, \quad (10)$$

де n – кількість значень j -го ефективного параметра на ділянці досліджень.

Оскільки значення контрастності параметрів γ_{ji} пронормовані за середньоквадратичним відхиленням і відповідно безрозмірні, то їх можна подати в інтегральній формі, а саме у вигляді суми ФКП у кожній точці вимірювань (Φ_i):

$$\Phi_i = \sum_{j=1}^p \gamma_{ji} - \sum_{j=1}^k \gamma_{ji}, \quad (11)$$

де p та k – кількість ефективних параметрів, які дають відповідно додатний та від'ємний ефект над аномальним об'єктом (у даному випадку – місцем можливого зсуву).

Отже, обчислення функції комплексного показника передбачає таку послідовність операцій: розрахунок контрастності аномалій сигналу по кожному окремому методу на ділянці досліджень; нормування контрастностей за середньоквадра-

тичним відхиленням; інтегральне зображення нормованих контрастностей.

Функцію комплексного показника необхідно розраховувати для декількох варіантів сполучення геофізичних, геологічних і геоморфологічних факторів.

Первинною картою результатів комплексної інтегрованої інтерпретації є карта функції комплексного показника. Цю карту необхідно проаналізувати щодо вірогідності наявних на ній аномалій. Аномалії можуть бути результатом: 1) одночасної дії сильних або слабких аномальних ефектів за двома або більше методами; 2) одночасної дії слабких аномальних ефектів за трьома і більше методами; 3) дії сильного аномального ефекту за одним методом. У перших двох випадках аномалію ФКП слід вважати вірогідною. У третьому випадку – невірогідною.

При аналізі карти ФКП слід звернути увагу на те, що контур реальних досліджень і прямокутний контур розрахунку ФКП не збігаються. Контур розрахунку ФКП, враховуючи вимоги існуючих розрахункових і сервісних програмних комплексів, повинен бути прямокутним. Це змушує під час побудови квадратної сітки розташування параметрів комплексної інтерпретації звертатись до процедури регуляризації, яка включає інтерполяцію та екстраполяцію. Саме некоректністю процедури екстраполяції пояснюється наявність хибних аномалій поза контуром досліджень.

На основі аналізу карт ФКП вибирають найоптимальнішу функцію комплексного показника.

Оцінка внеску параметрів, визначених на основі інтерпретації даних геолого-геофізичних досліджень, у формування ФКП. Для об'єктивної оцінки зсувонебезпеки та визначення раціонального комплексу методів досліджень необхідно поррахувати внесок кожного методу у формування ФКП. Для цього достатньо визначити коефіцієнти парної кореляції ФКП із кожним ефективним параметром та пронормувати ці коефіцієнти так, щоб в сумі їх по кожному варіанту ФКП було 100 %.

Процедура нормування передбачає знаходження суми всіх коефіцієнтів парної кореляції для певного варіанта розрахунку ФКП, ділення кожного коефіцієнта на цю суму (тобто приведення суми до одиниці, що дорівнює 100%) та відображення його у відсотках.

Розрахунок критерію ймовірності розвитку зсувів. Наступним етапом є розробка алгоритму переходу від функції комплексного показника до ймовірності зсувів. Побудуємо цей алгоритм так. Відомо, що дисперсія суми випадкових некорельованих величин (у даному випадку ефективних параметрів, узгоджених із зсувонебезпекою), розраховується за формулою

$$D = \sum_{j=1}^m D_j, \quad (12)$$

де m – кількість взятих для розрахунку ФКП ефективних параметрів ($m = p + k$).

Оскільки величини контрастностей нормалізовані відносно стандарту, то дисперсія кожного із ефективних параметрів 1. Тоді дисперсія, що відповідає i -й ФКП, буде:

$$D_{\phi} = m D(\gamma_j) = m. \quad (13)$$

Відповідний стандарт:

$$\sigma_{\phi} = \sqrt{m}. \quad (14)$$

Аномальна границя функції комплексного показника Φ_a визначається відповідно до границі $\pm 3\sigma$, якою враховується дисперсія параметрів. Якщо нижню аномальну границю брати для критерію 3σ , як це прийнято в геології, то одержимо

$$\Phi_a = 3\sigma_{\phi} = \pm 3\sqrt{m}. \quad (15)$$

Це означає, що нормальна випадкова величина відхиляється за абсолютним значенням від свого математичного очікування не більше ніж на 3σ . Відповідно до розрахунків для функції Лапласа можна стверджувати, що вказане відхилення не перевищує 3σ з ймовірністю 0.997. Якщо прийняти критерій у 2σ або σ , то відповідна ймовірність буде 0.95 або 0.623. Тут стає зрозумілим, що вимога наближення Φ_a до критерію 3σ є занадто жорсткою, адже ймовірність зсувонебезпеки в 0.95 і навіть в 0.9 є достатньо високою. Саме цю ймовірність, а не абстрактну ФКП, треба визначати як остаточний прогнозний параметр.

Тому сформулюємо задачу інакше: за відомого розподілу Φ_i та відомого $\sigma_{\phi} = \sqrt{m}$ розрахувати ймовірність відхилення Φ від свого математичного очікування. Саме цю ймовірність P нижче розглядатимемо як кількісну оцінку зсувонебезпеки. Для визначення P необхідно виконати два послідовних кроки:

- 1) порахувати значення Φ_i / \sqrt{m} для кожної i -ї точки спостереження;
- 2) розглядаючи ці значення як аргумент, визначити ймовірність P відповідно до функції Лапласа:

$$P = \Lambda\left(\Phi_i / \sqrt{m}\right). \quad (16)$$

Значення P далі розглядається як критерій ймовірності зсувів.

Визначення довірчої нижньої границі критерію ймовірності та виділення аномальних зон, які відповідають зсувній небезпеці. Важливим є питання, з якого рівня ФКП і відповідно P слід зважати на зсувонебезпеку, тобто яке значення P є граничним для зсувонебезпеки. Якщо це з'ясувати, то аномальними обгрунтовано будуть вважатися зони з P , що є більшим від граничного. Для визначення граничного P необхідно використати розподіл значень ФКП по ділянці. Для цих значень ФКП буде інтегральна крива розподілу ймовірності ФКП (рис. 2). За цією кривою виділяються три рівні ФКП, для яких аномальні значення стано-

вляють 5, 10 і 25 відсотків усіх значень ФКП, тобто виділяється значення ФКП, для яких $P(x) = 0.95; 0.9; 0.75$. Значення таких ФКП відповідно будуть 1.59; 1.24; 0.65 (див. рис. 2). Загальноприйнятим у геології є рівень ймовірності для прийняття рішень 0.9 або 0.95 – залежно від відповідальності рішень [Никитин, 1986] (чим більша відповідальність, тим меншим є рівень ймовірності). Нехай, у даному випадку, відповідальність є високою, тому приймаємо для рішень ймовірність 0.9, якому відповідає значення ФКП 1.24. Беремо до уваги загальноприйнятий при геофізичних дослідженнях рівень похибки 10 %, після чого робимо остаточний висновок – значення ФКП ≥ 1.12 вважаються аномальними, а значення ФКП < 1.12 – фоновими.

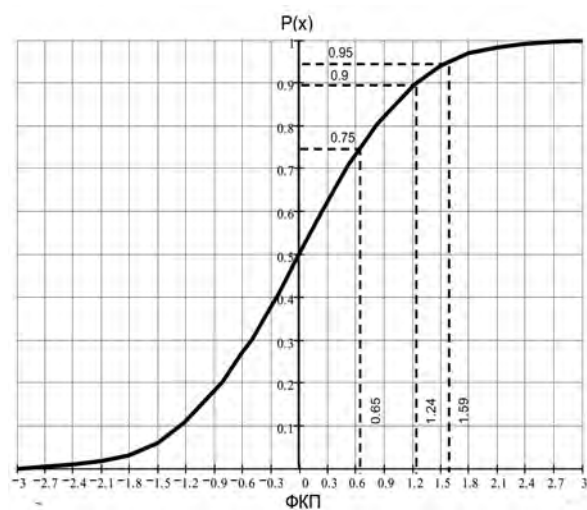


Рис. 2. Інтегральна крива розподілу ймовірностей функції комплексного показника

Додатковим критерієм виділення аномалії, що узгоджується зі зсувом, який прогнозується, вважається також підтвердження її як мінімум трьома ефективними геолого-геофізичними та геоморфологічними параметрами.

Трансформування розподілу критерію ймовірності зсувів у тривимірну модель. Тривимірні побудови є необхідною складовою та завершальним етапом подання геолого-геофізичної інформації, оскільки надають узагальнену картину результатів комплексної інтерпретації. 3D візуалізація дає можливість порівнювати геофізичну інформацію з інформацією інших видів досліджень (наприклад, геологічних) з метою оцінки вірогідності результатів інтерпретації, наочно та зрозуміло показати приуроченість аномалій до певних ділянок на місцевості. 3D побудови є інформативнішими, тобто на стандартному аркуші дозволяють подати максимум інформації в зручному для аналізу вигляді. Основними з таких побудов є ізометрична та ортогональна проєкції (рис. 3).

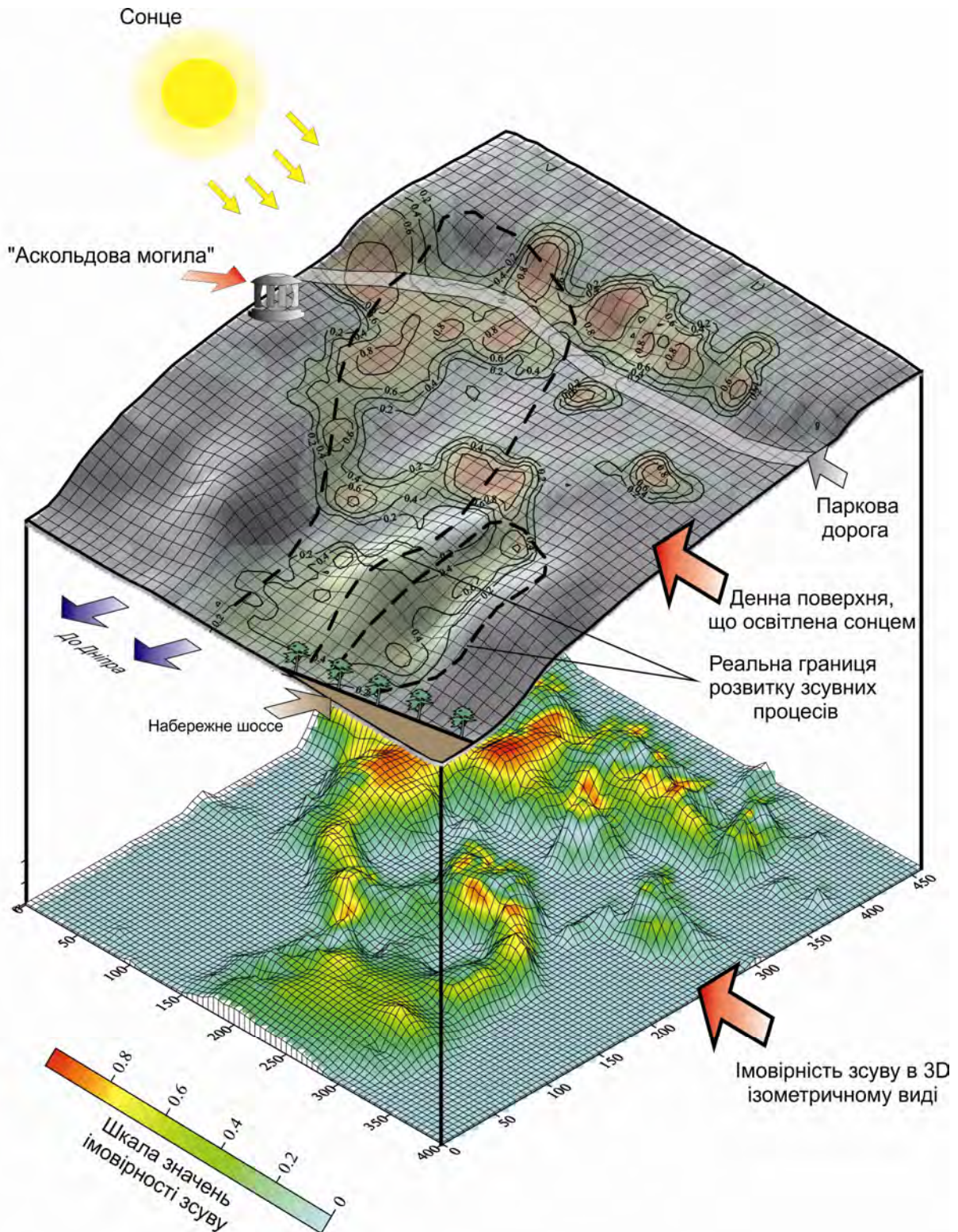


Рис. 3. Проекція критерію ймовірності розвитку зсуву на денну поверхню (ізометрія, “погляд з правого боку”). Ділянка Правобережна, м. Київ

Висновки

Розроблено методику та наведено детальний алгоритм проведення комплексної інтегрованої кількісної інтерпретації геолого-геофізичних даних, який передбачає прогнозування зсувних процесів на кількісному ймовірнісному рівні з використанням

функції комплексного показника ефективних параметрів, узгоджених із зсувною небезпекою.

Основним комплексом геофізичних методів дослідження зсувних процесів слід вважати таких: метод вертикального електричного зондування, метод природного імпульсного електромагнітного

поля Землі та метод природного електричного поля. Цей комплекс за необхідності деталізації можна доповнювати додатковими методами: заломлених хвиль, радіохвильового просвічування та еманційної зйомки.

За допомогою наведеної методики досліджено значну кількість зсувних та зсуво-небезпечних ділянок на забудованих територіях і в умовах проходження магістральних трубопроводів у Івано-Франківській, Чернівецькій, Закарпатській, Одеській, Харківській областях та на території Південного берега Криму.

Література

- Вахромеєв Г.С. Основы методологии комплексирования геофизических исследований при поисках рудных месторождений. – М.: Недра, 1978. – 152 с.
- Воробьев А.А. Равновесие и преобразование видов энергии в недрах. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 1980. – 211 с.
- Геофізичний моніторинг небезпечних геологічних процесів та екологічного стану середовища: тези доповідей II Міжнар. наук. конф., Київ, 8–10 жовт. 2001 р. – К.: КНУ ім. Т. Шевченка, 2001. – 74 с.
- Дослідження зсувних процесів геофізичними методами: монографія / Е.Д. Кузьменко, А.Ф. Безсмертний, О.П. Вдовина, І.В. Крив'юк, В.Д. Чебан, Л.В. Штогрин; за ред. Е.Д. Кузьменка. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2009. – 294 с.
- Жуков М.Н. Математична статистика і обробка геологічних даних: підручник / М.Н. Жуков. – К.: ВПЦ "Київський університет", 2008. – 518 с.
- Изучение оползней геофизическими методами / Н.Н. Горяинов, А.Н. Боголюбов, Н.М. Варламов и др. – М.: Недра, 1987. – 157 с.
- Карпатські зсуви: деякі геоморфологічні характеристики та зв'язок їх з літологією / Е.Д. Кузьменко, П.В. Блінов, О.М. Карпенко та ін. – Геоінформатика. – 2004. – № 1. – С. 74–83.
- Крив'юк І.В. Визначення зсувної небезпеки локального рівня з використанням геофізичних методів. Автореф. дис... к. геол. наук. – Київ: КНУ ім. Т. Шевченка. – 2012. – 19 с.
- Кузьменко Э.Д. Геофизические методы в системе пространственного прогнозирования оползней и их информативность // Мониторинг небезпечних геологічних процесів та екологічного стану середовища. IV Міжнар. наук. конф.: тези доп. – К.: Вид-во "Обрій". – 2003. – С. 82–84.
- Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Инженерная геодинамика. – Л.: Недра, 1977. – 479 с.
- Некоторые выводы из опыта проведения геофизических работ на оползневых участках / Э.Д. Кузьменко, Е.П. Вдовина, В.Д. Чебан, Д.Н. Ляшук // Строительство и техногенная безопасность: сб. науч. тр. – Симферополь: КАПКС. – 2002. – Вып. 6. – С. 127–130.
- Никитин А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации. – М.: Недра, 1986. – 342 с.
- О геомеханической природе потенциалов электрического поля в земной коре / В.В. Иванов, Б.Г. Тарасов, Э.Д. Кузьменко, Н.В. Гордийчук // Изв. ВУЗов. Геология и разведка. – 1991. – № 3. – С. 101–104.
- Семенов А.С. Электроразведка методом естественного электрического поля. – М.: Недра. 1980. – 446 с.
- Хархалис Н.Р. Особенности проявления естественного импульсного электромагнитного излучения на оползневом склоне // Геофиз. журн. – 1994. – Т. 16, № 4 – С. 58–61.
- Чебан В.Д. Комплекс геофізичних методів прогнозування зсувів на прикладі Закарпаття. Автореф. дис... к. геол. наук. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ. – 2002. – 19 с.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПОЛЗНЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Э.Д. Кузьменко, И.В. Кривюк, Л.В. Штогрин

Обоснована целесообразность использования комплексной интегрированной количественной интерпретации геолого-геофизических данных при прогнозировании оползневых процессов с применением геофизических методов. Такой подход предусматривает прогнозирование оползневых процессов на количественном вероятностном уровне с использованием функции комплексного показателя эффективных параметров, согласованных с оползневой опасностью. Выделен основной комплекс геофизических методов исследования оползневых процессов: метод вертикального электрического зондирования, метод естественного импульсного электромагнитного поля Земли и метод естественного электрического поля. Этот комплекс при необходимости детализации может дополняться другими методами: заломленных волн, радиоволнового просвечивания и эманационной съемки. Приведен детальный алгоритм проведения комплексной интегрированной количественной интерпретации геолого-геофизических данных. Обоснованы необходимые для комплексной интерпретации геолого-геофизические параметры, принципы трансформации входных и исходных параметров в эффективные. Геолого-геофизические параметры согласованы с оползневой опасностью на количественном уровне.

Ключевые слова: комплексная интегрированная количественная интерпретация; функция комплексного показателя; критерий вероятности развития оползней; геолого-геофизические данные; эффективные параметры.

**DEVELOPMENT OF THE TECHNIQUE OF LANDSLIDES FORECASTING
WITH THE APPLICATION OF GEOPHYSICAL METHODS****E.D. Kuzmenko, I.V. Kryvjuk, L.V. Shtogryn**

The appropriateness of use of complex integrated quantitative interpretation of geological and geophysical data for landslide processes forecasting with application of geophysical methods is proved. Such approach provides landslide processes forecasting at a quantitative probabilistic level with the use of function of a complex index of the effective parameters which are coordinated with landslide danger. The basic complex of geophysical methods of study of landslide processes is determined: a method of vertical electrical sounding, a method of a natural impulse electromagnetic field of the Earth and a method of natural electric field. At necessity of detailed elaboration this complex can be supplemented with additional methods: refraction shooting, radio wave raying and emanation survey. The detailed algorithm of carrying out of the complex integrated quantitative interpretation of the geological and geophysical data is resulted. Geological and geophysical parameters which are necessary for complex interpretation as well as principles of transformation of entrance and initial parameters into the effective are proved. Geological and geophysical parameters are coordinated with the landslide danger at a quantitative level.

Key words: the complex integrated quantitative interpretation; the function of a complex index; the criterion of probability of development of landslides; the geological-geophysical data; effective parameters.

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ*

Надійшла 6.06.2013