

УДК 624.042.7: 627.132

© Д.В. Стефанишин, д-р техн. наук

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ

## **ОЦІНКА РІВНЯ СЕЙСМІЧНОЇ НЕБЕЗПЕКИ В РАЙОНІ РОЗМІЩЕННЯ ДНІСТРОВСЬКОЇ ГАЕС ТА АНАЛІЗ ВПЛИВУ СЕЙСМІЧНОГО ФАКТОРА НА СТІЙКІСТЬ ДНІСТРОВСЬКОГО СХИЛУ**

*Виконано імовірнісну оцінку рівня сейсмічної небезпеки в районі розміщення Дністровської ГАЕС згідно з новими картами сейсмічного районування та проаналізовано вплив сейсмічного фактора на можливе порушення стійкості Дністровського схилу.*

**Ключові слова:** сейсмічна небезпека, карти сейсмічного районування, сейсмостійкість схилу, оцінка ймовірності

Серед основних проблем забезпечення безпечної експлуатації Дністровської ГАЕС слід відзначити проблему забезпечення стійкості Дністровського схилу, який є одним з ключових елементів єдиного природно-техногенного комплексу, що формується гідроспорудами Дністровської ГАЕС [1]. Враховуючи, що Дністровська ГАЕС розміщується в зоні дії потужних підкорових землетрусів із сейсмоактивної зони Вранча (Румунія), існує небезпека порушення порівняно невисокої, з наближенням до граничного стану, стійкості Дністровського схилу на ділянці основних гідроспоруд ГАЕС при сейсмічних впливах.

Згідно з чинними нормами [2] встановлюються спеціальні вимоги щодо сейсмостійкості основних гідроспоруд гідровузлів, що розміщуються в сейсмічно активних районах з нормативною сейсмічністю, яка характеризується інтенсивністю сейсмічних струшувань рівною 6 і більше балів за шкалою MSK-64. Однак Дністровський схил не є гідроспорудою, це природний схил, тому і менш потужні землетруси, з інтенсивністю менше 6 балів, також можуть нести загрозу для стійкості Дністровського схилу. При цьому вони є більш імовірними, адже мають менші періоди повторення.

При обґрунтуванні сейсмостійкості гідроспоруд використовуються два рівні сейсмічних навантажень [2]: проектний землетрус (ПЗ), який має сприйматися гідроспорудою без порушення режиму її нормальної експлуатації, і максимальний розрахунковий землетрус (МРЗ), при якому не допускається руйнування гідроспоруди. В якості ПЗ згідно з новими картами сейсмічного районування (карти ОСР-2004 [2, 3]) приймається землетрус з періодом повторення 1 раз в 500 років (карта ОСР-2004-А, рис. 1) або щорічною ймовірністю перевищення сейсмічної події  $2 \cdot 10^{-3}$ , рік<sup>-1</sup>; МРЗ – 1 раз в 5000 років (карта ОСР-2004-С, рис. 2) або щорічною ймовірністю перевищення сейсмічної події  $2 \cdot 10^{-4}$ , рік<sup>-1</sup>. Таким чином, гідроспоруди Дністровської ГАЕС розміщуються в зоні, де можливе виникнення землетрусів з інтенсив-

вністю сейсмічних струшувань 6 балів за шкалою MSK-64, що відповідають рівню ПЗ, і 7 балів за шкалою MSK-64, що відповідають рівню МРЗ.

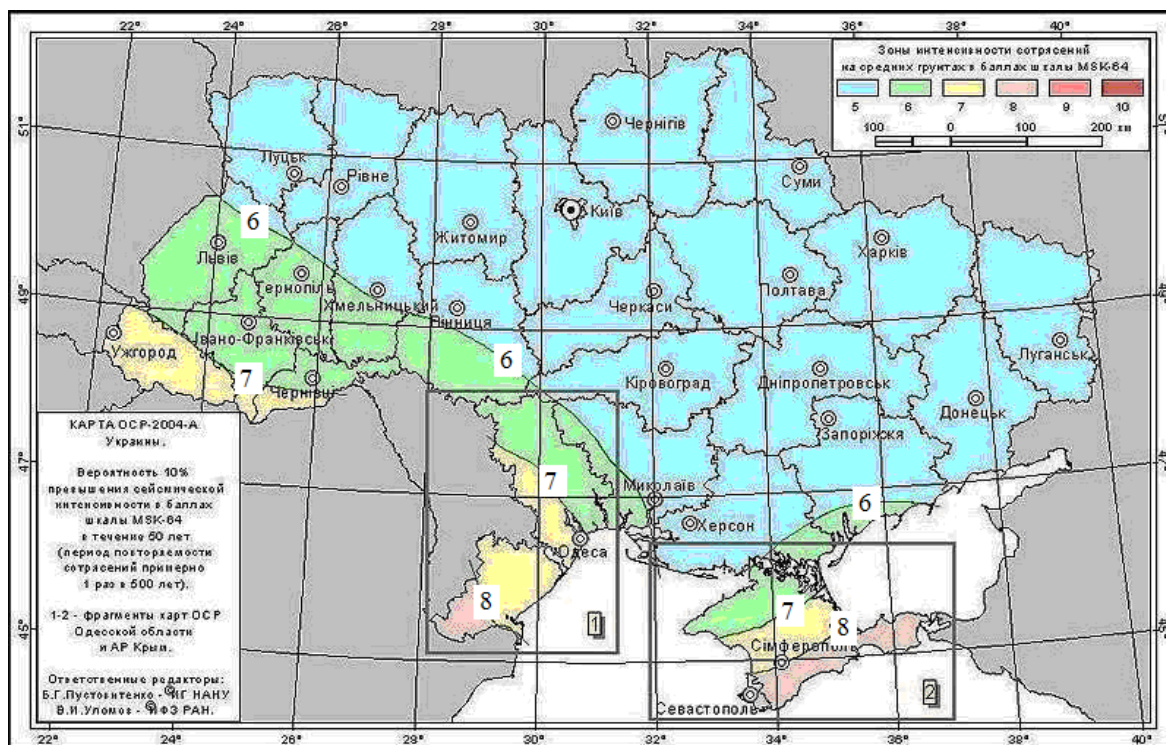


Рис. 1 — Карта сейсмічного районування ОСР-2004-А [2, 3]

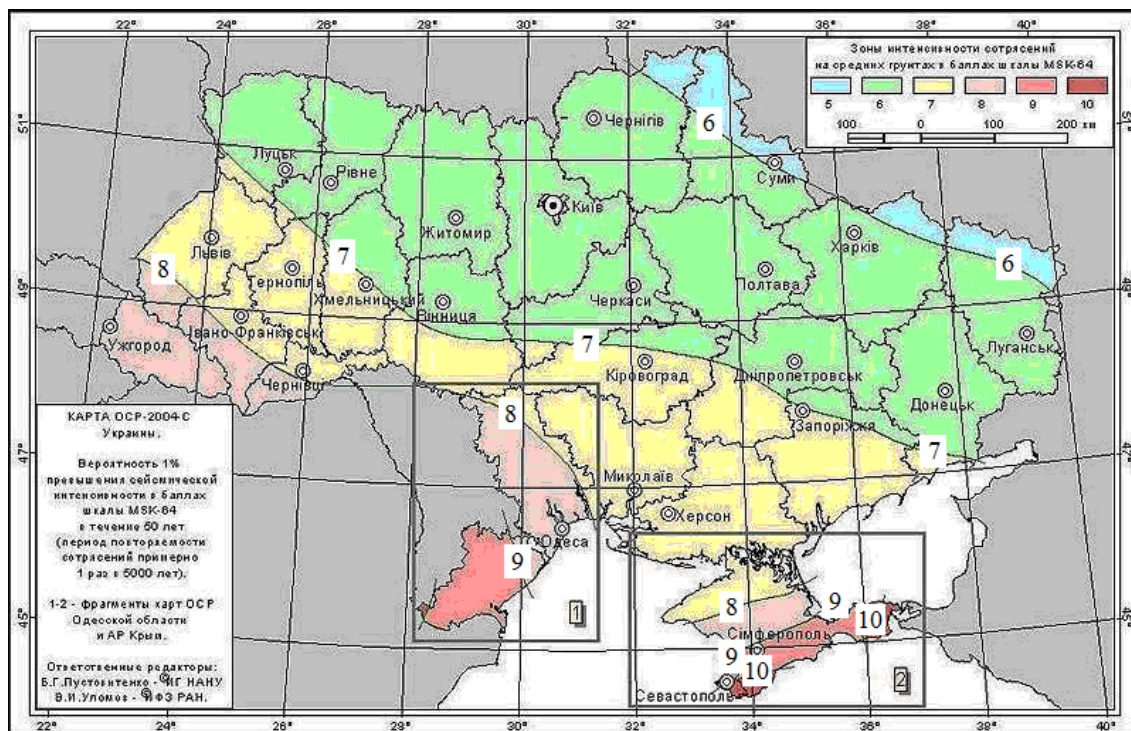


Рис. 2 — Карта сейсмічного районування ОСР-2004-С [2, 3]

При цьому, основною розрахунковою характеристикою, що характеризує рівень сейсмічної небезпеки для споруд, є максимальне сейсмічне прискорення  $a_{\max}$  в коливаннях частинок ґрунту на поверхні землі. Для середніх ґрунтів розрахункове максимальне прискорення для землетрусів інтенсивністю 7 балів приймають рівним  $0,1 \cdot g$ , де  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  – прискорення вільного падіння ( $\sim 100 \text{ см/с}^2$ ). Відповідно основні гідротехнічні споруди Дністровської ГАЕС та Дністровський схил при перевірці на МРЗ мають розраховуватися на дію максимального сейсмічного прискорення  $a_{\max}$  в коливаннях частинок ґрунту на поверхні землі  $a_{\max} = 0,1 \cdot g$ .

Однак між сейсмічною інтенсивністю  $I$  в балах шкали MSK-64 і максимальним прискоренням  $a_{\max}$  встановлюється більш складна імовірнісна залежність (див. рис. 3), згідно з якою одним і тим же значенням прискорення  $a_{\max}$  можуть відповідати різні інтегральні ймовірності  $P(a_{\max})$  (ймовірності неперевищення) при різній інтенсивності  $I$  землетрусів і, відповідно, при різних періодах їх повторення.

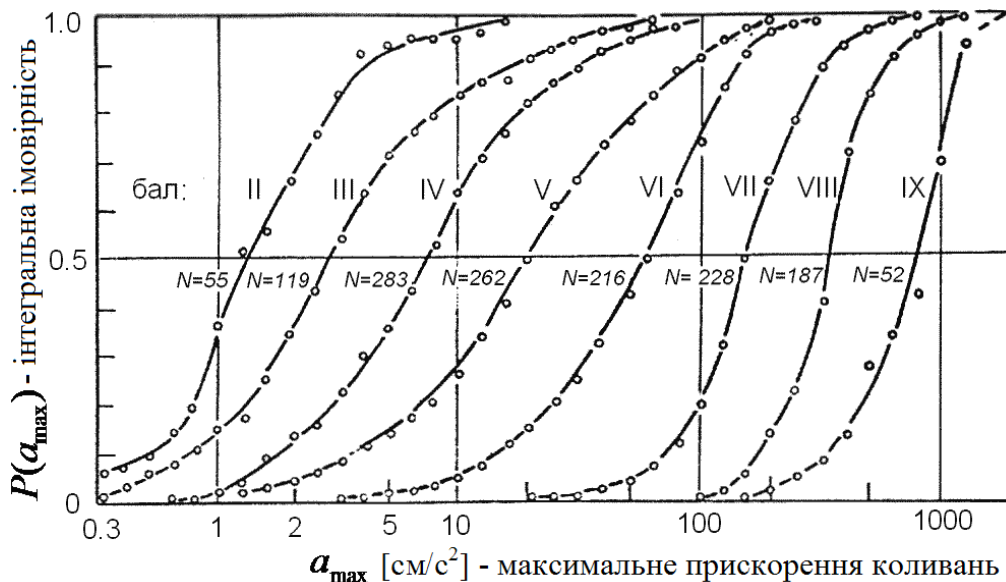


Рис. 3 — Характер імовірнісного зв'язку між сейсмічною інтенсивністю  $I$  в балах шкали MSK-64 і максимальним сейсмічним прискоренням  $a_{\max}$ ;

$N$  – кількість сейсмограм землетрусів, використаних для побудови графіків, що характеризують різну сейсмічну інтенсивність у балах [4]

Так, згідно з даними рис. 3 максимальне сейсмічне прискорення  $a_{\max} = 0,1 \cdot g$  може спостерігатися при землетрусах інтенсивністю 7 балів, 6 балів, а також і при землетрусах інтенсивністю 5 балів. При цьому забезпеченість (ймовірність перевищення) максимального сейсмічного прискорення  $a_{\max} = 0,1 \cdot g$  при землетрусі інтенсивністю 7 балів ( $I_7$ ) складає  $\sim 80\%$ , 6 балів ( $I_6$ )  $\sim 27\%$ , 5 балів ( $I_5$ )  $\sim 10\%$ .

Тобто умовні ймовірності перевищення максимального сейсмічного прискорення  $a_{\max} = 0,1 \cdot g$  при землетрусах з різною інтенсивністю в балах шкали MSK-64 будуть:  $P(a_{\max} \geq 0,1 \cdot g | I_7) = 0,8$ ;  $P(a_{\max} \geq 0,1 \cdot g | I_6) = 0,27$ ;  $P(a_{\max} \geq 0,1 \cdot g | I_5) = 0,1$ .

При цьому, з урахуванням щорічної ймовірності перевищення сейсмічних струшувань інтенсивністю 7 балів  $P(I \geq 7) = 2 \cdot 10^{-4}$ , рік<sup>-1</sup>, повна ймовірність перевищення (забезпеченість) максимального сейсмічного прискорення  $a_{\max} = 0,1 \cdot g$  в районі розміщення гідроспоруд Дністровської ГАЕС при землетрусах інтенсивністю не менше 7 балів буде:

$$P(a_{\max} \geq 0,1 \cdot g, I \geq 7) = P(I \geq 7) \cdot P(a_{\max} \geq 0,1 \cdot g | I_7) = 1,6 \cdot 10^{-4}, \text{ рік}^{-1}. \quad (1)$$

З урахуванням щорічної ймовірності перевищення сейсмічних струшувань інтенсивністю 6 балів  $P(I \geq 6) = 2 \cdot 10^{-3}$ , рік<sup>-1</sup>, повна ймовірність перевищення (забезпеченість) максимального сейсмічного прискорення  $a_{\max} = 0,1 \cdot g$  в районі розміщення гідроспоруд Дністровської ГАЕС при землетрусах інтенсивністю не менше 6 балів буде:

$$P(a_{\max} \geq 0,1 \cdot g, I \geq 6) = P(I \geq 6) \cdot P(a_{\max} \geq 0,1 \cdot g | I_6) = 5,4 \cdot 10^{-4}, \text{ рік}^{-1}. \quad (2)$$

Зауважимо, що повна ймовірність перевищення максимального сейсмічного прискорення  $a_{\max} = 0,1 \cdot g$  при землетрусах інтенсивністю не менше 6 балів  $P(a_{\max} \geq 0,1 \cdot g, I \geq 6)$  в районі розміщення гідроспоруд Дністровської ГАЕС є більшою за відповідну ймовірність  $P(a_{\max} \geq 0,1 \cdot g, I \geq 7)$  при землетрусах інтенсивністю не менше 7 балів. При цьому повна ймовірність перевищення максимального сейсмічного прискорення  $a_{\max} = 0,1 \cdot g$  при землетрусах інтенсивністю не менше 6 балів і менше 7 балів в районі розміщення гідроспоруд Дністровської ГАЕС також є більшою ймовірності  $P(a_{\max} \geq 0,1 \cdot g, I \geq 7)$ :

$$\begin{aligned} &P(a_{\max} \geq 0,1 \cdot g, 6 \leq I < 7) = \\ &= P(a_{\max} \geq 0,1 \cdot g, I \geq 6) - P(a_{\max} \geq 0,1 \cdot g, I \geq 7) = 3,8 \cdot 10^{-4}, \text{ рік}^{-1}. \end{aligned} \quad (3)$$

У зв'язку з відсутністю даних про періоди повторення землетрусів інтенсивністю 5 балів в районі розміщення Дністровської ГАЕС щорічну ймовірність перевищення сейсмічних струшувань інтенсивністю 5 балів  $P(I \geq 5)$  встановимо наступним чином.

Визначаємо повну ймовірність відсутності землетрусу інтенсивністю не менше шести балів протягом розрахункового періоду повторення шестибальних землетрусів в регіоні  $T_6 = 500$  років:

$$P(I \leq 6, T_6) = [1 - P(I \geq 6)]^{T_6} = 0,7633. \quad (4)$$

Далі встановлюємо відповідну їй щорічну ймовірність перевищення сейсмічних струшувань інтенсивністю менше 6 балів:

$$P(I < 6) = 1 - [1 - P(I < 6, T_6)]^{\frac{1}{T_6}} = 0,00288, \text{ рік}^{-1}. \quad (5)$$

Отриману оцінку, з запасом по ризику, округлюємо до  $P(I < 6) = 0,003, \text{ рік}^{-1}$ .

З метою перевірки можливості використання ймовірності  $P(I < 6) = 0,003, \text{ рік}^{-1}$ , в якості оцінки ймовірності  $P(I \geq 5)$ , за даними карт сейсмічного районування [2, 3] було здійснено екстраполяцію сейсмічних подій різної ймовірності перевищення біля м. Чернівці, де прогнозується можливість землетрусів різної інтенсивності: 8 балів (рис. 2), ймовірністю перевищення сейсмічних струшувань  $2 \cdot 10^{-4}, \text{ рік}^{-1}$ ; 7 балів, ймовірністю перевищення сейсмічних струшувань  $10^{-3}, \text{ рік}^{-1}$  (карта ОСР-2004-В, рис. 4); 6 балів, ймовірністю перевищення сейсмічних струшувань  $2 \cdot 10^{-3}, \text{ рік}^{-1}$  (рис. 1).

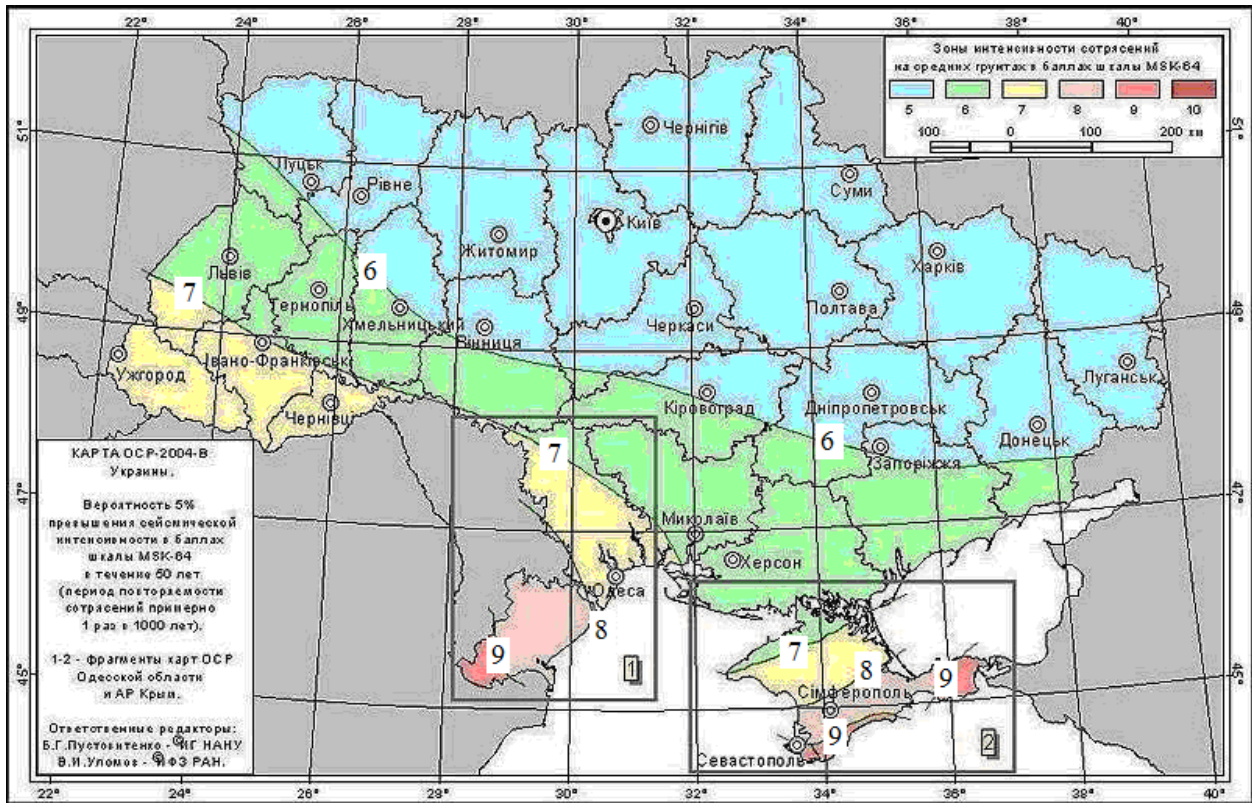


Рис. 4 — Карта сейсмічного районування ОСР-2004-В [2, 3]

Екстраполяція за трьома точками за допомогою логарифмічної функції дає ймовірність перевищення сейсмічних струшувань інтенсивністю 5 балів біля м. Чернівці в  $0,003, \text{ рік}^{-1}$  (рис. 5а). Аналогічна (логарифмічна) екстраполяція за двома точками для району, де розміщуються гідроспоруди Дністровської ГАЕС, дає  $0,004, \text{ рік}^{-1}$  (рис. 5б). Із запасом ризику приймаємо  $P(I \geq 5) = 0,004, \text{ рік}^{-1}$ .

З урахуванням щорічної ймовірності перевищення сейсмічних струшувань інтенсивністю 5 балів  $P(I \geq 5) = 4 \cdot 10^{-3}, \text{ рік}^{-1}$ , повна ймовірність перевищення (забезпеченість) максимального сейсмічного прискорення  $a_{\max} = 0,1 \cdot g$  в районі розміщення гідроспоруд Дністровської ГАЕС при землетрусах інтенсивністю не менше 5 балів буде:

$$P(a_{\max} \geq 0,1 \cdot g, I \geq 5) = P(I \geq 5) \cdot P(a_{\max} \geq 0,1 \cdot g | I_5) = 4 \cdot 10^{-4}, \text{ рік}^{-1}. \quad (6)$$

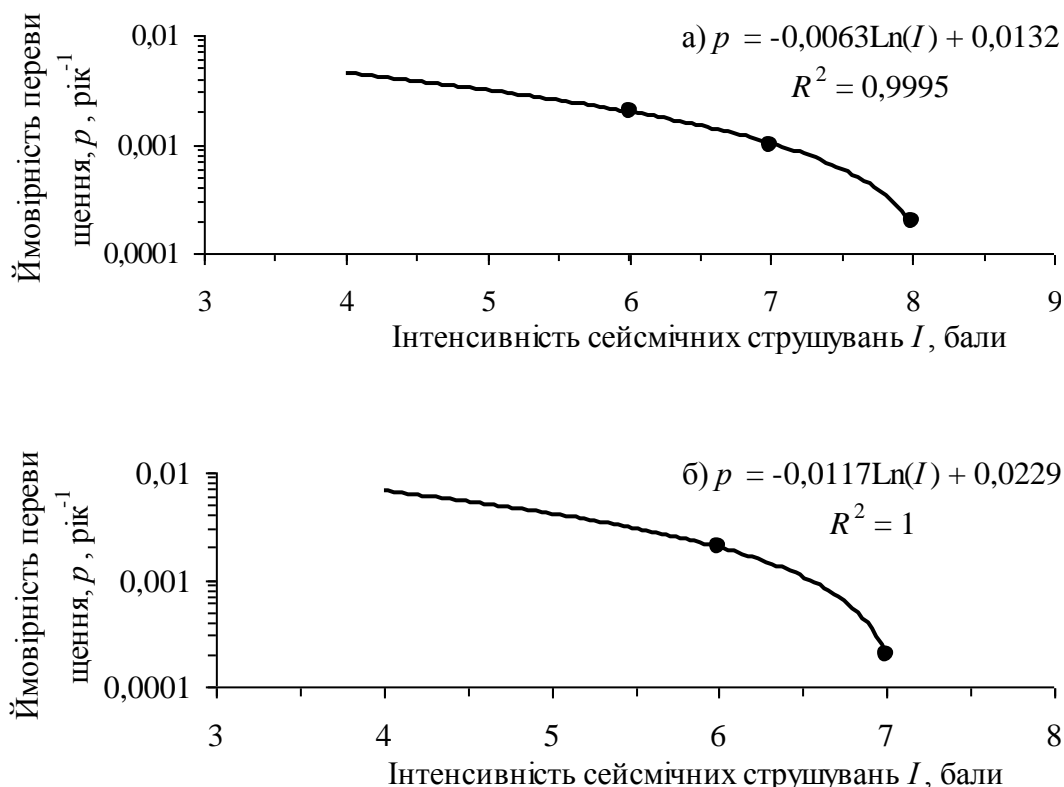


Рис. 5 — Модельні графіки щорічних ймовірностей перевищення сейсмічних струшувань:  
 а) біля м. Чернівці; б) в районі розміщення Дністровської ГАЕС

Відповідно повна ймовірність перевищення максимального сейсмічного прискорення  $a_{\max} = 0,1 \cdot g$  при землетрусах інтенсивністю не менше 5 балів і менше 6 балів в районі розміщення гідропоруд Дністровської ГАЕС буде:

$$\begin{aligned}
 P(a_{\max} \geq 0,1 \cdot g, 5 \leq I < 6) &= \\
 = P(a_{\max} \geq 0,1 \cdot g, I \geq 6) - P(a_{\max} \geq 0,1 \cdot g, I \geq 5) &= 1,4 \cdot 10^{-4}, \text{ рік}^{-1}.
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Повна ймовірність перевищення максимального сейсмічного прискорення  $a_{\max} = 0,1 \cdot g$  при землетрусах інтенсивністю не менше 5 балів при цьому буде:

$$\begin{aligned}
 P(a_{\max} \geq 0,1 \cdot g, I \geq 5) &= P(a_{\max} \geq 0,1 \cdot g, 5 \leq I < 6) + P(a_{\max} \geq 0,1 \cdot g, 6 \leq I < 7) + \\
 &+ P(a_{\max} \geq 0,1 \cdot g, I \geq 7) = 6,8 \cdot 10^{-4}, \text{ рік}^{-1},
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

з періодом повторення відповідної сейсмічної події ( $a_{\max} = 0,1 \cdot g$ ) рівним 1470 років.

Аналіз впливу різних за інтенсивністю землетрусів на можливе порушення стійкості Дністровського схилу здійснювався за ймовірністю на основі оцінки «внесків» («ваг») відповідних  $i$ -х землетрусів у повну ймовірність порушення стійкості схилу з урахуванням дії землетрусів інтенсивністю 5, 6 і 7 балів. Для цього визначалися відповідні «ваги» кожного з  $i$ -х землетрусів,  $i = \overline{5,7}$ , за наступною формулою (у відсотках):

$$w(E_i)\% = 100 \cdot \frac{P(E_i)}{\sum_{i=5}^7 P(E_i)}, \quad (9)$$

де  $P(E_i)$  – ймовірність порушення стійкості схилу внаслідок  $i$ -ї сейсмічної події;  $\sum_{i=5}^7 P(E_i)$  – в нашому випадку – повна ймовірність порушення стійкості схилу.

Оцінка ймовірності порушення стійкості Дністровського схилу при сейсмічних впливах виконувалася методом дерев відмов і несправностей [5]. Діаграма відповідного дерева відмов і несправностей з результатами розрахунків наведена на рис. 6.

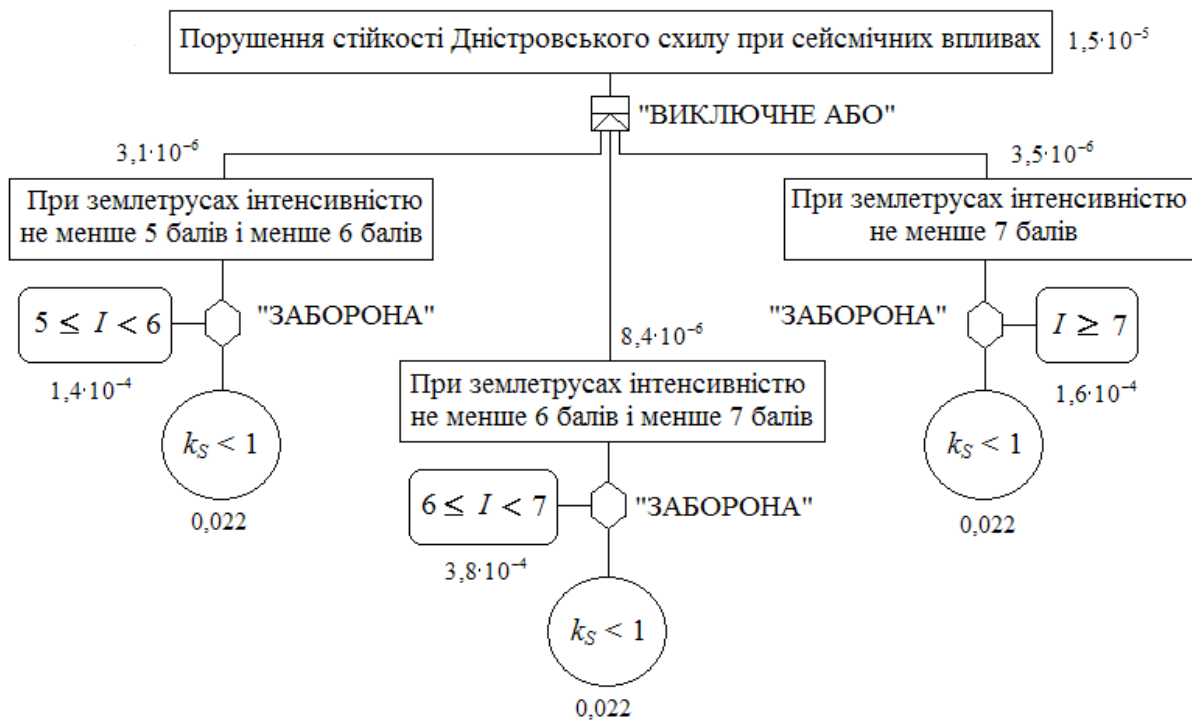


Рис. 6 — Дерево відмов і несправностей для оцінки ймовірності порушення стійкості Дністровського схилу при сейсмічних впливах

При оцінці умовної ймовірності порушення стійкості Дністровського схилу як ймовірності того, що коефіцієнт стійкості  $k_S$ , як випадкова величина, при дії сейсмічного прискорення  $a_{\max} = 0,1 \cdot g$  виявиться меншим за одиницю ( $k_S < 1$ ), враховувалося, що в цілому схил на ділянці основних споруд у природних умовах стійкий, але в граничному стані рівноваги знаходиться верхнє зсувне тіло, складене зміщеними розробленими пакетами верхньокрейдяних порід, яке окреслювалося потенційно можливою поверхнею зрушення I [1, 6]. Припускалося, що саме це тіло найімовірніше може втратити стійкість при сейсмічних впливах.

Умовна ймовірність порушення стійкості схилу як ймовірність того, що коефіцієнт стійкості  $k_S < 1$ , встановлювалася за результатами нормативних розрахунків стійкості схилу по поверхні зрушення I, яка окреслює верхнє зсувне тіло, при дії сейсмічного прискорення  $a_{\max} = 0,1 \cdot g$ . Були використані результати розрахунків, що проводилися в Укргідропроєкті

[6] різними методами: Чугаєва ( $k_{s,p} = 1,06$ ), Можевітінова-Шинтемірова ( $k_{s,p} = 0,985$ ), похилих сил взаємодії ( $k_{s,p} = 1,112$ ), Маслова-Берера ( $k_{s,p} = 0,915$ ), де  $k_{s,p}$  – розрахункове значення коефіцієнта стійкості (забезпеченістю  $p$ ). При цьому отриманим різними методами розрахунковим значенням коефіцієнта стійкості  $k_{s,p}$  приписувалася однакова міра довіри. Було побудовано варіаційний ряд та встановлено емпіричні ймовірності різних розрахункових значень коефіцієнта стійкості  $k_{s,p}$  (рис. 7).

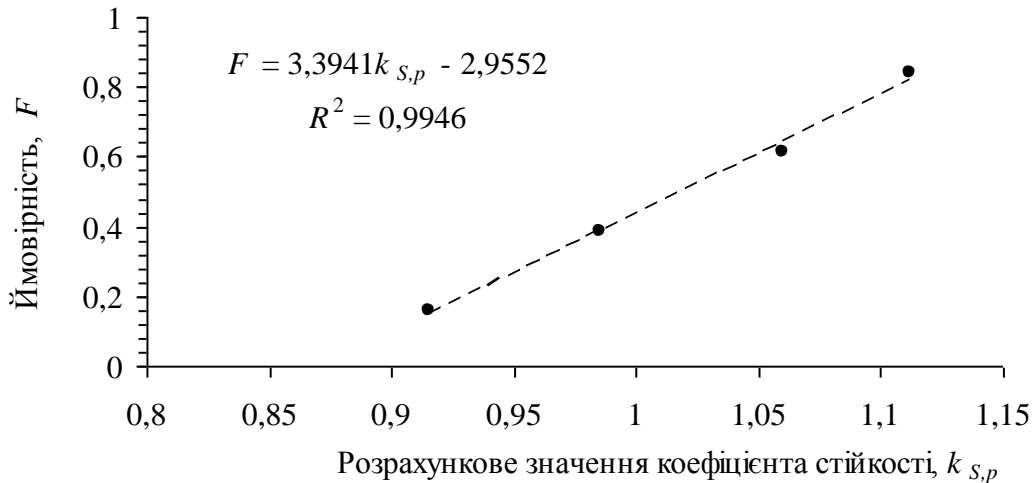


Рис. 7 — Графік емпіричної ймовірності  $F(k_s < k_{s,p})$  за даними нормативних розрахунків сейсмостійкості Дністровського схилу по поверхні зрушення I

За отриманою залежністю емпіричної ймовірності від розрахункових значень коефіцієнта стійкості  $k_{s,p}$  була встановлена емпірична ймовірність  $k_{s,p} = 1$ :  $F = 0,44$ . Далі припускалося, що при забезпеченості 95% розрахункових значень характеристик міцності порід проти зсуву ймовірність втрати стійкості схилу при  $k_{s,p} = 1$  складає 0,05. З урахуванням емпіричної ймовірності  $F = 0,44$  при розрахунковому значенні коефіцієнта стійкості  $k_{s,p} = 1$  схилу по поверхні зрушення I маємо умовну ймовірність втрати стійкості Дністровського схилу по цій поверхні при сейсмічних впливах з урахуванням сейсмічного фактору  $P(k_s < 1 | I) = 0,022$ . Можна показати, що при нормальному законі розподілу  $k_s$  ймовірність  $P(k_s < 1 | I) = 0,022$  відповідає середньому значенню коефіцієнта варіації для  $k_s$  близькому до 0,2, що погоджується з даними [7].

**У результаті розрахунків** були отримані наступні ймовірності порушення стійкості Дністровського схилу при сейсмічних впливах: повна ймовірність порушення стійкості схилу при сейсмічних впливах –  $1,5 \cdot 10^{-5}$ , рік<sup>-1</sup>; при землетрусах інтенсивністю не менше 5 балів і менше 6 балів –  $3,1 \cdot 10^{-6}$ , рік<sup>-1</sup>, що складає 20,6% повної ймовірності порушення стійкості схилу; при землетрусах інтенсивністю не менше 6 балів і менше 7 балів –  $8,4 \cdot 10^{-6}$ , рік<sup>-1</sup>, що складає 55,9% повної ймовірності порушення стійкості схилу; при землетрусах інтенсивністю не менше 7 балів –  $3,5 \cdot 10^{-6}$ , рік<sup>-1</sup>, що складає 23,5% повної ймовірності порушення стійкості схилу. Можна зробити висновок, що найбільший «вклад» у ймовірність порушення стійкості Дністровського схилу в районі гідропоруд Дністровської ГАЕС вносять землетруси інтенсивністю до 7 балів (76,5%).



**Список використаної літератури**

1. Стефанишин Д.В. Оцінка надійності ґрунтових гідротехнічних споруд Дністровської ГАЕС / Д.В. Стефанишин, О.В. Жеребят'єв // Вісник НУВГП. Зб. наукових праць. –Вип. 3 (47). – Частина 1. – Рівне: НУВГП. – 2009. – С.520-530.
2. ДБН В.1.1-12:2006. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівництво в сейсмічних районах України. Мінбудівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України. – К.: 2006. – 83 с.
3. режим доступу: <http://seismos-u.ifz.ru/zoning.htm>.
4. режим доступу: <http://wdc.org.ua/uk/node/178>.
5. Векслер А.Б. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений / А.Б. Векслер, Д.А. Ивашинцов, Д.В. Стефанишин. – СПб.: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2002. – 591 с.
6. Отчет по теме: Расчеты устойчивости склона на участке основных сооружений Днестровской ГАЭС. Этап 2. Расчеты устойчивости склона на участке основных сооружений Днестровской ГАЭС в строительный период и в период эксплуатации. 732-14-Т61. ОАО «Укргідропроєкт». – Харьков: 1994. – 33 с.
7. Стефанишин Д.В. Методика оцінки ймовірностей аварій на гідроспорудах на основі рандомізації результатів розрахунків споруд за методом граничних станів / Д.В. Стефанишин // Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво. Зб. наукових праць. – Вип. 34. –Рівне: НУВГП. – 2009. – С.109-115.

*Стаття надійшла до редакції 14.03.13 українською мовою*

**© Д.В. Стефанишин**

**ОЦЕНКА УРОВНЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ В РАЙОНЕ РАЗМЕЩЕНИЯ  
ДНЕСТРОВСКОЙ ГАЭС И АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ФАКТОРА  
НА УСТОЙЧИВОСТЬ ДНЕСТРОВСКОГО СКЛОНА**

*Выполнено вероятностную оценку уровня сейсмической опасности в районе размещения Днестровской ГАЭС в соответствии с новыми картами сейсмического районирования и проанализировано влияние сейсмического фактора на возможное нарушение устойчивости Днестровского склона.*

**© D.V. Stefanishin**

**ASSESSMENT OF SEISMIC HAZARD IN THE REGION OF THE DNIESTER PSP  
AND ANALYSIS OF THE IMPACT OF THE SEISMIC FACTOR  
ON STABILITY DNIESTER SLOPE**

*The probabilistic assessment of seismic hazard in the region of the Dniester PSP according to new seismic zoning maps was performed and the impact of the seismic factor of a possible violation of the stability of the Dniester slope was analyzed.*