

Коцюруба Володимир Іванович (доктор технічних наук, професор) ¹

Прошин Ігор Вікторович ¹

Сорокін Максим Вікторович ²

Пилипенко Олександр Ігорович ²

¹ Національний університет оборони України, Київ, Україна

² Інститут проблем математичних машин і систем Національної академії наук України, Київ, Україна

УДОСКОНАЛЕНА МЕТОДИКА ПРОГНОЗУВАННЯ НАСЛІДКІВ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ТЕРОРИСТИЧНОГО ХАРАКТЕРУ НА ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУДАХ

Метою статті є удосконалення методики прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій терористичного характеру на гідротехнічних спорудах. Під час написання проведення дослідження застосовано гідродинамічну імітаційну модель COASTOX, що заснована на розв'язанні системи рівнянь мілкої води Сен-Венана на неструктурованих трикутних сітках, метод прогнозування умов руху, статистичні методи для оцінювання масштабу та характеру зруйнувань, кількості постраждалого населення у районах виникнення надзвичайних ситуацій, пов'язаних зі зруйнуванням гідротехнічних споруд. Зазначений методологічний підхід дає змогу розширити межі прогнозованих оцінок із одночасним аналізом впливу наслідків надзвичайної ситуації як на цивільне населення, критичну інфраструктуру, так і на результативність застосування озброєння та військової техніки в районах активних та пасивних затоплень місцевості. У статті наведено сукупність взаємопов'язаних методів для дослідження проблемних питань прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій терористичного характеру на гідротехнічних спорудах, що змістовно входять до вказаної удосконаленої методики, яка на відміну від існуючих, додатково враховує зниження прохідності місцевості поза шляхами за перезволоження ґрунтів різної категорії, неоднорідність щільності забудови урбанізованої місцевості та густини заселеності районів виникнення надзвичайних ситуацій в межах зон затоплень під час зруйнування гідротехнічних споруд, що дає змогу визначити умови руху транспорту поза шляхами, вплив наслідків надзвичайної ситуації на цивільну інфраструктуру й цивільне населення та підвищити точність прогнозованих оцінок. Запропонована Методика має суттєве значення для теорії та практики цивільного захисту і може бути використана як для проведення наукових досліджень, так і для проведення практичних розрахунків під час прогнозування масштабів та обсягів негативного впливу наслідків зруйнування гідротехнічних споруд. Проведені розрахунки із використанням удосконаленої методики дали змогу здійснити верифікацію та підтвердити адекватність розглянутого науково-методичного апарату.

Ключові слова: надзвичайна ситуація, гідротехнічна споруда, ризик персоналу, засоби повітряного нападу, гідродинамічна аварія, затоплення місцевості, об'єкти критичної інфраструктури.

Вступ

Постановка проблеми. Гідродинамічна аварія – це аварія на гідротехнічній споруді (далі – ГТС), коли вода поширюється з великою швидкістю, що, в свою чергу, створює загрозу виникнення надзвичайної ситуації техногенного характеру. Такими аваріями в Україні можуть стати прориви гребель (дамб, шлюзів) з утворенням хвиль прориву та катастрофічних затоплень або з утворенням проривного паводку, і аварійні спрацьовування водосховищ гідроелектростанцій (далі – ГЕС) у зв'язку із загрозою проривів ГТС. Характерним для катастрофічного затоплення у разі руйнування ГТС є велика швидкість поширення (3...25 км/год), висота (10...20 м) та ударна сила 5...10 т/м² хвили

прориву і велика швидкість затоплення значної за площею території.

В умовах повномасштабної агресії постала загроза цілеспрямованого ураження ГТС збройними силами російської федерації, адже протягом всього часу ведення воєнних дій ворог досить часто застосовує зброю проти цивільного населення, руйнує критичну інфраструктуру із застосуванням засобів повітряного нападу (далі – ЗПН) [1]. Отже, дослідження факторів руйнування ГТС та прогнозування наслідків такого руйнування в даний час є вкрай актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У Значний внесок у вивчення наслідків надзвичайних ситуацій на гідроспорудах, зокрема, їх впливу на ведення бойових дій, оцінки ймовірностей аварій

на гідроспорудах в результаті екстремальних явищ, зробили сучасні українські науковці Д. Стефанишин [2], Ю. Убайдулаєв та В. Бурбашиш [3]. Останнім часом закордонні та вітчизняні науковці почали надавати значно більше уваги дослідженню проблемних питань виникнення техногенних ситуацій внаслідок терористичних актів, зокрема зруйнування ГТС за допомогою ЗПН противника. Наприклад у [4] наведена методика розрахунку наслідків поломки (руйнування) ГТС критичної інфраструктури. У публікації наведено приклад повного зруйнування ГТС, що стає певним обмеженням питання врахування різного характеру та ступеню їх пошкоджень. Цей факт унеможливило дослідження результатів ураження ГТС різного типу та з різними технічними характеристиками (наприклад: маса бойової частини крилатої ракети). У [5] наведена удосконалена методика оцінювання загроз і ризиків для об'єктів критичної інфраструктури за сценаріями розвитку надзвичайних ситуацій. При цьому, у переважній більшості праць за даною тематикою не враховано важливий фактор – обмеження маневрених можливостей військ при перезволоженні ґрунтів, недостатньо уваги приділяється врахуванню неоднорідності щільності забудови населених пунктів та густина населеності районів виникнення надзвичайних ситуацій. В цілому, виникає потреба щодо продовження досліджень проблемних питань прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій на гідротехнічних спорудах.

Врахування вказаних факторів започатковано у попередніх авторських публікаціях [6–8]. Водночас, врахування вищезазначених умов та факторів під час прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій терористичного характеру на ГТС досі залишається актуальним науковим завданням.

Метою статті є удосконалення методики прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій терористичного характеру на гідротехнічних спорудах.

Виклад основного матеріалу дослідження

Методика прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій терористичного характеру на ГТС (далі – Методика) призначена для визначення числових значень прогнозованих показників впливу наслідків активних та пасивних затоплень на маневрені можливості військ, руйнування інфраструктури та втрати серед цивільного населення в районах виникнення надзвичайних ситуацій.

До сукупності прогнозованих показників оцінювання наслідків надзвичайних ситуацій на ГТС терористичного характеру входять:

умови руху по прохідності місцевості поза шляхами руху та швидкісні характеристики;

площа затопленої території місцевості;
кількість зруйнованих та пошкоджених об'єктів, що попали до зони затоплення;
кількість постраждалих, загиблих та поранених осіб під час пасивних та активних затоплень.

Як обмеження та припущення дослідження приймаються середньостатистичні числові значення даних щодо заселеності районів у межах населених пунктів. Методика не враховує міграційні процеси суспільства, які притаманні сучасним умовам в Україні.

Структурно-логічна схема удосконаленої Методики наведена на рисунку 1.

Вхідними даними (блок 1 рис. 1) для проведення розрахунків є:

параметри водосховища, ГТС;
технічні характеристики засобів ураження противника, що застосовуються по ГТС;
фізико-географічні та погодні умови (характеристики водної перешкоди та прилеглої території місцевості);

тип озброєння та військової техніки, що застосовується у районі;

щільність забудови прилеглих до водної перешкоди урбанізованих районів;

густина заселеності районів виникнення надзвичайних ситуацій в межах зон затоплень.

У блоці 2 рис. 1 проводять моделювання процесів зруйнування ГТС засобами ураження противника та визначення параметрів зон затоплень із використанням удосконаленої математичної моделі [7; 8]. Порівняльне оцінювання достовірності отриманих результатів моделювання [7] підтверджено високим збігом із результатами, отриманими із застосуванням гідродинамічної імітаційної моделі COASTOX, що є сертифікованим програмним продуктом.

Модель COASTOX – двовимірна гідравлічна модель, розроблена Інститутом проблем математичних машин і систем Національної академії наук України [9; 10]. Принцип роботи моделі заснований на розв'язанні системи рівнянь Сен-Венана (рівнянь мілкої води) на неструктурованих трикутних сітках. Модель дає змогу моделювати динаміку потоку води в просторі та часі, зокрема, у випадку прориву гідротехнічних та гідрозахисних споруд. Модель є аналогом моделі HEC-RAS-2D [11], яка використовується корпусом інженерів США, а саме, для моделювання проривів ГТС.

Раніше модель COASTOX використовувалась для розрахунку зон затоплення у випадку аномальних скидів через греблю Київської ГЕС [12], а також для розрахунку динаміки водного переносу радіонуклідів, що потрапили у водне середовище внаслідок аварій на Чорнобильській атомній електростанції [13] та атомній електростанції Фукусіма Дайїчі [14].

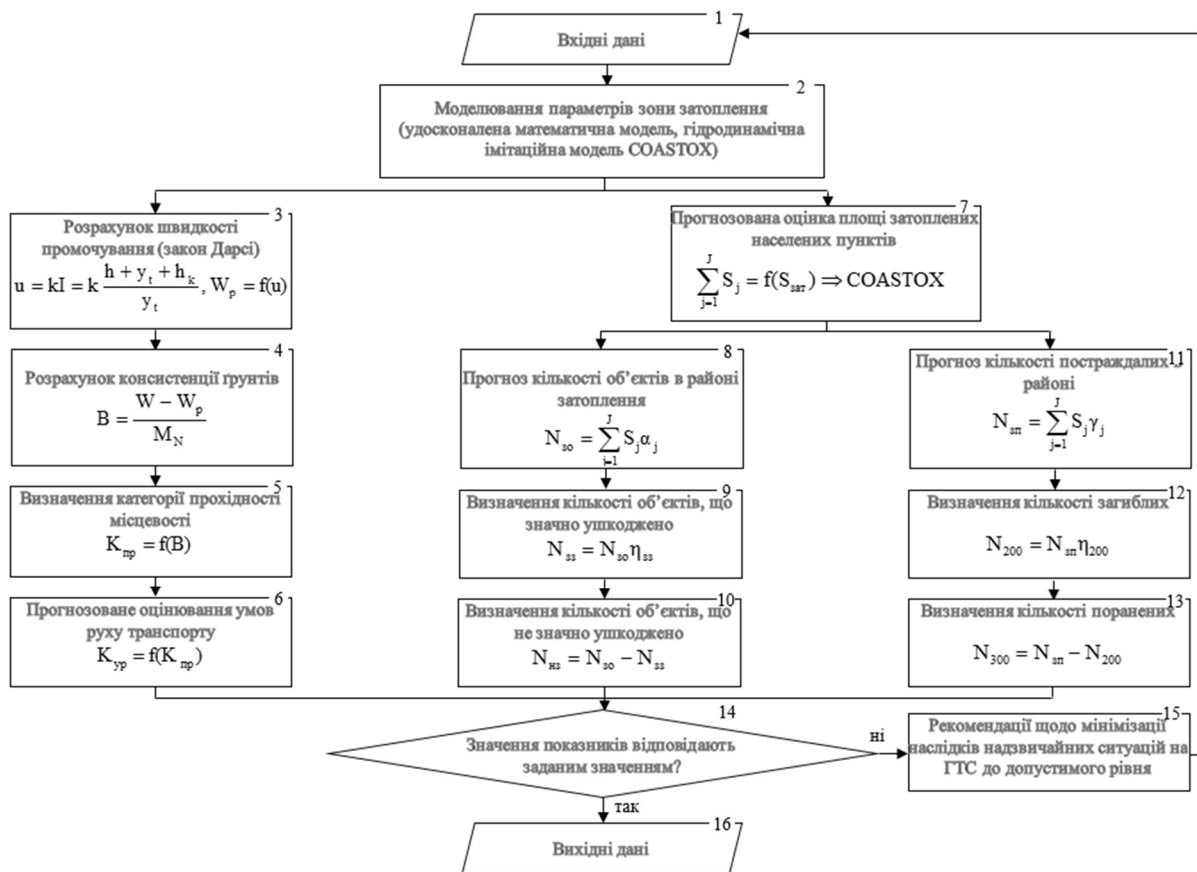


Рисунок 1 – Структурно-логічна схема удосконаленої методики прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій терористичного характеру на гідротехнічних спорудах

Формулювання моделі та паралелізація її алгоритмів. Для описання динаміки поверхневих вод у моделі COASTOX використовуються двовимірні рівняння мілкої води (далі – РМВ), що описують адвекцію водних мас за заданим рельєфом під дією гравітації з урахуванням гідростатичного тиску і донного тертя:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \vec{F} = S, \quad (1)$$

де U – вектор змінних, $\vec{F} = (E, G)$ - вектор конвективного потоку, $\vec{F}^d = (E^d, G^d)$ – вектор дифузійного потоку (E і G - компоненти в x та y напрямках), S — вектор вільних членів, що визначаються відповідно до [11]:

$$U = \begin{bmatrix} h \\ q_x \\ q_y \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$E = \begin{bmatrix} uh \\ uq_x + \frac{1}{2}gh^2 \\ uq_y \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$G = \begin{bmatrix} vh \\ vq_x \\ vq_y + \frac{1}{2}gh^2 \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ -gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \tau_x^\eta \\ -gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \tau_y^\eta \end{bmatrix}. \quad (5)$$

де η, ξ – рівні поверхні землі та вільної поверхні води; h – глибина води ($= \xi - \eta$); u, v – x та y компоненти осередненої по глибині швидкості потоку; q_x, q_y – компоненти витрати води через одиничну ширину; g – прискорення вільного падіння; ρ – густина води; $\partial \eta / \partial x, \partial \eta / \partial y$ - похили річкового дна в x та y напрямках; τ_x^η, τ_y^η – компоненти дотичного напруження на дні Донне тертя в (2) апроксимоване квадратичною залежністю від швидкості течії:

$$\tau_x^\eta / \rho = c_b u U, \tau_y^\eta / \rho = c_b v U, U = \sqrt{u^2 + v^2}, \quad (6)$$

з коефіцієнтом тертя c_b , що задається формулами Манінга $c_b = g n^2 / h^{1/3}$ $c_b = g n^2 / h^{1/3}$ (n – коефіцієнт шорсткості Манінга).

Чисельні схеми рівнянь моделі отримані на основі методу контрольних об'ємів, відповідно до якого область моделювання дискретизується на неструктуровану розрахункову сітку із трикутними комірками – контрольними об'ємами (рис. 2). Дискретизація рівнянь моделі здійснюється шляхом інтегрування їх по контрольним об'ємам, із

заміною об'ємного інтеграла від дивергенції конвективного потоку інтегралом по границі об'єму. Після апроксимації похідної за часом чисельною різницею, об'ємних інтегралів середніми значеннями векторів в об'ємі, а інтегралів по границі трикутних комірок сумою по їхніх ребрах, замість диференціальних рівнянь (1) - (5) отримуємо систему алгебраїчних рівнянь для всіх трикутних комірок, що складають розрахункову сітку моделі:

$$\Delta A_p \frac{\Delta U_p}{\Delta t} = - \sum_{k=1}^3 \vec{F}_k \cdot \vec{n}_k \Delta l_k + \Delta A_p S_p, \quad (7)$$

де p – індекс комірки, Δt – часовий крок, ΔA_p – площа комірки p , \vec{n}_k – одинична нормаль до її k -го ребра ($\vec{n} = (n_x, n_y)$), Δl_k – довжина ребра k .

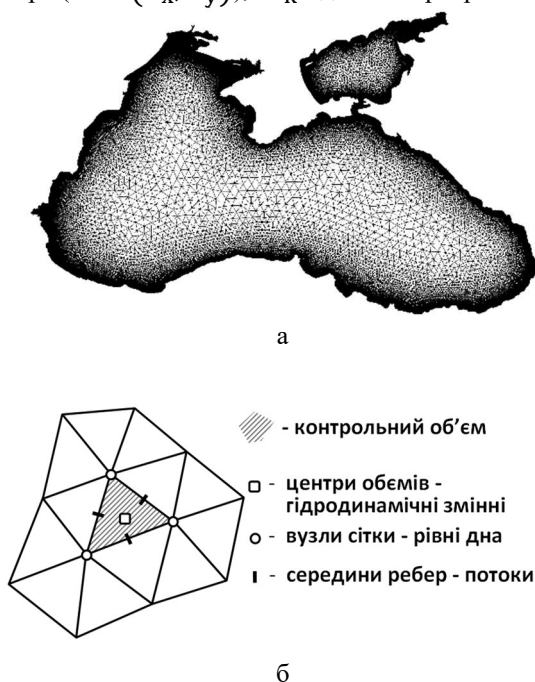


Рисунок 2 – Дискретизація області моделювання із використанням рівняння мілкої води:
а – приклад неструктурованої сітки моделі для Чорного і Азовського морів;
б – збільшене зображення контрольного об'єму.

Алгоритм розв'язання рівнянь (7) ґрунтується на явній схемі SEA [10]. Розв'язування виконується ітераційно за часом відповідно до явного двоетапного методу Рунге-Кутта типу предиктор-коректор з використанням двох різних методів розрахунку конвективних потоків на етапах предиктора і коректора, завдяки чому досягається 2-ий порядок у часі та просторі. Для розрахунку потоків на етапі предиктора використовується схема обчислення потоку Годуновського типу із наближеними методами розв'язання задачі Рімана: HLLC чи Роу. На етапі коректора потоки рахуються безпосередньо, вниз за потоком, використовуючи стани задачі Рімана. Для врахування течій із різкою зміною параметрів, загальний конвективний потік через ребро комірки на етапі коректора

формулюється із використанням TVD обмежувача потоку. Доданок у векторі вільних членів, обумовлений похилом дна, також обчислюється за двоетапною схемою предиктора-коректора. Внесок донного тертя в (7) розраховується останнім за напівявною схемою, що не впливає на явний характер чисельної схеми розрахунку інших доданків. Оскільки чисельна схема моделі явна, її стабільність забезпечується вибором мінімального часового кроку за умовою Куранта [11].

Описані чисельні схеми реалізовано в програмному кодї моделі за допомогою мови програмування FORTRAN у вигляді циклів по вузлах розрахункової сітки, комірках або ребрах комірок. Їхня особливість в тому, що ітерації більшості циклів незалежні, а обчислення локальні. Незалежність ітерацій циклів за елементами сітки дозволяє не реорганізувати алгоритми для виділення незалежних підзадач. Кожна ітерація циклу фактично є незалежною підзадачею. Тож алгоритми можуть бути розпаралелені засобами багатопотокового програмування. Кожній ітерації або групі ітерацій ставиться у відповідність паралельний потік, який може оброблятися незалежно від інших потоків. Потоки обробляються процесорами багатопроцесорної системи паралельно порція за порцією доти, доки не будуть оброблені всі елементи сітки.

У блоках 3–6 рис. 1 визначають числові значення прогнозованих показників оцінювання наслідків активних та пасивних затоплень на маневрені можливості військ, що ключовою різницею з попередніми доступними публікаціями у предметній галузі та складає перший елемент наукової новизни удосконаленої Методики.

Розрахунок швидкості промочування ґрунту здійснюють у блоці 3 із використанням закону Дарсі [11]. Із використанням результатів розрахунку визначають вологість ґрунту на границі розкочування, що відповідає переходу ґрунту з пластичного стану у твердий W_p .

У блоці 4 рис. 1 розраховують показник консистенції ґрунтів:

$$B = \frac{W - W_p}{M_N}, \quad (8)$$

де W – природна вагова вологість ґрунту, %; W_p – вологість ґрунту на границі розкочування, що відповідає переходу ґрунту з пластичного стану у твердий, %; M_N – число пластичності ґрунту, що є основною класифікаційною ознакою ґрунтів. За $B > 1$ ґрунти знаходяться в текучому стані, а за $B < 0$ – у твердому. Проміжні значення показника консистенції $1 \geq B \geq 0$ характеризують ступінь пластичності ґрунтів. На основі визначеного показника встановлюють категорію прохідності $K_{пр}$ (блок 5 рис. 1) відповідно до [6].

У блоці 6 рис. 1 здійснюють прогнозоване оцінювання умов руху транспорту $K_{ур}$ [6], які використовують під час планування застосування військ (сил) із урахуванням їх маневрених можливостей.

Прогнозування характеру й обсягів зруйнувань та постраждалого цивільного населення у районах виникнення надзвичайних ситуацій, що пов'язано із зруйнуванням ГТС, здійснюють у блоках 7–13 рис. 1. Під час отримання результатів прогнозованих оцінок додатково враховують щільність забудови α_j , прилеглих до водної перешкоди урбанізованих районів, та густину заселеності районів виникнення надзвичайних ситуацій γ_j в межах зон затоплень, що складає другий елемент наукової новизни удосконаленої Методики.

Зокрема, із використанням моделі COASTOX у блоці 7 визначають сумарну площу населених пунктів, що потрапляють до зони затоплення:

$$\sum_{j=1}^J S_j = f(S_{\text{зат}}), \quad (9)$$

де $f(S_{\text{зат}})$ – функція належності до загальної площі затоплення місцевості.

Прогнозна кількість об'єктів (будівель) в районі затоплень, що можуть отримати пошкодження різного ступеня визначають у блоці 8 рис. 1 за формулою:

$$N_{30} = \sum_{j=1}^J S_j \alpha_j, \quad (10)$$

α_j – щільність забудови урбанізованої місцевості в межах районів виникнення надзвичайних ситуацій, км^{-2} .

Ступінь терористичного впливу по відношенню до ушкодження будівель цивільної інфраструктури відповідно [4; 5] класифікують за трьома основними вражаючими факторами, які в більшому або меншому ступені проявляються при скоєнні терористичних актів з переважним застосуванням ЗПН противника. Перший вражаючий фактор – це кінетичний удар ЗПН. Другий – це пожежа, що виникає внаслідок горіння палива ЗПН. Третій – це фугасна дія та дія ударної хвилі, яка виникає під час вибуху палива, або вибухівки, завантаженої ЗПН.

В урбанізованій місцевості для споруд та інших об'єктів розрізняють чотири ступеня руйнування: повне, сильне, середнє та слабке [5]. У Методиці прийнято, що повне та сильне руйнування споруд віднесено до значних пошкоджень об'єктів інфраструктури. Середнє та слабке – до незначних.

Отже, прогнозовану кількість значно пошкоджених об'єктів інфраструктури (блок 9 рис. 1) визначають як:

$$N_{33} = N_{30} \eta_{33}, \quad (11)$$

де η_{33} – показник відносних середньостатистичних оцінок значно пошкоджених об'єктів інфраструктури (за досвідом зруйнування ГТС приймають рівним 0,15...0,2).

Значення прогнозованої кількості не значно пошкоджених об'єктів інфраструктури (блок 10 рис. 1) визначають за формулою:

$$N_{\text{нз}} = N_{30} - N_{33}. \quad (12)$$

У блоці 11 рис. 1 здійснюють прогноз загальної кількості постраждалих у районі виникнення надзвичайної ситуації, пов'язаної із зруйнуванням ГТС:

$$N_{\text{зп}} = \sum_{j=1}^J S_j \gamma_j, \quad (13)$$

де γ_j – густина заселеності районів виникнення надзвичайних ситуацій в межах зон затоплень.

Кількість загиблих серед цивільного населення визначають у блоці 12 за формулою:

$$N_{200} = N_{\text{зп}} \eta_{200}, \quad (14)$$

де η_{200} – показник відносних середньостатистичних оцінок загиблих (за досвідом зруйнування ГТС приймають рівним 0,05...0,1). Прогнозовану оцінку кількості поранених (блок 13) здійснюють як:

$$N_{300} = N_{\text{зп}} - N_{200}. \quad (15)$$

У блоці 14 рис. 1 здійснюють оцінювання за визначеними показниками на основі критерію по придатності шляхом порівняння отриманих числових значень із заданими.

Блок 15 рис. 1 – розроблення рекомендацій щодо мінімізації наслідків надзвичайних ситуацій терористичного характеру на ГТС до допустимого рівня та змінюють вхідні данні блоку 1 рис. 1.

Рекомендації мають бути умовно розподілені:

1. За цільовою аудиторією:

для потреб виконання бойових (спеціальних) завдань Збройними Силами України та іншими складовими Сил оборони держави;
в інтересах цивільної інфраструктури та цивільного населення.

2. За характером реалізації:

організаційні;
інженерно-технічні.

Отже, до організаційних заходів в інтересах Збройними Силами України та іншими складовими Сил оборони держави може бути віднесено:

врахування результатів прогнозних оцінок щодо масштабів затоплення та прохідності місцевості під час планування застосування військ (сил);

своєчасне сповіщення про повітряні удари та терористичні атаки іншого характеру по ГТС;

організація охорони та оборони, протиповітряного прикриття та РЕБ тощо.

Інженерно-технічними заходами можуть бути наступні:

інженерне обладнання критичних елементів об'єктів критичної інфраструктури, як заходи інженерного захисту ГТС;

зниження помітності критичних елементів шляхом застосування аерозольних завіс та інженерних засобів маскуванню;

імітація фізичних полів, наприклад, ефективної площі розсіювання із використанням кутикових відбивачів;

передбачення наявності переправних засобів та інженерного майна для покращення умов прохідності місцевості, наприклад, збірно-розбірного дорожнього покриття, резервування дорожньо-мостових споруд тощо.

В інтересах цивільної інфраструктури та цивільного населення організаційними заходами можуть бути:

врахування результатів прогнозних оцінок щодо масштабів затоплення під час планування заходів цивільного захисту;

своєчасне оповіщення населення про надзвичайні ситуації на ГТС;

організація евакуації місцевого населення із районів затоплень;

надання оперативної домедичної допомоги та евакуація постраждалих;

обладнання системи зв'язку, забезпечення постраждалого населення первинно необхідними матеріальними засобами;

підготовка пунктів обігріву та харчування, створення запасу питної води тощо.

Інженерно-технічними заходами є:

обов'язкове врахування можливих наслідків надзвичайних ситуацій на ГТС під час забудови прибережних районів;

обладнання інженерними спорудами русла водних перешкод для зменшення зон затоплень тощо.

Блок 16 рис. 1 – узагальнення вихідних даних на основі прогнозованих оцінок наслідків надзвичайних ситуацій при зруйнуванні ГТС.

Наведемо приклад використання методики. Розглянемо Дніпровський каскад ГЕС, який складається з 6 ГЕС. Найбільша з них – Дніпровська ГЕС потужністю 1500 МВт. Загальна площа водосховищ – 6950 км². Повний об'єм акумульованої води – 43,9 км³. Можливі варіанти застосування противником ЗПН для ураження Дніпровської ГЕС (знімок з висоти 4340 м над рівнем моря) наведено на рисунку 3.



Рисунок 3 – Найбільш імовірні варіанти атаки гідротехнічної споруди із використанням засобів повітряного нападу противника

Моделювання наслідків руйнування Дніпровської ГЕС із використанням моделі COASTOX. В якості вихідного сценарію руйнування було використано історичний випадок 18 серпня 1941 року, коли червона армія вчинила умисний підрив греблі для зниження темпів просування військ Німеччини. Орієнтовна потужність вибуху становила 20 т. На основі

історичних даних проран греблі було оцінено як 200 м в ширину, 60 м (повна висота греблі) у висоту. Зони затоплення розраховувались для гідрогеологічних умов станом на квітень 2024 року: рівень на нижньому б'єфі ГЕС – 15,7 м; рівень на верхньому б'єфі ГЕС – 51,5 м; витрата води – 3000 м³/с. Результати моделювання зони максимального затоплення наведено на рисунку 4.

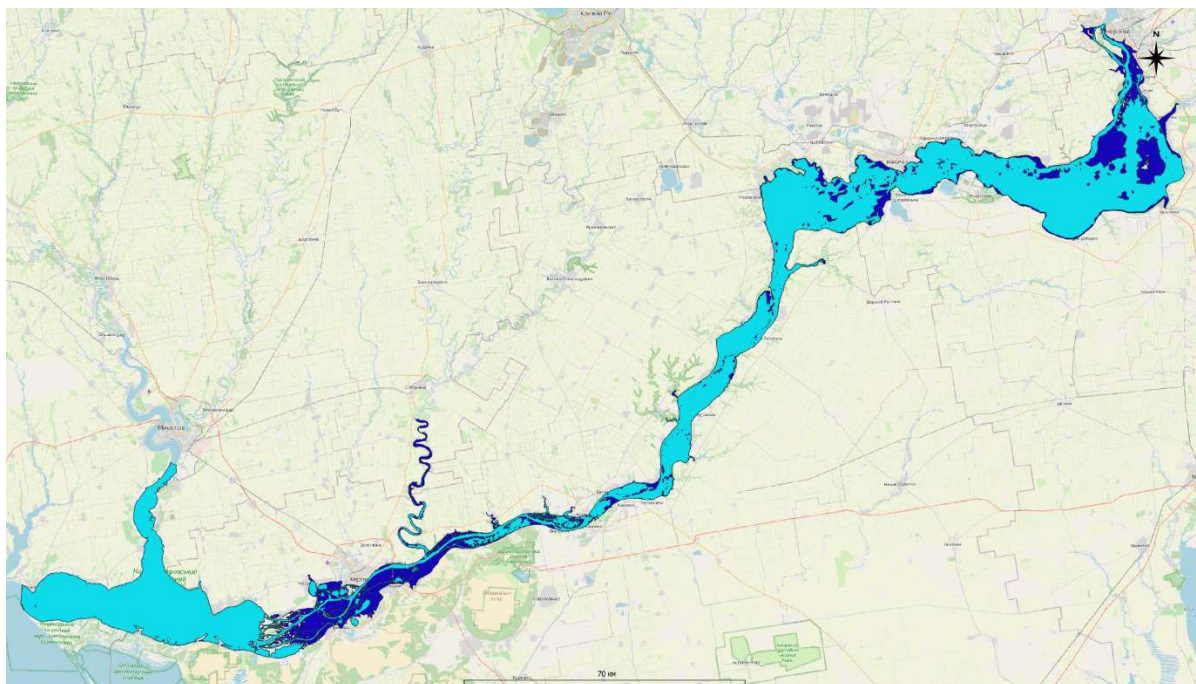


Рисунок 4 – Загальні прогнозовані зони затоплення для умовного сценарію прориву гідротехнічної споруди: блакитним – початкові умови моделювання, синім – зони затоплення в наслідок прориву

Параметри зони затоплень за результатами моделювання із використанням гідродинамічної моделі COASTOX наступні. Довжина (ширина) зони затоплення – 240 (3...24) км. Висота хвилі прориву – 5...23 м. Тривалість затоплення – 53 год.

Оцінка наслідків прориву Дніпровської ГЕС з використанням ГІС-технологій. На основі отриманих даних щодо максимальних площ затоплення в наслідок прориву греблі Дніпровської ГЕС було проведено аналіз масштабу затоплення із використанням геопросторових технологій. Для оцінки використовувались наступні геопросторові шари: шар адміністративних границь населених пунктів та розташування будівель на місцевості (сервіс OpenStreetMap); шар оціночної щільності населення в Україні станом на 2023 (дані з відкритого доступу LandScan Global Population Database). Слід зазначити, що використані шари знаходяться у відкритому доступі. Точність шарів стає вищою для густо урбанізованої місцевості.

На основі даних шарів було розраховано площі затоплення, орієнтовну кількість постраждалого населення для найбільш затоплених населених пунктів (таблиця 1). Таких населених пунктів виявилось 6. Враховуючи різницю густини заселеності, сумарна очікувана кількість постраждалих у районі виникнення надзвичайної ситуації складе більш ніж 32000 осіб. З них мінімально очікувана кількість загиблих – близько 1600.

Таблиця 1
Прогнозовані площі затоплення, кількості постраждалого населення у зонах затоплення для основних населених пунктів

Назва населеного пункту	Площа затоплення, км ²	Прогнозована кількість постраждалого населення
Запоріжжя	25,51	27400
Кардашинка	28,62	930
Херсон	2,30	2820
Білогрудове	1,54	240
Олешки	1,34	310
Г. Пристань	1,26	650

Для прикладу було проведено детальний аналіз затопленої інфраструктури та угідь поблизу м. Запоріжжя (рис. 5).

Результати розрахунків показали, що в зону затоплення підпадає близько 1340 будівель. Відповідно прогнозованих оцінок з них отримають ушкоджень: значних – 268; незначних – 1072 будівлі цивільної інфраструктури. Аналогічні розрахунки можуть бути проведені для решти населених пунктів в межах зон затоплень.

Аналіз ґрунтових умов в районі м. Запоріжжя засвідчив, що там переважають чорноземи, число пластичності яких відповідно [3] приймаємо рівним $M_N=15$. Результати розрахунків показали, що показник консистенції ґрунтів в середньому дорівнює $V=0,82$. За даними [3; 7] стан ґрунтів оцінено як текучопластичні.

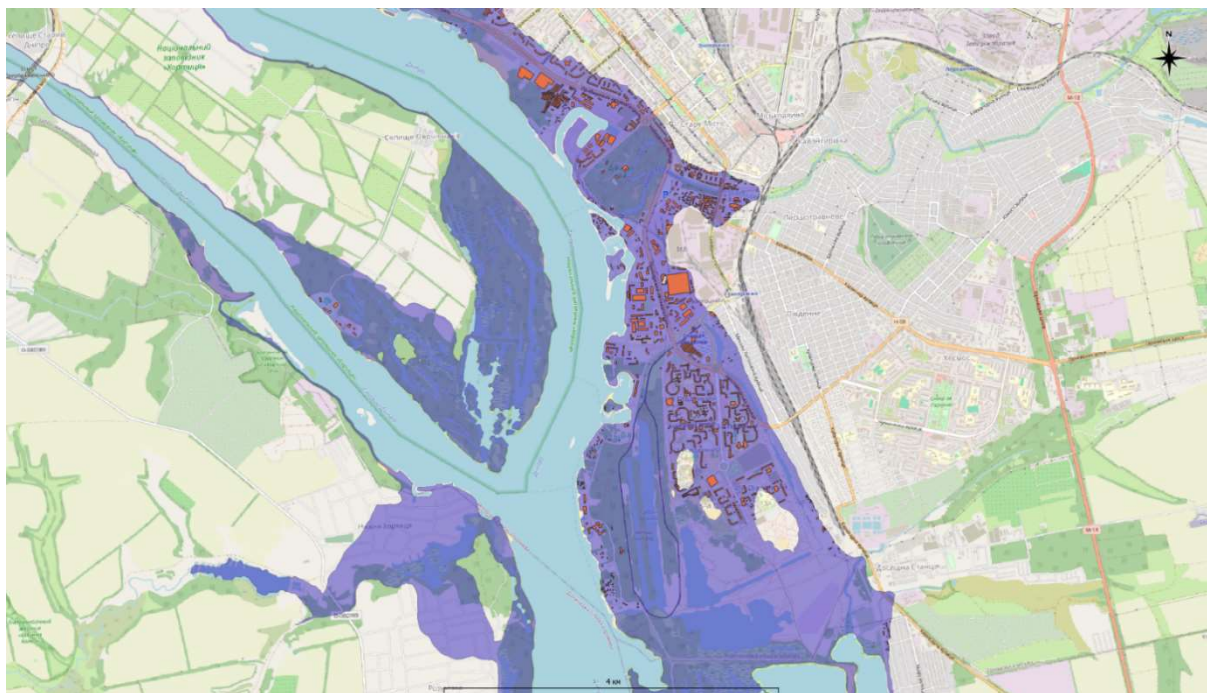


Рисунок 5 – Прогнозування затоплення місцевості поблизу м. Запоріжжя

Водночас, для колісної техніки категорія прохідності – V, для гусеничної техніки – III. Отже, прогнозоване оцінювання умов руху транспорту ($K_{ур}$) дало змогу зробити висновок про незадовільні умови застосування колісної техніки та ускладнені характеристики прохідності заболоченої місцевості після повного просочування води у ґрунт для гусеничної, що дасть можливість здійснювати поодинокий рух лише гусеничної техніки зі швидкостями 10...15 км/год.

Отримані результати моделювання із використанням математичної моделі [7] збігаються із результатами, що отримані за допомогою гідродинамічної імітаційної моделі COASTOX. Похибка на окремих ділянках зон затоплення не перевищує 5%, що свідчить про високу достовірність отриманих результатів розрахунків.

Висновки й перспективи подальших досліджень

Отже, удосконалена Методика, на відміну від існуючих, додатково враховує зниження прохідності місцевості поза шляхами за перезволоження ґрунтів різної категорії, неоднорідність щільності забудови урбанізованої місцевості та густини заселеності районів

виникнення надзвичайних ситуацій в межах зон затоплень під час зруйнування гідротехнічних споруд. Методика ґрунтується на моделюванні параметрів зон затоплень під час руйнування гідротехнічних споруд різного характеру та ступеню їх пошкоджень внаслідок терористичних атак противника, що дає змогу визначити умови руху транспорту поза шляхами, вплив наслідків надзвичайної ситуації на цивільну інфраструктуру і цивільне населення та підвищити точність прогнозованих оцінок.

Запропонована Методика має суттєве значення для теорії та практики галузі цивільного захисту та може бути використана як для проведення наукових досліджень, так і для проведення практичних розрахунків під час прогнозування масштабів та обсягів негативного впливу наслідків зруйнування гідротехнічних споруд.

Проведені розрахунки із використанням удосконаленої Методики дали змогу здійснити верифікацію та підтвердити її адекватність. Мета статті досягнута. Як напрям подальших досліджень є розроблення практичних рекомендацій щодо мінімізації наслідків надзвичайних ситуацій терористичного характеру на гідротехнічних спорудах України.

Список бібліографічних посилань

1. Денис Шмигаль закликає міжнародних партнерів тиснути на росію, аби вона відновила гідротехнічні споруди Каховської ГЕС. Урядовий портал. 2016. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/> (дата звернення: 15.09.2024). 2. Стефанишин Д. В. Досвід і перспективи імовірнісного аналізу надійності й безпеки гідротехнічних споруд ГЕС і ГАЕС. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Сер.: Технічні науки.* 2013.

Вип. 2(62). С. 108–122. 3. Локалізація та ліквідація надзвичайних ситуацій на гідротехнічних спорудах: навч. посіб. / О. Й. Мацько, Ю. Н. Убайдулаєв, В. В. Барбашин, І. О. Толкунов. Харків : НУЦЗУ, 2012. 112 с. 4. Мурасов Р., Тертишний Б. Методика розрахунку наслідків поломки (руйнування) гідротехнічних споруд критичної інфраструктури. *Social Development and Security.* 2022. № 12(6). С. 140–152. 5. Мурасов Р., Нікітін А., Мешеряков І.,

Підгородецький М., Поплавець С. Методика оцінювання загроз і ризиків для об'єктів критичної інфраструктури за сценаріями розвитку надзвичайних ситуацій. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки і оборони*. 2023. № 3(48). С. 35–43. **6. Прошин І.** Аналіз факторів та фізико-географічних умов що впливають на причини виникнення аварій на гідротехнічних спорудах. *Journal of Scientific Papers "Social Development and Security"*. 2023. Vol. 13, No. 3. **7. Прошин І.В., Коцюруба В. І., Михайловський Д. В.** Моделювання затоплення місцевості в наслідок зруйнування гідротехнічних споруд. Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. Київ : КНУБА. Вип. 111. 2023. С. 87–101. **8. Прошин І. В., Коцюруба В. І.** Удосконалена методика визначення параметрів руху хвилі прориву та затоплень під час зруйнування гідротехнічних споруд: *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2024. №1(49). С. 69–77. **9. Zheleznyak M., Kivva S., Pylypenko O., Sorokin M.** Modeling of Behavior of Fukushima-Derived Radionuclides in Freshwater Systems. *Behavior of Radionuclides in the Environment III*. Springer, Singapore. 2022. P. 199–252. **10. Сорокін М. В.** Розпаралелювання чисельних

розв'язків рівнянь мілкої води методом скінченних об'ємів для реалізації на багатопроекторних системах графічних процесорах. *Екологічна безпека та природокористування*. 2023. № 46(2). С. 163–193. **11. Hydrologic Engineering Center.** HEC-RAS 2D Modeling User's Manual, U.S. Army Corps of Engineers, Davis CA., April 2021. **12. Бойко В. М., Євдін Є. О., Железняк М. Й., Коломієць П. С., Іщук О. О.** Особливості формування весняного стоку Дніпра та моделювання зон затоплення у межах м. Києва на основі сучасної гідролого-гідравлічної моделі. *Гідрологія, Гідрохімія, Гідроекологія*. 2012. № 1(26). С. 55–63. **13. Zheleznyak M. J., Demchenko R. I., Khursin S. L., Kuzmenko Y. I., Tkalich P. V., Vitiuk N. Y.** Mathematical modeling of radionuclide dispersion in the Pripyat-Dnieper aquatic system after the Chernobyl accident. *Science of The Total Environment*. 1992. № 112(1). С. 89–114. **14. Zheleznyak M., Dykyi P., Kivva S., Pylypenko O., Sorokin M., Aoyama M., Tsumune D.** Modelling of Cs-137 transport in the nearshore zone of Fukushima-Daiichi NPP under the combined action of waves, currents and fluxes of sediments. *EGU General Assembly Conference Abstracts*. 2018. № 4.

IMPROVED METHOD FOR FORECASTING THE CONSEQUENCES OF EMERGENCIES OF A TERRORIST NATURE AT HYDRAULIC FACILITIES

Kotsyruba Volodymyr (Doctor of Technical Sciences, Professor) ¹

Proshchyn Ihor ¹

Sorokin Maksym ²

Pylypenko Oleksandr ²

¹ *National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

² *Institute of Mathematical Machines and Systems Problems of the National Academy of Sciences, Kyiv, Ukraine*

Formulation of the problem in general. *In the conditions of full-scale aggression, there is a threat of targeted damage to hydraulic structures by the armed forces of the Russian Federation, because during the entire period of military operations, the enemy quite often uses weapons against the civilian population, destroys critical infrastructure with the use of air strikes. Thus, the study of the factors of the destruction of hydrotechnical structures and the prediction of the consequences of such destruction are currently extremely relevant. The aim of the article is the improvement of the method of forecasting the consequences of emergencies of a terrorist nature at hydraulic facilities*

Research methods. *During the research the COASTOX hydrodynamic simulation model was employed, which is based on the Saint-Venant shallow water equations solving on the unstructured triangle grids, a method of predicting water motion condition, statistical methods of the demolition extent and the fracture mode estimation, the number of affected population in areas where emergencies occur, attributed to hydraulic facilities destruction. The above-mentioned methodological approach gives the opportunity to expand limits of the predicted appraisal with simultaneous analysis of the impact of the consequences of the emergency both on civilians, critical infrastructure and on the effectiveness of use of military equipment and weapons in areas of active and passive terrain flooding.*

Analysis of recent researches and publications. *Modern Ukrainian scientists D. Stefanyshyn, Yu. Ubaidulaev and V. Burbashyn. At the same time, in the vast majority of works on this topic, an important factor is not taken into account - the limitation of the maneuverability of the troops in case of overwetting of the soil, insufficient attention is paid to taking into account the heterogeneity of the built-up density of settlements and the population density of the areas where emergency situations occur. In general, there is a need to continue researching the problematic issues of forecasting the consequences of emergency situations on hydrotechnical structures.*

Presenting the main material. *The article presents an improved methodology, in contrast to the existing ones, it additionally takes into account the decrease in the passability of the area outside the roads in case of overwetting of different categories of soil, the heterogeneity of the density of the built-up area in the urbanized area and the population density of the areas of emergency situations within the flood zones during the destruction of hydrotechnical structures. The methodology is based on the modeling of the parameters of flood zones during the destruction of different types of railways and the degree of their damage due to enemy terrorist attacks, which makes it possible to determine the conditions of off-road traffic, the impact of the consequences of an emergency*

on civil infrastructure and the civilian population, and to increase the accuracy of forecasted estimates. The proposed Methodology is of significant importance for the theory and practice of the field of civil protection and can be used both for conducting scientific research and for conducting practical calculations when forecasting the scale and scope of the negative impact of the consequences of the destruction of hydrotechnical structures. The performed calculations using the improved Methodology made it possible to verify and confirm the adequacy of the considered scientific and methodological apparatus.

Elements of scientific novelty. The article provides a set of interrelated methods for the research of problematic issues of forecasting the consequences of emergencies of a terrorist nature on hydraulic facilities, which meaningfully included into the indicated method. Unlike the existing ones, this method additionally takes into account the decrease of trafficability outside the roads in the case of soil waterlogging of various categories, urban density heterogeneity, population density of the areas of emergencies appearance within flooded zones at the time of hydraulic facilities destruction which enables to determine the conditions of the off road traffic, the impact of the consequences on the civilian infrastructure and the civilian population and increase the accuracy of the predicted estimates

Theoretical and practical significance of the article. The offered method is of the essence for the theory and practice of civil protection and may be used both for scientific research and for practical calculations in forecasting the scale of the negative impact of the consequences of the destruction of hydraulic structures. The conducted calculations using the improved method enabled to verify and confirm the adequacy of the considered scientific and methodological apparatus.

Conclusion and the perspectives of future researches. The performed calculations using the improved Methodology made it possible to verify and confirm the adequacy of the considered scientific and methodological apparatus. The direction of further research is the development of practical recommendations for minimizing the consequences of emergency situations of a terrorist nature on Ukraine's hydrotechnical structures.

Keywords: emergency situation, hydrotechnical construction, personnel risk means of air attack, hydrodynamic accident, flooding of the area, objects of critical infrastructure.

References

1. Denys Shmyhal called on international partners to put pressure on Russia to restore the hydraulic facilities of the Kakhovskaya HPP [online] (2016). *The government portal*. Available at: <https://www.kmu.gov.ua/news/> [Accessed: 15 September 2024].
2. Stefanyshyn, D. V., (2013) Experience and prospects of probabilistic reliability and safety analysis of hydrotechnical structures of hydroelectric power plants and gas power plants. *Bulletin of the National University of Water Management and Nature Management. Ser.: Technical sciences.* 2, 62, 108–122.
3. **Localization and liquidation of emergency situations at hydrotechnical structures** (2012): training. manual / O. Y. Matsko, Y. N. Ubaidulaev, V. V. Barbashyn, I. O. Tolkunov. Kharkiv : NUTZU, 112.
4. Murasov, R., Tertyshnyi, B., (2022). Methodology for calculating the consequences of failure (destruction) of hydraulic structures of critical infrastructure. *Social Development and Security*, 12(6), 140-152.
5. Murasov, R., Nikitin, A., Meshcheryakov, I., Pidhorodetskyi, M., Poplavets, S., (2023). Methodology for assessing threats and risks for critical infrastructure objects according to scenarios of the development of emergency situations. *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, 3(48), 35-43.
6. Proshchyn, I., (2023). Analysis of factors and physical-geographical conditions affecting the causes of accidents at hydrotechnical structures. *Journal of Scientific Papers «Social Development and Security»*. 13, 3.
7. Proshchyn, I. V., Kotsyuruba, V. I., Mykhaylovskyi, D. V.. Modeling of flooding of the area as a result of the destruction of hydraulic structures. 2023. Resistance of materials and theory of structures: science and technology. collection Kharkiv : KNUBA. 111, 87-101.
8. Proshchyn, I. V., Kotsyuruba, V. I., (2024). An improved method of determining the parameters of the movement of the breakthrough wave and flooding during the destruction of hydrotechnical structures. *Scientific journal Modern information technologies in the field of security and defence*, 49, 1, 69-77.
9. Zheleznyak, M., Kivva, S., Pylypenko, O., Sorokin, M., (2022). Modeling of Behavior of Fukushima-Derived Radionuclides in Freshwater Systems. *Behavior of Radionuclides in the Environment III. Springer, Singapore*, 199–252.
10. Sorokin, M. V., (2023). Parallelization of numerical solutions of shallow water equations using the finite volume method for implementation on multiprocessor systems graphics processors. *Ecological safety and environmental management*. 46(2), 163-193.
11. Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS 2D Modeling User's Manual, U.S. Army Corps of Engineers, Davis CA., April 2021.
12. Boyko, V. M., Yevdin, E. O., Zheleznyak, M. Y., Kolomiets, P. S., Ishchuk, O. O., (2012). Peculiarities of the formation of the spring flow of the Dnipro and modeling of flooding zones within the city of Kyiv based on a modern hydrologic-hydraulic model. *Hydrology, Hydrochemistry, Hydroecology*. 1(26), 55–63.
13. Zheleznyak, M. J., Demchenko, R. I., Khursin, S. L., Kuzmenko, Y. I., Tkulich, P. V., Vitiuk, N. Y., (1992). Mathematical modeling of radionuclide dispersion in the Pripjat-Dnieper aquatic system after the Chernobyl accident. *Science of the Total Environment*, 112(1), 89-114.
14. Zheleznyak, M., Dykyi, R., Kivva, S., Pylypenko, O., Sorokin, M., Aoyama, M., Tsumune, D., (2018). Modeling of Cs-137 transport in the nearshore zone of Fukushima-Daiichi NPP under the combined action of waves, currents and fluxes of sediments. EGU General Assembly Conference Abstracts, 4.