

**ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ РАДІОНУКЛІДІВ У РІЧКОВИХ
БАСЕЙНАХ У СИСТЕМІ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПІД ЧАС
РАДІАЦІЙНИХ АВАРІЙ JRODOS**

О.В. Бойко;

М.Й. Железняк, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.
(Інститут проблем математичних
машин і систем НАН України)

У статті розглядається модуль розрахунку транспорту радіонуклідів у поверхневих водах європейської системи підтримки прийняття рішень у разі радіаційних аварій JRODOS – JHDM (Java Hydrological Dispersion Module). Надано опис моделей, що входять у ланцюг процесу «випадіння радіонуклідів на поверхню водозбору – змив радіонуклідів з водозбору у річкову мережу – перенесення радіонуклідів у річках у розчині та у завислих наносах». Представлені приклади пілотного застосування програмного комплексу для басейнів р.Дунаю та нижньої течії р.Вісли.

В статье рассматривается модуль расчета транспорта радионуклидов в поверхностных водах европейской системы поддержки принятия решений в случае радиационных аварий JRODOS – JHDM (Java Hydrological Dispersion Module). Приведены описания моделей, которые входят в цепочку процесса «выпадение радионуклидов на поверхность водосбора – смыв радионуклидов из водосбора в речную сеть – перенос радионуклидов в реках в виде раствора и во взвешенных наносах». Представлены примеры пилотного применения программного комплекса для бассейнов р.Дуная и нижнего течения р.Вислы.

The paper introduces the module of radionuclide transportation in the overland flows of the decision support system JRODOS - JHDM (Java Hydrological Dispersion Module). Module is based on models chain that simulated processes of “atmospheric fallout on watershed – wash-off from watershed – radionuclide transportation in river net”. The main equations of models are given. The examples of the pilot implementation of JHDM for the Danube and Vistula river basin are shown.

Вступ

Системи підтримки прийняття рішень у режимі реального часу з реагування на радіаційні аварії почали активно розвиватися на початку 90-х років з урахуванням досвіду Чорнобильської аварії. З 1992 року в рамках науково-дослід-

них проектів Європейської комісії розроблялася система RODOS (Realtime Online Decision Support System for nuclear emergency management, <http://www.rodos.fzk.de>) [1,2]. У країнах Скандинавії набула широкого розповсюдження датська система ARGOS (<http://www.pdc.dk/Argos/decision.asp>). У Росії НПО Тайфун РосГідроМета розроблена система РЕКАСС [3,4]. У таких системах традиційно основна увага приділяється моделюванню атмосферного переносу радіонуклідів. На сьогодні з широко розповсюджених СППР аварійного реагування тільки в систему RODOS включений модуль розрахунку міграції радіонуклідів в гідрологічних системах – річках та водосховищах. Модуль, що має назву Hydrological Dispersion Module – HDM [5], розроблявся в Інституті проблем математичних машин і систем НАН України з початку 90-х років минулого століття в рамках проектів Європейської Комісії.

Система RODOS розроблялась у 90-х роках як програмний комплекс для серверів Hewlett-Packard, що працювали під операційною системою UNIX. В останні роки створено нову кросс-платформену версію системи, так званий JRODOS [6]. Ця система об'єднує моделі програмного комплексу під інтерфейсом, створеним в Java середовищі, і може працювати на різних обчислювальних платформах, в тому числі на персональних комп'ютерах. Гідрологічний модуль системи було перероблено для гнучкого і швидкого аналізу забруднення річкових систем внаслідок аварійних випадків на водозбори. Головне призначення модуля - надати кількісну оцінку змиву радіонуклідів з водозборів (модель J-RETRACE) та дослідити динаміку їх розповсюдження у руслах річок (модель J-RIVTOX) в залежності від погодних умов та гідрологічного режиму річок під час аварії та у короткостроковий період після. Модуль має програмну архітектуру, властиву всім модулям, які інтегровані в систему JRODOS [6]. У статті надається опис підсистем гідрологічного модуля системи JRODOS та наводяться приклади її впровадження для басейнів європейських річок.

Модель змиву радіонуклідів з водозборів J-RETRACE

Модель J-RETRACE є спрощеною версією моделі RETRACE [7,8]. В основу концепції моделі RETRACE покладено емпіричне співвідношення, що описує змив радіонуклідів з водозборів водним стоком. Модель включає в себе два блоки: блок розрахунку водного стоку та блок розрахунку змиву радіонуклідів. Але з огляду на задачі короткострокового прогнозування та невеликі початкові площі радіаційного ураження на водозборі, об'ємами водного стоку з уражених ділянок можна знехтувати, вважаючи їх набагато меншими, ніж запаси води у руслах річок. Звідси у модель J-RETRACE входить тільки блок змиву радіонуклідів, що ґрунтується на двох базових припущеннях:

- А. Об'єм змиву радіонуклідів формується з кожної комірки просторової сітки атмосферного випадіння, що належить водозбору, та лінійно залежить від

величини опадів та концентрації випадіння радіонуклідів. Для цього вводиться певний коефіцієнт змиву для кожного радіонукліду.

В. Радіонукліди змиваються без затримки у часі безпосередньо у найближчу за відстанню розрахункову точку річкової мережі гідродинамічної моделі J-RIVTOX.

Припущення (А) є загальноприйнятим у практиці моделювання змиву радіонуклідів з водозборів (Monte, 1996). Припущення (В) призводить до завищення концентрацій радіонуклідів, що потрапляють до річкової мережі, але таким чином показується максимально можливий консервативний об'єм змиву, що повністю задовольняє основній меті роботи моделі – оцінити найгірший можливий ефект від змиву. Змив радіонукліда з ділянки водозбору розраховується за формулою:

$$J = K_w \cdot D \cdot S \cdot L_w, \quad (1)$$

де D – густина забруднення ділянки водозбору, Бк/м²; K_w – коефіцієнт змиву, м⁻¹; L_w – шар водного стоку, м; S – площа ділянки водозбору, м². У моделі J-RETRACE шар водного стоку дорівнює шару опадів, що випали на водозбір за певний проміжок часу. Для того щоб підкреслити фізичний зміст коефіцієнта змиву, співвідношення (1) можна записати у вигляді:

$$K_w = \frac{J}{D \cdot (S \cdot L_w)} = \frac{C}{D}, \quad (2)$$

де C – концентрація радіонуклідів у водному стоці, Бк/м³. Зі співвідношення (2) випливає, що K_w – це концентрація радіонуклідів у потоці води, нормалізована на густину забруднення. K_w суттєво залежить від часу, тому у моделі J-RETRACE було використано наступне співвідношення для перерахунку зміни значення коефіцієнта у часі з моменту початку змиву радіонуклідів:

$$K_w = \varepsilon \cdot (A_1 \cdot e^{-\lambda_1 \cdot t} + A_2 \cdot e^{-\lambda_2 \cdot t}), \quad (3)$$

де $A_1 + A_2 = 1$; $\lambda_1 \gg \lambda_2$; перший член описує «швидкий» змив для періодів від доби до тижнів, а другий – «повільний» для періодів від тижнів до років. Співвідношення (3) запропоноване в роботі Monte [9] та було виведене, ґрунтуючись на базі чисельних натур спостережень. Оскільки $A_2 \ll A_1$, то (3) можна записати у вигляді:

$$K_w = \varepsilon \cdot (e^{-\lambda_1 \cdot t} + A_2 \cdot e^{-\lambda_2 \cdot t}). \quad (4)$$

З (4) випливає, що співвідношення інтегрального у часі змиву радіонуклідів «швидкою» та «повільною» компонентами дорівнює:

$$R_{12} = \frac{\lambda_2}{A_2 \cdot \lambda_1} \quad (5)$$

У наступній таблиці наведено результати емпіричних досліджень змиву ^{137}Cs та ^{90}Sr з водозборів р. Рейну, р.Дніпра та р.Прип'яті [9]. Ці значення використовуються моделлю J-RETRACE у якості базових, однак значення параметрів можливо змінювати в інтерфейсі в процесі ініціалізації моделі.

Таблиця 1 – Характеристики «швидкого» та «повільного» змиву Cs та Sr за даними Monte.

Басейн	Нуклід	A_2	$\lambda_1, 10^{-7} \cdot \text{c}^{-1}$	$\lambda_2, 10^{-7} \cdot \text{c}^{-1}$	R_{12}
р.Рейн	^{137}Cs	0.052	6.5	0.27	0.8
р.Прип'ятя	^{137}Cs	0.035	5.2	0.18	1.0
р.Дніпро	^{137}Cs	0.028	8.8	0.11	0.4
р.Прип'ятя	^{90}Sr	0.048	9.0	0.049	0.11
р.Дніпро	^{90}Sr	0.166	5.2	0.055	0.06

Співвідношення (1)-(4) застосовуються для кожної комірки сітки випадіння, яка була розрахована модулем атмосферного переносу системи JRODOS. У результаті отримується величина змиву радіонуклідів (Бк/с) у найближчу розрахункову точку річкової мережі на одиницю розрахункового інтервалу. Слід зауважити, що кількість радіонуклідів, яка змивається в дану розрахункову точку моделі гідродинаміки J-RIVTOX, розраховується як сума змиву з кожної комірки, що задовольняє припущенню (B). Таким чином, на виході роботи моделі формуються часові ряди бічного припливу радіонуклідів, що будуть використовуватися в якості граничних умов гідродинамічною моделлю J-RIVTOX.

Нижче наведено перелік вхідних даних моделі J-RETRACE:

- Сітка концентрацій випадіння, отриманого або модулем атмосферної дисперсії (ADM/LSMC) системи JRODOS, або моделлю Rimpuff в автономній версії J-HDM;
- Топологія річкової мережі в ГІС-форматі ESRI Shape format (*.shp);
- Розрахункові точки гідродинамічної моделі J-RIVTOX в ГІС-форматі ESRI Shape format (*.shp);
- Область уздовж річкової мережі, яка представляє область водозбору, з якого відбувається змив;
- Часовий ряд опадів на водозборі, що був інтерпольований з результатів регіональної чисельної моделі прогнозу погоди або заданий користувачем;

Модель переносу радіонуклідів у руслових потоках J-RIVTOX

Модель J-RIVTOX є імплементацією моделі річкової гідродинаміки RIVTOX [10,11] та застосовується для розрахунку динаміки розповсюдження радіонуклідів у річках та природних водотоках. J-RIVTOX включає наступні підмоделі:

- Модель динаміки руху води у руслах річок;
- Модель транспорту радіонуклідів.

Модель динаміки руху води у руслах річок розраховує середню швидкість потоку у перерізах русла річки та відповідні рівні і витрати води. Модель має два різновиди: перший базується на розв'язку повної системи рівнянь Сен-Венана, другий є спрощеним варіантом та базується на спрощенні, відомому як рівняння «дифузійної хвилі» [12]. Повна система рівнянь використовується для розрахунків водного режиму з урахуванням впливу на режим річки господарських споруд, таких як дамби, іригаційні канали тощо. Зокрема для моделювання проривів дамб. Але для задач модуля транспорту радіонуклідів системи JRODOS достатньо застосувати спрощену систему «дифузійної хвилі». Нижче наведено основні рівняння моделі:

рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_l; \quad (6)$$

рівняння динаміки:

$$gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f \right) = 0, \quad (7)$$

де A – площа поперечного перерізу русла; $Q = UA$ – витрати води ($\text{м}^3/\text{с}$), де U – усереднена по перерізу швидкість потоку; q_l – бічний приплив у ($\text{м}^2/\text{с}$); g – прискорення сили тяжіння; h – глибина потоку.

Модель транспорту радіонуклідів описує процеси адвекції та дифузії концентрацій радіонуклідів, усереднених за поперечним перерізом річки, концентрацій у завислих наносах та концентрацій у верхньому шарі донних випадінь. Основні рівняння наведено нижче:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{Q}{A} \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(AE_c \frac{\partial C}{\partial x} \right) &= f^c(S, C, C^s, C^b, Z^*, \vec{p}^c) + f^{c_i}(C, C_i) \\ \frac{\partial C^s}{\partial t} + \frac{Q}{A} \frac{\partial C^s}{\partial x} - \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(AE_c \frac{\partial C^s}{\partial x} \right) &= f^c(S, C, C^s, C^b, Z^*, \vec{p}^{c^s}) + f^{c_i^s}(C, C^s, C_i, C_i^s) \\ \frac{\partial C^b}{\partial t} &= f^{c^b}(S, C, C^s, C^b, Z^*, \vec{p}^{c^b}) \\ \frac{\partial Z^*}{\partial t} &= f^{c^b}(S, \vec{p}^{z^*}) \end{aligned} \quad (8)$$

де

$$\begin{aligned}
 f^C &= -\lambda C - a_{1,2}(K_{ds}SC - C^S) - a_{1,3}(K_{db}C - C^b) \frac{\rho_s(1-\varepsilon)Z^*}{h} \\
 f^{C_l} &= \frac{Q}{A}(C_l - C) \\
 f^{C^S} &= -\lambda C^S + a_{1,2}(K_{ds}C - C^S) + \frac{q_{sed}(C^b - C^S)}{hS} \\
 f^{C_l^S} &= \frac{QS_l(C_l^S - C^S)}{AS} \\
 f^{C^b} &= a_{1,3}(K_{db}C - C^b) - \frac{q_{res}(C^b - C^S)}{\rho_s(1-\varepsilon)Z^*} - \lambda C^b
 \end{aligned} \tag{9}$$

Перелік параметрів наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Параметри модуля транспорту радіонуклідів.

C	Бк/м ³	Розрахована концентрація радіонукліда
C^S	Бк/кг	Концентрація радіонукліда у завислих наносах
C^b	Бк/кг	Концентрація радіонукліда у донних випадіннях
C_l	Бк /м ³	Концентрація радіонукліда у бічному припливі
C_l^S	Бк/кг	Концентрація радіонукліда у завислих наносах бокового припливу
E_C	м ² /сек	Коефіцієнт дисперсії вздовж русла
λ	сек ⁻¹	Коефіцієнт розпаду
$a_{1,2}$	сек ⁻¹	Питома швидкість сорбції в системі «вода-завислі наноси»
$a_{2,1}$	сек ⁻¹	Питома швидкість десорбції в системі «вода-завислі наноси»
$a_{1,3}$	сек ⁻¹	Питома швидкість сорбції в системі «вода-донні випадіння»
$a_{3,1}$	сек ⁻¹	Питома швидкість десорбції в системі «вода-донні випадіння»
K_{ds}	м ³ /кг	Коефіцієнт розподілення в системі «вода-завислі наноси»
K_{db}	м ³ /кг	Коефіцієнт розподілення в системі «вода-донні випадіння»

Для розрахунків транспорту радіонуклідів у модель базово закладено наступні значення параметрів:

Таблиця 3 – Значення параметрів модуля транспорту радіонуклідів

Радіонуклід	K_{db} , м ³ /кг	K_{ds} , м ³ /кг	a_{12} (1/день)	a_{21} (1/день)	a_{13} (1/день)	a_{31} (1/день)
Cs-137	3	15	1	0.02	0.01	0.002778
Sr-90	0.25	0.8	1	0.02	0.04	0.002778

Вхідними даними для моделі J-RIVTOX є:

- Топологія річкової мережі в ГІС-форматі ESRI Shape format (*.shp);
- Історичні часові ряди спостережень витрат води, що використовуються для побудови гідродинамічної моделі, а саме, для калібрування гідравлічних параметрів русла;
- Гідроморфологічні дані: ширина та глибина русла річки та основних приток;
- Гідрологічний прогноз або сценарії гідрологічного режиму для періоду моделювання.

У результаті розрахунків моделі отримуються витрати, швидкості, рівні води та концентрації радіонуклідів уздовж розрахункової мережі річки у розчині, донних випадіннях та у завислих наносах.

Пілотне впровадження JHDM для басейну р. Дунаю

З метою демонстрації майбутнім користувачам системи з європейських центрів реагування на радіаційні аварії можливостей нової технології була розроблена демонстраційна версія модуля гідрологічної дисперсії - «Дунай Демо». Система включає спрощені, недеталізовані дані про поперечні перерізи р. Дунаю, історичні дані стоку для трьох сценаріїв – малої, середньої та високої води, набори гідрологічних сценаріїв для основних приток, інформація про АЕС у басейні Дунаю. На базі цих даних була створена, відкалібрована та перевірена гідродинамічна модель р. Дунаю. Незважаючи на спрощене представлення, користувач без додаткового збору інформації має змогу проводити розрахунки за сценаріями аварійних викидів з АЕС та змиву радіонуклідів уздовж усієї течії Дунаю, від Німеччини до України.

Передбачалось, що після ознайомлення з можливостями системи JHDM на прикладі «Дунай Демо» користувачі у європейських центрах з аварійного реагування будуть мотивовані проводити збір даних для налаштування повнофункціональних систем JHDM для своїх територій.

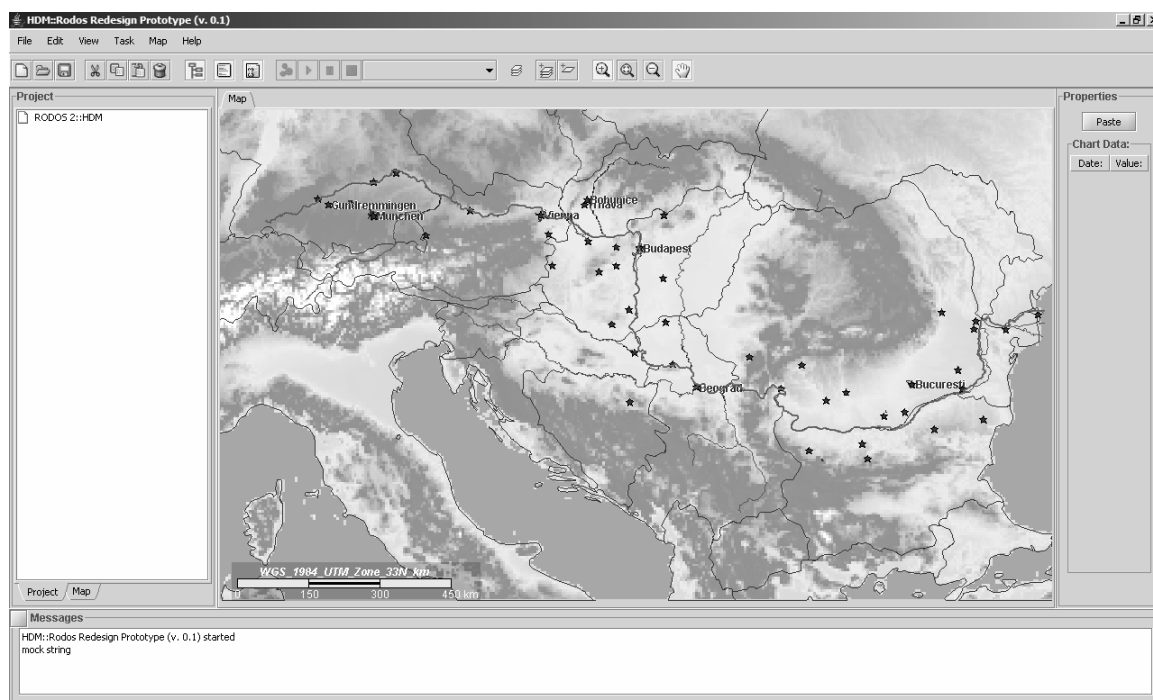


Рис. 1. ГІС інтерфейс системи J-HDM «Дунай Демо»

Оскільки спочатку JHDM «Дунай Демо» розроблявся як "stand-alone" пакет, без інтеграції в систему JRODOS, в якості блоку атмосферної дисперсії для розрахунку випадінь з заданих АЕС була використана модель RIMPUFF [13]. В той же час повнофункціональний JHDM використовує дані атмосферного випадіння, що розраховуються блоком атмосферної дисперсії JRODOS. Обидва підходи дозволяють розраховувати поля випадінь радіонуклідів як наслідок аварійного викиду з будь-якої АЕС басейну Дунаю з урахуванням заданого метеорологічного сценарію. Розраховані концентрації є вхідною інформацією для подальшого моделювання міграції радіонуклідів у природних водотоках ланцюгом моделей J-RETRACE – J-RIVTOX.

Для побудови гідродинамічної моделі «дифузійна хвиля» була зібрана гідрологічна інформація за 1988 рік, навесні якого відбулася одна з найбільших повеней за період проведення спостережень. Дані щодо витрат та рівнів води були зібрані для основних гідропостів р.Дунаю та його приток і були використані в якості граничних умов для моделювання гідрологічного режиму річки за 1988 рік. І як показало тестування створеної гідродинамічної моделі р.Дунаю, застосування рівняння «дифузійної хвилі» дозволяє отримати задовільні результати в термінах відповідності розрахованих та виміряних історичних витрат (див. рис. 2).

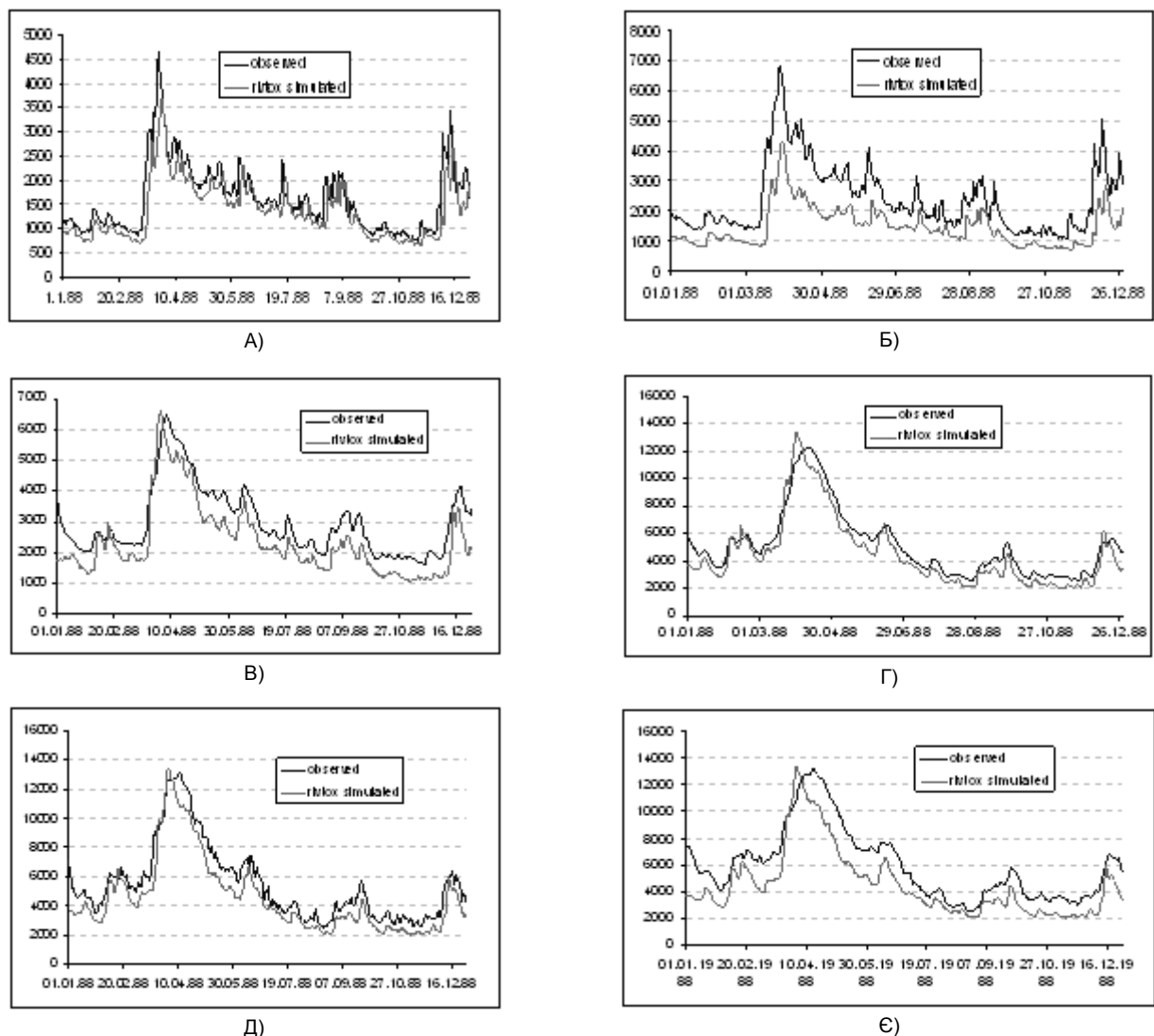


Рис. 2. Модель J-RIVTOX. Порівняння розрахованих(сірий колір) та вимірених(чорний колір) витрат для повені 1988 року на р.Дунай. А) Лінц, Австрія; Б) Братіслава, Словачія; В) Богоєво, Сербія; Г) Вел.Градїште, Сербія; Д) Лом, Румунія; Е) Хіршова, Румунія

Система була розповсюджена для вивчення та тестування в європейські центри з аварійного реагування. На основі відгуків та рекомендацій була проведена розробка повнофункціонального модуля, який був інтегрований у систему JRODOS.

Застосування JHDM для басейну р. Вісли

Інтегрований в JRODOS JHDM був впроваджений для нижнього басейну р.Вісли, на території якого знаходиться атомний реактор польського Інституту атомної енергетики в м. Свєрку, яке, в свою чергу, розташоване в безпосередній близькості до Варшави. Для побудови гідродинамічної моделі р.Вісли були отримані гідрологічні дані спостережень за повінню 1979 року. Аналогічно, як і для р.Дунаю, використовувалося рівняння «дифузійної хвилі». Перевірка роботи

моделі проводилася в контрольних точках вздовж Вісли, для яких були отримані дані витрат, –на станціях Влоцлавек та Торунь(див. рис. 3).

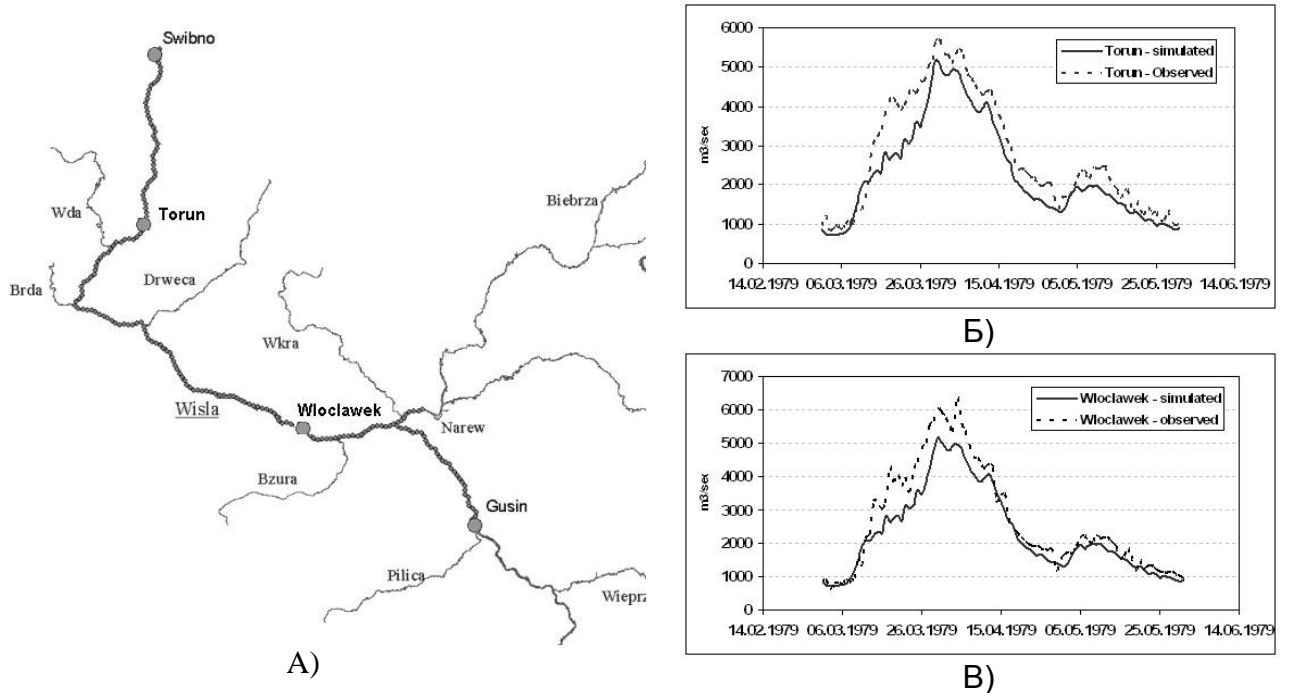


Рис. 3. Результати перевірки роботи моделі, де А) Схематична карта річкової мережі Вісли та розташування гідрологічних станцій; Порівняння вимірених (пунктир) та розрахованих витрат моделлю J-RIVTOX для паводка 1979 року на р.Віслі; Б) Станція Торунь; В) Влоцлавек

Система була передана до польського Інституту атомної енергетики, де на базі побудованої моделі гідродинаміки р.Вісли були проведені чисельні тести по змиву та розповсюдженню радіонуклідів внаслідок умовних аварій на атомному реакторі інституту. Деякі скріншоти роботи системи наведено нижче(див. рис. 4-6).

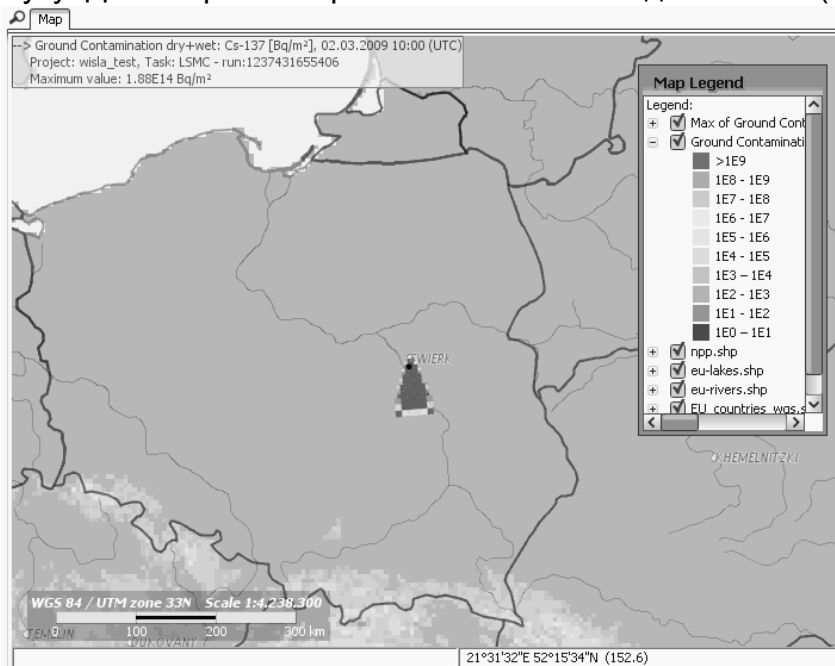


Рис. 4. Візуальне представлення карти концентрацій випадіння на поверхню Cs137 через годину після умовної аварії на атомній станції м. Свєрк. Результат моделі LSMC

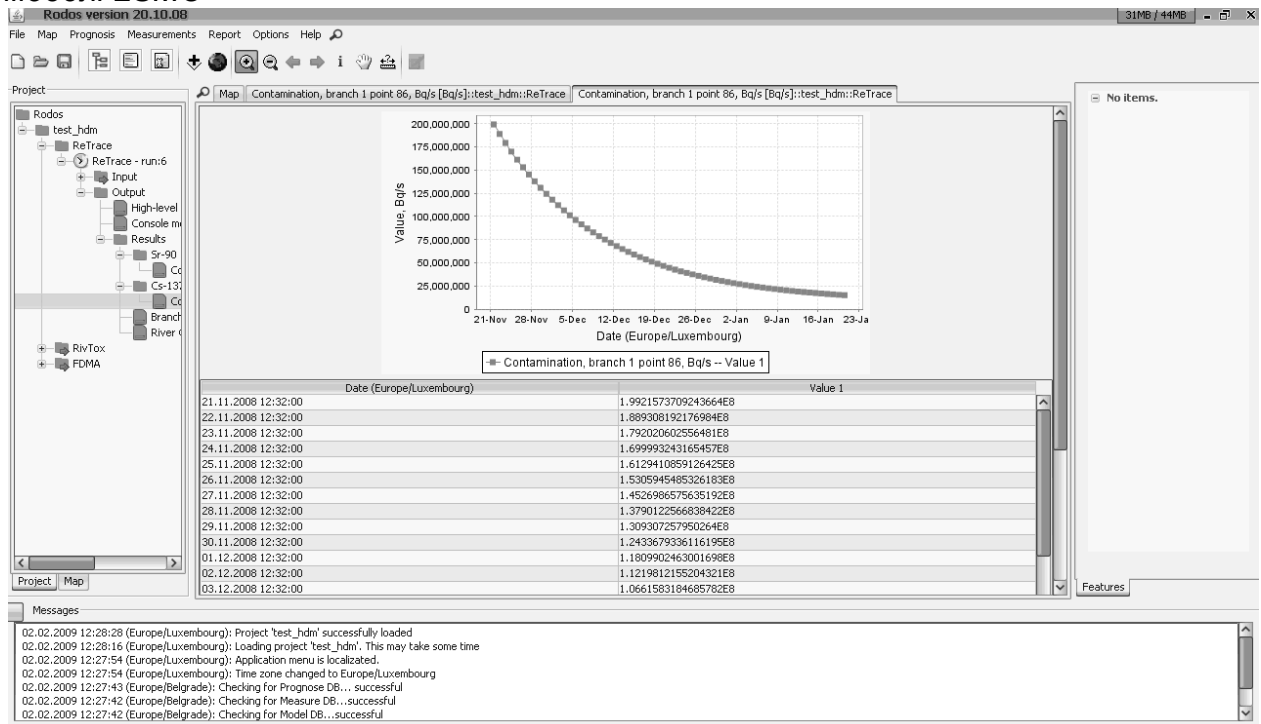


Рис. 5. Інтенсивність змиву Cs-137 для обраної точки на р.Віслі. Результат роботи моделі J-RETRACE

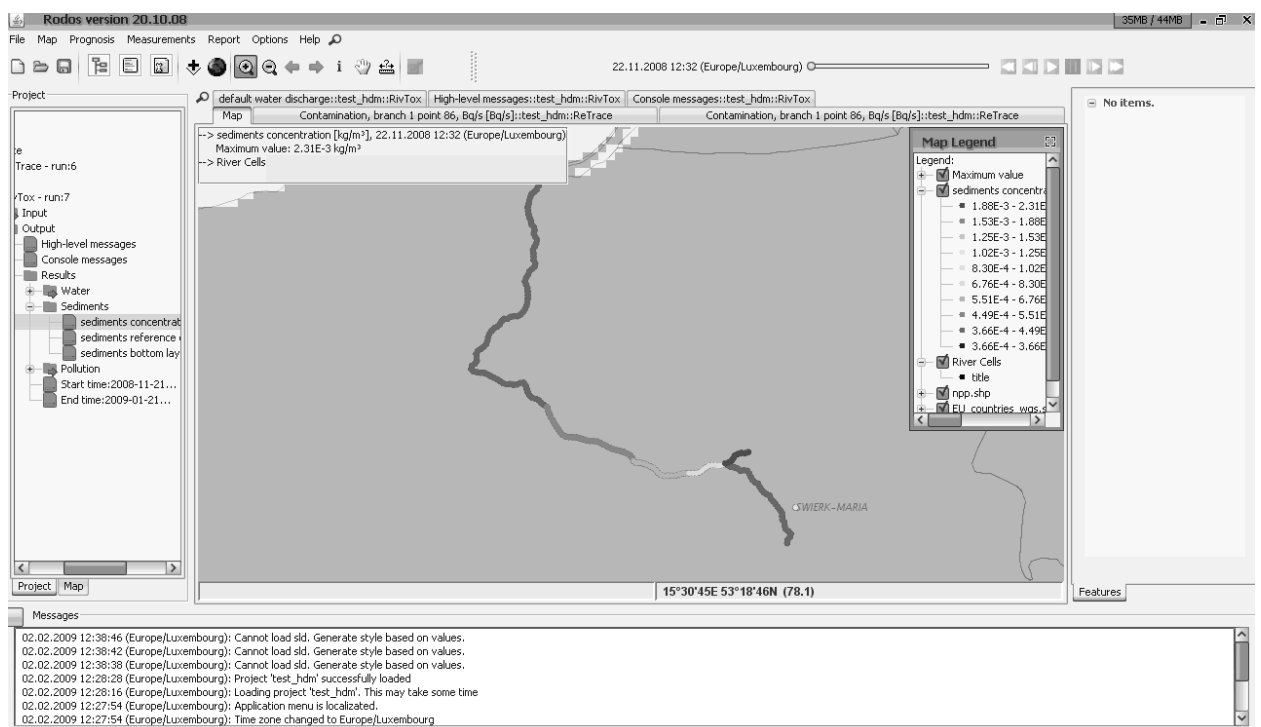


Рис. 6. Візуальне представлення концентрації Sr-90 у седиментах вздовж Вісли через день після умовної аварії. Певним кольорам відповідає певна концентрація

Висновки

Розроблений модуль міграції радіонуклідів у річкових системах JHDM включено до системи підтримки прийняття рішень аварійного реагування JRODOS.

Проведено тестування роботи модуля на прикладі р.Дунаю та р.Вісли. Запропонований у модулі ланцюг моделей дозволяє розраховувати динаміку таких показників забруднення:

- інтенсивність поверхневого змиву у ріки радіонуклідів з аварійних випадінь на водозбори в залежності від погодних умов, а саме, опадів;
- концентрації радіонуклідів у річках : у розчині, у завислих наносах та у донних випадіннях.

Отримані дані використовуються в інших модулях системи JRODOS для розрахунків доз опромінення населення. У 2011 в рамках двох проектів Європейської Комісії заплановано розпочати впровадження системи JRODOS для підтримки прийняття рішень з реагування на потенційні аварії на українських АЕС.

* * *

1. Ehrhardt, J. The RODOS system: decision support for off-site emergency management in Europe.-Radiation Protection Dosimetry / J.Ehrhardt / 1997, v.73, No.1-4. - P.35-40.
2. Raskob W. Is there a need for hydrological modelling in Decision Support Systems for nuclear emergencies? / W. Raskob, R. Heling, M. Zheleznyak // Radiat. Protect. Dosim., **109**, 2004/ - P.11-114.
3. Shershakov V.M., Kosykh V.S. Borodin R.V. Radioecological Analysis Support System (RECASS) / V.M. Shershakov, V.S. Kosykh, R.V. Borodin // Radiation Protection Dosimetry, 1993, V.50.- P.181-184.
4. Косых В.С. Интеграция системы поддержки принятия решений в случае радиационных аварий RECASS NT с аналогичными системами, действующими в других странах / В.С Косых, А.В. Крылова / Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2009. № 2. - С. 128-147.
5. Zheleznyak M Hydrological dispersion module of the decision support system RODOS / M. Zheleznyak, R. Heling, W. Raskob // Radioprotection, Vol. 37, n° C1, 2002.- P. 683-688.
6. RODOS re-engineering: aims and implementation details / Le Ievdin, D. Treebushny, M. Zheleznyak, W. Raskob // Radioprotection 2010, Vol. 45, n° 5. - P. 181–189.
7. Kolomeev M. Description of RETRACE: A new catchment model of the hydrological dispersion module in the RODOS system RODOS(RA5)-TN(01)-09 / M. Kolomeev, H.Madsen / Report of FP5 DAONEM Project FIKR-CT-2000-00025, FZK Karlsruhe. 2002. – 32 p.
8. Overview of modelling of hydrological pathways in RODOS / R. Heling, M. Zheleznyak, W. Raskob and other / Radiation Protection Dosimetry, v.73, No.1-4, 1997. – P.67-70.

9. Monte, L. Analysis of models assessing the radionuclide migration from catchments to water bodies / L. Monte / Health Physics, vol.70, N2, 1996. - P.227-237.
10. Aquatic dispersion model - first approaches to integration into the EEC decision support system based on post-Chernobyl experience / M.J. Zheleznyak, P.V. Tklich, G.B. Lyashenko, A.V. Marinets / Radiat. Prot. Dosim. 50(2-4), 1993. – P. 235–242.
11. Radioactivity and pollution in the Nordic Seas and Arctic Region: observations, modelling and simulations / O.M. Johannessen, V.A. Volkov, A. Stepanov and other / Springer, Series: Springer Praxis Books, ISBN: 978-3-540-24232-1, 2009.
12. Кюнж Ж.А. Численные методы в задачах речной гидравлики / Ж.А. Кюнж, Ф.М. Холли, А. Вервей/ -М:Энергоатомиздат, 1985.
13. Thykier-Nielsen S. RODOS SYSTEM, Analysing Subsystem: RIMPUFF, Stand Alone Version, RIMDOS7 / S. Thykier-Nielsen, S. Deme and T. Mikkelsen / Users Guide, RODOS(A)-TN(95)3, 1997.

Отримано: 1.10.2011 р.