

ДОЗОВА ЗАЛЕЖНІСТЬ МОРФОЛОГІЧНИХ ЗМІН ТА АБЕРАЦІЙ У СОСНОВИХ НАСАДЖЕННЯХ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ

В. О. Кашпаров, Ю. О. Бондар, В. І. Йощенко

Український науково-дослідний інститут сільськогосподарської радіології
Національного університету біоресурсів і природокористування (УкрНДІСГР НУБіП), Київ

Визначено дозові навантаження на верхівкову меристему сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.) з трьох експериментальних полігонів. Підраховано кількість морфологічних та цитогенетичних порушень у деревах та побудовано залежності цих показників від дозових навантажень на верхівкову меристему.

Вступ

В останній час особливу актуальність набули питання оцінки ризику опромінення не тільки людини, але й інших організмів. Піднімається питання правомірності основної парадигми радіоекології, що базується на твердженні: “Якщо захищена людина, то захищені й інші біологічні об’єкти” (ICRP 91, 103) [1, 2]. Проте після аварії на ЧАЕС більш ніж 250 тис. га земель залишилися за межами постійного проживання людини. Таким чином, людина була захищена від опромінення (шляхом евакуації та відселення), у той час як біота залишилася на забрудненій радіонуклідами території та відчувала постійний вплив іонізуючого випромінювання від зовнішніх та внутрішніх джерел. Це призвело до формування значних радіобіологічних ефектів, які можна спостерігати й нині. Тому сьогодні стало зрозуміло, що потрібен єдиний методологічний підхід до радіаційного захисту як людини, так і біоти, оскільки лише з цих позицій видається можливим розробити наукові основи оцінки наслідків радіоактивного забруднення біосфери.

Після Чорнобильської катастрофи багато дослідників приділяли увагу вивченню впливу іонізуючого опромінення на сосну в умовах чорнобильського радіоактивного забруднення [3 - 7]. На жаль, ці дослідження велися в різні роки й не були пов’язані між собою, тому отримані ними результати є несистемними та фрагментарними.

Практичне значення даної роботи полягає в тому, що сосна звичайна (*Pinus sylvestris* L.) є не тільки дуже поширеним видом в екосистемах зони відчуження, а й однією з найбільш радіочутливих рослин. Саме це є підставою використовувати сосну звичайну як індикатор забруднення екосистеми радіонуклідами в процесі моніторингу та прогнозування стану навколишнього природного середовища в зоні відчуження ЧАЕС. Також 5-м комітетом МКРЗ «Радіаційний захист навколишнього середовища» сосна була запропонована в якості референтної рослини з точки зору оцінки радіоактивного впливу на біоту. При

цьому чорнобильська зона розглядається як один із базових полігонів для накопичення необхідних масивів емпіричних значень.

Матеріали та методи досліджень

На трьох експериментальних полігонах, два з яких знаходяться в межах зони відчуження ЧАЕС, періодично відбиралися репрезентативні органи та тканини соснових дерев для наступного вимірювання в них питомої активності радіонуклідів та цитогенетичних досліджень.

Перший експериментальний полігон являв собою соснові насадження віком 15 - 20 років, що росли на території пункту тимчасової локалізації радіоактивних відходів «Рудий ліс» (близько 1,5 км на захід від ЧАЕС), де питомі активності радіонуклідів у деревах істотно варіюють залежно від конкретних умов росту (частина дерев із найбільшими рівнями забруднення росла безпосередньо на траншеях, в яких локалізовані радіоактивні відходи, тоді як інші знаходилися на відносно чистих ділянках між траншеями). В якості додаткових полігонів було обрано соснові насадження приблизно такого ж віку поблизу с. Копачі (5 км на південь від ЧАЕС) та поблизу м. Іванків (близько 40 км на південь від ЧАЕС), що знаходилися за межами зони відчуження.

З дерев із середніми характеристиками періодично відбиралися репрезентативні проби органів та тканин. Після цього в них вимірювали питому активність радіонуклідів. Відбиралися узагальнені проби хвої 1-го та 2-го років, пагонів, гілок та бруньок із трьох гілок, розміщених у нижній, середній та верхній частинах крони дерева; кора, луб та деревина відбиралися на двох висотах. Для проведення цитогенетичних досліджень відбирали шишки з обраних модельних дерев.

Активність ^{137}Cs вимірювали на гамма-спектрометрі ADCAM-300, який мав напівпровідниковий детектор з високоочищеного германію GEM-30185 (EG&G ORTEC, США). Активності ^{90}Sr визначалися за стандартною радіохімічною методикою, яка базується на екстрагуванні ^{90}Sr з

розчину, після чого робився аналіз зразків на бета-спектрометрі СЕБ-001 (Україна).

Для всього масиву дерев застосовували метод польової радіометрії, який ґрунтується на вимірюванні щільності потоку бета-частинок від стовбура кожного дерева в режимах із відкритим та закритим коліматорами радіометра РКС-20.03 «Прип'ять» («Енергосила», Україна). Для декількох контрольних дерев різниця даних радіометра була зіставлена з результатами прямих радіохімічних вимірювань активності ^{90}Sr в деревині. Зробивши достатню кількість вимірювань, було встановлено, що значення щільності потоку прямо пропорційне питомій активності радіонукліда в деревині з коефіцієнтом $k = 0,026 \pm \pm 0,008$ (кБк/кг) $(\text{см}^{-2} \cdot \text{хв}^{-1})^{-1}$.

Для проведення цитогенетичних досліджень була використана методика одержання давлених (тимчасових та постійних) препаратів кореневих меристем рослин та їх аналіз анафазотелофазним методом [8]. Відносна кількість хромосомних аберацій визначалась окремо для кожного дерева із середніми характеристиками. При цьому аналізувалось близько 10 тисяч клітин із кожного дерева за допомогою мікроскопа Ахіоскоп 40 (Zeiss) та програмного забезпечення «Відеотест-Каріо 3.0».

Результати досліджень

Детальна інформація щодо розподілу радіонуклідів у деревах та його сезонної динаміки викладена в іншій нашій роботі [9]. На основі даних по накопиченню радіонуклідів різними частинами дерев та розробленої в УкрНДІСГР НУБіП дозиметричної моделі було оцінено дозове навантаження на їх апікальну меристему сосни [10].

Основним зовнішнім джерелом опромінення дерев експериментального масиву стали локалізовані в ґрунті радіонукліди (в основному ^{137}Cs ,

оскільки бета-випромінювання ^{90}Sr поглинається більшою мірою у ґрунті, а активності інших радіонуклідів чорнобильського викиду на даний період дуже малі). Гамма-випромінювання ^{137}Cs від усіх джерел (ґрунт та дерева) сформувало на експериментальних ділянках більш («Копачі», «Іванків») або менш («Рудий ліс») рівномірне поле, визначення впливу якого на формування дозових навантажень на дерева здійснювалося шляхом прямих вимірювань потужності поглинутої дози в місцях проростання дерев.

У той же час урахування бета-випромінювання інкорпорованих в органах дерев радіонуклідів потребувало формалізації завдання в рамках певного концептуального підходу. Ураховували випромінювання від локалізованих в органі-мішені радіонуклідів (у нашому випадку це центральна брунька верхівкової меристеми) та органах-джерелах, що розміщувалися поблизу (бічні бруньки, верхня частина стовбура, хвоя, бічні пагони) і досягали обраної точки органі-мішені. Для вирішення подібних завдань найкращим виявився мікродозиметричний підхід, який і був використаний у даному дослідженні. З метою попередження помилок, якими характеризуються різні емпіричні дозові функції, наш підхід базувався на використанні табульованих значень дозової функції точкового джерела випромінювання, отриманих методом Монте-Карло [11]. Максимальний пройдений шлях у біологічній тканині випромінюваних бета-частинок близько 1 см для ^{90}Y та приблизно 0,16 см для ^{90}Sr . Даний показник для ^{137}Cs близько 0,3 см.

Таким чином, розрахунок потужності дози для випадку, коли орган-джерело збігається з органом-мішенню, зводиться до інтегрування за об'ємом органа значень $\text{DRPS}(x)$. За таких умов доцільно перейти в циліндричну систему координат.

$$DH = \rho \cdot \iiint A(r, z) \cdot \text{DRPS} \left[\sqrt{(r - \xi \cdot \cos \phi)^2 + (\xi \cdot \sin \phi)^2 + (z - \zeta)^2} \right] \cdot r \, dr \, d\phi \, dz, \quad (1)$$

де ρ – щільність матеріалу органа, г/см^3 ; $A(r, z)$ – функція, що задає радіальне та поздовжнє розподілення питомої активності в органі, Бк/г ; r, z, ϕ, ξ, ζ – координати в циліндричній системі.

Також потрібно враховувати максимальний пройдений шлях частинки в органі при виборі меж інтегрування для спрощення розрахунків.

У рамках моделі на основі спостережень були зроблені припущення щодо геометричних параметрів верхівкової меристеми сосни. Власне система бруньок складалася з одної центральної (основної) бруньки та семи бічних. Висота бічної бруньки була в 1,5 рази менша, ніж висота

центральної в будь-який період року. Також протягом року залишалася незмінною форма бруньок, змінювався лише їх розмір. Форма бруньки описується залежністю між радіусом точки $\text{shape}(z)$ на поверхні бруньки та висотою z у циліндричній системі координат (з очевидним розміщенням осі Z по осі симетрії бруньки)

$$\text{shape}(z) = \frac{L}{\text{aspect}} \times \cos \left[(z - \text{shift} \cdot L) \cdot \frac{\pi}{2 \cdot (1 - \text{shift}) \cdot L} \right], \quad (2)$$

де L – висота бруньки, см; значення параметрів $aspect$ та $shift$ приймаються рівними 6 та 0,2 відповідно.

Також результати спостережень та вимірювань дали змогу зробити висновок, що питома активність радіонуклідів у бічних бруньках у півтора рази перевищувала питому активність у центральній. Радіус стовбура дорівнював сумі радіусів центральної та діаметра бічної бруньок. Діаметри семи бічних пагонів були рівні між собою та становили половину від діаметра центрального пагона (верхівки стовбура). На 1 см довжини центрального пагона припадало 10 хвоїнок завдовжки 5 см кожна. Кут нахилу бічних пагонів по відношенню до стовбура визначається 25° , ігнорується поглинання в них випромінювання. Для хвої на бічних пагонах дозовий коефіцієнт дорівнює коефіцієнту для бічних пагонів на підставі подібності геометричних параметрів переносу випромінювання в точку, для якої визначається інтегральний дозовий коефіцієнт. Під дозовим коефіцієнтом будемо розуміти потужність дози, що створювалась у вказаній контрольній точці радіонуклідом, інкорпорованим в органі-джерелі при його питомій активності 1 Бк/кг. Інтегральний дозовий коефіцієнт відповідав потужності дози з урахуванням усіх органів-джерел при одиничній питомій активності радіонуклідів у деревині, тобто за цих обставин беруться до уваги співвідношення між активностями радіонуклідів.

Дозові коефіцієнти для вказаної точки від радіонуклідів, локалізованих в стовбурі та бруньках, легко розраховуються, виходячи з виразу (1) у тривіальних межах інтегрування для відрізка стовбура та в межах, заданих виразом (2) для бруньок. Очевидно, при розрахунку дозових коефіцієнтів від інкорпорованих у пагонах та хвої радіонуклідів необхідно враховувати наявність повітряних проміжків між джерелом випромінювання та контрольною точкою. Ігнорується поглинання бета-випромінювання в повітрі, але приймаються до уваги геометричні фактори розсіювання. Тут ураховується поглинання випромінювання в центральному пагоні та бруньках на шляху x_1 до точки, для якої розраховується дозовий коефіцієнт, та розсіювання в повітряних проміжках $(x - x_1)$ даної системи опромінення. Для глици центрального пагона розрахунок проводився для всіх хвоїнок, які впливали на опромінення обраної точки (очевидно, що для хвоїнок, розміщених на більшій відстані d , поглинання в тканинах центрального пагона ставало повним при перевищенні x_1 гранично пройденої відстані бета-частинок даного радіонукліда. Наприклад, для найбільш енергетичного серед досліджуваних радіонуклідів ^{90}Y ця величина буде близько 1 см. Це означає, що при радіусі центрального пагона 0,5 см можна не враховувати внесок в опромінення від усіх хвоїнок, для кінчиків яких кут β перевищує 60°).

Основна розрахункова формула має такий вигляд:

$$DH(d) = aL \cdot \int_0^L \frac{DRPS \left[R \cdot \frac{\sqrt{(R+l \cdot \sin \alpha)^2 + (d-l \cdot \cos \alpha)^2}}{R+l \cdot \sin \alpha} \right]}{(R+l \cdot \sin \alpha)^2 + (d-l \cdot \cos \alpha)^2} \cdot dl. \quad (3)$$

Зрозуміло, що вираз для підрахунку випромінювання від бічних пагонів буде аналогічним – зміняться тільки величини конкретних параметрів.

Вирази (1) - (3) дозволяють розраховувати для обраної контрольної точки в рамках верхівкової меристеми значення індивідуальних дозових коефіцієнтів, тобто значення для фіксованих геометричних параметрів системи. Наступним кроком стало врахування співвідношень між питомими активностями радіонуклідів в елементах меристеми в різні проміжки часу та відповідних цим проміжкам геометричних розмірів даних елементів, які визначені в емпіричних дослідженнях. Отже, можна визначити сумарні дозові коефіцієнти для кожного інтервалу часу (місяця) упродовж року, які відповідають одиничній питомій активності радіонуклідів у деревині на контрольний момент часу t_0 . Тут потрібно зазначити, що

найбільший внесок в опромінення контрольної точки вносять радіонукліди, інкорпоровані в бруньках та центральному пагоні (стовбурі), тоді як випромінювання від інших органів, відповідно до проведених обчислень, можна не враховувати. Сума цих коефіцієнтів дає значення інтегрального дозового коефіцієнта, що дорівнює величині дози, поглинутої у контрольній точці меристеми протягом року, якщо питома активність радіонукліда в деревині в момент t_0 становить 1 Бк/кг. Він становить 6,2 мкГр/рік для ^{90}Sr та 18,1 мкГр/рік для ^{137}Cs . З урахуванням співвідношення між питомими активностями радіонуклідів на вказаний момент для дерев у «Рудому лісі» він становитиме 7,2 мкГр/рік при перерахуванні для ^{90}Sr та близько 190 мкГр/рік при перерахуванні із значень щільності потоку бета-частинок від стовбура дерева в обраній реалізації

радіометричного методу оцінки радіоактивного забруднення дерев для даного полігону [10].

Розроблена дозиметрична модель дала змогу провести розрахунок потужності поглинутих доз на верхівкову меристему дерев експериментального масиву, яка необхідна для вирахування дозових залежностей морфологічних та цитогенетичних ефектів хронічного опромінення.

Для дерев експериментального масиву на контрольному майданчику поблизу м. Іванків указаний показник був $4,5 \pm 0,5$ мГр/рік. При цьому істотний вплив на дозові навантаження мало внутрішнє опромінення від інкорпорованого ^{137}Cs . У цілому внутрішнє опромінення становило до 2/3 сумарної потужності дози, що пояснюється наближеністю майданчика до зони відчуження. Не дивлячись на наявність вираженої чорнобильської складової, сумарні дозові навантаження були достатньо невисокими, тому вибір ліг саме на полігон «Іванків» в якості контрольного, особливо з

урахуванням чутливості досліджуваного виду рослин до ґрунтово-кліматичних умов.

На полігоні «Копачі» потужності доз на верхівкову меристему були на порядок вищими – $1,9 \pm 0,3$ сГр/рік. Вплив зовнішніх джерел перевищував у два-три рази внутрішні.

У «Рудому лісі» найбільший вплив на загальне опромінення верхівкової меристеми дерев мало випромінювання інкорпорованого ^{90}Sr . Потужності доз варіювали в широкому діапазоні: від декількох сантигрей на рік до декількох грей на рік, при цьому внутрішнє опромінення підвищувалося з ростом сумарної потужності дози. Характерна для більшості дерев на даному полігоні потужність дози в декілька грей на рік мала достатньо високі показники, що й призводило до частих проявів радіобіологічних ефектів у «Рудому лісі» на морфологічному рівні.

У результаті цитогенетичного аналізу було виявлено підвищену кількість клітин з абераціями хромосом в апікальній меристемі первинного корінця проростків з насіння, відібраного на всіх трьох полігонах «Іванків», «Копачі» та «Рудий ліс». Результати цих досліджень продемонстровано в таблиці.

Середні значення \pm STD кількості абераційних змін у клітинах апікальної меристеми сосен зони відчуження ЧАЕС

Показники	"Рудий ліс" на траншеї	"Рудий ліс" поза траншеєю	"Копачі"	"Іванків"
Кількість клітин	10407 ± 917	10158 ± 963	10019 ± 41	5187 ± 844
Кількість аберацій	$106,6 \pm 36,9$	$113,5 \pm 14,7$	$39,6 \pm 4,5$	$13,5 \pm 3,5$
Мітотичний індекс	$66,8 \pm 8,5$	$66,8 \pm 2,6$	$73,2 \pm 4,3$	$55 \pm 1,5$
Абераційні анафаз	$16,7 \pm 8,3$	$14,2 \pm 6$	$10,6 \pm 2,1$	$11,2 \pm 1,8$
Абераційні телофази	$30,6 \pm 6,9$	$30,2 \pm 1,3$	$12,9 \pm 0,5$	$7,3 \pm 1,3$

Цитогенетичні дослідження дозволили побудувати залежність кількості порушень в анафазних та телофазних клітинах від дози, яку отримала верхівкова меристема за рік (рис. 1).

Залежність цитогенетичних порушень від дозових навантажень на верхівкову меристему має класичний вигляд і підтверджує положення про безпорогову дію іонізуючої радіації. Частота цитогенетичних порушень зростала від 8 % при дозовому навантаженні $4,5$ мГр/рік на полігоні «Іванків» до 34 % при дозі $5,3$ Гр/рік на полігоні «Рудий ліс».

На всіх експериментальних полігонах був визначений відсоток дерев з морфологічними змінами (різні види зняття апікального домінування при розвитку крон сосен) залежно від потужності поглинутої дози верхівковою меристемою [12]. Якщо з підвищенням потужності поглинутої дози збільшується кількість як морфозів, так і хромосомних аберацій, то між цими величинами також буде спостерігатись кореляційна залежність (рис. 2).

Отримані результати підтверджують класичну теорію, яка полягає в тому, що зі зростанням дози збільшується кількість генетичних порушень у рослині. Порівнюючи дані результати з раніше отриманими С. О. Гераськіним та співавторами [4], можна зробити певні висновки. По-перше, отримані результати відображають реальну картину радіоактивного забруднення зони відчуження ЧАЕС. По-друге, С. О. Гераськін та співавтори в 1995 р. при гострому одноразовому опроміненні насіння сосни в дозі 15 Гр отримали 2 - 4 % абераційних клітин в апікальній меристемі первинних корінців. У даних дослідженнях були отримані дещо інші результати, а саме при менших дозах опромінення кількість клітин з аферентними порушеннями є в декілька разів вищою. Це пояснюється тим, що при хронічному іонізуючому опроміненні негативний ефект, що проявляється в фенотипічних та генетичних ураженнях організмів, виявляється більшим.

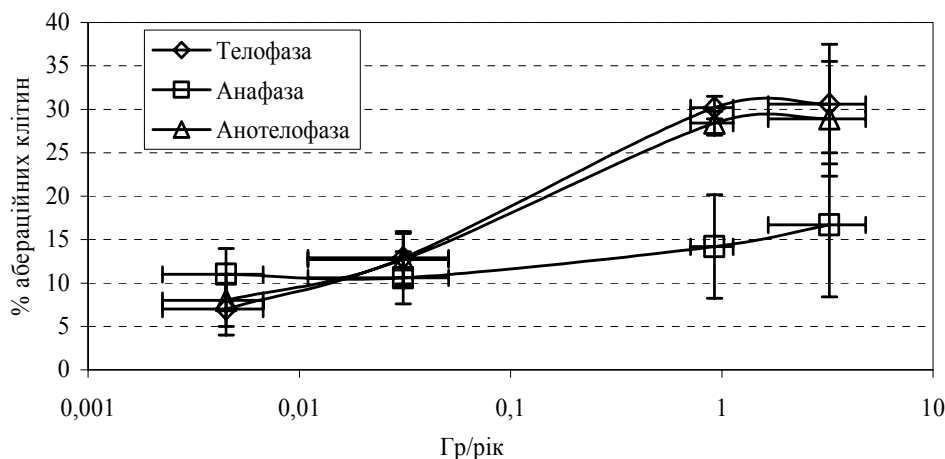


Рис. 1. Залежність «потужність дози - ефект» для цитогенетичних змін у кореневій меристемі проростків сосни. По осі абсцисс вказано значення потужності дози на верхівковій меристемі дерев; по осі ординат – відсоток абераційних клітин в апікальній меристемі первинних корінців.

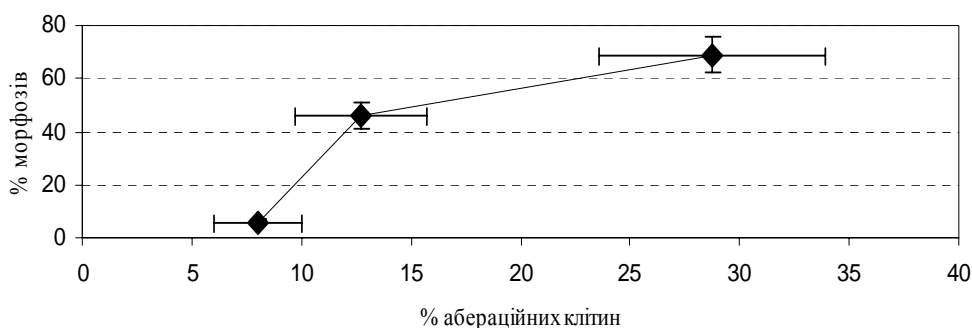


Рис. 2. Співвідношення між відносною кількістю дерев з морфологічними змінами (по осі ординат) та хромосомними абераціями в апікальній меристемі первинного корінця проростків з насіння експериментальних полігонів (по осі абсцисс).

Висновки

1. Розроблена дозиметрична модель дозволяє оцінювати поглинуту дозу на апікальну меристему дерев. Для дерев експериментального масиву потужність поглинутої дози на верхівковій меристемі дерев змінювалась від 4,5 мГр/рік для полігону біля м. Іванків до декількох грей на рік для дерев, розміщених на траншеях у «Рудому лісі». Характерна для більшості дерев на даному полігоні потужність дози в декілька грей на рік була досить високим показником, що й призвело до підвищення частоти прояву радіобіологічних ефектів.

2. Установлено, що під дією хронічного опромінення від інкорпорованих радіонуклідів у насінному матеріалі сосни звичайної виникають численні пошкодження клітин. Для експериментального масиву, що представляє широкий діапа-

зон радіоактивного забруднення дерев, показана тенденція до збільшення внеску делецій у загальну кількість пошкоджень від 75 до 95 % зі збільшенням рівня поглинутої дози в органах сосни. Статистично достовірно встановлено, що відсоток абераційних клітин зростає зі збільшенням рівня поглинутої дози в органах сосни.

3. Для реальних умов чорнобильського радіоактивного забруднення була побудована залежність «доза - ефект» для цитогенетичних (відсоток абераційних клітин в апікальній меристемі первинних корінців) радіобіологічних ефектів при хронічному опроміненні сосни звичайної. Результати проведених цитогенетичних досліджень можуть бути використані для нормування допустимих рівнів опромінення біоти, а також для розвитку теоретичних підходів до опису радіобіологічних ефектів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Fesenko S.V., Alexakhin R.M., Geras'kin S.A. et al. Comparative radiation impact on biota and man in the area affected by the accident at the Chernobyl nuclear power plant // Journal of Environmental Radioactivity. - 2005. - Vol. 80, issue 1. - P. 1 - 25.
2. A framework for assessing the impact of ionizing radiation on non-human species / Ed. J. Valentin. - Vienna: Annals of the ICRP, 2002. - 70 p. - (ICRP Publication 91).

3. Козубов Г.М., Таскаев А.И. Радиобиологические исследования хвойных в районе Чернобыльской катастрофы. - М.: ИПЦ «Дизайн. Информация. Картография», 2002. - 272 с.
4. Geraskin S.A., Zimina L.M., Dikarev V.G. et al. Bioindication of the anthropogenic effects on micropopulations of *Pinus sylvestris* L. in the vicinity of a plant for the storage and processing of radioactive waste and in the Chernobyl NPP zone // Journal of Environmental Radioactivity. - 2003. - Vol. 66. - P. 171 - 180.
5. Chernobyl Catastrophe / Ed. V. G. Baryakhtar. - K.: House of Annual, 1997. - 579 p.
6. Рубанович А. В., Кальченко В. А. Нарушение сегрегации в хронически облучаемых популяциях *Pinus sylvestris* L., произрастающих в зоне аварии на Чернобыльской АЭС // Генетика. - 1994. - Т. 30, № 1. - С. 126 - 128.
7. Кальченко В. А., Архипов Н. П., Федотов И. С. Мутагенез ферментных локусов, индуцированный в мегаспорах *Pinus sylvestris* L. ионизирующим излучением при аварии на Чернобыльской АЭС // Там же. - 1993. - Т. 29, № 2. - С. 266 - 273.
8. Паушева З. П. Практикум по цитологии растений. - М.: Агропромиздат, 1988. - 271 с.
9. Йощенко В. І., Бондар Ю. О. Річна динаміка питомої активності ^{137}Cs та ^{90}Sr в штучних соснових насадженнях Чернобыльської зони відчуження // Науковий вісник НАУ. - 2008. - Вип. 118. - С. 222 - 227.
10. Йощенко В. І., Бондарь Ю. О. Дозовая зависимость частоты морфологических изменений в насаждениях *Pinus sylvestris* L. в Чернобыльской зоне отчуждения // Радиационная биология. Радиоэкология. - 2009. - Т. 48, № 1. - С. 258 - 274.
11. Cross W. G., Freedman N. O., Wong P. Y. Beta-ray dose distributions from point sources in an infinite water medium // Health Physics. - 1992. - Vol. 63 (2). - P. 160 - 171.
12. Йощенко В. І., Кашпаров В. А., Бондарь Ю. О. Биологические и цитогенетические эффекты хронического облучения сосны в Чернобыльской зоне отчуждения // Гигиенические аспекты обеспечения радиационной безопасностью населения на территориях с повышенным уровнем радиации: Материалы междунар. конф. (Санкт-Петербург, 21 - 24 июня 2008 г.). - СПб., 2008. - С. 67 - 68.

ДОЗОВАЯ ЗАВИСИМОСТЬ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ И АБЕРАЦИЙ В СОСНОВЫХ НАСАЖДЕНИЯХ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ ЗОНЫ ОТЧУЖДЕНИЯ

В. А. Кашпаров, Ю. О. Бондарь, В. И. Йощенко

Определены дозовые нагрузки на верхушечную меристему сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) трех экспериментальных полигонов. Подсчитано количество морфологических и цитогенетических изменений в деревьях и построены зависимости этих показателей от дозовых нагрузок на верхушечную меристему.

DOSE DEPENDENCE OF MORPHOLOGICAL CHANGES AND ABERRATION TO THE PLANTATION OF PINE IN THE CHERNOBYL NPP EXCLUSION ZONE

V. O. Kashparov, Yu. O. Bondar, V. I. Yoschenko

Dose rates to the Scots pine' (*Pinus sylvestris* L.) apical meristem at three experimental sites were calculated. The morphological and cytogenetic changes of the trees were estimated, and the dependences of these changes on the dose rates to the apical meristem were formulated.

Надійшла до редакції 11.02.09,
після доопрацювання - 31.03.09.