

## ОСОБЛИВОСТІ РОСТУ ТА МОРФОГЕНЕЗУ СОСНИ ЗВИЧАЙНОЇ У ЗОНІ РАДІАЦІЙНОГО ВПЛИВУ АВАРІЇ НА ЧОРНОБИЛЬСЬКІЙ АЕС

**Ю. О. БОНДАР**, кандидат біологічних наук, доцент кафедри радіобіології та радіоекології

**І. М. ГУДКОВ**, доктор біологічних наук, професор, завідувач кафедри радіобіології та радіоекології

**Національний університет біоресурсів і природокористування України**

*E-mail:* ingudkov@ukr.net

**Анотація.** Лісові насадження в умовах радіаційних аварій здатні затримувати до 90 % радіоактивних опадів. Внаслідок цього в них можуть формуватися високі дози як зовнішнього, так і внутрішнього опромінення рослин іонізуючою радіацією. Встановлено, що хвойні дерева набагато активніше накопичують  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$ , ніж листяні. У цих умовах у рослин сосни, види якої відзначаються високою чутливістю до багатьох несприятливих факторів, у тому числі й іонізуючої радіації, відзначали аномалії в формуванні меристем, загибель верхівкових бруньок, закладку великої кількості бічних бруньок з невпорядкованою орієнтацією, спостерігали утворення вкорочених пагонів з короткою або гігантською хвоєю, яка була потовщеною або більш видовженою порівняно зі звичайною, утворення терат.

Причиною появи таких морфологічних змін була елімінація центральних клітин апікальних стеблових меристем та клітин перехідної зони, в той же час як значна частина бруньки формувалась з клітин периферійної зони. Результатом цього було зняття апікального домінування і формування низькорослих дерев з багаточисельними морфологічними порушеннями. У меристемних клітинах таких дерев спостерігали порушення поділу клітин: збільшення кількості К-мітозів, клітин з абераціями хромосом.

**Ключові слова:** аварія на Чорнобильській АЕС, сосна звичайна, морфози, порушення поділу клітин

**Актуальність.** Велике значення у перерозподілі та фіксації радіонуклідів у навколишньому середовищі мають лісові екосистеми. Ліс може відігравати роль глобального міграційного фактора. Радіонукліди, що осідають на кронах дерев, під впливом атмосферних опадів і внаслідок опадання листя переміщуються в лісову підстилку і залучаються до основних біоекологічних процесів. Саме тому надзвичайно важливим є виявлення закономірностей накопичення радіонуклідів різними видами деревних порід [1]. Особливу роль у перерозподілі радіонуклідів в лісових екосистемах відіграє сосна звичайна (*Pinus silvestris* L.), яка окрім того, що є основним лісоутворюючим видом на забруднених радіоактивними

речовинами територіях, постраждалих внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС, ще й є однією з найбільш радіочутливих видів рослин [2].

**Метою** даного **дослідження** є визначення особливостей росту і розвитку рослин сосни звичайної в умовах радіоактивного забруднення території.

На прикладі унікальних популяцій сосни цього виду, що проростають на території Хренівського бору у Воронізькій області (РФ), яка не постраждала внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС, показана надзвичайна полімофність цієї рослини і виділено 21 кліматичний екотип для даного виду [3]. Вивчено популяцію дерев середньою висотою 32,5 м, з яких збирали шишки в березні і пророщували насіння, отримане з цих шишок. Аналіз хромосом та ядерець меристематичних клітин корінців проростків сосни виявив значну варіабельність числа хромосом з перетяжками в межах одного дерева, у різних дерев та в популяції в цілому. Число ядерець суттєво варіювало (від 2 до 12). Максимальне значення хромосомних порушень за мітозу не перевищувало 2,1 %, що для сосни є рівнем спонтанного мутаційного процесу. Знайдено близько 1 % клітин з мікроядрами, що вказує на наявність нерепарованих пошкоджень хромосом. Умови існування цієї популяції сосни не оптимальні внаслідок суттєвого антропогенного впливу. В оптимальних умовах Усманського бору (РФ) варіабельність хромосомних порушень клітин меристем коренів проростків сосни звичайної значно менша.

Вивчення інших популяцій сосни звичайної, які не зазнавали впливу понадфонового іонізуючого опромінення, показало, що вони надзвичайно чутливі до умов зовнішнього середовища [4–6]. Встановлено, що під впливом несприятливих умов зростає самоопилення рослин, що спричиняє дефіцит гетерозигот і зміщення в загальнопопуляційному пулі в бік збільшення гомозигот. Життєздатність пилку сосни за пророщування в сахарозі та у воді зменшується, як і довжина пилкових трубочок. Найсуттєвіші зміни спостерігались за дефіциту води. Отже, сосна належить до надзвичайно чутливих до несприятливих умов середовища видів рослин.

Дослідження, які були проведені у 80–90-х роках минулого століття щодо аналізу популяцій сосни, що росли в місцях проведення ядерних випробувань 40–50-х років, свідчить про високу здатність виду до консервації генетичних змін, викликаних дією радіаційного чинника [7, 8]. З метою вивчення порушень мейозу дослідили 279 зразків (пагони з чоловічими (мікростробіли) та жіночими (мегастробіли) шишками і насіння) від 119 рослин сосни звичайної, що росли в семи лісництвах Алтайського краю (РФ). Встановлено, що популяції дерев достовірно (в десятки разів) відрізняються за числом клітин з порушеннями в першому мейотичному поділі та за числом шишок із порушеннями в залежності від району. Головний тип генетичних змін – затримання утворення веретена поділу, яке спричиняло нерозходження хромосом і їх лізис, а також порушення в розходженні унівалентів. В контрольних зразках спостерігали 1–3 % аберацій в першому поділі мейозу та 0,4–0,8 % – другому, що не перевищує рівень спонтанної мінливості. Автори приходять до висновку, що негативний вплив радіонуклідів на окремі рослини накопичувався протягом багатьох років, а мейоз виступає в ролі бар'єра по відношенню до передачі нащадкам

деяких типів мутацій, внаслідок чого утворюється нежиттєздатне насіння та стерильний пилок. Порушення клітинних поділів є ознакою, яка знаходить під контролем відбору. Встановлено, що частота аномалій в мейозі в дослідних популяціях сосни достовірно відрізняється від того, що відзначено в контрольній популяції.

Соснові насадження в умовах радіаційної аварії здатні затримувати до 90 % радіоактивних опадів [9, 10]. Значна поглинальна здатність обумовлена тим, що поверхня багаторічної не опадаючої хвої протягом цілого року концентрує радіонукліди. В 1986 р. внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС на площі до 500 га поглинута доза перевищувала 150 Гр, що спричинило повну загибель сосни та ялини 15–30-річного віку протягом трьох наступних років [11]. На інших територіях зі значно меншою дозою опромінення того ж року відзначали утворення вкорочених пагонів з густо розташованими зачатками листків та передчасне опадання хвої.

Найчастіше у 1987 р. у рослин сосни відзначали аномалії в формуванні меристем, пошкодження меристем, загибель верхівкових бруньок, закладку великої кількості бічних бруньок з невідповідною орієнтацією. Утворювались вкорочені пагони з короткою або гігантською хвоєю, яка була потовщеною або більш видовженою порівняно зі звичайною. Кількість бруньок на таких пагонах перевищувало норму.

В 1988 р. відзначено утворення терат, які ще називають „відьмині мітли”. Причиною появи таких морфологічних змін була елімінація центральних клітин апікальних стеблових меристем сосни та клітин перехідної зони, в той же час як значна частина бруньки формувалась з клітин периферійної зони. Взимку 1987–1988 рр. було знайдено потовщення бруньок та заглиблення в місці розташування апексу. У пагонів з жовтою та вкороченою хвоєю латеральні бруньки здебільшого не розвивались. Значне розширення бруньки обумовлювалось збільшення кількості клітин периферійної меристеми. Покривні луски нерідко модифікувались в голки.

В 1993–1994 рр. у 50–60 % рослин сосни та ялини 2–9-річного віку була відзначена друга хвиля аномального морфогенезу, яка обумовлювалась поєднанням зовнішнього, інкорпорованого та хронічного опромінення [12]. Причиною появи цього явища були пожежі 1990–1992 років у 30-кілометровій зоні навколо Чорнобильської АЕС, що призвело до вигорання лісової підстилки і, як наслідок, до осадження на деревах та інших компонентах біогеоценозу радіоактивно забрудненої золи.

Пізня стадія аварії на Чорнобильській АЕС характеризується появою численних морфологічних змін у соснових насадженнях на території колишнього «Рудого лісу» та на порядок нижчими значеннями для інших територій зони відчуження [13]. Дослідження, які були проведені у 2005–2009 рр., показали, що основним видом морфологічних порушень у рослин сосни звичайної були зняття апікального домінування за розвитку крони дерева, поодинокі зустрічались оголення пагонів та депігментація хвої на окремих гілках – виникнення хлорофільних мутацій. Авторами була розроблена модель дозового навантаження на верхівкову меристему сосен з урахуванням вмісту радіонуклідів у різних органах та тканинах рослини та їх сезонну динаміку. Використовуючи дану модель було визначено, що на контрольному полігоні поблизу міста Іванків Київської області за дозового навантаження на

верхівкову меристему 4,5 мГр / год морфологічні зміни виявляються у 6 % дерев, на полігоні «Копачі» (зона відчуження Чорнобильської АЕС) даний показник складає 1,9 сГр / год за 46 % дерев, а на полігоні «Рудий ліс» потужність дози досягала декількох Гр / год і частота морфологічних порушень складала 69 %.

За вивчення аномально вкороченої хвої сосни звичайної, яку збирали в районі с. Янів у січні 2001 р., була виявлена зміна рівня експресії 42 генів, у двох з них відзначали особливий рівень експресії [14]. Це гени, що кодують убіквітинзв'язувальний фермент та аскорбатпероксидазу. Автори приходять до висновку, що в аномальній хвої особливо зростає синтез аскорбатпероксидази. Це не дивно і очевидно навіть без складних аналізів, адже добре відомо, що різні стресові чинники, у тому числі й іонізуюча радіація, спричиняють окислювальний стрес, яких супроводжуються утворенням перекису водню, вільних радикалів, окислених сполук, а еволюційно сформовані системи, до складу яких входить аскорбатпероксидаза, призначені утилізувати такі сполуки і захищати клітину від пошкоджуючої дії стресового чинника.

Вивчення каріотипу сосни звичайної з зони відчуження ЧАЕС проводили в 1999 р. [15]. Як об'єкт дослідження використовували вкорочену та нормальну хвою 7–12-річних дерев, яку збирали в червні 1999 р. поблизу с. Янів на посадках, розташованих у пунктах тимчасового захоронення та локалізації радіоактивних відходів, де потужність зовнішнього  $\gamma$ -опромінення складала 1–3 мР / год. Загальна кількість клітин з хромосомними абераціями та порушеннями мітотичного апарату у контрольній хвої складала 23,14 %, а у аномальної – 35,86 %. Кількість клітин з К-мітозами у контрольній хвої складала 18 %, а у аномальної – 24,1 %, клітин з мітками в контролі 4,4 %, в досліді – 8,5 %, клітин з фрагментами в контролі – 0,74 %, в досліді – 3,26 %. Отже, в умовах радіаційної аномалії відзначаються суттєві порушення процесу поділу соматичних клітин хвої. На жаль, автори не приводять відповідних даних для рослин, які вирощувались в чистій зоні, тому важко оцінити наскільки отримані дослідниками результати відхиляються від значень спонтанної мінливості у сосни даного регіону.

У роботах інших авторів, які досліджували соснові насадження на території колишнього «Рудого лісу» біля села Копачі та міста Іванків (умовний контроль), відзначається, що найбільша кількість абераційних змін (75–95 % від загальної кількості аберацій) апікальної меристеми насінневих корінців була представлена фрагментами, водночас відзначалася тенденція до зростання їх внеску в загальну кількість аберацій із збільшенням забруднення майданчика, тоді як внесок інших видів аберацій, відповідно, зменшувався [16]. Відносна кількість аберацій корелювала з рівнями радіоактивного забруднення дерев і її можна ранжирувати так: «Рудий Ліс» на траншеї > «Рудий Ліс» поза траншеєю > «Копачі» > «Іванків». Частота порушень у генетичному матеріалі зростала від 8 % за дозового навантаження 4,5 мГр / рік на полігоні «Іванків» до 34 % за дози 5,3 Гр / рік на полігоні «Рудий ліс». Отримані результати описуються класичною залежністю «доза-ефект».

На дослідній ділянці лісництва Дубровицького району Рівненської області було встановлено, що найбільша частка сумарної активності  $^{137}\text{Cs}$

екосистеми (76,5 %) була зосереджена у ґрунті, в тому числі 18,1 % у лісовій підстилці та 58,4 % – у мінеральних шарах ґрунту [1]. Відповідно, компоненти надземної фітомаси ценозу утримували 23,5 % валового запасу  $^{137}\text{Cs}$  лісової екосистеми. У зв'язку із значною фітомасою частка деревного ярусу у розподілі  $^{137}\text{Cs}$  в екосистемі є визначальною серед компонентів фітоценозу – 13,7 %. На основі отриманих результатів радіологічного дослідження було визначено, що вміст радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  у дуба звичайного (*Quercus robur* L.) становив в середньому 1786 Бк/кг; сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.) 2394 Бк/кг; берези повислої (*Betula pendula* R.) – 1590 Бк/кг. Загалом, автори роблять висновок, що хвойні дерева набагато активніше накопичують  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$ , ніж листяні породи (вони є більш швидкоростучими, окрім того важливу роль в накопиченні нуклідів відіграє хвоя).

Проведено аналіз насіння сосни звичайної, яке збирали на Старопетрівській лісній дослідній станції Київської області (контроль) та в різних місцях 30-кілометрової зони ЧАЕС (с. Новошепеличі, с. Чистогалівка, с. Дитятки) [17]. Насіння контрольного варіанту за період формування отримало поглинену дозу від 0,03 до 6 Гр. Зразки насіння, зібраного в різних місцях 30-кілометрової зони, з різних дерев об'єднували в одну партію для нівелювання явища індивідуальної мінливості. Частину зразків насіння сосни звичайної контрольного та дослідного варіантів додатково опромінювали  $\gamma$ -радіацією в дозах 0,03, 3 та 6 Гр. В неопроміненому контролі схожість насіння складала  $67,2 \pm 5,3$ ; після опромінення в дозі 0,03 Гр –  $58,2 \pm 2,7$ ; дозі 3 Гр –  $66,0 \pm 5,2$  і 6 Гр –  $63,2 \pm 4,1$  %. Подібні показники проростання насіння сосни звичайної були зареєстровані й іншими дослідниками [18]. Однак, життєздатність протопластів клітин, виділених з коренів проростків довжиною 40–60 мм і визначених за допомогою вітальних барвників без додаткового опромінення у всіх варіантах складала 99,9 %, після опромінення в дозі 20 Гр складала від 86 до 98 %, в дозі 40 Гр – від 76 до 97,8 %. Авторами виявлені незначні розбіжності в кінетиці елімінації розривів ДНК в різних варіантах, тому робиться висновок, що репаративні системи ефективно працюють лише у разі значного радіаційного навантаження на систему. Проведені дослідження збіднює фактична відсутність контролю, адже всі проби насіння відбирались в місцевостях, що зазнали суттєвого впливу радіаційного забруднення, адже в оптимальних умовах росту схожість насіння сосни звичайної варіює в межах 90–98 % [3].

Дослідження, що проводились в найбільш радіоактивно забруднених місцях Брянської області (РФ) протягом 2007–2011 рр. показали, що основним дозоутворюючим радіонуклідом даної місцевості був  $^{137}\text{Cs}$ , питома активність якого у верхньому 5-см шарі ґрунту коливалась в діапазоні 1570–96900 Бк / кг та в 20–1320 разів перевищувала цей показник на контрольній ділянці [19]. Максимальний вміст  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  в шишках соснових дерев перевищував цей параметр для контрольних полігонів у 315 та 78 разів відповідно, поглинута доза генеративними органами коливалась в межах 0,13–129,9 мГр / год. Якість насіння експериментальних популяцій протягом всіх років досліджень вирізнялась підвищеною міжроковою мінливістю і не виявляла зв'язку з рівнями радіоактивного забруднення майданчиків або поглинутою генеративними органами сосни дозою. Тому автори прийшли до

висновку, що кількість абортивного насіння та його схожість визначалась впливом інших факторів, зокрема погодними умовами.

Вивчення міграції  $^{137}\text{Cs}$  у кедрових лісах забруднених внаслідок аварії на АЕС «Фукусіма-1» (Японія) у 2014–2016 рр. показало, що питома активність у надземній біомасі, зокрема деревній рослинності, за дослідний період залишалась сталою, в той час як у підстилці вміст радіонуклідів значно зменшився (від  $20 \pm 11$  % у 2014 р. до  $4,6 \pm 2,7$  у 2016 р.). Причинами пониження у підстилці концентрації  $^{137}\text{Cs}$  були вимивання у ґрунт та зменшення забруднення свіжого опаду листя. 80 % радіонуклідів екосистеми містились у верхньому 5-см шарі ґрунту [20]. Порівнявши перерозподіл радіоактивного та стабільного цезію між різними компонентами екосистеми автори прийшли до висновку, що радіонуклід поступово наближається до квазірівноважного стану зі своєю стабільною формою у надземній біомасі. Баланс маси запасів радіонуклідів, що враховував надходження  $^{137}\text{Cs}$  у підстилку та дерева, дозволив приблизно оцінити щорічний притік внаслідок кореневого всмоктування на рівні  $2 \pm 1$  % від його загальної кількості в екосистемі.

Отже, техногенні катастрофи, до яких належить й наймасштабніша радіаційна аварія на Чорнобильській АЕС, можуть призводити до зміни рослинного покриву внаслідок різної чутливості окремих видів рослин до дії пошкоджуючого чинника [2]. Вивчення особливостей росту й розвитку сосни звичайної в умовах радіонуклідного забруднення територій однозначно свідчить про цей процес. І хоча такі дослідження проводяться протягом тривалого часу з використанням різноманітних методів та підходів, однак значна кількість даних залишилась фрагментарними, неповними, нерідко відсутній повноцінний адекватний контроль. Відсутні також чіткі дані про частоту та кількість морфогенних аномалій, немає їх класифікації. На сьогодні через 32 роки після аварії на Чорнобильській АЕС розглядаються вже віддалені, але абсолютно очевидні наслідки радіаційної дії. Необхідно провести детальний системний моніторинг насаджень сосни в зоні відчуження Чорнобильської АЕС за ознакою частоти появи морфогенетичних аномалій у дерев різного віку, життєздатності насіння, стану бруньок, аномалій поділу соматичних клітин хвої та проростаючого насіння. Для відбору проб потрібно залучити значно більше рослин, ніж в проведених до цього часу дослідженнях, що дозволить отримати достовірні результати, охарактеризувати стан насаджень сосни та з'ясувати причини пригнічення їх росту. При цьому обов'язково слід враховувати і безсумнівний вплив на ці процеси місця зростання рослин – ґрунтове покриття, кислотність ґрунту, забезпечення водою та елементами живлення, інше.

## References

1. Trohymchuk, I. M. (2015). Lisorozvedennya na radioacsi'no zabrydneni' terutorii [Forest felling on radioactive contaminated territory]. Herald of Cherkasy University, 19, 121–126.
2. Gudkov, I. M. (2016). Radiobiologiya [Radiobiology]. Oldi-Plus, 504.
3. Butorina, A. K., Cherkashchina, A. I., Chernobov, A. I., Avdeyeva, I. A. (2005). Izmenchivost csutologicheskikh pokazatele' semyan sosnu obuknovenno'

ynikalnogo Hrenovskogo bora [Variability of cytological indices of pine seed of the ordinary exceptional Khrenovsky boron]. *Genetics*, 41 (6), 778–783.

4. Korshikov, I. I., Kalafat, L. A. (2004). Sravnitelnoe izychnenie allozimnogo polimorfizma v gryppah derev'ev sosnu obuknovenno' (*Pinus silvestris* L.) s razno' semenno' prodyktivnostyu [Comparative study of allozym polymorphism in groups of pine trees (*Pinus silvestris* L.) with different seed production]. *Cytology and Genetics*, 38 (2), 9–14.

5. Shigapov, Z. H., Timeryanov, A. Sh., Yanbaev, Yu. A., Shigapov, A. I. (1996). Dinamika geneticheskoy struktury potomstva po godam na lesosemennoi plantacii i v prirodnoi populyacii sosnu obuknovennoi (*Pinus silvestris* L.) [Dynamics of the genetic structure of offspring by years on the forest-seed plantation and in the natural population of pine common]. *Genetics*, 32 (10), 1362–1370.

6. Romanovsky M. G. (1989). Gematofytnaya smertnost' senmyapochek sosny obuknovennoy [Gametophyte death rate of Scots pine buds]. *Genetics*, 25 (1), 99–107.

7. Tikhomirov, F. A., Fedotov, I. S. (1982). Radiochustvitelnost' generanyvnyh i vegetanyvnyh organov sosny obuknovennoy v usloviyah osennego i vesennego oblucheniya [Radiosensitive of generative and vegetative organs of Scots pine in the conditions of autumn and spring irradiation]. *Radiobiology*, 22 (4), 502–510.

8. Peltek, S. E. i dr. (1996). Izuchenie populyatsiy vyshykh rastenyi, nahodyaschihsya v zone vlyaniya Semypalatinskogo poligona [Study of higher plants populations located in the zone of influence of the Semipalatinsk test site]. *Cytology and Genetics*, 30 (4), 9–14.

9. Grodzinskiy, D. M., i dr. (1991). Antropogennaya radionuklidnaya anomal'ya i rasteniya [Anthropogenic radionuclide anomaly and plants]. Kiev, Ukraine: Lybid, 160.

10. Kozubov, G. M., Taskaev, A. I. (1994). Radiobiologicheskie i radioekologicheskie issledovaniya drevesnykh raiteniy [Radiobiological and radioecological studies of woody plants]. Sankt-peterburg, Russia: Nauka, 248.

11. Gudkov, I. M., Gaichenko, V.A., Kashparov, V.O. (2017). Sil's'kogospodars'ka radioekologiya [Agricultural radioecology]. Kiev, Ukraine: Lira-K, 268.

12. Srochinskiy, B. V. (1998). Osobennosti belkovogo sostava anomal'noy hvoi eli (*Picea abies*) i sosny (*Pinus silvestris*) iz 10 km zony Cgernobyl'skoy AES [Special of the protein consist of the anomal fir needles (*Picea abies*) and pine (*Pinus silvestris*) from the 10 km zone of the Chernobyl Nuclear Power Plant]. *Cytology and Genetics*, 32 (5), 35–40.

13. Yoschenko, V. I., Bondar, Yu. O. (2009). Dozovaya zavisimost' chastoty morfologicheskikh izmeneniy v nasazhdeniyah *Pinus sylvestris* L. V Chernobyl'skoy zone otchuzhdeniya [Dose dependence of the frequency of morphological changes in plantations of *Pinus sylvestris* L. in the Chernobyl exclusion zone]. *Radiation biology. Radioecology*, 48 (1), 258–274.

14. Zelena, L. B., Sorochn's'ky, B. V. (2005). Osoblivosti ekspresii geniv u morfologichno anomal'noi hvoi sosny zvychnoi [Special of gene expression in morphological abnormal Scots pine needles]. *Ukrainian Botanical Journal*, 77 (1), 78–83.

15. Zelenaya, L. B., Srochinskiy, B. V., Grodzinskiy, D. M. (2002). Osobennosyu kariotipa tkaney sosny (*Pinus silvestris* L.) sformirovavshih morfologicheskies anomalii v usloviyah zonu otchuzhdeniya Chernobyl'skoy AES [Special karyotype of pine matter (*Pinus silvestris* L.) that formed morphological anomalies in the Chernobyl exclusion zone]. *Reports NAS Ukraine*, 1, 172–175.

16. Yoschenko, V. I., et al. (2011). Chronic irradiation of *Pinus sylvestris* in the Chernobyl exclusion zone: dosimetry and radiobiological effects. *Health Physics*, 101 (4), 393–408.

17. Sokolov, M. V., Isaenkov, C. B., Sorochn's'ky, B. V. (1998). Hroniche oprominennya v malykh dozah zdatne modufikuvaty pokaznyky zhittediyal'nosti sosny

zvychainoi (*Pinus silvestris* L.) [Chronic irradiation in small doses can modify the viability indicators of pine (*Pinus silvestris* L.)]. *Cytology and Genetics*, 32 (4), 65–71.

18. Shevshenko, V. A., i dr. (1996). *Geneyticheskie posledstvia dlya populyacii rasteniy radioaktivnogo zagryazneniya okruzhayushey sredy v svazi s Chernobyl'skoy avariey* [Genetic implications for the plants population of radioactive contamination of the environment in connection with the Chernobyl accident]. *Radiation biology. Radioekology*, 36 (4), 531–545.

19. Geras'kin, S. A., Vasil'ev, D. V., Kuz'menkov, A. G. (2015). *Osobennosti formirovaniya semyan sosny obyknovennoy v otdalennuy period posle avarii na Chernobyl'skoy AES* [Special of pine seed formation in the remote period after the accident at the Chernobyl nuclear power plant]. *Radiation biology. Radioekology*, 55 (5), 539–547.

20. Yoschenko, V., Takase, T., Hinton, T. G., Nanba, K., Onda, Y., Konoplev, A., Goto, A., Yokoyama, A., Keitoku, K. (2018). *Radioactive and stable cesium isotope distributions and dynamics in Japanese cedar forests*. *Journal of Environmental Radioactivity*, 186, 34–44.

## **ОСОБЕННОСТИ РОСТА И МОРФОГЕНЕЗА СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В ЗОНЕ РАДИАЦИОННОГО ВЛИЯНИЯ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС**

**Ю. О. Бондарь, И. Н. Гудков**

**Аннотация.** *Лесные насаждения в условиях радиационных аварий способны задерживать до 90 % радиоактивных осадков. Вследствие этого у них могут формироваться высокие дозы, как внешнего, так и внутреннего облучения растений ионизирующей радиацией. Установлено, что хвойные деревья намного активнее накапливают  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , чем лиственные. В этих условиях у растений сосны, виды которой определяются высокой чувствительностью ко многим неблагоприятным факторам, в том числе и ионизирующей радиации, определили аномалии в формировании меристем, гибель верхушечных почек, закладку большого количества боковых почек с беспорядочной ориентацией, наблюдали образование укороченных побегов с короткой или гигантской хвоей, которая была утолщенной или более удлинённой по сравнению с обыкновенной, образование терат.*

*Причиной появления таких морфологических изменений была элиминация центральных клеток апикальных стеблевых меристем и клеток переходной зоны, в то же время как большая часть почки формировалась из клеток периферийной зоны. Результатом этого было снятие апикального доминирования и формирование низкорослых деревьев с многочисленными морфологическими нарушениями. В меристемных клетках таких деревьев наблюдали нарушения деления клеток: увеличения количества К-митозов, клеток с аберрациями хромосом.*

**Ключевые слова:** *авария на Чернобыльской АЭС, сосна обыкновенная, морфозы, нарушения деления клеток*

## **FEATURES OF PINE TREE'S GROWTH AND MORPHOGENESIS IN THE RADIATION EFFECT ZONE OF THE CHORNOBYL NPP ACCIDENT**



**Yu. Bondar, I. Gudkov**

**Abstract.** *Forest plantations can hold up to 90 % of radioactive precipitation in the conditions of radiation accidents. As a result, plants can obtain high doses of both external and internal irradiation by ionizing radiation. It is established that conifers are much more active accumulate  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  than deciduous trees. Under these conditions pine trees which are characterized by high sensitivity to many unfavorable factors, including ionizing radiation, noted anomalies in the formation of meristems, the death of apical buds, the formation of a large number of side buds with disordered orientation, observed the formation of truncated shoots with short or a giant needles that were thickened or more elongated than conventional, the formation of teratomas. The reason for the appearance of such morphological changes was the elimination of the central cells of the apical stem meristems and cells of transitional zone, while a significant part of the bud was formed from cells of the peripheral zone. The result was the removal of apical dominance and the formation of low-growing trees with many morphological disturbances. There was a violation of the division of cells in meristem cells of such trees: an increase in the number of K-mitoses, cells with chromosomal aberrations.*

**Keywords:** *accident at the Chernobyl nuclear power plant, pine tree, morphoses, violation of cell division*