

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ГІДРОБІОЛОГІЇ

ЯВНЮК
Андріан Андріанович



УДК [[581.141:582.542.11]:504.455(477.41/.42)](043.3)

ОСОБЛИВОСТІ РАННЬОГО ОНТОГЕНЕЗУ ОЧЕРЕТУ ЗВИЧАЙНОГО
***PHRAGMITES AUSTRALIS* (CAV.) TRIN. EX STEUD. В УМОВАХ**
РАДІОНУКЛІДНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ВОДОЙМ

03.00.17 – гідробіологія

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата біологічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному авіаційному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор біологічних наук, професор, завідувач лабораторії радіоекологічної надійності біосистем
Кутлахмедов Юрій Олексійович,
Інститут клітинної біології та генетичної інженерії НАН України

Офіційні опоненти: доктор біологічних наук, професор, директор Наукового інституту радіаційної та техногенно-екологічної безпеки
Томілін Юрій Андрійович,
Чорноморський національний університет імені Петра Могили.

кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник відділу іхтіології та гідробіології річкових систем
Дьяченко Тетяна Миколаївна,
Інститут гідробіології НАН України.

Захист дисертації відбудеться «__» _____ 2019 р. о __ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.213.01 Інституту гідробіології НАН України за адресою: Проспект Героїв Сталінграда, 12, м. Київ, Україна, 04210.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту гідробіології НАН України за адресою: Проспект Героїв Сталінграда, 12, м. Київ, Україна, 04210.

Автореферат розіслано «__» _____ 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої
ради Д 26.213.01, доктор біологічних наук



Н.І. Кірпенко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Наслідки аварій на підприємствах ядерно-паливного циклу, таких як Киштимська аварія (1957 р., СРСР), аварія на АЕС Трі-Майл-Айленд (1979 р., США), Чорнобильська катастрофа (1986 р., СРСР), аварія на АЕС «Фукусіма-1» (2011 р., Японія), що призвели до широкомасштабного радіаційного забруднення навколишнього середовища, потребують перегляду існуючих підходів до оцінки радіаційних та радіоекологічних ризиків і повинні розглядатися не тільки відносно людини, але й біоти. Міжнародною Комісією з радіаційного захисту започатковано створення наукових баз даних для розрахунку дозових навантажень та прогнозування радіаційних загроз біоті на популяційному, біоценотичному та екосистемному рівнях (FREDERICA Database, 2000). Тому науковцям України необхідно активно інтегруватися до аналізу вже існуючих та створення нових баз даних щодо радіобіологічних ефектів тривалого низькоінтенсивного радіаційного опромінення рослин і тварин.

Відповідно до Водної Рамкової Директиви 2000/60/ЕС, у системі оцінки екологічного стану поверхневих вод особливе місце серед біотичних складових належить макрофітам. Важливим джерелом інформації про ураження вищих рослин в умовах тривалого антропогенного радіонуклідного забруднення водних екосистем є дані про порушення раннього онтогенезу рослинного організму. Об'єктивну оцінку наявності таких порушень забезпечує аналіз морфологічних і фізіологічних характеристик паростків насіння та показників життєздатності насіннєвого потомства (Гродзинский, 1989, 2008, 2013; Позолотина, 2003; Игонина, 2010; Каримуллина, 2012). Ці показники у наземних рослин добре досліджені та внесені як референтні у систему комплексної оцінки екологічного стану наземних екосистем, відповідно до публікації 108 Міжнародної комісії з радіологічного захисту «Захист довкілля: концепція та використання референтних тварин та рослин» (2008 р.). Проте подібні дослідження для водних макрофітів досить обмежені і не використовуються при оцінюванні радіоекологічного стану водних екосистем в Україні, що і визначає актуальність проведеного дисертаційного дослідження.

Після аварії на Чорнобильській АЕС значна кількість радіонуклідів надійшла у водні екосистеми, де вищі водяні рослини беруть активну участь в їх перерозподілі. Особливої уваги заслуговує очерет звичайний *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., широко поширений у водоймах Чорнобильської зони відчуження, зарості якого можуть займати до половини площі повітряно-водяних рослин цих водойм (Гудков и др., 2001). Очерет має розгалужену кореневу систему, довжина повзучих кореневищ якої може сягати 2,5 м, що сприяє активному накопиченню радіонуклідів (Пришляк та ін., 2015). Показники коефіцієнтів накопичення ^{90}Sr та ^{137}Cs за участю кореневої системи у водоймах зони відчуження ЧАЕС для очерету звичайного становлять у середньому близько 50 та 600, відповідно (Гудков и др., 2001).

Відомо, що очерет звичайний характеризується високою насіннєвою продуктивністю – один наземний пагін може містити в суцвітті від 5000 до 50000 насінин, схожість яких за сприятливих умов становить понад 50% (Luther, 1950; Hurlimann, 1951; Bjork, 1967). До теперішнього часу життєздатність насіннєвого

потомства очерету звичайного, з урахуванням комплексу фізіологічних та морфологічних показників, за умов тривалого низькоінтенсивного йонізуючого опромінення, залишалась поза увагою дослідників. Результати таких досліджень могли б використовуватися для оцінки радіаційних та радіоекологічних ризиків водних екосистем.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана на базах кафедри екології Національного авіаційного університету МОН України – відповідно до плану наукових досліджень згідно з держбюджетною (кафедральною) науковою тематикою № 4/10.02.03 «Дослідження екологічної безпеки біоти забруднених радіонуклідами екосистем» (2012–2014 рр.), у рамках науково-дослідної теми «Екотоксикологічна оцінка водних об'єктів мегаполісу на прикладі м. Києва» (№ ДР 0117U002372, 2016–2018 рр.).

Мета та завдання досліджень

Метою досліджень є оцінка порушень розвитку насінневого потомства очерету звичайного в градієнті потужності поглиненої дози йонізуючого опромінення на батьківські рослини у водоймах Чорнобильської зони відчуження (ЧЗВ).

Завдання досліджень:

1. Дослідити динаміку переходу ^{90}Sr та ^{137}Cs від абіотичних компонентів водних екосистем до очерету звичайного.

2. Виявити зміни життєздатності насінневого потомства та особливості росту паростків зернівок очерету звичайного у градієнті потужності поглиненої дози на вегетуючу рослину у водоймах ЧЗВ та за різних режимів додаткового гострого йонізуючого опромінення.

3. Дослідити морфологічні порушення паростків зернівок очерету звичайного з водойм ЧЗВ.

4. Встановити найбільш чутливі показники раннього онтогенезу очерету звичайного для оцінки радіаційного ураження досліджуваних рослин в умовах радіонуклідного забруднення водойм.

Об'єкт досліджень – ранній онтогенез очерету звичайного водойм Чорнобильської зони відчуження.

Предмет досліджень – насінневе потомство очерету звичайного *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. з водойм Чорнобильської зони відчуження, його морфологічні, фізіологічні показники та життєздатність.

Методи досліджень. У роботі використані стандартні методи відбору та пророщування насіння у лабораторних умовах, визначення показників росту та аномалій розвитку первинного кореня та листка паростків зернівок, дослідження показників життєздатності насінневого потомства очерету звичайного, метод додаткового опромінення насіння, метод камерних моделей дослідження переходу радіонуклідів між абіотичними та біотичними компонентами екосистеми, статистичні методи аналізу отриманих результатів, двофакторний та кореляційно-регресійний аналіз.

Наукова новизна одержаних результатів

Дисертантом вперше:

- досліджено стан насінневого потомства очерету звичайного в умовах впливу тривалого низькоінтенсивного йонізуючого опромінення батьківських рослин у водоймах ЧЗВ;
- виявлено порушення раннього онтогенезу за комплексом фізіологічних, морфологічних показників та показників життєздатності;
- доведено значущість тривалості періоду спокою насіння для елімінації прихованих порушень у насінневого потомства очерету звичайного;
- проаналізовано взаємозв'язок між порушеннями розвитку насінневого потомства очерету звичайного та ступенем радіаційного навантаження на батьківські рослини;
- запропоновано прогноз динаміки переходу з абіотичних компонентів до очерету звичайного основних дозоформуючих радіонуклідів ^{90}Sr та ^{137}Cs .

Практичне значення одержаних результатів. Проведені дослідження є важливою складовою у вивченні біоти водних екосистем, що зазнають антропогенного радіонуклідного забруднення. Отримані результати можуть використовуватися для оцінки стану макрофітів за умов тривалого низькоінтенсивного йонізуючого опромінення.

Досліджені показники життєздатності насінневого потомства очерету, показники росту кореня та листка паростка, а також їх аномалії доповнюють існуючі бази даних дозозалежних ефектів хронічного впливу йонізуючого опромінення на живі організми. Проведені дослідження вказують на те, що очерет звичайний можна використовувати як референтний вид для оцінки якості водного середовища за умов радіонуклідного забруднення. Результати досліджень можуть бути використані при розробці реабілітаційних заходів, спрямованих на покращення екологічного стану водних екосистем. Розроблені моделі динаміки переходу радіонуклідів ^{90}Sr та ^{137}Cs з абіотичних компонентів до очерету звичайного дозволяють робити прогнози формування дози опромінення гідробіонтів у озерних екосистемах.

Особистий внесок здобувача. Дисертантом спільно з науковим керівником проведено вибір напрямку досліджень і аналіз отриманих результатів. Здобувачем здійснено огляд наукової літератури, освоєно низку методів, необхідних для проведення досліджень. Здобувач безпосередньо брав участь у плануванні та розробці всіх складових виконаних досліджень, проводив лабораторні дослідження, розробляв математичні моделі, аналізував та математично обробляв отримані дані, а також сформулював основні положення та висновки дисертаційної роботи.

Результати виконаних автором досліджень відображені у публікаціях спільно з науковим керівником та співавторами. Права співавторів публікацій при викладенні дисертації та автореферату не порушено.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень представлено та обговорено на таких наукових форумах: 37-му Щорічному з'їзді Європейського товариства радіаційних досліджень (2009, Прага, Чеська Республіка); 10-й Міжнародній конференції «Сахаровські читання 2010 року: екологічні проблеми

XXI століття» (2010, Мінськ, Республіка Білорусь); VI Міжнародній науково-практичній конференції «Важкі метали і радіонукліди в навколишньому середовищі» (2010, Семей, Казахстан); Міжнародній конференції «Двадцять п'ять років Чорнобильської катастрофи. Безпека майбутнього» (2011, Київ); 14-му Міжнародному конгресі радіаційних досліджень (2011, Варшава, Республіка Польща); 13-му Конгресі Міжнародної асоціації з радіаційного захисту (2012, Глазго, Велика Британія); Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених та студентів «Екологічна безпека держави» (2012, 2013, Київ); VIII Міжнародній науково-практичній конференції «Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення» (2012, Алушта); Міжнародній науковій конференції, присвяченій 25-річчю Інституту радіобіології НАН Білорусі «Малые дозы» (2012, Мінськ, Республіка Білорусь); IV Всеукраїнському з'їзді екологів з міжнародною участю (2013, Вінниця); Науково-практичній конференції, присвяченій 95-річчю заснування Національної академії наук України «Актуальні проблеми сучасної гідроекології» (2013, Київ); III Міжнародній конференції з радіації та діяльності у різних галузях науки (2015, Будва, Республіка Чорногорія); VI з'їзді радіобіологів України (2015, Київ); XXIII Щорічній науковій конференції Інституту ядерних досліджень НАН України (2016, Київ); III науково-практичній конференції молодих вчених «Сучасна гідроекологія: місце наукових досліджень у вирішенні актуальних проблем» (2016, Київ); XXIV Щорічній науковій конференції Інституту ядерних досліджень НАН України (2017, Київ); Науково-практичній конференції із міжнародною участю «Вода: проблеми та шляхи вирішення» (2017, Житомир); 4-й Міжнародній конференції з радіоекології та радіоактивності навколишнього середовища (2017, Берлін, ФРН); XXV щорічній науковій конференції Інституту ядерних досліджень НАН України (2018, Київ); Міжнародній науково-практичній конференції «Чорнобильська катастрофа. Актуальні проблеми, напрямки та шляхи їх вирішення» (2018, Житомир).

Публікації за темою дисертації. За матеріалами дисертації опубліковано 32 праці: 8 статей, 5 з яких у наукових фахових виданнях з біологічних наук, 1 з яких входить до наукометричних баз Web of Science, Scopus; 1 розділ книги видавництва Springer, яка входить до Scopus; 22 тез у матеріалах вітчизняних та міжнародних конференцій; 1 патент (у співавторстві).

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з 6 розділів та включає вступ, огляд літератури, опис матеріалів та методів досліджень, результати досліджень, їх обговорення та узагальнення, заключення, висновки, список використаної літератури та додатки.

Роботу викладено на 204 сторінках. Рукопис містить 33 таблиці, 63 рисунка. Список використаної літератури нараховує 295 джерел, з яких 234 – іншомовні.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

НАДХОДЖЕННЯ РАДІОНУКЛІДІВ У ВОДНІ ЕКОСИСТЕМИ ТА ЇХ ВПЛИВ НА БІОТУ (ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ)

У розділі розглянуто шляхи та джерела надходження природних та штучних радіонуклідів у водойми. Проаналізовано особливості міграційних процесів радіонуклідів у компонентах водних екосистем – донних відкладах, водному середовищі та біоті. Описано стаціонарні й динамічні камерні моделі переходу радіонуклідів між компонентами екосистем. Наведено огляд робіт з результатами досліджень ураження та радіостійкості насіннєвого потомства вищих рослин, радіоморфозів, викликаних спотворенням спадкового матеріалу за дії хронічного та гострого йонізуючого опромінення, ефектів додаткового гострого опромінення (далі ДГО) насіннєвого потомства рослин, які зазнають хронічного опромінення.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Надано геоморфологічну та радіоекологічну характеристику досліджуваних водойм (Кузьменко та ін., 2001; Казаков и др., 1994). Проаналізовано інформацію щодо морфології та процесів проростання насіння очерету звичайного *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., як типового представника повітряно-водяних рослин (Быков и др., 1964; Демидовская, Кириченко, 1964; Дубына и др., 1993).

Проведено серію дослідів з пророщування насіння очерету звичайного з використанням стандартних методів лабораторного культивування насіння (ГОСТ 24933.2–81). Насіннєвий матеріал відібрано за допомогою стандартних методів (ГОСТ 24933.0-81) з суцвіть очерету звичайного у водоймах ЧЗВ – озерах Глибоке, Далеке, Азбучин, Янівського затону, водойми-охолодника ЧАЕС (ВО ЧАЕС), які слугували полігонними, та водойм з фоновим рівнем радіонуклідного забруднення – Київського водосховища (с. Лютіж) та оз. Вербне (м. Київ), які слугували референтними.

Пророщували насіння очерету звичайного після 20–30- та 120–160-добовго періоду спокою. Тривалість досліду з пророщування насіння, що пройшло порівняно короткий період спокою (КПС) – 20–30 діб після збору, становила 26 діб, після тривалого періоду спокою (ТПС) – 120–160 діб спостереження проводили протягом 21 доби. Зернівки пророщували у трьох повторностях, висіваючи їх на вологий фільтрувальний папір у чашках Петрі. В досліді використовували по 150 зернівок з рослин з кожної водойми, по 50 насінин на одну чашку Петрі. До пророщування насіння зберігали у темному сухому приміщенні за температури до 10 °С.

Дослід з додатковим опроміненням у дозі 1 Гр з потужністю у 0,5 Гр/год проводили з насіннєвим матеріалом після КПС. Тривалість досліду становила 15 діб. Зразки насіння відібрано з озер Глибоке, Далеке, Азбучин, Янівського затону, ВО ЧАЕС та Київського водосховища. Зернівки опромінювали за допомогою установки УПД (Інтер), модель 11, джерело опромінення – ^{134}Cs , активністю $2,8 \cdot 10^{12}$ Бк.

В окремому досліді насіння очерету звичайного з ВО ЧАЕС, озер Глибоке та Вербне пророщували після КПС та додаткового опромінення у дозі у 25, 75 та

150 Гр. Зернівки опромінювали на електронному прискорювачі «ИЛУ-6» з рентгенівським випромінюванням у діапазоні енергій 1,2–2,5 МеВ. Потужність дози опромінення становила 30 Гр/хв. Тривалість досліджу становила 35 діб.

Життєздатність насіннєвого потомства оцінювали за показниками схожості, енергії проростання, періоду появи першого-останнього паростка, виживаності паростків та життєздатності насіння. Виживаність паростків та життєздатність насіння визначали на стадії появи справжнього листка. Досягнення паростком цієї стадії морфогенезу свідчило про його подальшу життєздатність та початок функціонування верхівкової та кореневої меристем (Позолотина и др., 2008).

Для оцінки ростових процесів паростків досліджували лінійні показники росту: довжину коренів та листків. Тератологічний ефект досліджували за показником частоти аномалій визначеного типу у перерахунку на всю досліджувану вибірку (Іванов, 1974). Виявлені аномалії схожих зернівок віднесено до радіоморфозів, що можуть бути спричинені радіаційним ураженням частини спадкового матеріалу, який відповідає за ріст та розвиток рослини. Аномалії розділено на чотири групи: хлорофільні аномалії листка, порушення геотропізму, порушення органогенезу та некрози коренів. До першої групи хлорофільних або пігментних аномалій віднесли паростки з безхлорофільними знебарвленими листками. Для паростків зернівок очерету звичайного з порушеннями геотропізму була характерна «скрученість» зародкових коренів та/або зародкового та першого справжнього листка. До порушень органогенезу віднесли паростки з розвиненим листям без кореня, паростки з кількома коренями, що мали спільну точку росту, та паростки з додатковими коренями, що росли з колеоптиля. Інший тип порушень, який часто зустрічався – відмирання (некрози) коренів у паростків.

Показники життєздатності насіннєвого потомства очерету звичайного, росту паростків та їх аномалії визначали за допомогою бінокуляру МСБ-9 зі збільшенням 8x2.

В роботі використано такі методи математичної обробки результатів: статистичні (Рокицкий, 1973; Закс, 1976; Гланц, 1998; Новиков, Новочадов, 2005), методи кореляційного (Рокицкий, 1973; Закс, 1976; Бендат и др., 1979; Вайнберг, Лапач и др., 2001), регресійного (Вучков и др., 1987; Draper, Smith, 1998) та двофакторного дисперсійного аналізу (Кендалл, Стьюарт, 1976; Айвазян, 1982; Айвазян и др., 1985), з використанням програмних продуктів Origin Pro 8.0, 9.0 та MS Excel 2016. За допомогою методу камерних моделей здійснено моделювання переходу ^{90}Sr та ^{137}Cs між компонентами водних екосистем (Джерела та дія йонізуючої радіації ... Доп. за 1977 р. Ген. Асамблеї, 1978, 1982; Методы оценки доз ..., Публикация МКРЗ: Доп. 4., 1980; Георгиевский, 1994). Стійкість розроблених моделей оцінювали за допомогою методів на основі теорії стійкості моделей (Ляпунов, 1959) з використанням програмних продуктів MathCad 15 та Maple 9.

Дисертаційна робота виконана без порушень біоетичних норм.

МОДЕЛІ ПОВЕДІНКИ РАДІОНУКЛІДІВ ^{90}Sr ТА ^{137}Cs В ОЗЕРАХ ГЛИБОКЕ ТА ДАЛЕКЕ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ

На основі аналізу даних щодо активності основних дозоформуючих радіонуклідів чорнобильського походження ^{90}Sr та ^{137}Cs (Деревець та ін., 2001, 2002, 2004, 2005; Гудков, 2006; Кузьменко та ін., 2010; Ганжа, 2015) в абіотичних та біотичних компонентах екосистем озер Глибоке та Далеке, які є найбільш забрудненими радіонуклідами водоймами ЧЗВ, створено камерні моделі міграції

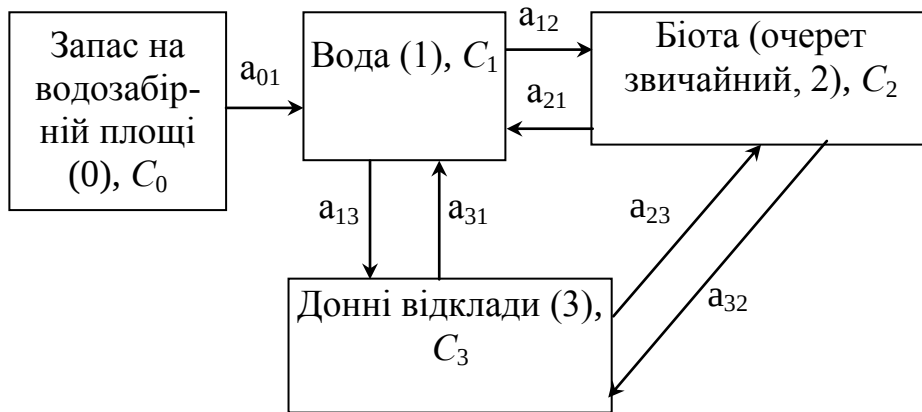


Рис. 1. Блок-схема камерної моделі переходу ^{137}Cs та ^{90}Sr у водоймах Чорнобильської зони відчуження

радіонуклідів в замкненій озерній екосистемі (рис. 1).

При моделюванні враховували фактор розпаду радіонуклідів та визначали сталу піврозпаду λ для ^{90}Sr та ^{137}Cs , яку включали у диференційні рівняння моделей. За початкові умови для розв'язку систем диференційних

рівнянь взято відсоткову частку вмісту радіонуклідів у компонентах водних екосистем від їх загального запасу в озерах Глибоке та Далеке за 2000–2004 роки, базуючись на літературних даних (див. вище). Метою побудови моделей є прогноз розподілу радіонуклідів між абіотичними та біотичними компонентами на 20-річний період. Коефіцієнти a_{01} , a_{12} , a_{21} , a_{23} , a_{32} , a_{13} та a_{31} , які характеризують швидкість переходу радіонуклідів між камерами (Георгиевский, 1994; Матвеева та ін., 2005, 2006; Петрусенко та ін., 2008; Матвеева, 2008; Петрусенко, 2009), розраховували як частку радіонукліда, яка переходить з однієї камери до іншої за одиницю часу.

Прологарифмовані криві динаміки вмісту ^{90}Sr та ^{137}Cs у досліджуваних компонентах озер наведено на рис. 2. Камерні моделі поведінки ^{90}Sr та ^{137}Cs в абіотичних та біотичних компонентах озер Глибоке та Далеке ЧЗВ протягом 20-річного періоду після 2000-го року показали, що понад 70% запасу радіонуклідів у озерних екосистемах припадає на донні відклади, де основним чинником, який обумовлює зменшення їх вмісту, є природний розпад.

Дослідження динаміки активності радіонуклідів у товщі води та фітомасі очерту звичайного в озерах Глибоке та Далеке ЧЗВ показало чітко виражені 2 періоди перерозподілу радіонуклідів між компонентами озерних екосистем – період «інтенсивних змін» та період «динамічної рівноваги».

Протягом періоду «інтенсивних змін» спостерігалось суттєве зниження частки активності радіонуклідів у водному середовищі озер, що обумовлено накопиченням радіонуклідів, особливо ^{137}Cs , у повітряно-водяних рослинах, депонуванням радіонуклідів у донних відкладах та розпадом ^{90}Sr та ^{137}Cs .

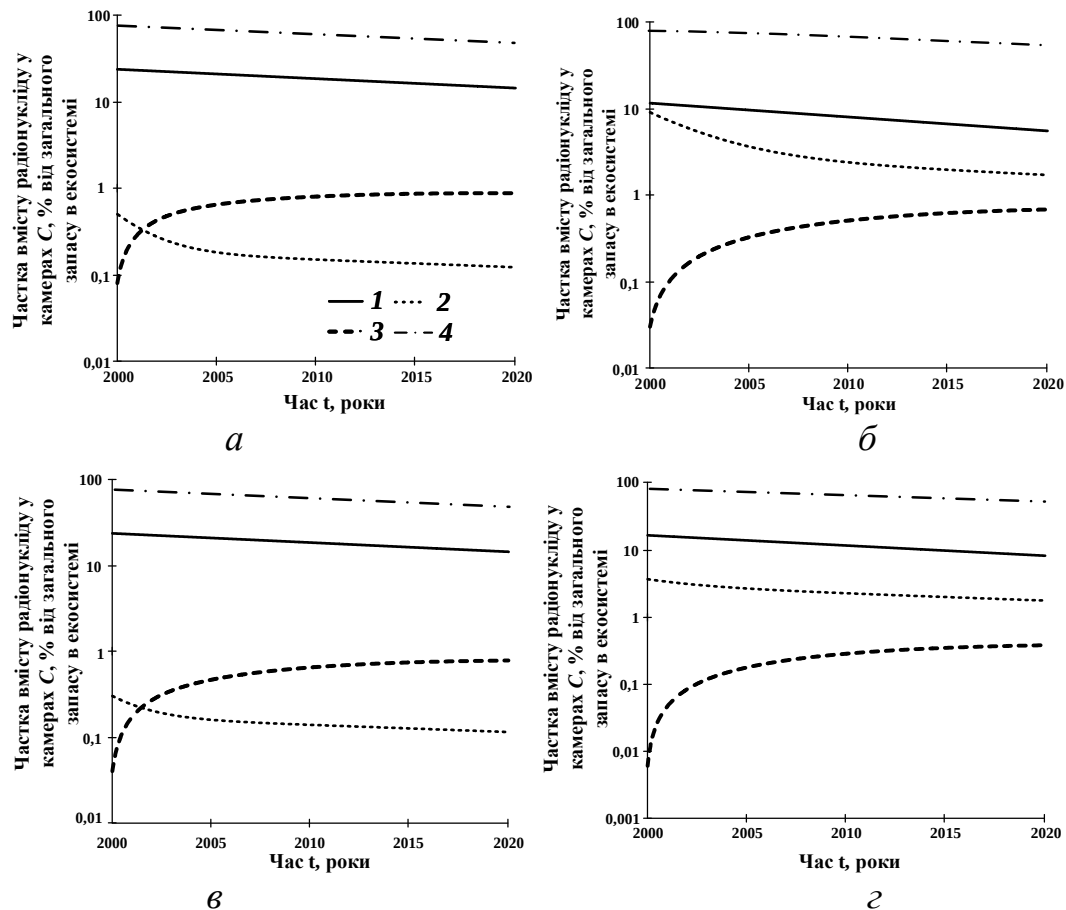


Рис. 2. Прогноз розподілу активності ^{137}Cs та ^{90}Sr в екосистемі озер Глибоке (а та б, відповідно) і Далеке (в та з, відповідно). 1 – Запас на водозабірній площі (C_0), 2 – Вода (C_1), 3 – Біота (очерет звичайний, C_2), 4 – Донні відклади (C_3)

У цей період вміст ^{90}Sr і ^{137}Cs у воді оз. Глибоке знижувався у 2 та 5 разів інтенсивніше, порівняно з оз. Далеке. Суттєву роль при цьому відігравала більша швидкість водообміну в екосистемі оз. Глибоке.

Активність ^{90}Sr та ^{137}Cs у фітомасі очерету звичайного в оз. Глибоке протягом періоду «інтенсивних змін», порівняно з початковими умовами, зростала в 6 та 10 разів, в оз. Далеке – у 10 та 20 разів, відповідно.

Аналіз стійкості створених камерних моделей поведінки ^{90}Sr та ^{137}Cs в абіотичних та біотичних компонентах озер Глибоке та Далеке показав, що дані моделі є стійкими, розрахункові значення коренів характеристичних багаточленів матриць диференційних рівнянь становлять $-0,02$ – $-0,57$.

З урахуванням отриманих особливостей накопичення дозоформуєчих радіонуклідів в очереті звичайному та літературних даних (Гудков и др., 2001; Кузьменко та ін., 2010; Шевцова и др., 2012; Ганжа, 2015) були визначені діапазони дозового навантаження на очерет звичайний у досліджуваних водоймах. У водоймах лівобережної заплави р. Прип'ять, а саме в озерах Глибоке та Далеке, величини потужності дози йонізуючого опромінення рослин становили 10–34 мкГр/год, у водоймах правобережної заплави – оз. Азбучин, ВО ЧАЕС та Янівському затоні – 1,9–5,8 мкГр/год, в той час як у Київському водосховищі та оз. Вербне – 0,036 та 0,03 мкГр/год відповідно (Gudkov et. al., 2016).

ВПЛИВ ТРИВАЛОСТІ ПЕРІОДУ СПОКОЮ ТА ДОЗИ ЙОНІЗУВАЛЬНОГО ОПРОМІНЕННЯ НА ЖИТТЄЗДАТНІСТЬ НАСІННЄВОГО ПОТОМСТВА ОЧЕРЕТУ ЗВИЧАЙНОГО

Дослідження життєздатності насіннєвого потомства очерету звичайного у градієнті зростання потужності поглиненої дози опромінення при різній тривалості періоду спокою виявило залежність процесів проростання від часового фактору.

Збільшення тривалості періоду спокою насіння з 20–30 до 120–160 діб призводило до скорочення у 3 рази часового інтервалу між появою першого та останнього насіннєвого паростка рослин з водойм ЧЗВ, а показники схожості, енергії проростання та життєздатності насіння у середньому зросли на 10, 15 та 22%, відповідно.

У насіннєвих паростків рослин з референтних водойм, навпаки, показники схожості, енергії проростання та життєздатності насіння знижувалися на 28, 32 та 15%, відповідно, а часовий інтервал між появою першого та останнього насіннєвого паростка скоротився у 1,5 рази.

Криві схожості насіння очерету звичайного з полігонних водойм, а саме озер Далеке, Азбучин, Янівського затону та ВО ЧАЕС, де середня потужність поглиненої батьківськими рослинами дози (СППБРД) не перевищує 10 мкГр/год, після КПС підпорядковувалися вірогідній логарифмічній залежності (рис. 3а).

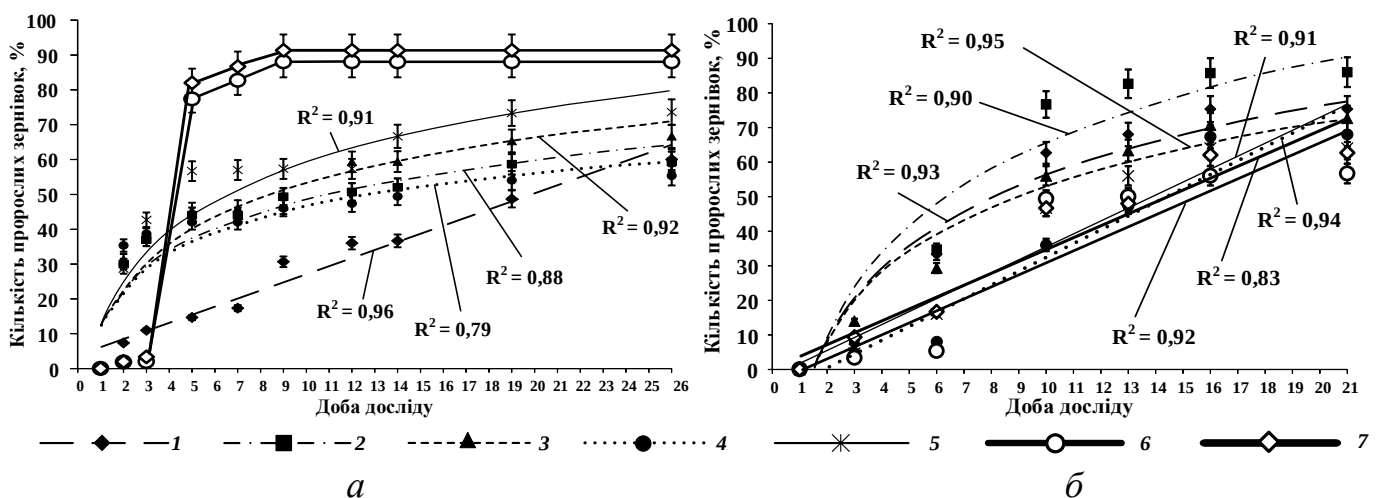


Рис. 3. Динаміка схожості насіння очерету звичайного у водоймах з різним рівнем радіонуклідного забруднення (період спокою: а – 20–30 діб, б – 120–160 діб).
1 – оз. Глибоке, 2 – оз. Далеке, 3 – оз. Азбучин, 4 – Янівський затон, 5 – ВО ЧАЕС, 6 – Київське водосховище, 7 – оз. Вербне

Схожість зернівок рослин з оз. Глибоке, за СППБРД 34 мкГр/год, вірогідно зростала відповідно до лінійної функції з малим кутом нахилу. Криві схожості насіння рослин з референтних водойм, де СППБРД не перевищує 0,036 мкГр/год, характеризувала коротка логарифмічна фаза тривалістю 8 діб та плато до кінця періоду спостереження. Така s-подібна форма властива нормальному перебігу процесів проростання.

При ТПС (рис. 3б) динаміка схожості насіння очерету звичайного з оз. Азбучин, Далеке та Глибоке, де СППБРД становить 5,8–34,0 мкГр/год, відповідала вірогідній логарифмічній залежності. У насінневих паростків рослин з Янівського затону, ВО ЧАЕС та референтних водойм, де СППБРД не перевищує 3,2 мкГр/год, залежність вірогідно лінійна, з малим кутом нахилу. Це може свідчити про збільшення неоднорідності насіннєвого матеріалу зі збільшенням тривалості періоду спокою. Також можна припустити вплив часового фактора на фізіолого-біохімічні процеси проростання насіння рослин з водойм ЧЗВ.

За дози ДГО 75 Гр спостерігався ефект пригнічення, що проявлявся у зниженні життєздатності зернівок рослин з оз. Вербне та ВО ЧАЕС до передкритичного та критичного рівня відповідно. За дози 150 Гр виживаність насінневих паростків рослин з оз. Вербне порівняно з контрольними неопроміненими паростками зменшилася майже у 12 разів, з ВО ЧАЕС – у 6 разів, з оз. Глибоке – у 3 рази. Чутливість показника виживаності насінневих паростків очерету звичайного до ДГО зменшувалася у градієнті підвищення СППБРД, що, ймовірно, свідчить про вищу радіостійкість насіннєвого потомства, зумовлену радіоадаптивними процесами у поколіннях рослин, які зазнають низькоінтенсивного тривалого йонізуючого опромінення у водоймах ЧЗВ.

РОСТОВІ ПОКАЗНИКИ КОРЕНІВ ТА ЛИСТКІВ НАСІННЄВИХ ПАРОСТКІВ ОЧЕРЕТУ ЗВИЧАЙНОГО ЗА РІЗНИХ РЕЖИМІВ ОПРОМІНЕННЯ

Фактори хронічного та додаткового гострого опромінення вірогідно впливали на довжину паростків насіння очерету звичайного, що підтверджено результатами двофакторного аналізу. Вірогідність впливу тривалого низькоінтенсивного опромінення з потужністю доз 0,03, 1,9 і 34 мкГр/год та ДГО у дозах 25, 75 та 150 Гр з потужністю 0,5 Гр/с, а також їхньої сумісної дії на динаміку лінійних показників насінневих паростків очерету звичайного з Київського водосховища, ВО ЧАЕС та оз. Глибоке підтверджено результатами кореляційного та двофакторного аналізів при рівнях значущості $P = 0,80$ і $P = 0,95–0,99$, відповідно.

Затримка проростання насіння і уповільнення росту насіннєвих паростків очерету звичайного з водойм ЧЗВ посилювалися за ДГО у дозах 25, 75 та 150 Гр у порівнянні з насінням з референтної водойми (рис. 4).

Динаміка ростових процесів коренів та листків насіннєвих паростків рослин із водойм ЧЗВ підпорядковувалася експоненційній залежності ($R^2 = 0,89–0,997$ та $0,93–0,999$, відповідно). Ріст коренів та листків насіннєвих паростків рослин з референтних водойм підпорядковувався лінійній залежності ($R^2 = 0,75–0,99$ і $0,83–0,96$, відповідно).

В результаті встановлено вірогідну обернену кореляційну залежність між дозою ДГО і довжиною коренів та листків насіннєвих паростків при рівні значущості $P = 0,8$. Коефіцієнт кореляції, відповідно, становив для насіннєвих паростків рослин з оз. Вербне: $-0,99$ та $-0,94$; з ВО ЧАЕС: $-0,89$ та $-0,80$; з оз. Глибоке: $-0,93$ та $-0,89$.

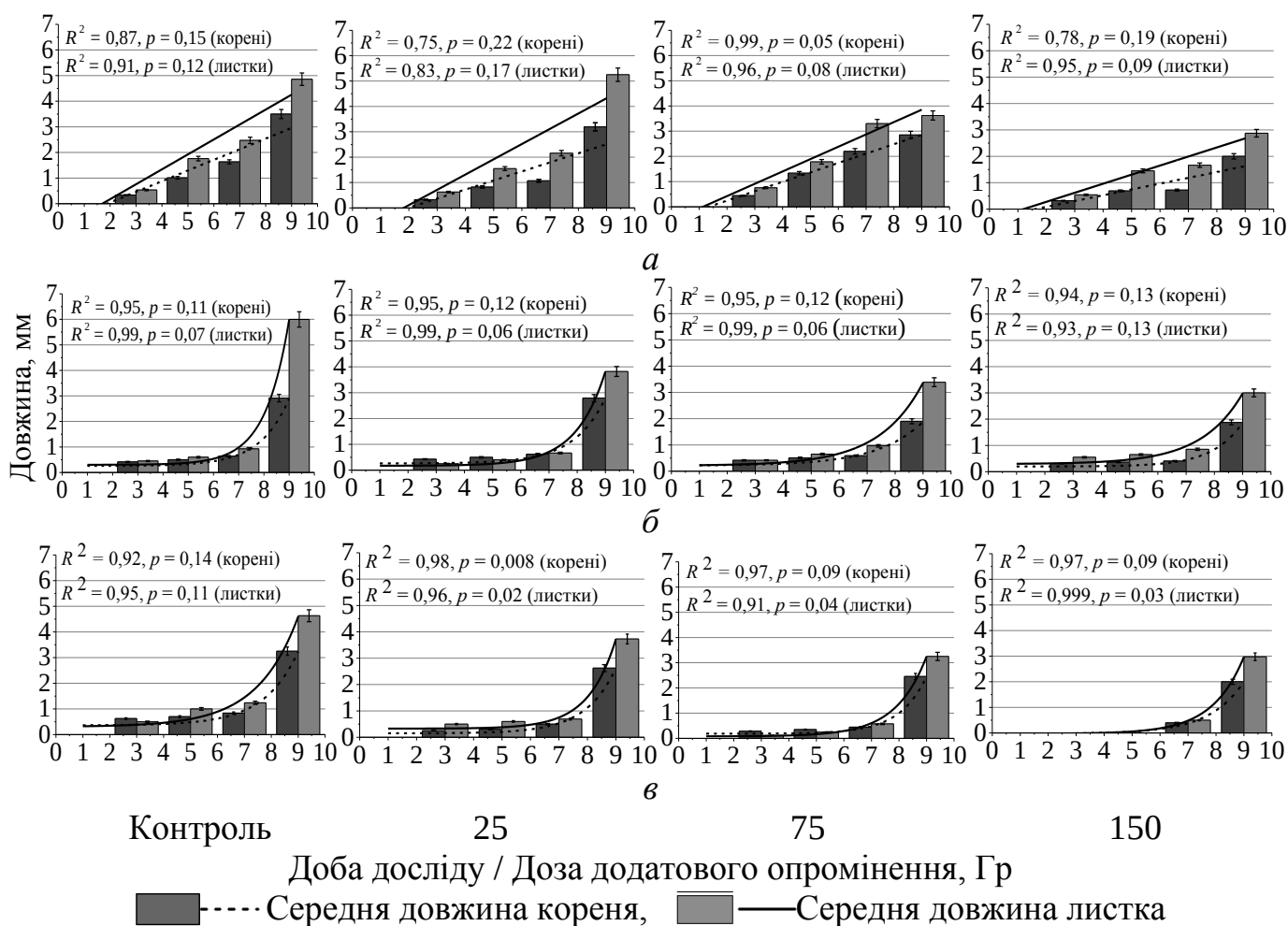


Рис. 4. Середня довжина коренів і листків у насінневих паростків очерету звичайного: а – оз. Вербне (референтна водойма), б – ВО ЧАЕС, в – оз. Глибоке

Регресійний аналіз виявив експоненційну залежність між дозою ДГО та довжиною коренів і листків насінневих паростків рослин з водойм ЧЗВ ($R^2 = 0,80$ – $0,92$ і $0,72$ – $0,84$, відповідно). У коренів і листків насінневих паростків рослин з оз. Вербне така залежність була лінійною ($R^2 = 0,99$ та $0,87$, відповідно).

Результати досліджень свідчать про наявність відхилень у динаміці ростових процесів насіннєвого потомства очерету звичайного у водоймах з радіонуклідним забрудненням.

Подібні порушення спонукають до припущення про радіаційно індуковані зміни у фізіолого-біохімічних процесах, що відповідають за ріст паростків насіннєвого потомства рослин водойм ЧЗВ, де СППБРД становить $5,8$ – 34 мкГр/год.

МОРФОЛОГІЯ ПАРОСТКІВ ЗЕРНІВОК ОЧЕРЕТУ ЗВИЧАЙНОГО З ВОДОЙМ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ ЗА РІЗНИХ РЕЖИМІВ ОПРОМІНЕННЯ

Проаналізовано частоту зустрічальності аномалій життєздатних насінневих паростків очерету звичайного, які не викликали загибелі насіннєвого потомства та є проявом радіоморфозу: хлорофільні аномалії листків (рис. 5а, б), порушення

геотропізму (рис. 5в, г) та порушення органогенезу (рис. 5д–е). Окремо досліджено некрози коренів, які спричиняли загибель паростків (рис. 5ж).

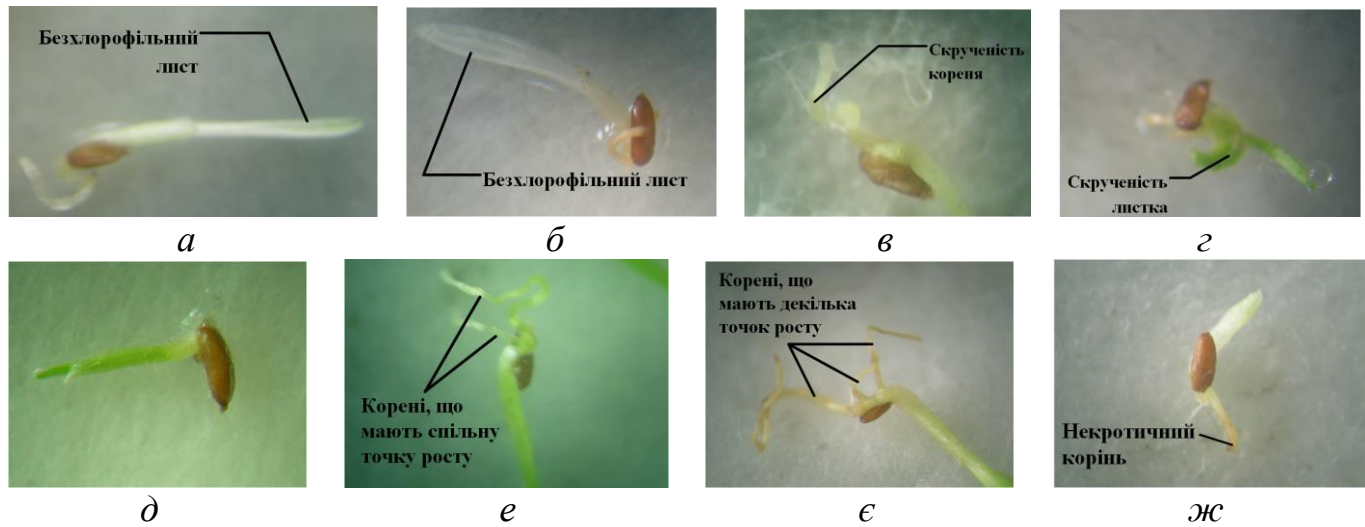


Рис. 5. Аномалії насіннєвих паростків очерету звичайного. *а, б* – хлорофільна аномалія листка; *в, г* – порушення геотропізму; *д–є* – порушення органогенезу (*д* – відсутність кореня); *ж* – некроз кореня

У насіннєвих паростків очерету звичайного з найбільш забруднених радіонуклідами водойм ЧЗВ було виявлено високе число аномалій – до 76%, що у 15 разів більше, ніж у зразків з референтних водойм. Дослідження показали, що після КПС найвищий відсоток аномалій розвитку життєздатних паростків спостерігався у насінневого потомства очерету звичайного з найбільш забруднених водойм ЧЗВ (рис. 6а).

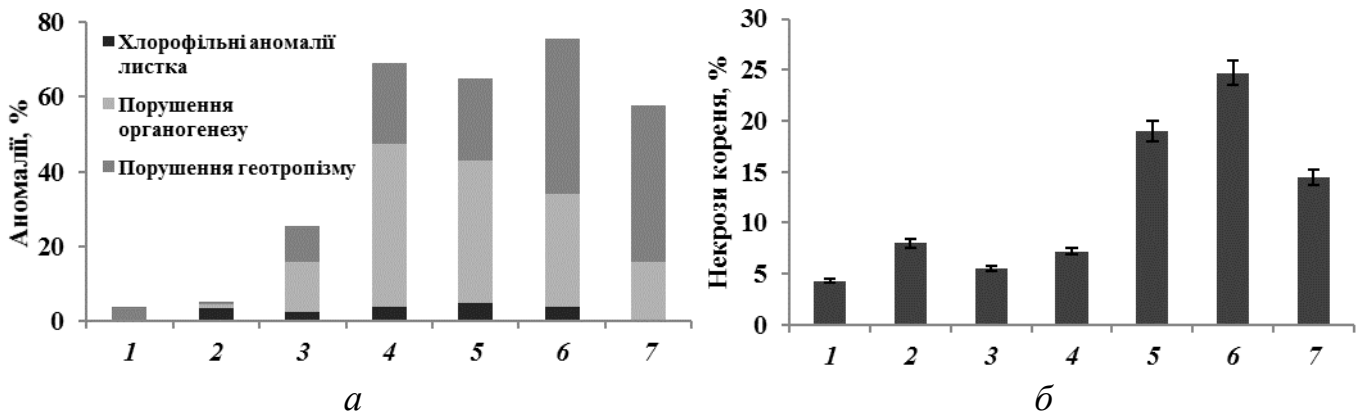


Рис. 6. Дозова залежність виходу аномалій насіннєвих паростків очерету звичайного після КПС. *а* – аномалії життєздатних паростків, *б* – некрози коренів; 1 – оз. Вербне, 2 – Київське водосховище, 3 – ВО ЧАЕС, 4 – Янівський затон, 5 – оз. Азбучин, 6 – оз. Далеке, 7 – оз. Глибоке

Частка порушень органогенезу та геотропізму у насіннєвих паростків рослин з водойм ЧЗВ у середньому становила 44 та 42%, відповідно, а у референтних вибірках їх кількість не перевищувала 5% загальної кількості аномалій. Кількість некротизів коренів (рис. 6б) у насіннєвих паростків рослин з полігонних водойм

наближалась до 25%, що значно вище, ніж у референтних вибірках, де даний показник не перевищував 8%.

Порівняльний аналіз частоти аномалій розвитку насіннєвих паростків очерету звичайного з полігонних водойм виявив зменшення кількості аномальних паростків при збільшенні тривалості періоду спокою (рис. 7).

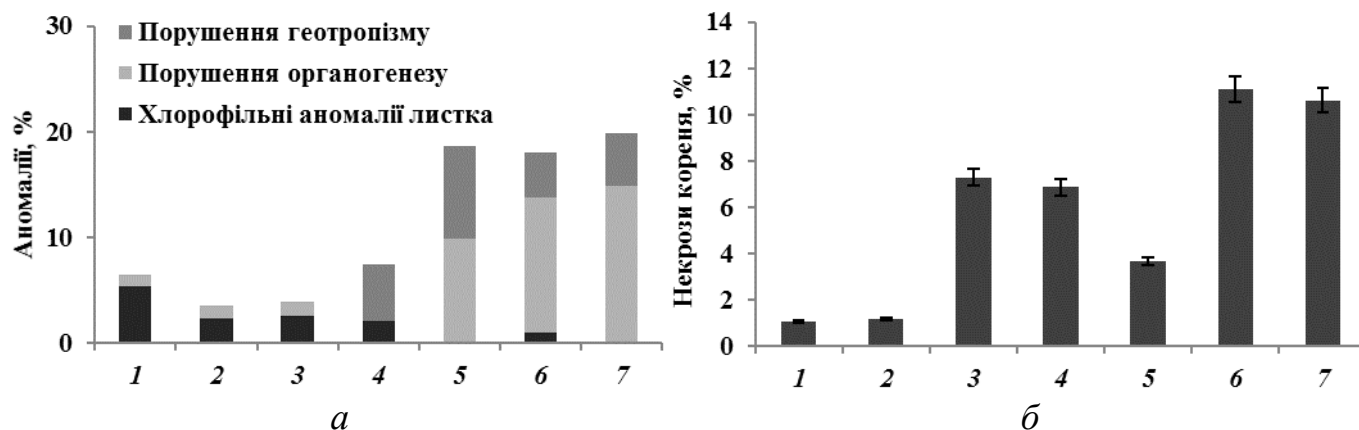


Рис. 7. Дозова залежність виходу аномалій насіннєвих паростків очерету звичайного після ТПС. *а* – аномалії життєздатних паростків, *б* – некрози коренів; 1 – оз. Вербне, 2 – Київське водосховище, 3 – ВО ЧАЕС, 4 – Янівський затон, 5 – оз. Азбучин, 6 – оз. Далеке, 7 – оз. Глибоке

Кількість порушень, які не викликали загибелі насіннєвого потомства рослин з полігонних водойм, після ТПС зменшилася в 5 разів. У насіннєвих паростків рослин з референтних водойм їх кількість не перевищувала 7%. Кількість некрозів коренів зменшилася у середньому у 2 та 5 разів, відповідно.

Розраховані коефіцієнти кореляції між виживаністю насіннєвих паростків очерету звичайного та їх аномаліями, зі збільшенням дози ДГО від 25 до 75 та 150 Гр показали від'ємний зв'язок для більшості типів аномалій у насіннєвого потомства очерету звичайного ($|r| \leq 0,90$; $P \leq 0,90$). Найбільш чутливим до ДГО був органогенез насіннєвих паростків, що підтверджено найвищими значеннями коефіцієнту кореляції ($|r| = 0,72-0,90$; $P \leq 0,90$).

ВИСНОВКИ

На підставі дослідження життєздатності, особливостей росту і морфологічних порушень у насіннєвого потомства очерету звичайного водойм Чорнобильської зони відчуження (ЧЗВ) за різної тривалості періоду спокою, а також додаткового гострого опромінення, та з урахуванням результатів моделювання динаміки накопичення очеретом радіонуклідів стронцію та цезію, встановлено, що тривале низькоінтенсивне йонізувальне опромінення викликає численні порушення раннього онтогенезу рослини.

1. Моделювання динаміки розподілу ^{90}Sr та ^{137}Cs між абіотичними та біотичними компонентами озерних екосистем ЧЗВ свідчить про наявність двох часових періодів – періоду «інтенсивних змін» та періоду «динамічної рівноваги», середньою тривалістю 5 та 15 років, відповідно. Протягом першого періоду рослини

накопичують майже половину від розрахованого за 20 модельних років вмісту ^{90}Sr та ^{137}Cs . У період динамічної рівноваги активність радіонуклідів у біомасі рослин змінюється повільно. Отримані моделі є стійкими.

2. Для насіннєвого потомства очерету звичайного з водойм ЧЗВ встановлено дозозалежне зменшення показників життєздатності в діапазоні потужності поглиненої дози опромінення батьківських рослин 0,03–34,0 мкГр/год. Показники схожості та життєздатності насіння рослин з водойм ЧЗВ у середньому були нижчими у 1,4 та 1,8 разів, а показники енергії проростання та виживаності паростків – у 2 та 1,2 рази, відповідно, за аналогічні показники насіння рослин з референтних водойм.

3. Збільшення тривалості періоду спокою зернівок очерету звичайного з 30 до 160 діб супроводжувалось відновленням життєздатності насіннєвого потомства рослин з водойм ЧЗВ. Схожість та енергія проростання насіння рослин з водойм ЧЗВ у середньому зростали на 10 та 15%, на відміну від зниження на 28 та 32% у референтних вибірках. Період схожості скоротився у 3,0 та 1,5 рази, відповідно. Виживаність паростків зростала на 4–28% у водоймах ЧЗВ та на 10–22% у референтних водоймах.

4. Після тривалого періоду спокою кількість аномалій життєздатних паростків та некрозів коренів паростків рослин водойм ЧЗВ знизилася у середньому в 5 та 2 рази, відповідно, тоді як кількість аномалій насіннєвих паростків рослин з референтних водойм практично не змінилася, а кількість некрозів коренів зменшилася у 5 разів. За потужності поглиненої дози 5,8–34 мкГр/год кількість порушень органогенезу паростків у середньому вдвічі зменшилася, однак їх частка від загальної кількості порушень зросла у 2 рази. За найвищих потужностей доз у 10 та 34 мкГр/год кількість порушень геотропізму зменшилася в 4 рази, а їх частка від загальної кількості аномалій – у 2–3 рази.

5. Довжина коренів насіннєвих паростків рослин з водойм ЧЗВ після додаткового гострого опромінення у дозі 1 Гр в середньому збільшилася на 19% у порівнянні з контрольними неопроміненими паростками. У референтних вибірках більш чутливими до дії додаткового опромінення був показник довжини листків, що збільшувався у середньому на 14% у порівнянні з неопроміненим контролем.

6. Додаткове опромінення насінин рослин з водойм ЧЗВ у дозах 25, 75 та 150 Гр спричиняло зменшення довжини коренів та листків на 40%, а їх активний ріст починався на 7 діб пізніше порівняно з контролем. У насіннєвих паростків рослин референтної водойми такої затримки не виявлено, а довжина коренів і листків у середньому зменшилася на 30%. Динаміка росту коренів та листків насіннєвих паростків рослин з референтної водойми характеризувалася вірогідною лінійною ($p = 0,05–0,22$), а з водойм ЧЗВ – експоненційною кривою ($p = 0,008–0,14$).

7. Кількість морфологічних аномалій насіннєвих паростків очерету звичайного з водойм ЧЗВ в середньому у 13 разів перевищувала референтні вибірки, переважно за рахунок порушень органогенезу та геотропізму, частка яких сягала, відповідно, 63 та 73% від загальної кількості аномалій, на відміну від референтної вибірки, де загальна кількість аномалій паростків не перевищувала 5%, в основному за рахунок порушень геотропізму та хлорофільних аномалій листків.

8. Насіннєве потомство очерету з водойм ЧЗВ характеризувалося підвищенням стійкості до додаткового гострого опромінення у градієнті зростання потужності поглиненої хронічної дози на батьківські рослини у діапазоні 1,9–34,0 мкГр/год. За зростання дози додаткового опромінення з 25 до 150 Гр, при потужностях поглиненої дози хронічного опромінення 1,9 та 34 мкГр/год, виживаність насіннєвих паростків очерету звичайного з водойм ЧЗВ знизилась у 6 та 3 рази, відповідно, а з референтної водойми – у 14 разів.

9. Хронічне радіонуклідне забруднення водойм ЧЗВ призводить до порушень у розвитку насіннєвого потомства очерету звичайного на ранніх стадіях онтогенезу. Виживаність насіннєвих паростків, морфометричні показники динаміки росту коренів та листків, загальна кількість порушень життєздатних паростків вірогідно відображають вплив радіаційного чинника на очерет звичайний і можуть бути рекомендовані для оцінки ураження рослин очерету звичайного за умов хронічного впливу йонізуючого опромінення у забруднених радіонуклідами водоймах.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у фахових виданнях

1. Шевцова Н.Л., **Явніук А.А.**, Гудков Д.І. Вплив хронічної дії іонізуючої радіації на насіннєве потомство очерету звичайного у водоймах Чорнобильської зони відчуження. *Доповіді НАН України*. 2012. № 3. С. 162–167. (обробка даних, участь у аналізі даних та написанні статті).

2. Shevtsova, N.L., **Yavniuk, A.A.**, Gudkov, D.I. Effect of rest period on germination of the common reed seeds from the water bodies of the Chornobyl exclusion zone. *Hydrobiological Journal* 2014. Vol. 50. Iss. 5. P.7888. (обробка даних, участь у аналізі даних та написанні статті).

3. **Явніук А.А.**, Шевцова Н.Л., Гудков Д.І. Аномалії паростків очерету звичайного у водоймах з різним рівнем радіонуклідного забруднення. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету ім. В. Гнатюка*. 2014. №1. Т. 58. С. 71–76. (обробка даних, участь у аналізі даних та написанні статті).

4. **Явніук А.А.**, Шевцова Н.Л., Гудков Д.І. Оцінка впливу додаткового радіаційного опромінення на морфометричні показники насіннєвих паростків *Phragmites australis* із водойм Чорнобильської зони відчуження. *Український ботанічний журнал*. 2015. № 5. Т. 72. С. 446–453. (участь у проведенні експериментів, обробці даних, аналізі та написанні статті).

5. **Явніук А.А.**, Шевцова Н.Л., Гудков Д.І. Аномалії проростання насіння очерету звичайного з водойм Чорнобильської зони відчуження за умов додаткового гострого йонізуючого опромінення. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету ім. В. Гнатюка*. 2016. № 1 (65). С. 51–60. (участь у проведенні експериментів, обробці даних, аналізі та написанні статті).

6. Gudkov D.I., Shevtsova N.L., Pomortseva N.A., Dzyubenko E.V., **Yavnyuk A.A.**, Kaglyan A.Ye., Nazarov A.B. Aquatic plants and animals in the Chernobyl exclusion zone: effects of long-term radiation exposure on different levels of biological organization. *Genetics, Evolution and Radiation* / V. Korogodina, C. Mothersill,

S. Inge-Vechtomov, C. Seymour (Eds.). Cham: Springer International Publishing AG, 2016. P. 287–302. (обробка експериментальних даних та участь у їх аналізі).

Патенти

1. Кутлахмедов Ю.О., Матвеева І.В., Кравець М.О., **Явнюк А.А.**, Петрусенко В.П., Боруль Н.В. Спосіб реконструкції та прогнозу забруднення екосистеми полютантами: пат. 101677 Україна: МПК 2015.01; заявл. 02.04.15, опубл. 25.09.15, Бюл. №18. (обробка та аналіз даних, розробка математичних моделей, участь у створенні патенту).

Статті у інших періодичних наукових виданнях

1. Гудков Д. І., Шевцова Н.Л., **Явнюк А.А.** Вплив хронічного іонізуючого опромінення на проростання та схожість насінин очерету звичайного. *Вісник Національного авіаційного університету*. 2011. Вип. 47. № 2. С. 131–136. (обробка, участь у аналізі даних та написанні статті).

2. Kutlakhmedov Yu.O. **Yavnyuk A.A.** Radionuclides Behaviour Modelling of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in Glyboke and Daleke Lakes of Chernobyl Exclusion Zone. *Proceedings of the NAU*. 2013. Vol. 54. No 1. P. 101–105. (обробка та аналіз експериментальних даних, участь у написанні статті).

3. Шевцова Н.Л., Гудков Д.І., **Явнюк А.А.** Оцінка життєздатності насіннєвого потомства очерету звичайного в умовах тривалого радіаційного опромінення. *Вісник Житомирського національного агроекологічного університету*. 2016. №1 (55). Т. 3. С. 54–65. (обробка даних, участь у аналізі та написанні статті).

Матеріали та тези доповідей конференцій

1. **Yavnyuk A.A.**, Protsenko O.N., Shevtsova N.L., Gudkov D.I. Some Morphological and Productional Changes of Hydrobionts within the Chernobyl Accident Exclusion Zone. *37th Annual Meeting of the European Radiation Research Society: Abstract book* (Prague, Czech Republic, 26th – 29th August 2009). Prague: 2009. P 126. (Написання тез, обробка та аналіз експериментальних даних).

2. **Явнюк А.А.**, Шевцова Н.Л., Гудков Д.І., Левченко Я.І. Показатели жизнеспособности семян тростника обыкновенного в водоемах Чернобыльской зоны отчуждения. *Сахаровские чтения 2010 года: экологические проблемы XXI века: материалы 10-й международной научной конференции* (г. Минск, Республика Беларусь, 20 – 21 мая 2010 г. В 2 ч.). Минск: МГЭУ им. А. Д. Сахарова, 2010. Ч. 2. С. 60–61. (Написання тез, обробка та аналіз експериментальних даних).

3. Гудков Д.І., Шевцова Н.Л., Дзюбенко Е.В. Назаров А.Б., Проценко О.Н., **Явнюк А.А.** Эффекты хронического радиационного воздействия у гидробионтов чернобыльской зоны отчуждения. *Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде: материалы VI Международной научно-практической конференции* (г. Семей, Казахстан, 4–7 февраля 2010 г.). Семей: 2010. Т. 2. Секц. 7. С. 354–359. (Обробка та участь у аналізі експериментальних даних).

4. Шевцова Н.Л., **Явнюк А.А.**, Гудков Д.І. Аналіз показників життєздатності насіння очерету звичайного у водоймах Чорнобильської зони відчуження. *Двадцять*

п'ять років Чорнобильської катастрофи. Безпека майбутнього: збірка тез міжнародної конференції (м. Київ, 20–22 квітня 2011 р.). К: 2011. С. 241–242. (Обробка даних та участь у аналізі та написанні тез).

5. Шевцова Н.Л., Гудков Д.І., Каглян О.Є., **Явнюк А.А.** Вплив низькодозового хронічного опромінення на генетичні, морфологічні та репродуктивні показники очерета звичайного у водоймах Чорнобильської зони відчуження *Двадцять п'ять років Чорнобильської катастрофи. Безпека майбутнього: збірка тез міжнародної конференції (м. Київ, 20–22 квітня 2011 р.). К: 2011. С. 243–244. (Обробка експериментальних даних, участь у аналізі та написанні тез).*

6. **Yavnyuk A.A.**, Shevtsova N.L., Gudkov D.I. Study of Abnormalities During Early Ontogenesis of the Common Reed's Germs in Conditions of Long-Term Ionizing Radiation Impact. *14th International Congress of Radiation Research: abstract book (Warszawa, Poland, 28 August – 1 September 2011). Warszawa: 2011. P 236. (Написання тез, обробка та участь у аналізі експериментальних даних).*

7. **Yavnyuk A.A.**, Shevtsova N.L., Gudkov D.I. The Common Reed Seeds' Viability from Water-Bodies with Different Levels of Radioactive Contamination. *13th International Congress of the International Radiation Protection Association: IRPA13 abstracts (Glasgow, Great Britain, 13–18 May, 2012). Glasgow: 2012. P. 1103. (Написання тез, обробка та аналіз експериментальних даних).*

8. **Явнюк А.А.**, Шевцова Н.Л., Гудков Д.І. Вплив хронічного йонізуючого випромінювання на життєздатність насіння очерету звичайного у водоймах різного типу в Чорнобильській зоні відчуження. *Екологічна безпека держави: тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених та студентів (м. Київ, 17–18 квітня 2012 р.). К.: НАУ, 2012. С. 201–202. (Написання тез, обробка та аналіз експериментальних даних).*

9. Шевцова Н.Л., **Явнюк А.А.**, Гудков Д.І. Вищі водні рослини в екологічному нормуванні. *Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення: матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції (м. Алушта, АР Крим 10–14 вересня 2012 р.). Харків: 2012. С. 212–218. (Обробка експериментальних даних, участь у аналізі даних та написанні тез).*

10. **Явнюк А.А.**, Шевцова Н.Л., Гудков Д.І. Эффекты малых доз ионизирующего излучения у тростника обыкновенного в водоемах Чернобыльской зоны отчуждения. *Малые дозы: материалы Международной научной конференции, посвященной 25-летию Института радиобиологии НАН Беларуси (г. Минск, Республика Беларусь, 26–28 сентября 2012 г.). Минск: Институт радиобиологии, 2012. С. 157–159. (Участь у написанні тез, обробці та аналізі експериментальних даних).*

11. **Явнюк А.А.**, Шевцова Н.Л., Гудков Д.І. Ефекти хронічного та гострого йонізуючого випромінювання в очерету звичайного у водоймах Чорнобильської зони відчуження. *Екологічна безпека держави: тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених та студентів (м. Київ, 16–18 квітня 2013 р.). К.: НАУ, 2013. С. 203–204. (Написання тез, обробка та аналіз експериментальних даних).*

12. **Iavniuk A.A.**, Kutlakhmedov Iu. O. Box Models of ^{137}Cs and ^{90}Sr Radionuclides Migration in Glyboke and Daleke Lakes within Chernobyl Exclusion Zone.

IV Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю: матеріали міжнародної конференції (м. Вінниця, 25–27 вересня 2013 р.). Вінниця: видавництво ВНТУ, 2013. С. 436–438. (Написання тез, обробка та аналіз експериментальних даних).

13. **Явніук А.А.** Життєздатність паростків очерету звичайного за умов хронічного та гострого впливу йонізуючого випромінювання. *Актуальні проблеми сучасної гідроекології: збірник матеріалів науково-практичної конференції, присвяченої 95-річчю заснування Національної академії наук України (м. Київ, 5–6 листопада 2013 р.). К.: Інститут гідробіології НАНУ, 2013. С. 104–105. (Написання тез, обробка та аналіз експериментальних даних).*

14. **Iavniuk A., Shevtsova N., Gudkov D.** Dynamics of growth processes of the common reed's seed from water bodies in the Chernobyl exclusion zone after additional irradiation. *Third International Conference on Radiation and Applications in Various Fields of Research: book of abstracts (Budva, Montenegro, June 8–12, 2015). Budva, 2015. P. 456. (Обробка даних, участь у аналізі та написанні тез).*

15. **Явніук А.А., Шевцова Н.Л., Гудков Д.І.** Ростові процеси паростків насіння очерету звичайного в умовах хронічного та додаткового гострого йонізуючого опромінення. *VI з'їзд Радіобіологічного товариства України: тези доповідей (м. Київ, 5–9 жовтня 2015 р.). К., 2015. С. 139. (Обробка даних, участь у аналізі та написанні тез).*

16. **Явніук А.А., Шевцова Н.Л., Гудков Д.І.** Аномалії паростків насіння очерету звичайного з водойм Чорнобильської зони відчуження за умов додаткового йонізуючого опромінення. *XXIII щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: тези доповідей (м. Київ, 1–5 лютого 2016 р.). К., 2016. С. 198–199. (Написання тез, обробка та аналіз експериментальних даних).*

17. **Явніук А.А., Кутлахмедов Ю.О.** Камерні моделі поведінки радіонуклідів ^{137}Cs та ^{90}Sr в озері Глибоке Чорнобильської зони відчуження. *III науково-практична конференція молодих вчених «Сучасна гідроекологія: місце наукових досліджень у вирішенні актуальних проблем»: збірник матеріалів (м. Київ, 6–7 жовтня 2016 р.). К.: Інститут гідробіології НАНУ, 2016. С. 60–62. (Написання тез, обробка та аналіз експериментальних даних).*

18. **Явніук А.А., Шевцова Н.Л., Гудков Д.І.** Порушення розвитку насіннєвого потомства очерету звичайного *Phragmites australis* за умов радіонуклідного забруднення водойм. *XXIV Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: тези доповідей (м. Київ, 10–13 квітня 2017 р.). К., 2017. С. 217–218. (Написання тез, обробка та аналіз експериментальних даних).*

19. **Явніук А.А., Шевцова Н.Л., Гудков Д.І.** Вплив тривалості латентного періоду та режимів опромінення на життєздатність насіннєвого потомства очерету звичайного з водойм Чорнобильської зони відчуження. *Вода: проблеми та шляхи вирішення: збірник статей Науково-практичної конференції із міжнародною участю (м. Житомир, 5–8 липня 2017 р.). Житомир: Вид-во ЕЦ «Укрекобіокон», 2017. С. 299–304. (Участь у написанні статті, обробці та аналізі експериментальних даних).*

20. **Iavniuk A., Shevtsova N., Gudkov D.** Disorders of the initial ontogenesis of seed progeny of the common reed (*Phragmites australis*) from water bodies within the Chernobyl Exclusion Zone. *4th International Conference on Radioecology &*

Environmental Radioactivity: Abstracts Book (Berlin, Germany, 3–8 September, 2017). Berlin, 2017. P. 680–682. (*Обробка даних, участь у аналізі та написанні тез*).

21. **Явнюк А.А.**, Шевцова Н.Л., Гудков Д.І. Лінійні показники паростків насіння очерету звичайного з водойм Чорнобильської зони відчуження за умов додаткового гострого опромінення. *XXV щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: тези доповіді* (м. Київ, 16–20 квітня 2018 р.). К.: Ін-т ядерних дослідж., 2018. С. 202–204. (*Написання тез, обробка та аналіз експериментальних даних*).

22. **Явнюк А.А.**, Шевцова Н.Л. Показники життєздатності насіннєвого потомства очерету звичайного водойм Чорнобильської зони відчуження за додаткового опромінення. *Міжнародна науково-практична конференція «Чорнобильська катастрофа. Актуальні проблеми, напрямки та шляхи їх вирішення»*: тези доповіді (м. Житомир, 26–27 квітня 2018 р.). Житомир: ЖНАЕУ, 2018. С. 334–338. (*Написання тез, обробка та аналіз експериментальних даних*).

ПОДЯКА

Автор висловлює глибоку шану та щиру вдячність за плідне співробітництво, консультативну допомогу, цінні поради та всебічну підтримку при проведенні досліджень науковому керівнику, завідувачу лабораторії радіоекологічної надійності біосистем відділу біофізики і радіобіології Інституту клітинної біології та генетичної інженерії НАН України, д.б.н., професору Кутлахмедову Юрію Олексійовичу; старшому науковому співробітнику відділу водної радіоекології Інституту гідробіології НАНУ, к.б.н., Шевцовій Н.Л.; завідувачу відділу водної радіоекології Інституту гідробіології НАНУ, старшому науковому співробітнику, д.б.н., Гудкову Д.І.; провідному науковому співробітнику відділу водної радіоекології Інституту гідробіології НАНУ, д.б.н., професору Кузьменку М.І.; провідному науковому співробітнику відділу водної радіоекології Інституту гідробіології НАНУ, д.б.н., Волковій О.М.; доценту кафедри екології Національного авіаційного університету к.б.н., доценту Білик Т.І., а також усім співробітникам відділу водної радіоекології Інституту гідробіології НАНУ за допомогу у відборі матеріалу та проведенні експериментальних досліджень.

АНОТАЦІЯ

Явнюк А. А. Особливості раннього онтогенезу очерету звичайного *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. в умовах радіонуклідного забруднення водойм. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата біологічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 03.00.17 «Гідробіологія». – Інститут гідробіології НАН України, Київ, 2019.

Дисертація присвячена комплексному дослідженню порушень розвитку насіннєвого потомства очерету звичайного *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. в умовах впливу тривалого низькоінтенсивного йонізуючого опромінення та

різної тривалості періоду спокою. Розроблено камерні моделі переходу ^{90}Sr та ^{137}Cs з абіотичних компонентів до вегетуючих рослин очерету для екосистем озер Глибоке та Далеке у Чорнобильській зоні відчуження (ЧЗВ) за 20-річний період від 2000 р. до прогнозованого 2020 р. Встановлено обернену залежність життєздатності насіннєвого потомства очерету від потужності поглиненої дози хронічного опромінення. Збільшення тривалості періоду спокою зернівок очерету з 30 до 160 діб супроводжувалось відновленням життєздатності насіннєвого потомства рослин з водойм ЧЗВ. Найпоширенішими аномаліями життєздатних насіннєвих паростків очерету були порушення органогенезу та геотропізму, частка яких від загальної кількості аномальних паростків була на порядок більшою порівняно з референтними вибірками. Кількість некрозів кореня у референтних вибірках була у 2 рази меншою, ніж у вибірках з водойм ЧЗВ. З'ясовано, що насіннєве потомство очерету водойм ЧЗВ характеризується підвищенням стійкості до додаткового гострого опромінення у дозі 25, 75 та 150 Гр у градієнті зростання потужності поглиненої дози хронічного опромінення батьківських рослини у діапазоні 1,9–34,0 мкГр/год. Встановлено, що виживаність, ростові показники та загальна кількість аномалій розвитку насіннєвих паростків вірогідно відображають вплив радіаційного чинника і можуть бути рекомендовані для оцінки ураження очерету в умовах хронічного впливу йонізуючого опромінення у забруднених радіонуклідами водоймах.

Ключові слова: очерет звичайний, Чорнобильська зона відчуження, проростання насіння, хронічне та гостре йонізуюче опромінення, життєздатність насіннєвого потомства, аномалії паростків, радіоморфози.

ABSTRACT

Iavniuk A. A. Peculiarities of early ontogenesis of the common reed *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. in conditions of water bodies radionuclide contamination. – Qualification research work as the manuscript.

Ph. D. thesis on biology of 03.00.17 major “Hydrobiology”. – Institute of hydrobiology of the NAS of Ukraine, Kyiv, 2019.

The thesis is devoted to the complex study of development disorders of seed progeny of the common reed *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. under the impact of long-term low-intensity ionizing irradiation and different duration of rest period. The box models of ^{90}Sr and ^{137}Cs transition from abiotic components to vegetative reed plants from Glyboke and Daleke Lakes in the Chornobyl Exclusion Zone (CEZ) for the 20-year period from 2000 to the forecasted 2020 have, been developed. The inverse dependence between vitality of the common reed seed progeny and long-term irradiation absorbed dose rate, was found. The increase of the common reed seed rest period duration from 30 to 160 days was accompanied by the regeneration of CEZ plant seed progeny vitality. The most widespread abnormalities of vital reed seedlings were organogenesis and geotropism disorders, number of which in proportion to the total number of abnormal seedlings was an order of magnitude larger in comparison with the reference samples. The number of root necrosis in the reference samples was 2 times lower than in the samples from CEZ reservoirs. It was determined that reed seedlings from CEZ reservoirs were characterized

by increased resistance to additional acute exposure at a dose of 25, 75 and 150 Gy in the gradient of parent plant absorbed dose growth in the range of 1.9–34.0 $\mu\text{g h}^{-1}$. It has been established that survivability, growth indices and total number of abnormalities of seedlings reliably indicate the impact of the radiation factor and can be recommended for the evaluation of the reed damage in conditions of long-term ionizing radiation exposure in radionuclide contaminated reservoirs.

Key words: common reed, Chernobyl Exclusion Zone, seed germination, long-term and acute ionizing radiation, vitality of seed progeny, anomalies of seedlings, radiomorphosis.

АННОТАЦИЯ

Явнюк А.А. Особенности раннего онтогенеза тростника обыкновенного *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. в условиях радионуклидного загрязнения водоемов. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук (доктора философии) по специальности 03.00.17 «Гидробиология» (03 – Биологические науки). – Институт гидробиологии НАН Украины, Киев, 2019.

Диссертация посвящена комплексному исследованию нарушений развития семенного потомства *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. в условиях действия длительного низкоинтенсивного ионизирующего облучения и разной продолжительности периода покоя семян.

Разработаны камерные модели перехода ^{90}Sr и ^{137}Cs из абиотических компонентов в вегетирующие растения тростника обыкновенного для экосистем озер Глубокое и Далекое Чернобыльской зоны отчуждения (ЧЗО) за 20-летний период с 2000 г. до прогнозируемого 2020 г. Модели верифицированы по натурным данным. Вычислены периоды «интенсивных изменений» и «динамического равновесия» содержания радионуклидов в биомассе популяции тростника продолжительностью в среднем 5 и 15 лет, соответственно. В течение первого периода растения накапливают до половины содержания радионуклидов от рассчитанного за 20 модельных лет.

Установлена обратная зависимость жизнеспособности семенного потомства тростника от дозы хронического облучения. Временной фактор достоверно влиял на жизнеспособность семенного потомства тростника. С увеличением продолжительности периода покоя с 30 до 160 суток жизнеспособность семенного потомства восстанавливалась.

При дополнительном облучении дозами 25, 75 и 150 Гр выживаемость проростков семян снижалась до 50% в градиенте роста мощности дозы хронического облучения до 34 мкГр/час.

Факторы хронического и острого облучения достоверно влияли на длину проростков семян тростника обыкновенного, что подтверждено результатами двухфакторного анализа. Средняя длина корней и листьев достоверно уменьшалась почти на 40% в градиенте роста мощности поглощенной дозы хронического облучения от 0,03 до 34 мкГр/час.

Динамика ростовых процессов корней и листьев семенных проростков растений из водоемов ЧЗО подчинялась экспоненциальной зависимости ($R^2 = 0,89–0,997$ и $0,93–0,999$ соответственно). Рост корней и листьев семенных проростков растений референтных водоемов подчинялся линейной зависимости ($R^2 = 0,75–0,99$ и $0,83–0,96$ соответственно).

Установлена достоверная обратная корреляция между дозой дополнительного острого облучения и длиной корней и листьев проростков семян с уровнем значимости $P = 0,8$. Коэффициент корреляции, соответственно, составил для фонового водоема (оз. Вербное) $-0,99$ и $-0,94$; ВО ЧАЭС: $-0,89$ и $-0,80$; оз. Глубокое: $-0,93$ и $-0,89$.

Результаты регрессионного анализа указывают на экспоненциальную зависимость между дозой острого облучения и длиной корней и листьев проростков семян растений из водоемов ЧЗО ($R^2 = 0,80–0,92$ и $0,72–0,84$ соответственно). Для корней и листьев проростков семян растений из оз. Вербное такая зависимость была линейной ($R^2 = 0,99$ и $0,87$).

Наиболее распространенными аномалиями жизнеспособных проростков семян тростника из водоемов ЧЗО были нарушения органогенеза и геотропизма. Их доля от общего количества аномальных проростков достигала 63 и 73%. У проростков семян растений из референтных водоемов общее количество таких нарушений не превышало 5%. Количество некрозов корней в референтных выборках было в 2 раза меньше, чем в выборках из водоемов ЧЗО.

Общее количество аномалий жизнеспособных проростков семян тростника из водоемов ЧЗО после увеличения продолжительности периода покоя с 20–30 до 120–160 суток уменьшилась в 5 раз, а количество некрозов корней – в 2 раза.

Семенное потомство тростника из водоемов ЧЗО характеризовалось повышением устойчивости к дополнительному острому облучению в градиенте увеличения мощности поглощенной хронической дозы на родительские растения в диапазоне 1,9–34,0 мкГр/час. При повышении дозы дополнительного облучения с 25 до 150 Гр, при мощностях поглощенной дозы хронического облучения 1,9 и 34 мкГр/ч, выживаемость семенных проростков тростника обыкновенного из водоемов ЧЗО снизилась в 6 и 3 раза соответственно, а из референтного водоема – в 14 раз.

Хроническое радионуклидное загрязнение водоемов ЧЗО приводит к возникновению нарушений в развитии семенного потомства тростника обыкновенного на ранних стадиях онтогенеза. Выживаемость проростков семян, морфометрические показатели роста корней и листьев, общее количество нарушений жизнеспособных проростков достоверно отражают влияние радиационного фактора и могут быть рекомендованы для оценки поражения тростника обыкновенного в условиях длительного низкоинтенсивного действия ионизирующего облучения в загрязненных радионуклидами водоемах.

Ключевые слова: тростник обыкновенный, Чернобыльская зона отчуждения, прорастание семян, хроническое и острое ионизирующее облучение, жизнеспособность семенного потомства, аномалии проростков, радиоморфозы.

**Підписано до друку 29.03.2019 р. Формат 60х90 1/16.
Папір офсетний. Умовн. др. арк. 0,9
Друк різнограф. Тираж 50 прим. Зам. № 2703/01.**

**Надруковано ФОП Гузік О.М.
Податковий номер №2705814113
м. Київ, вул. Б. Гаврилишина, 16
Тел.: 338-16-61.**