

**ВПЛИВ РАДІОАКТИВНОГО ЗАБРУДНЕННЯ СЕРЕДОВИЩА
ПРИРОДНИМИ І ШТУЧНИМИ РАДІОНУКЛІДАМИ НА НАЗЕМНІ
УГРУПОВАННЯ РОСЛИН ТА ТВАРИН**

І. М. ГУДКОВ, доктор біологічних наук, професор
*Національний університет біоресурсів і природокористування
України*

А. Г. КУДЯШЕВА, доктор біологічних наук, старший науковий співробітник
Інститут біології Комі НЦ УрВ РАН, Сиктивкар
E-mail: ingudkov@ukr.net

Анотація. Розглянуто вплив забруднення навколишнього середовища природними та штучними радіоактивними речовинами і, як наслідок, тривалого хронічного опромінення на природні угруповання рослин і тварин. Проаналізовано біологічні ефекти малих доз опромінення в дикорослих рослин, популяцій тварин на клітинному, тканинному, організменому рівнях. Сукупність експериментальних даних, відомих на теперішній час, дає можливість зробити висновок про високу чутливість багатьох фізіолого-біохімічних процесів у тканинах рослин і тварин до хронічної дії іонізуючої радіації низької інтенсивності у природних умовах і при радіоактивному забрудненні. Разом з тим виявлено відмінності у забезпеченні антиоксидантами тканин мишоподібних гризунів із контрольних і радіоактивних ділянок, а також у кількісному співвідношенні окремих фракцій фосфоліпідів у тканинах мишоподібних гризунів «чорнобильської» популяції. Це дає змогу припустити як залежність стану біохімічних параметрів у тканинах тварин із природних популяцій від еколого-популяційних чинників, так і наявність змін регуляції клітинних процесів у тканинах тварин, які протягом десятиків поколінь мешкають на територіях із підвищеним природним радіаційним фоном. Показано, що хронічна дія іонізуючого випромінювання у малих дозах зумовлює неспецифічні реакції, характерні для різних стадій загального адаптаційного синдрому, і закономірний розвиток компенсаторних перебудов органів різних систем, що є реакціями пристосування організму до дії радіоекологічного чинника. Однак цей механізм спрямований лише на виживання популяції, а не на її процвітання у подібних умовах.

Ключові слова: *радіоактивні речовини, іонізуюче випромінювання, хронічне опромінення, популяції рослин і тварин, радіобіологічні ефекти.*

Актуальність. Радіобіологією та радіоекологією накопичено великий досвід вивчення реакцій живих організмів на дію іонізуючого випромінювання, який дає можливість певною мірою передбачати можливі зміни в угрупованнях рослин і популяціях тварин, які піддані тотальній дії радіаційного чинника у природному середовищі. І порівняння результатів

вивчення дії радіації на природні екосистеми з даними лабораторних досліджень виявляє велику різницю, зумовлену сильною модифікуючою дією звичайних постійно діючих чинників навколишнього середовища.

Вже у перших експериментах з тривалого опромінення вегетуючих рослин, проведених у 1950-і роки у відповідь на випробування атомної зброї, було одержано багато матеріалу, який основу став підґрунтям сучасних уявлень про виникнення і розвиток у рослин радіаційного синдрому. Дослідження з вивчення дії хронічного γ -опромінення на рослини було розпочато у США у Брукхейвенській національній лабораторії під керівництвом видатного радіобіолога А. Х. Сперроу на спеціально створеному для цієї мети гамма-полі [1]. Було визначено радіочутливість більше ніж ста видів рослин із 35 родин. Установлено, що цей важливий показник варіює у сотні разів. Саме там у ті часи було виявлено надзвичайно високу порівняно з іншими видами рослин радіочутливість голонасінневих видів, зокрема родини соснових, і особливо виду сосна. Пізніше було виявлено основні параметри, що визначають радіочутливість рослин і серед них такі найбільш важливі, як ядерні та хромосомні характеристики клітин, показано високу радіочутливість процесів статевого розмноження.

У цій же лабораторії проведено великомасштабні експерименти з вивчення дії іонізуючих випромінювань на ценози й екосистеми, кінцевою метою яких було розроблення системи критеріїв для оцінювання екологічних наслідків хронічної дії радіації на живі системи і заходів з відновлення рослинних ресурсів після ядерних і радіаційних інцидентів. В умовах експериментів з хронічним опроміненням виявлено зміни у структурі, особливостях домінування видів, щільності їх заселення, продуктивності. У польових дослідженнях підтверджено прогностичну роль хромосомно-ядерних характеристик і висунуто припущення, що у природних умовах вплив хронічного опромінення може проявлятися за менших потужностей доз, ніж при їх вирощуванні в умовах експерименту.

Значну потенційну небезпеку для рослин, що ростуть на уранових «хвостах» – залишках уранової руди після видобутку металу для потреб ядерної енергетики та військових цілей, довели Е. Речел і В. Кемпбел [2]. В лабораторних дослідах з особливо радіочутливим видом традесканції, яка вирощувалася на ґрунті з додаванням уранових відходів, вони спостерігали зміни у швидкості утворення волосків на тичинкових нитях, зниження життєздатності пилку, а також збільшення кількості соматичних мутацій. Було зроблено слушне припущення про неминучі специфічні особливості становлення фітоценозів в умовах подібних техногенних утворень, які проявляються насамперед в елімінації радіочутливих видів.

У дослідженнях, проведених у 1960–1970-і роки в Інституті біології Комі Уральського відділення РАН, в умовах унікального урано-радієвого біогеоценозу на півночі Республіки Комі, показано, що тривале зростання популяції горошку мишачого призводить до появи у цих рослин ознак, що відрізняють їх від тих, які ростуть в умовах звичайного радіаційного фону. Популяція зазначеного виду зростала на ділянці, де гамма-фон у найактивніших місцях досягав 1,5-2,5 мР/год, що у сто і більше разів перевищує середні рівні радіаційного фону на Землі. При цьому рослини

додатково були піддані радіаційному навантаженню з боку інкорпорованих α -випромінюючих радіонуклідів – ^{222}Rn , ^{226}Ra , ^{210}Po . Інтегральна кумулятивна доза на надземну масу за період вегетації становила 5,3МГр і для коренів – 64,3МГр. Було виявлено велику кількість аберантних ана- і телофаз у меристемних клітинах проростків із насіння, що сформувалося на рослинах в умовах хронічного опромінення, що свідчить про підвищення темпів мутаційної мінливості в рослин. Водночас ця популяція мала вищу порівняно з контролем частоту хлорофільних мутацій. Її також відрізняла підвищена радіочутливість насіння, що може свідчити про обтяженість генома популяції мутаціями, які накопичуються і передаються у прихованому вигляді наступним поколінням. Наявність такого вантажу в разі дії на популяцію радіаційного фактора більшої потужності робить її більш вразливою порівняно зі звичайними угрупованнями. Індуктором генетичного вантажу тут є весь комплекс несприятливих умов, що характеризують екологічну обстановку. Особливо важлива роль, разом із фактором підвищеного радіаційного фону, може належати важким металам, які також мають мутагенні властивості і вміст яких підвищений у цих ґрунтах [3].

Спостереження за хребетними тваринами (гризуни, зайцеві, копитні, рептилії) на полігонах після випробувань ядерної зброї на початку 1960-х років, на ділянках з локальним радіонуклідним забрудненням свідчать про затримку їх розвитку і статевого дозрівання, скорочення тривалості життя і зменшення стійкості до дії несприятливих факторів середовища, зменшення плодючості, зростання мінливості морфологічних структур. У звірків з районів з підвищеним у 5-7 разів природним радіаційним фоном частіше виявляли патології в діяльності кровотворної і статеві систем, значні варіювання чисельності популяції, високу загибель ембріонів, зміну структури популяції [4]. Усі ці зміни і порушення свідчать про вплив у природних умовах малих доз радіації на популяції тварин, зокрема гризунів, які тут мешкають.

Багаторічні дослідження співробітників Інституту біології показують, що радіоекологічний фактор (спільний вплив підвищеного фону природної радіації на один-два порядки порівняно з фоновими значеннями та геохімічних, кліматичних та інших природних і техногенних умов) може негативно діяти на організм і популяції тварин навіть за дуже малих рівнів іонізуючої радіації. На прикладі популяції полівок-економок продемонстровано високий рівень морфофізіологічної, гістоморфологічної, цитогенетичної мінливості деяких органів і систем під дією підвищеного рівня природної радіації у біогеоценозах [5]. Зареєстровано зміни у білковому обміні полівок, у рівні сульфгідрильних груп у печінці тварин, активності ферментів енергетичного обміну, антиоксидантних ферментів, окремих ланок перекисного окислення ліпідів, виявлено високу чутливість клітин периферичної крові до хронічної дії малих доз у природному середовищі. Гістоморфологічне вивчення сім'яників та яєчників полівок показало радіаційне ураження гонад в ембріональний період.

У цілому дослідження показали, що хронічна дія іонізуючого випромінювання у малих дозах спричинює неспецифічні реакції, характерні для різних стадій загального адаптаційного синдрому і зумовлює закономірний розвиток компенсаторних перебудов органів різних систем, що є реакціями пристосування організму до дії радіоекологічного чинника.

Однак це пристосування спрямоване лише на виживання популяції, а не її процвітання у подібних умовах.

У мишоподібних гризунів, які живуть у районах з підвищеним рівнем природних радіонуклідів урану, радію, торію, порівняно з такими тваринами з фонових територій, спостерігається порушення закономірних змін фаз популяційного циклу, підвищення інтенсивності розмноження, потенційної та загальної плодючості, що призводить до скорочення тривалості життя і репродуктивного періоду, зростання ембріональної смертності та появи менш життєздатного потомства [5, 6].

Аварія на Чорнобильській АЕС посилила інтерес до досліджень біологічних наслідків хронічного опромінення у малих дозах. виникли після аварії з'явилися території, забруднені довгоживучими радіонуклідами, – так звані штучні радіонуклідні аномалії. З їх появою створилися унікальні можливості для вивчення близьких і віддалених наслідків тривалого опромінення рослин і тварин. І було підтверджено, що радіобіологічні ефекти у підданих радіоактивному забрудненню природних екосистемах залежать від радіочутливості домінуючих у них видів. До найбільш радіочутливих видів рослин належать хвойні породи дерев, до найбільш радіо чутливих видів тварин – ссавці, а екосистем – хвойні ліси.

Характерною ознакою великих радіаційних аварій є наявність двох періодів їхнього перебігу – інтенсивного короткострокового опромінення і наступного тривалого, часом багаторічного, етапу з повільним зменшенням потужності дози. Найбільш значні ураження біоти бувають спричинені дією іонізуючої радіації в період гострого опромінення.

Багаторічне вивчення стану рослинності у зазначених умовах виявило стійку появу деяких біологічних ефектів тривалого – хронічного опромінення декількох поколінь однорічних видів рослин і багаторічників, у яких протягом цього періоду можуть накопичуватися досить значні дози опромінення клітин первинних і вторинних утворювальних тканин, спочиваючих бруньок і попередників майбутніх генеративних органів. Порівняння радіобіологічних ефектів у різних видів рослин вказує на суттєві відмінності відповіді популяції на хронічне опромінення [7].

Розрізняють ценотичні та видопопуляційні відповіді рослинності на хронічне опромінення. У швидко наступаючих ценотичних ефектах, які виявляються у зміні видового складу ценозу та зміні домінантних форм, основну роль відіграють явища радіаційного пригнічення радіочутливих видів, або збільшується частота утворення хромосомних і точкових мутацій, або проявляється явище гормезису. У повільніших ценотичних ефектах можуть виявлятися наслідки індукованих опроміненням процесів генетико-популяційної природи.

З ефектів, що виявляються при вивченні окремих видів рослин чи їхніх популяцій, треба зазначити такі:

- при хронічному низькоінтенсивному опроміненні проявляється кумулятивність його дії – у деяких видів з часом радіочутливість насіння і вегетуючих рослин зростає;

- з часом у рослин, що ростуть в умовах радіонуклідної аномалії, підвищується генетична нестабільність, яка проявляється у збільшенні частоти цитогенетичних і генетичних порушень і може зберігатися протягом

декількох років після припинення дії підвищених порівняно з фоновим рівнів опромінення;

- хронічне низькофонове опромінення не супроводжується індукцією радіоадаптації, що, ймовірно, спричинено поступовою втратою здатності клітин до репарації ДНК;

- в опромінених популяціях деяких видів рослин, зокрема хвойних дерев, з'являються радіоморфози двох типів: потворні форми окремих органів (листіків, стебел, квіток, суцвіть), поява яких зумовлена втратою здатності до поділу клітин, стохастично розподілених у меристемах; формування аномальних за розміром органів (дуже великих чи, навпаки, дрібних порівняно з нормою), хоча із збереженням регулярності у тканинній і клітинній структурах, що є наслідком втрати клітинами здатності сприймати сигнали позиційної інформації;

- зміни позиційної інформації на рівні фізіологічних процесів, які проявляються порушеннями властивій нормі періодичності органічного спокою насіння, послабленням апікального домінування у вегетуючих рослин та іншими явищами, від яких залежить стійкість рослин не тільки до опромінення іонізуючою радіацією, але й до стресових навантажень іншої природи [8, 9].

Флористичні дослідження, проведені у зоні радіаційного впливу аварії на Чорнобильській АЕС на різних рівнях організації рослин – від клітинного до популяційного, підтвердили дані про надзвичайну радіочутливість рослин родин соснових, бобових і лілейних [10].

Реакція на радіоактивне забруднення представників інших родин та рослинних угруповань, зокрема видів, що є компонентами природних трав'яних ценозів, була не такою помітною. При цитогенетичному аналізі насіння деяких представників дикої та культурної флори були одержані дані, що свідчать про зростання рівня мутацій, хоча далеко не завжди вдалося виявити зв'язок між кількістю мутацій і гамма-фоном у місцях зростання рослин. У різних видів рослин знаходили патології на всіх фазах мейозу, відхилення у мікроспорогенезі, різноспрямовані зміни мутаційного вантажу в популяціях рослин, що зростають за різних режимів хронічного опромінення. Протягом багатьох років реєстрували більш високий рівень різних відхилень у морфології вищих квіткових рослин, помічено зміни у структурі трав'янистих фітоценозів.

Усі ці дані свідчать про пригнічуючу дію на рослини радіонуклідного забруднення ґрунту, навколишнього середовища в цілому. Це проявляється як на цитогенетичному рівні у формі зростання частоти хромосомних мутацій, так і на рівнях організму і популяцій окремих видів рослин. Досить переконливим показником негативної дії радіоактивного забруднення на рослини є зменшення насіннєвої продуктивності в популяціях окремих видів.

Однак за сукупністю результатів різнобічного обстеження насіння великої кількості видів вищих квіткових рослин, що входять у лучні угруповання агроценозів у 30-кілометровій зоні Чорнобильської АЕС, можна вважати, що радіоактивне забруднення не призвело до помітних відхилень у рівні мінливості найважливіших популяційних показників. Разом з тим серед аборигенної рослинності є окремі види, чутливі до опромінення іонізуючою радіацією, такі як арабідопсис (резуха, *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh.),

подорожник ланцетолистий (*Plantago lanceolata* L.), фіалка ранкова (*Viola matutina* Klok.) і деякі інші [11].

Досвід радіаційної аварії на Південному Уралі, що сталася у 1957р., виявився досить корисним для таких досліджень. Сьогодні, коли після неї минув удвічі довший період, ніж після аварії на Чорнобильській АЕС, на території того радіоактивного сліду майже немає будь-яких зовнішніх проявів дії радіації на живі організми. Частота хромосомних аберацій у твірних клітинах вийшла на сталий рівень. Природні екосистеми набули свого передаварійного вигляду, за винятком хвойних лісів, які сильно постраждали від опромінення. Окрім того, біохімічні мутації й зараз ще не досягли сталого рівня. Екосистеми, уражені після аварії на Чорнобильській АЕС, мабуть, проходять ті самі етапи формування радіаційного синдрому, які проходили уражені екосистеми на Уралі. Для об'єктивного прогнозу можливих майбутніх змін у фітоценозах необхідно продовжувати моніторинг, залучаючи у багаторічні дослідження нові види рослин і вдосконалюючи фітоценотичні підходи до вивчення антропогенного впливу на природу. Однак результати досліджень наслідків тривалої радіаційної дії на стан здоров'я населення, яке мешкає на забруднених внаслідок аварії на Уралі територіях, дають певні підстави для висновку про негативну дію радіоактивного забруднення [12].

У тварин, які мешкають у природних умовах 30-кілометрової зони Чорнобильської АЕС, виявлено суттєві зміни біофізичних і біохімічних показників життєво важливих систем організму на рівні клітин, тканин, органів, популяцій. Характерними ознаками радіаційного ураження у перші роки після аварії (1986–1991 рр.) є порушення закономірностей зміни фаз чисельності дрібних ссавців, зростання частоти виникнення анатомічних аномалій, зміни у статеві-віковій структурі. У цих тварин виявлені порушення в ендокринній системі, зокрема порушення репродуктивної функції, а також зміни імунного статусу. Установлено високий ступінь індивідуальної варіабельності цитогенетичних показників, зазначено генетичну ефективність всіх рівнів забруднення. Виявлено, що частота уражень хромосом підвищувалася протягом 2-4 років після аварії і навіть через 20 років не знижувалася до фонових значень [13, 14].

Вивчення стану систем клітинної регуляції в органах гризунів із природних популяцій на різних ділянках зони радіаційного впливу, дало змогу встановити, що хронічне низькоінтенсивне опромінення у малих дозах спричинює в організмі мишоподібних гризунів складні порушення в системі регуляції перекисного окислення ліпідів (ПОЛ) та енергетичного обміну. Показано, що постійна дія на тварин такого режиму опромінення спричинює активацію вільнорадикальних реакцій, окислювальну деструкцію клітинних мембран, вихід ферментів з компартментів, тривалу активацію захисних компенсаторних систем, що призводить до їх виснаження і зриву [15].

Сукупність експериментальних даних, відомих на теперішній час, дає можливість зробити висновок про високу чутливість багатьох фізіолого-біохімічних процесів у тканинах тварин до хронічної дії іонізуючої радіації низької інтенсивності у природних умовах і при радіоактивному техногенному забрудненні. Разом з тим виявлено відмінності у забезпеченні антиоксидантами тканин гризунів із контрольних і радіоактивних ділянок, а

також у кількісному співвідношенні окремих фракцій фосфоліпідів у тканинах мишоподібних гризунів «чорнобильської» популяції. Це дає змогу припустити як залежність стану біохімічних параметрів у тканинах тварин із природних популяцій від еколого-популяційних чинників, так і наявність змін регуляції клітинних процесів у тканинах тварин, які протягом десятків поколінь мешкають на територіях з підвищеним природним радіаційним фоном [16].

На прикладі популяцій рудих полівок і бурозубок, які живуть на забруднених внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС територіях, встановлено напруженість фізіологічних та імунологічних процесів у тканинах тварин у відповідь на дію малих доз хронічного опромінення, порушення нормального розвитку та підвищення смертності серед молодих особин [17].

Комплексні багаторічні дослідження природних популяцій п'яти видів мишоподібних гризунів (перший поставарійний період – 1986-1991рр. і через 21 рік після аварії) дали можливість простежити основні етапи формування й розвитку змін в основних системах організму та процеси їх регуляції у декількох поколіннях тварин, які мешкають на території зони відчуження. Треба зазначити, що обстежували тварин, які певною мірою пройшли крізь своєрідний фільтр природного добору і являли собою найбільш життєздатних особин в умовах постійної дії іонізуючої радіації. Проте в обстежених звірків, попри зовнішнє благополуччя, виявлено чисельні й різноманітні структурні, морфологічні, біохімічні, біофізичні, цитогенетичні зміни в клітинах і тканинах, дозволяє на підставі чого можна зробити висновок про якісні зміни стану самих популяцій мишоподібних гризунів внаслідок тривалого проживання на територіях з підвищеним рівнем радіоактивного забруднення. Це підтверджується і зміною найпоширенішого виду мишоподібних гризунів, яка спостерігалася протягом 1986-1993р. і 2007р. у 30-кілометровій зоні навколо ЧАЕС, – зникнення полівки-економки й повсюдне поширення більш резистентних польових і жовтогорлих мишей; зростанням мінливості досліджуваних параметрів, збільшенням гетерогенності як відповідних реакцій.

Необхідно наголосити, що в умовах радіоактивного забруднення середовища ступінь порушення ліпідного обміну, забезпечення тканин енергією, морфологічні зміни в тканинах і генетичні наслідки для природних популяцій гризунів виявилися значно більшими, ніж в експериментах з хронічним зовнішнім γ -опроміненням лабораторних тварин. Це свідчить про необхідність як урахування дії усього комплексу чинників середовища, так і обережної екстраполяції результатів, отриманих у лабораторних експериментах, для прогнозування біологічних наслідків дії техногенного забруднення біоти. Патологічні процеси, що виникають (порушення у системі регуляції перекисного окислення ліпідів та дезінтеграції енергетичного обміну, процесів кровотворення, дисбаланс ендокринної системи, цитогенетичні порушення у статевих і соматичних клітинах), можуть призводити до недосконалості пристосувальних механізмів [17, 18].

Тривале перебування (2-4 місяці) лабораторних щурів і мишей у зоні відчуження Чорнобильської АЕС, тобто в умовах хронічної дії іонізуючого випромінювання, найбільш суттєво виявляється на змінах у стані

ендокринної системи, реакція якої спрямована на адаптацію організму до зазначеного фактора. При цьому найбільш чутлива ланка ендокринної системи – кора надниркової залози, яка відіграє ключову роль у реакції організму на стрес, зазнає змін рівня кортикостерону. Утримання тварин у зоні відчуження підвищує процеси мутагенезу (збільшується кількість мікроядер в еритроцитах) і канцерогенезу (збільшується кількість аденом у мишей), а також змінює реакцію організму на дію канцерогену хімічної природи. Збільшення строків утримання тварин у зоні відчуження впливає на інтенсивність перебігу окремих метаболічних процесів і на чутливість тварин до дії нерадіаційних факторів. Виявлені зміни стану цих важливих систем організму є наслідком спільної дії радіаційних і нерадіаційних чинників [19].

У поставарійний період (протягом 10 років) вивчення декількох поколінь щурів, яких утримували на території з підвищених радіаційним фоном, виявило глибокі порушення у гормональному статусі тварин, зокрема виявлено морфофункціональні зміни в різних органах і системах, при формуванні яких відбувається поступове виснаження адаптивно-компенсаторних можливостей організму [20].

Перехід клітинних систем регуляції на новий рівень функціонування, який зумовлює формування якісно нових субпопуляцій мишоподібних гризунів, забезпечує виживання популяції та підтримку гомеостазу в радіоекологічних умовах, що змінилися.

Порівняльна оцінка популяцій риб, що мешкають у водоймі-охолоджувачі та інших водоймах зони відчуження Чорнобильської АЕС, виявила їхню значну мінливість щодо морфологічних, морфометричних, цитогенетичних показників, показників відносної чисельності, екстер'єрних індексів. Це свідчить про те, що на стан популяцій риб впливають, крім радіаційного, й інші фактори зони відчуження. Результати багаторічних досліджень з накопичення ^{137}Cs у тканинах риб із водойм, забруднених радіонуклідами чорнобильського походження, показали, що протягом усього періоду радіоекологічних досліджень щука – представник вищого трофічного рівня – характеризувалася вищим рівнем питомої активності за цим радіонуклідом у м'язах порівняно з іншими видами хижих риб, зокрема із судаком. Установлено тісний зв'язок сезонних, вікових і статевих відмінностей у накопиченні ^{137}Cs в організмі риб із характером їх харчування [21, 22].

Отже, як у рослинних угрупованнях, так і в популяціях тварин у зонах радіоактивного забруднення найбільш значні зміни відбуваються на рівні окремих видів організмів, органів, тканин, клітин. Самі популяції здатні пристосовуватися до радіоактивного забруднення, змінюючи видове різноманіття, структуру, чисельність популяцій та інше.

Список використаних джерел

1. Сперроу А.Х., Вудвелл Дж. М. Чувствительность растений к хроническому γ -облучению // Вопросы радиоэкологии. – М. Атомиздат, 1968. – С. 57–86.
2. Rechel E.A., Campbell W.E. The effects radiation from uranium mill tailing of *Tradescantia* // Great Basin Natur. – 1978. – V. 38, N 4. – P. 456–462.
3. Попова О.Н., Таскаев А.И., Фролова Н.П. Генетическая стабильность и изменчивость семян в популяциях травянистых фитоценозов в районе аварии на Чернобыльской АЭС. – СПб.: Наука, 1992. – 144 с.

4. Вавилов П. П., Попова О.Н., Коданева Р.П. Исследование мейоза у облученных растений, а также у растений, выращенных на почвах с повышенным содержанием урана и радия // Радиозэкологические исследования в природных биосфереоценозах. – М.: Наука, 1972. – С. 103–112.

5. Раушенбах Ю.О., Монастырский А.О. Исследование адаптации животных к повышенному естественному фону радиации / Влияние ионизирующих излучений на наследственность. – М.: Наука, 1966. – С. 165–166.

6. Ильенко А.И., Концентрирование животными радиоизотопов и их влияние на популяции. – М.: Наука, 1974. – 166 с.

7. Ильенко А.И., Крапиво Т.П., Можейките Р.Б., Смирнова О.В. Изучение влияния загрязнения ⁹⁰Sr биосфереоценоза на популяцию лесных мышей / Проблемы и задачи радиозэкологии животных. – М.: Наука, 1980. – С. 97–120.

8. Гродзинський Д.М., Булах А.А., Гудков І.М. Радіобіологічні ефекти у рослин / Чорнобильська катастрофа. – К.: Наук. думка, 1996. – С. 311–326.

9. Гродзинський Д.М. Гудков І.М. Радіобіологічні ефекти у рослин на забрудненій радіонуклідами території / Чорнобиль: зона відчуження. – К.: Наук. думка, 2001. – С. 325–375.

10. Grodzinsky D.M., Gudkov I.N. Radiation damage of plants in the Chernobyl Nuclear Accident impact zone / 20 Years After the Chernobyl Accident: Past, Present and Future. – New York: Nova Science Publishers, 2006. – P. 231–246.

11. Попова О.Н., Таскаев А.И., Фролова Н.П. Генетическая стабильность и изменчивость семян в популяциях травянистых фитоценозов в районе аварии на Чернобыльской АЭС. – СПб.: Наука, 1992. – 144 с.

12. Гудков И.Н. Радиозэкологический парадокс? // Радиационная биология. Радиозэкология. – 2016. – Т. 56, №3. – С. 358–362.

13. Позолотина В.Н., Молчанова И.В., Караваева Е.Н., Михайловская Л.Н., Антонова Е.В. Современное состояние наземных экосистем Восточно-Уральского радиоактивного следа: уровни загрязнения, биологические эффекты. – Екатеринбург: Изд-во «Голицынский», 2008. – 204 с.

14. Кудяшева А.Г., Шишкина Л.Н., Шевченко О.Г., Башлыкова Л.А., Загорская Н.Г. Биологические эффекты радиоактивного загрязнения в мышевидных грызунов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2004. – 214 с.

15. Кудяшева А.Г., Шишкина Л.Н., Загорская Н.Г., Таскаев А.И. Биохимические механизмы радиационного поражения природных популяций мышевидных грызунов. – СПб.: Наука, 1997. – 156 с.

16. Shishkina L.N., Kudyasheva A.G., Zagorskaya N.G., Shevchenko O.G., Taskaev A.I. Participation of the lipid peroxidation processes in the mechanism of wild rodent adaptation to radioactive contamination of Chernobyl NPP zone / The Lessons of Chernobyl: 25 Years Later. – New York: Nova Science Publishers, 2011. – P. 187–208.

17. Кудяшева А.Г. Антиоксидантный статус, состав фосфолипидов и процессы дегидрирования в органах мышевидных грызунов из районов с радиоактивным загрязнением / Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. докт. биол. наук. – М.: МГУ, 1996. – 35 с.

18. Кудяшева А.Г., Шишкина Л.Н., Н.Г. Загорская, Шевченко О.Г., Ивашевская Е.А. Состав фосфолипидов печени полевок-экономок, обитающих в разных радиозэкологических условиях // Радиационная биология. Радиозэкология. – 2000. – Т. 40, вып. 3. – С. 327–333.

19. Таскаев А. И., Материй Л.Д., Кудяшева А.Г., Ермакова О.В. Биологические последствия радиоактивного загрязнения для мышевидных грызунов в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС / Теоретическая и прикладная экология. – 2016. – №2. – С. 55–64.

20. Серкіз Я.І., Липська А.І., Мойсеєнко М.І. Особливості формування дозових навантажень у тварин / Чорнобильська катастрофа. – К.: Наук. думка, 1996. – С. 288–291.

21. Серкіз Я.І., Дрозд І.П., Липська А.І., Алесіна М.Ю. Вплив радіаційного фактора Чорнобильської зони відчуження на організм тварин / Експериментальне моделювання хронічного комбінованого (внутрішнього та зовнішнього) опромінення тварин. – К.: Атіка, 2006. – С. 8–26.

22. Kryshev A.I., Ryabov I.N. A dynamic model of ^{137}Cs accumulation by fish of different age classes // J. Environmental Radioactivity. – 2000. – Т. 50, №3. – С. 221–233.

23. Gudkov D.I., Shevtsova N.I., Pomortseva N.A., Dzyubenko E.V., Kaglyan A.E., Nazarov A.B. Radiation-induced cytogenetic and hematologic effects on aquatic biota within the Chernobyl exclusion zone // J. Environmental Radioactivity. – 2016. – Т. 151. – С. 438–448.

References

1. Sperrow, A.H., Woodwel, J.M. (1968). Chuvstvitel'nost' rasteniy k khronicheskomu γ -oblucheniyu [Sensitivity of plants to chronic γ -irradiation], Voprosy radioecologii. Moscow, Agropromizdat, 57–86.

2. Rechel, E.A., Campbell, W.E. (1978) The effects radiation from uranium mill tailing of *Tradescantia*, Great Basin Natur., 38(4), 456–462.

3. Popova, O. N., Taskaev, A. I., Frolova, N.P. (1992) Geneticheskaya stabil'nost' i izmenchivost' semyan v populyatsiyakh travyanistyykh fitotsenozov v rayone avarii na Chernobyl'skoy AES [Genetic stability and variability of seeds in populations of herbaceous phytocenoses in the area of the Chernobyl accident], Saint Petersburg, Nauka, 144.

4. Vavilov, P. P., Popova, O. N., Kodaneva, R.P. (1972). Issledovaniye meyoza u obluchennykh rasteniy, a takzhe u rasteniy, vyrashchennykh na pochvakh s povyshennym soderzhaniyem urana i radiya [The study of meiosis in irradiated plants, as well as in plants grown on soils with a high content of uranium and radium]. Radioekologicheskiye issledovaniya v prirodnykh biogeotsenozakh [Radioecological research in natural biogeocenoses]. Moscow, Nauka, 103–112.

5. Raushenbah, Yu.O., Monastyrskiy, A.O. (1966) Issledovaniye adaptatsii zhivotnykh k povyshennomu yestestvennomu fonu radiatsii [Study of adaptation of animals to an elevated natural background of radiation]. Vliyaniye ioniziruyushchikh izlucheniy na nasledstvennost' [Influence of ionizing radiation on heredity]. Moscow, Nauka, 165–166.

6. Ilyenko, A.I., (1974). Kontsentriruvaniye zhivotnymi radioizotopov i ikh vliyaniye na populyatsii [Concentration of radioisotopes by animals and their effect on populations]. Moscow, Nauka, 166.

7. Ilyenko, A.I., Krapivko, T.P., Mozhekiyte, R.B., Smirnova, O.V. (1980) Izucheniye vliyaniya zagryazneniya ^{90}Sr biogeotsenoza na populyatsiyu lesnykh myshey [A study of the influence of ^{90}Sr pollution on biogeocenosis on the population of forest mice] / Problemy i zadachi radioekologii zhivotnykh [Problems and tasks of animals radioecology]. – Moscow, Nauka, 97–120.

8. Grodzinskiy, D.M., Bulakh, A.A., Gudkov, I.M. (1996). Radiobiologichni efekty u roslin [Radiobiological effects in plants]. Chornobyl's'ka katastrofa [Chernobyl catastrophe] Kyiv, Naukova dumka, 311–326.

9. Grodzinsky, D.M., Gudkov, I.N. (2001). Radiobiologichni efekty u roslin na zabrudneniy radionuklidamy terytoriyi [Radiobiological effects in plants on radionuclide contaminated territory]. Chornobyl': zona vidchuzhennya [Chernobyl: exclusion zone], Kyiv, Naukova dumka, 325–375.

10. Grodzinsky, D.M., Gudkov, I.N. (2006). Radiation damage of plants in the Chernobyl Nuclear Accident impact zone. 20 Years After the Chernobyl Accident: Past, Present and Future, New York, Nova Science Publishers, 231–246.
11. Popova, O.N., Taskaev, A.I., Frolova, N.P. (1992). Geneticheskaya stabil'nost' i izmenchivost' semyan v populyatsiyakh travyanistyykh fitotsenozov v rayone avarii na Chernobyl'skoy AES [Genetic stability and variability of seeds in populations of herbaceous phytocenoses in the area of the Chernobyl accident]. Saint Petersburg, Nauka, 144.
12. Gudkov, I.M. (2016). Radioekologicheskiy paradoks? [A radioecological paradox?]. Radiobiology. Radioecology. 56 (3), 358–362.
13. Pozolotina, V.N., Molchanova, I.V., Karavaeva, E.N., Mikhaylovskaya, L.N., Antonova, E.V. (2008). Sovremennoye sostoyaniye nazemnykh ekosistem Vostochno-Ural'skogo radioaktivnogo sleda: urovni zagryazneniya, biologicheskiye efekty [The current state of terrestrial ecosystems of the East Urals radioactive trace: pollution levels, biological effects]. Ekaterinburg, Goshchitskiy Publisher, 204.
14. Kudyasheva, A.G., Shishkina, L.N., Shevchenko, O.G., Bashlykova L.A., Zagorskaya, N.G. (2004). Biologicheskiye efekty radioaktivnogo zagryazneniya v myshevidnykh gryzunov [Biological Effects of Radioactive Contamination in Mouse Rodents]. Ekaterinburg: Uro RAS, 214.
15. Kudyasheva, A.G., Shishkina, L.N., Zagorskaya, N.G., Taskaev, A.I. (1997). Biokhimicheskiye mekhanizmy radiatsionnogo porazheniya prirodnkh populyatsiy myshevidnykh gryzunov [Biochemical mechanisms of radiation damage to natural populations of mouse-like rodents]. Saint Petersburg, Nauka, 156.
16. Shishkina, L.N., Kudyasheva, A.G., Zagorskaya, N.G., Shevchenko, O.G., Taskaev, A.I. (2011). Participation of the lipid peroxidation processes in the mechanism of wild rodent adaptation to radioactive contamination of Chernobyl NPP zone, The Lessons of Chernobyl: 25 Years Later, New York: Nova Science Publishers, 187–208.
17. Kudyasheva, A.G. (1996). Antioksidantnyy status, sostav fosfolipidov i protsessy degidrirovaniya v organakh myshevidnykh gryzunov iz rayonov s radioaktivnym zagryazneniyem [Antioxidant status, phospholipid composition and dehydrogenation processes in organs of mouse rodents from areas with radioactive contamination] /Thesis for obtaining Doctor of Science degree. Moscow, MSU, 35.
18. Kudyasheva, A.G., Shishkina, L.N., Zagorskaya, N.G., Shevchenko, O.G., Ivashevskaya, E.A. (2000). Sostav fosfolipidov pecheni polevok-ekonomok, obitayushchikh v raznykh radioekologicheskikh usloviyakh [Composition of phospholipids of the liver of voles-economists, inhabiting different radioecological conditions]. Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya [Radiation Biology. Radioecology]. 40(3), 327–333.
19. Taskaev, A. I., Materi, L.D., Kudyasheva, A.G., Yermakova, O. V. (2016) Biologicheskiye posledstviya radioaktivnogo zagryazneniya dlya myshevidnykh gryzunov v zone otchuzhdeniya Chernobyl'skoy AES [Biological consequences of radioactive contamination for rodent mice in the exclusion zone of the Chernobyl NPP]. Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya [Theoretical and Applied Ecology], 2, 55–64.
20. Serkiz, Ia.I., Lyska, A. I., Moiseenko M.I. (1996). Osoblyvosti formuvannya dozovykh navantazhen' u tvaryn [Features of the formation of dose loads in animals]. Chornobyl's'ka katastrofa [Chornobyl catastrophe]. Kyiv, Naukova dumka, 288–291.
21. Serkiz, Ia.I., Drozd, I. P., Lyska, A. I., Alesina, M. Iu. (2006) Vplyv radiatsiynoho faktora Chornobyl's'koyi zony vidchuzhennya na orhanizm tvaryn [Influence of Radiation Factor of Chornobyl Exclusion Zone on Animals]. Eksperymental'ne modelyuvannya khronichnoho kombinovanoho (vnutrishn'oho ta zovnishn'oho) oprominennya tvaryn [Experimental Modeling of Chronic Combined (Internal and External) Irradiation of Animals]. Kyiv, Atika, 8–26.

22. Kryshev, A.I., Ryabov, I.N. (2000). A dynamic model of ^{137}Cs accumulation by fish of different age classes. J. Environmental Radioactivity, 50(3), 221–233.
23. Gudkov, D.I., Shevtsova, N.I., Pomortseva, N.A., Dzyubenko, E.V., Kaglyan, A.E., Nazarov, A.B. (2016) Radiation-induced cytogenetic and hematologic effects on aquatic biota within the Chernobyl exclusion zone, J. Environmental Radioactivity, 151, 438–448.

ВЛИЯНИЕ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ СРЕДЫ ЕСТЕСТВЕННЫМИ И ИСКУССТВЕННЫМИ РАДИОНУКЛИДАМИ НА НАЗЕМНЫЕ СООБЩЕСТВА РАСТЕНИЙ И ЖИВОТНЫХ

И. Н. Гудков, А. Г. Кудяшева

Аннотация. Рассмотрено влияние загрязнения окружающей среды естественными и искусственными радионуклидами и, как следствие, длительного хронического облучения ионизирующей радиацией на природные сообщества растений и животных. Проанализированы биологические эффекты малых доз облучения у дикорастущих растений и популяций животных на клеточном, тканевом, организменном уровнях. Совокупность экспериментальных данных, имеющихся к настоящему времени, позволяет прийти к выводу о высокой чувствительности многих физиолого-биохимических процессов в тканях растений и животных к хроническому действию ионизирующей радиации низкой интенсивности в естественных условиях и при радиоактивном загрязнении. Выявлены отличия в обеспечении антиоксидантами тканей мышевидных грызунов с контрольных и радиоактивных участков, а также в количественном соотношении отдельных фракций фосфолипидов в тканях животных «чернобыльской» популяции. Это позволяет допустить как зависимость состояния биохимических параметров в тканях животных из природных популяций от эколого-популяционных факторов, так и наличие изменений регуляции клеточных процессов в тканях животных, которые на протяжении десятков поколений обитают на территориях с повышенным радиационным фоном. Показано, что хроническое действие ионизирующего излучения в малых дозах вызывает неспецифические реакции, характерные для разных стадий адаптационного синдрома и приводят к закономерному развитию компенсаторных перестроек органов различных систем, являющихся реакциями приспособления организма к действию радиоз экологического фактора. Однако этот механизм направлен лишь на выживание популяции, а не на ее процветание в подобных условиях.

Ключевые слова: радиоактивные вещества, ионизирующее излучение, хроническое облучение, популяции растений и животных, радиобиологические эффекты.

EFFECT OF RADIOACTIVE CONTAMINATION OF ENVIRONMENT BY NATURAL AND MANMADE RADIONUCLIDES ON PLANTS AND ANIMALS TERRESTRIAL COMMUNITIES

I. Gudkov, A. Kudijasheva

Abstract. Effects environmental contamination by natural and manmade radionuclides and, as a result, prolonged chronic irradiation by ionizing radiation

on plants and animals terrestrial communities were considered. The biological effects of small irradiation doses on wild plants and animal populations at cell, tissues and organism levels were analyzed. Available experimental data allows making a conclusion about high sensitivity of many physiological and biochemical processes in plant and animal tissues to chronic action of low-level ionizing radiation under natural condition as well as radionuclide contamination. The differences in antioxidants content in tissues of mice-similar rodents in control and radioactive territories and in quantitative correlation of separate phospholipide fractions in animal tissues of «Chernobyl» population were discovered. It allows assuming the dependence of biochemical parameters of animal tissues from natural population on ecological-populational factors, as well as the possibility of cell processes regulation alterations in tissues of animal living on territories with high radiation background, during dozens of generations. The action of small doses ionizing radiation caused the non-specific reactions, typical for different stages of adaptation syndrome and leads to natural development of compensatory reorganization of organs of different systems, which is organism adaptation reactions to action of radioecological factor were showed. However, this mechanism directed only to population survival but not on its prosperity in conditions of this kind.

Keywords: radioactive substances, ionizing radiation, chronic irradiation, plant and animal populations, radiobiological effects.