

ОГЛЯДИ

УДК 577.3

РАДІОАКТИВНІ ІЗОТОПИ І ЖИТТЯ

© 2010 р. Д. М. Гродзинський

Інститут клітинної біології і генетичної інженерії

Національної академії наук України

(Київ, Україна)

Протягом усієї еволюції життя на Землі живі організми зазнавали дії малих доз іонізуючого випромінювання, зумовленого природними радіоактивними ізотопами, які у розсіяному стані виявляються у будь-яких компонентах біосфери. За низьких доз радіація, напевно, не може відігравати роль енергетичного джерела для життєвих процесів, але завдяки особливостям взаємодії іонізуючих випромінювань з речовинами вона спричиняє мутагенну дію та виконує певну інформаційну функцію. Різке зростання радіоактивності природного середовища, котре пов'язане з аваріями атомних реакторів та випробуванням ядерної зброї, набуває загрозливого характеру внаслідок того, що перевищення фону природних радіоактивних випромінювань супроводжується індукцією нестабільності геному, втратою клітинами здатності сприймати позиційну інформацію, регулювати онтогенетичний розвиток тощо. Дослідження віддалених ефектів опромінення на територіях, що зазнали радіоактивного забруднення, мають проводитися на різних рівнях – від молекулярно-генетичного до популяційного і ценотичного.

Ключові слова: *природна радіоактивність, ^{40}K , цитогенетичні радіаційні пошкодження, ефект свідка, репарація ДНК, пострадіаційне відновлення, Чорнобильська катастрофа*

Усі живі і неживі компоненти довкілля є радіоактивними, оскільки у своєму речовинному складі вони містять природні й штучні радіоактивні ізотопи. Відомо понад 60 природних радіоактивних ізотопів, або як їх часто називають радіонуклідів. Відрізняють дві групи природних радіонуклідів:

1. Відвічні радіонукліди, які містяться у матеріалах планет Сонячної системи, починаючи з моменту її формування.

2. Космогенні радіонукліди, котрі виникають унаслідок ядерних реакцій за участю космічних променів та атомів деяких хімічних елементів.

Крім природних радіонуклідів у довкіллі поширилися штучні радіоактивні ізотопи, котрі виникають у процесах ядерних технологій і до-

сліджень у галузі ядерної фізики, біології та медицини при застосуванні радіоактивних ізотопів.

Радіонукліди, що належать до зазначених груп, містяться у довкіллі здебільшого у стані розсіяння і виявляються у будь-яких об'єктах навколишнього середовища: в атмосфері, континентальних і морських водах, гірських породах, ґрунтах, рослинах, тваринах, грибах, мікроорганізмах. Радіонукліди поширюються переважно у формі крайнього розсіяння, коли головні взаємодії між різними радіонуклідами і речовинами зумовлені адсорбційними явищами.

Включені до складу різних об'єктів довкілля радіонукліди зумовлюють постійне опромінення всього живого іонізуючою радіацією. Оцінено значення середньої потужності дози опромінення у біосфері: вона складає кілька десятків сГрей за рік, варіюючи у широкому діапазоні відповідно до змін локальних кон-

Адреса для кореспонденції: Гродзинський Дмитро Михайлович, Інститут клітинної біології і генетичної інженерії НАН України, вул. Академіка Заболотного 148, Київ, 03143, Україна

РАДІОАКТИВНІ ІЗОТОПИ І ЖИТТЯ

центрацій радіонуклідів в об'єктах природного середовища.

Жодного місця і об'єкта з нульовою радіоактивністю на нашій планеті немає. Кожна жива істота містить більш або менш істотні активності природних радіонуклідів вуглецю-14 (^{14}C) і калію-40 (^{40}K), які є головними радіонуклідами як ізотопи основних біогенних елементів.

Рівні дозових навантажень від природних радіонуклідів зазвичай досить низькі, оскільки їх концентрації невисокі. Проте трапляються дві ситуації, коли дозове навантаження від опромінення може бути набагато вищим порівняно з середнім рівнем природного фону. Перша ситуація пов'язана з підвищеною концентрацією природних радіонуклідів у ґрунтах або материнських породах. Друга створюється завдяки радіоактивному забрудненню довкілля штучними радіонуклідами техногенного походження. Оскільки рівні радіонуклідних забруднень можуть досягати високих значень, люди та інші об'єкти живої природи зазнають опромінення у більш високих дозах, ніж при дії природного фону іонізуючої радіації. Саме тому вміст радіонуклідів у гірських породах, ґрунтах, воді, повітрі та біомасі став дуже важливим параметром екологічної якості довкілля.

Тривалість періоду напіврозпаду штучних радіонуклідів у більшості випадків набагато коротша, ніж у природних радіонуклідів. Багато зі штучних радіонуклідів мають дуже короткі періоди напіврозпаду, тривалістю порядку секунд або й частки секунди. Проте чимало штучних радіонуклідів характеризуються тривалим терміном життя в десятки років і більше. На цей час відомо більше 700 штучних радіонуклідів.

Головні джерела штучних радіонуклідів для їх потрапляння у довкілля це – випробування ядерної зброї, аварії на атомних електростанціях, сховищах радіоактивних відходів та витоки радіоактивних речовин, які використовуються у наукових дослідженнях і медицині.

Оскільки природні і штучні радіонукліди випромінюють однакові типи іонізуючого випромінювання, їх біологічна дія визначається лише потужністю дози, котра у разі радіоактивного забруднення може бути істотно вищою, ніж та, що зумовлена природною радіоактивністю.

Природна радіоактивність є споконвічною характеристикою будь-яких об'єктів до-

вкілля, відображаючи особливості біогеохімічних процесів міграції радіоактивних ізоотопів (Гродзинский, 1965; Перцов, 1967).

Радіоактивне забруднення довкілля є неприродною подією, біологічні наслідки якої можуть бути істотними, коли дозове навантаження на живі організми досягне високих значень (Eisebud et al., 1987).

Можлива роль природного радіоактивного фону у процесах життєдіяльності біологічних систем

Ідея необхідності природного фону іонізуючого випромінювання для процесів життєдіяльності організмів має довгу історію, яка розпочалася ще на початку минулого століття. Проте чисельні експериментальні спроби кількісно оцінити значення природного радіоактивного фону для живих істот стикаються з великими труднощами. Дійсно, навіть створення умов утримання організмів, котрі можна було б назвати контролем, є далеко не простою справою, оскільки при цьому доводиться вирішувати принаймні дві проблеми: повністю позбутися природного радіоактивного фону, а також використовувати у поживному середовищі калій, позбавлений радіоактивного ізоотопу ^{40}K . Першу проблему вирішують у такий спосіб, що з метою послабити можливий вплив космічних променів експерименти здійснюють у глибоких шахтах у породах з дуже низьким вмістом радіоактивних речовин. Для вирішення другої проблеми доводиться отримувати калій без природного радіоактивного ізоотопу ^{40}K , що вимагає дуже великих коштів. Тож, і відповідних експериментів було проведено дуже мало, і висновки щодо біологічної дії природної радіоактивності часто-густо робилися на підставі теоретичних розмірковувань.

Слід розглядати два аспекти цієї проблеми. По-перше, природна радіоактивність як мутагенний чинник може відігравати роль в еволюції видів. По-друге, іонізуюче випромінювання може брати участь безпосередньо у процесах життєдіяльності організмів. В основі останнього припущення той факт, що у давні часи біохімічної еволюції рівень радіоактивності був значно вищим, ніж тепер, отже радіоактивні промені становили помітну частку енергетики середовища.

Природна радіоактивність як фактор еволюції. З огляду на те, що зазвичай ізоотоп ^{40}K є основним джерелом опромінення клітин іонізуючою радіацією, Мур і Састрі (Moore,

Sastry, 1982) припустили, що цей внутріклітинний ізотоп мав відгравати істотну роль в еволюції як мутагенний чинник. При цьому основну роль у формуванні дози відіграють електрони Оже і Костер-Кроніга, утворення яких супроводжує електронне захоплення при розпаді ^{40}K . Очікуване число розпаду електронного захоплення у клітині за добу є вкрай незначним ($3 \cdot 10^{-10}$) (Gevertz et al., 1985). Проте кількість клітин у популяціях може виявитися набагато більшою, ніж 10^{10} , що потрібно мати на увазі. Поза тим, крім ^{40}K на клітини діє іонізуюче випромінювання важких радіоактивних елементів. Отож, є підстави припускати, що частота мутаційних змін може виявитися такою величиною, яка може відгравати певну роль в еволюційному процесі. Припущення про можливий зв'язок між природною радіоактивністю і походженням видів ще у 1928 році було висловлено Олсоном і Льюїсом у журналі «Nature» (Olson, Lewis, 1928).

Рівень природної радіоактивності у часи біохімічної доклітинної еволюції був помітно вищим, ніж нині, і тому іонізуюче випромінювання було, безсумнівно, доволі потужним чинником, що міг брати участь в утворенні первинних органічних речовин. Синтез низькомолекулярних органічних сполук у газах первинної атмосфери, полімеризація мономерів, що призводить до утворення білковоподібних молекул, як і інші результати радіохімічних процесів, сформували основу подальшої еволюції життя на Землі. Зазначені радіохімічні реакції було відтворено у штучних умовах.

У подальшому, коли розпочався етап клітинної еволюції, наявність постійного поля іонізуючого випромінювання, зумовлена природною радіоактивністю середовища, також могла відгравати роль в індукції мінливості первинних форм життя. Справді, рівень мінливості у потомстві будь-яких видів залежить від дії мутагенних чинників, і природний радіоактивний фон, безперечно, є одним із можливих факторів генетичної мінливості від початку еволюції видів в історії Землі. На користь такого припущення свідчить те, що відомі центри походження видів розташовані не тільки там, де має місце географічна ізоляція, але й підвищений рівень природної радіоактивності.

Головні механізми впливу природної радіоактивності на еволюцію видів можуть полягати у збільшенні частоти рекомбінаційних явищ у генетичних структурах клітин, збільшенні норми помилкової репарації і радіаційній

індукції нестійкості геному. У статті Бабкока і Коллінса (Babcock, Collins, 1929) підкреслювалось, що природне іонізуюче випромінювання Землі відіграє важливу роль в еволюції.

Видоутворення, як правило, – дуже повільний процес. Багато поколінь минає перш, ніж корисна мутація, з появи якої розпочалася мікроеволюція, зможе опанувати видову популяцію. Тому немає можливості в прямому експерименті довести участь природної радіоактивності у видоутворенні. Разом з тим, дані геологічних явищ, ймовірно, проливають певне світло на можливу роль природної радіоактивності в еволюції видів. Так, у працях російського вченого Неручева містяться свідчення існування прямого зв'язку між радіоактивністю земної кори і еволюцією живого світу. У геологічному минулому Землі були періоди, коли рівень природної радіоактивності у земній корі зростав у багато разів унаслідок геофізичних і геохімічних процесів, котрі супроводжувалися зростанням кількості урану в світовому океані і поверхнях континенту (Неручев, 2007). Збільшення концентрації урану в земній корі досягало тисячі разів. Тривалість таких радіоактивних періодів варіювала в межах мільйонів років.

Палеонтологічні дослідження різних стратиграфічних груп виявляють існування прямої кореляції між рівнем радіоактивності у доквітлі та інтенсивністю процесів видоутворення. Геологічні періоди інтенсивного накопичення урану в поверхневих шарах земної кори збігалися із швидкими змінами флори і фауни. Неручев (Неручев, 2007) наводить приклади виразної модифікації у флорі і фауні протягом періодів високої природної радіоактивності середовища. Так, серйозні зміни у водоростей мали місце між нижнім і середнім кембрієм. Багато нових таксонів губок і bryozoans з'явилося у пізній Юрі, коли радіоактивність у земній корі була дуже високою. Перші хребетні тварини з'явилися у радіоактивній частині раннього Ордовіку. Перші земні чотириногі тварини виявилися у радіоактивній епосі пізнього Девону. Отже, за появою нових таксонів протягом періодів підвищеної радіоактивності земної кори є привід пов'язувати природну радіоактивність з явищами мікро- і макроеволюції. З обґрунтованістю цього твердження збігається і наступний факт.

М.І. Вавілов (Вавілов, 1926; Vavilov, 1992) виявив центри походження культурних рослин. Вони розташовані у тих регіонах Землі, де процеси еволюції видів рослин характери-

зуються високою інтенсивністю. Дослідження радіоактивності ґрунтів показали, що центри походження культурних рослин Вавілова розміщуються у місцях залягання уранових покладів. Таким чином, палеонтологічні дані, як і особливості розташування центрів видоутворення рослин у Голоценові, можуть розглядатися як свідчення причетності природної радіоактивності до мікро- і макроеволюційних процесів.

Дуже важливим аспектом проблеми дії іонізуючого випромінювання на живі об'єкти є вирішення питання про те, чи існує поріг дози у біологічній дії цієї радіації. Хоча до останнього часу це питання дискутується, все ж є переконливі підстави вважати, що такого порогу існувати не може. Справді, сама фізична суть влучення, передачі енергії випромінювання ультраструктурам клітини та зумовлені цим влученням первинні ефекти не залежать від значення дози. Поза тим, репарація ДНК від радіаційних пошкоджень далеко не завжди відбувається у повному обсязі, оскільки частково здійснюється так звана помилкова репарація, котра є генетично регульованим процесом, завдяки якому забезпечується мінливість виду. До того ж, біологічні ефекти іонізуючого випромінювання не обмежуються тією клітиною, яка зазнала влучення іонізуючої радіації, але завдяки ефекту свідка охоплюють й інші клітини (Prise et al., 2003). Цей ефект свідка у популяції клітин виявляється у разі саме низьких доз опромінення, і це має певний вплив на формування радіобіологічних ефектів (Kadhim et al., 2004).

Отже, вплив малих доз іонізуючих випромінювань на живі організми опосередковується помилковою репарацією і проявом ефекту свідка, які, певно, виявляються як на фенотипному, так і на генетичному рівнях. Справді, виявлено чітку залежність між відповідними біологічними ефектами і рівнем природної радіоактивності у регіонах, які характеризуються високими концентраціями урану або торію.

Соматичні ефекти природної радіоактивності. Безпосереднє використання енергії природної радіоактивності в автотрофних процесах рослин є малоімовірним, оскільки зазвичай кількість цієї енергії, котра передається у формі збуджених станів молекул та вільних радикалів, вкрай незначна. Проте, деякі вчені вважають, що природна радіоактивність може забезпечувати життєдіяльність мікроорганізмів, котрі мешкають у глибоких шарах світового океану. Як відомо, істотна частка біомаси на Землі утворюється мікроорганізмами, зокрема у

морських екосистемах. Бактеріальне життя виявляють до 400 метрів нижче від поверхні моря, де немає достатньої кількості органічних сполук як енергетичного ресурсу для життєвих процесів. Йоргенсен і Д'Хондт (Jorgensen, D'Hondt, 2006) вважають, що мікроорганізми у глибоких шарах океану виживають завдяки використанню енергії природної радіоактивності. Проте, певно, й інші джерела енергії можуть використовуватися мікроорганізмами в афотичних зонах світового океану.

Жодні ефекти не спостерігалися в експериментах із заміною калію звичайного природного ізотопного складу на калій, який не містив радіоактивного ізотопу ^{40}K (Виноградов и др., 1957; Vinogradov, 1957). У цих експериментах використовували гриб *Aspergillus niger*, і жодного обмеження приросту біомаси грибів в культурі при поживному середовищі без радіоактивного ізотопу калію не було виявлено так само, як не спостерігалось будь-якого впливу заміни природного калію на калій, збіднений на вміст ^{40}K , у перфузійному розчині на діяльність серцевого м'яза. В експериментах, проведених Гевертцом (Gevertz et al., 1985), було показано, що вилучення 20-30% притаманного нормі природного опромінення не мало доказового ефекту на спонтанний вихід мутацій у декількох репродукціях бактерій.

Проте, наявність впливу зменшеної інтенсивності природного радіоактивного фону була продемонстрована на Протіших у *Paramecium caudatum* і *Paramecium aurella*. У відповідних експериментах камери з низьким фоном (їх стінки були товщиною 10 см) розміщували у шахтах соляних родовищ на глибині 200 м. Дані, отримані у цих експериментах, свідчать про те, що зменшення фону природної радіоактивності спричиняло негативний вплив на життєздатність парамецій (Planel et al., 1969; Planel et al., 1987). Однак цей вплив не досягав повної інактивації клітин популяції.

Вочевидь проблема ролі природного радіоактивного фону в життєдіяльності організмів потребує подальших досліджень. Цю проблему всебічно аналізував О.М. Кузін (Кузін, 1991; 1995). Він дійшов висновку, що природний радіоактивний фон є невід'ємною частиною будь-якого природного середовища і є необхідним для нормального існування живих організмів.

О.М. Кузін був переконаним у тому, що механізм біологічної дії дуже низьких доз іонізуючого випромінювання пов'язаний з утво-

ренням унаслідок поглинання відповідних квантів енергії тривало існуючих екситонів, названих поляритонами. Деградація останніх супроводжується випромінюванням низької інтенсивності, котре нагадує мітогенетичні промені, ідентифіковані свого часу А. Гурвичем (Gurvitsch, 1932). Це випромінювання, яке отримало назву променів Гурвича і відповідає області синьо-ультрафіолетового світла, стимулює поділ клітин і відповідне зростання чисельності клітинної популяції у прокариот і еукариот.

Випромінювання, котре з'являється при розпаді поляритонів, виникнення яких спричинене впливом природного радіоактивного фону, О.М. Кузін назвав вторинним біогенним випромінюванням (Кузін, 1997).

Енергія, абсорбована живими клітинами від природного радіоактивного фону, дуже низька й тому, як уже зазначалось, малоімовірно, що можливі ефекти радіоактивного фону у життєдіяльності доповнюють енергетичний ресурс автотрофних реакцій, швидше його дія опосередковується через інформаційні процеси.

Біологічні ефекти радіоактивного забруднення довкілля на прикладі віддалених наслідків Чорнобильської катастрофи

Дослідження радіобіологічних наслідків радіоактивного забруднення дає дуже цінну інформацію про вплив малих доз постійно діючого опромінення живих істот іонізуючою радіацією в нелетальних дозах. Ці дослідження уможливають вирішення принаймні таких питань, як ступінь небезпеки від підвищеного рівня опромінення для людини й інших об'єктів біоти та можливі механізми дії хронічного опромінення. Відтак можна знайти й нові підходи у пошуках відповіді на те, яку функцію в життєдіяльності організмів відіграє природна радіоактивність.

Головні радіоекологічні наслідки забруднення радіонуклідами довкілля, зумовлені аварією 1986 року на Чорнобильській атомній електростанції, такі:

1. У результаті аварійної розгерметизації зруйнованого реактора в атмосферу була викинута дуже велика кількість високоактивних продуктів поділу урану, яка далі потрапила в екосистеми величезної території. Радіонукліди перебувають у постійній міграції в екосистемах, унаслідок чого все живе – віруси, мікроорганізми, гриби, рослини і тварини, а також людина зазнають додаткового опромінення.

2. Радіонукліди потрапляють у трофічні ланцюги, надходять у рослини і, відповідно, у рослину і тваринну продукцію та в організм людини. Всі матеріали, які оточують людину, також стають радіоактивними, що є причиною зовнішнього опромінення. Для прикладу наведемо такі дані: радіоактивність листя дерев на центральних вулицях Києва у 1987 році через радіонуклідне забруднення варіювала в межах від 70 до 4000 кБк/кг (Чорнобильська ..., 1997).

3. З часом радіонукліди зазнають перерозподілу серед об'єктів екосистем. Цей процес супроводжується відповідним формуванням дозових навантажень на людей і різні об'єкти біоти. Зумовлене радіоактивним забрудненням опромінення людини складається з трьох компонентів: зовнішнього опромінення від радіоактивних матеріалів оточуючих предметів, внутрішнього опромінення, яке спричиняється депонованими у тканинах радіонуклідами, та інгаляційного опромінення, пов'язаного з потраплянням у легені радіозолів.

4. Надлишок дози опромінення над природним фоном спричинює маніфестацію різних хвороб у людей і погіршення стану флори і фауни на територіях, сильно забруднених радіонуклідами (Grodzinsky, 1995; 2004).

Епідеміологічні дані свідчать про те, що рівень захворюваності за різними класами хвороб у постраждалих унаслідок аварії на ЧАЕС вищий, ніж у середньому по Україні, і має виразну тенденцію до зростання з часом.

На початковій стадії аварії були встановлені наступні синдроми:

1. Цитопенія і лейкоцитопенія;
2. Астенічний вегетативний синдром;
3. Мікроциркуляторна дистонія;
4. Синдром ларингіту;
5. Пошкодження слизової оболонки і шкіри внаслідок опромінення бета-частинками (цей ефект був названий "Бета-опіком").

З роками після аварії виявилася широка різноманітність нозологічних форм захворювань. Це свідчить про те, що додаткове опромінення, спричинене радіонуклідним забрудненням довкілля, причетне до зростання захворюваності людей.

Значення відносних ризиків для багатьох хвороб з часом зростає. Це стосується не лише пухлинних, але й не пухлинних хвороб, зокрема цереброваскулярних захворювань, ішемії,

РАДІОАКТИВНІ ІЗОТОПИ І ЖИТТЯ

гіпертонії, ризик яких істотно зростав на територіях, забруднених радіацією.

Захворюваність людей, які брали участь у ліквідації наслідків аварії набагато вища, ніж у середньому по Україні. Особливо збільшилася частота захворювань на рак щитоподібної залози у дітей. Причиною цього є накопичення радіоактивного ізотопу ^{131}I у цій ендокринній залозі. Відразу після аварії на ЧАЕС радіоактивний йод поширився на великі території. Останнім часом спостерігається зростання частоти гострої лімфобластної лейкемії.

Цитогенетичний контроль виявляє істотні порушення клітинних процесів у людини, яка зазнає додаткового опромінення. Спостерігається зростання ембріональної смертності, частоти появи аномальних і поліплоїдних клітин, мікроядер, хромосомних аномалій тощо. Ці клітинні ефекти лежать в основі формування віддалених ефектів опромінення. Ми досліджували формування таких ефектів на рослинах протягом 23 років після аварії на ЧАЕС.

Вплив радіонуклідного забруднення на рослини. Дозові навантаження на рослини, як і природа цього навантаження після аварії на ЧАЕС, були неоднаковими у різні періоди після появи радіонуклідів в екосистемах. Зазначені періоди виділяють наступним чином.

Перший період тривав від 26 квітня до середини травня 1986 року. Основними джерелами опромінення були короткоживучі радіонукліди, котрі випали на поверхню ґрунтів і листя рослин, а також містилися у радіоактивних хмарах. Радіонукліди потрапили на поверхню листя, бруньок рослин, на відкритий ґрунт, поверхню водних басейнів. Значна частка радіонуклідів перебувала у складі так званих «гарячих частинок», хоча вони були представлені різними фізико-хімічними формами (оксиди, карбіді, іони). Компоненти опромінення рослин протягом першого періоду склалися із зовнішнього опромінення від радіонуклідів, поширених у зовнішньому середовищі, а також з опромінення, зумовленого радіоактивними матеріалами, адсорбованими на зовнішніх клітинних шарах органів рослин (аплікаційне опромінення). Зовнішнє опромінення значною мірою було пов'язане з гамма радіацією, аплікаційне – з різними типами випромінювання: бета-, альфа-частинками і гамма променями. Клітини і тканини рослин засвоїли деяку активність розчинних форм радіонуклідів (Гродзинский и др., 1991), й тому частково доза, отримана рослинними тканинами, була спричинена і внутрішнім

опроміненням. Поглинута доза для критичних органів рослин, наприклад, для апікальних стеблових меристем злаків, що росли за умов радіонуклідного забруднення, варіювала у межах 1,33-12 Гр при поверхневій щільності забруднення від 1,18 до 8,4 (108 Бк/м²).

Другий період після середини травня 1986 року був пов'язаний з випромінюванням від триваложивучих радіонуклідів і короткоживучих радіонуклідів, котрі до того часу не встигли зазнати повного розпаду. Головними складовими дози у цьому періоді були зовнішнє, аплікаційне і дещо збільшене порівняно з першим періодом внутрішнє опромінення, зумовлене зростаючими концентраціями радіонуклідів, депонованих рослинами.

Нарешті, третій період характеризується зростанням частки внутрішнього опромінення, зумовленого нагромадженням у тканинах рослин довгоживучих радіонуклідів, котрі шляхом поглинання коренями надходять з ґрунту в рослини.

В цілому, значення поглинутих доз для рослин варіюють у дуже широких межах. Вони залежать як від вмісту радіоактивних речовин у ґрунтах, так і від властивостей видів рослин, котрі відрізняються за здатністю нагромаджувати ті або інші радіонукліди. З часом провідного значення як дозоутворювачі набули ^{137}Cs і ^{90}Sr .

Територія навколо Чорнобильської АЕС, особливо 10-кілометрова зона, характеризується дуже високими значеннями доз опромінення біоти. Хвойні дерева, що зростали у деяких місцях цієї території, загинули невдовзі після аварії. Цей загиблий ліс набув такого кольору, що його було названо «Червоним Лісом». Летальна доза для хвойних дерев становить 80-100 Гр (Козубов, Таскаев, 2002). Знання цієї величини дає можливість оцінки доз у Зоні Відчуження Чорнобильської АЕС. Проте, загибель рослин спостерігалася лише на окремих територіях, де поверхнєве забруднення радіонуклідами сягало крайніх значень. Рівні потужності доз хронічного опромінення на решті забрудненої території варіювали у межах від сублетальних до близьких до рівня природного фону. Дослідження радіобіологічних реакцій рослин, котрі протягом кількох поколінь зазнають впливу хронічного опромінення у таких різних дозах, дало змогу отримати важливі дані для розкриття механізмів формування віддалених наслідків опромінення та для прогнозу очікува-

них ефектів у людей та інших об'єктів біоти і у біоценозах в цілому.

На території значного радіонуклідного забруднення спостерігаються різні типи реакцій рослин на хронічне опромінення. Серед них – загибель апікальних меристем, яка супроводжується зняттям апікального домінування й зростанням галузження рослин, цитогенетичні ефекти у вигляді формування хромосомних аберацій, поява різних морфологічних аномалій. Типи і частоти прояву цих реакцій залежать від доз опромінення та від виду рослин (Grodzinsky, 2006).

Зазначимо, що відносна біологічна ефективність хронічного опромінення, як свідчать дані експериментів, в яких порівнювали прояв ефектів гострої і хронічної дії радіації на різні рослинні системи, може бути значно вищою, ніж у разі гострого опромінення. Це стосується насамперед цитогенетичних ефектів.

Генетичний ефект хронічного опромінення було показано в експериментах з використанням мутантів деяких видів рослин за частотами появи відповідних ревертантів. Доведено також, що існує різниця в інтенсивності прояву реакцій рослин на внутрішнє і зовнішнє опромінення. Ефективність внутрішнього опромінення вища порівняно із зовнішнім опроміненням. Це було продемонстровано в експериментах з пилком ячменю (Grodzinsky, 1995).

Неспівпадання біологічної ефективності внутрішнього і зовнішнього опромінення може бути зумовлене двома причинами. З одного боку, відносна біологічна ефективність внутрішнього опромінення залежить від особливостей мікродозиметричного поля, котре визначається внутрішньоклітинним і внутрішньотканинним розподілом депонованих радіонуклідів, і, з другого боку, малі потужності доз хронічного опромінення можуть сприйматися не тільки як безпосередні наслідки молекулярних пошкоджень, а і як опосередкований цими пошкодженнями сигнал тривоги. Нами отримані експериментальні підтвердження справедливості цього припущення: у відповідь на хронічне опромінення у рослинах відбуваються процеси адаптації до дії іонізуючої радіації. Отже, цей чинник спричиняє активну відповідь рослини. При цьому існують дві адаптивні стратегії, а саме, онтогенетична або фізіологічна і популяційна або філогенетична адаптації. Перша знаходить свій прояв у радіоадаптації, при якій після опромінення рослини у малій дозі радіостійкість до наступних опромінювань зростає.

Другий тип адаптивної стратегії полягає у зростанні мінливості, завдяки чому збільшуються можливості для активного природного відбору форм, що відрізняються підвищеною генетично детермінованою радіостійкістю.

Механізм онтогенетичної адаптації полягає у синтезі додаткових ферментів репарації ДНК та інших компонентів, котрі забезпечують радіостійкість (наприклад, збільшення концентрації антиоксидантів тощо).

Ймовірно, онтогенетична адаптивна стратегія діє як спосіб забезпечення надійності організму в природних умовах, котрі зазнають істотних коливань за окремими параметрами. Розширення генетичної мінливості у рослин у поколіннях досягається шляхом кількох індукованих опроміненням процесів, насамперед, підвищенням геномної нестабільності. Певно, за дії хронічного опромінення у рослин перш за все знаходять прояв саме наслідки реалізації адаптивних стратегій, серед яких важливими є ефекти, що відображають збільшення мінливості.

У рослин, що зростають на територіях, забруднених радіонуклідами, особливо виразно простежуються морфологічні аномалії. Виокремлюються два типи таких аномалій. По-перше, це нерегулярні радіоморфози – потворні органи з неупорядкованою організацією тканин. Виникають ці радіоморфози внаслідок втрати здатності до властивої нормі росту органів через появу стохастично розподілених у твірних тканинах клітин, які не спроможні зазнавати планові поділи. По-друге, це – регулярні морфози, які характеризуються різкими відхиленнями за розмірами чи формою від норми, але зберігають регулярність структури. Поява таких радіоморфозів зумовлена втратою здатності меристемних клітин розпізнавати позиційну інформацію або ж змінами програми морфогенезу.

Регулярні радіоморфози особливо часто зустрічалися як у деревних, так і у трав'янистих рослин на забруднених радіонуклідами територіях у перші роки після аварії на ЧАЕС. При цьому від ступеня забруднення залежала частота прояву регулярних морфозів, а не характер морфологічних змін (Чорнобиль ..., 2001). Наприклад, збільшення довжини голок у ялини при гігантизмі було однаковим у всіх голок на окремих гілочках дерева незалежно від дози опромінення, але частота трапляння цих морфологічних аномалій у дерев на більш забруднених радіонуклідами територіях була вищою,

РАДІОАКТИВНІ ІЗОТОПИ І ЖИТТЯ

Таблиця 1. Типові морфологічні аномалії у рослин на забруднених радіонуклідами територіях

Тип морфологічних аномалій	Причини утворення морфологічних аномалій
Нерегулярний радіоморфоз	Проліферативна загибель клітин, стохастично розподілених у меристемі
Гігантизм листкової пластинки і голок	Зміна позиційного контролю в меристемі
Карликовість листкової пластинки і голок	Зміни позиційного контролю в меристемі
Багатоверхівковість	Пригніченість апікального домінування у стебловому апексі
Утворення позапланових апікальних і латеральних бруньок	Послаблення апікального домінування і зміна позиційної інформації у вторинних меристемах
Утворення адитивних позапланових голок на гілках хвойних дерев	Втрата позиційного контролю в катафілах
Втрата геотропічної орієнтації гілок	Порушення полярності органів і механізму сприйняття гравітаційного впливу
Надлишкове галуження	Послаблення корелятивних зв'язків у морфогенезі

Таблиця 2. Утворення хлорофільних мутацій albina у рослин жита і ячменю при їх вирощуванні на ґрунті 30 кілометрової зони ЧАЕС* (Grodzinsky, 1995)

Рослина	Контроль	Роки			
		1986	1987	1988	1989
Жито, сорт Київський-80	0,01	0,14	0,40	0,91	0,71
Жито, сорт Харків-03	0,02	0,80	0,99	1,20	1,14
Ячмінь, сорт Ні-2	0,35	0,81	0,63	0,70	0,71

Примітка. * Активність ґрунту, зумовлена ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{144}Ce , ^{106}Ru та іншими радіонуклідами, становила 180 кБк/кг. Дані отримані О.Д. Коломієць.

ніж при менших дозових навантаженнях. Така особливість прояву регулярних радіоморфоз дає підстави віднести їх до стохастичних ефектів опромінення.

Вочевидь на територіях, забруднених радіонуклідами, послаблюється прояв апікального домінування, що виявляється у збільшенні ступеня галуження у багатьох видів рослин, деякі з них набувають відмінного від норми габітусу.

В окремих видів рослин, зокрема у ялин, спостерігалася втрата здатності адекватно реагувати на силу тяжіння. У цьому разі мають місце відхилення росту верхівок і плагітропних гілок від нормального напрямку.

Зазначені вище морфологічні аномалії у рослин узагальнені в табл. 1.

Також у рослин, що зростали за умов радіонуклідного забруднення ґрунту, спостерігалися зміни фізіологічних і біохімічних процесів.

Мутагенний вплив радіонуклідних забруднень середовища на рослини. Розглядають два типи реакцій живого організму на дію як гострого, так і хронічного опромінення – детерміновані і стохастичні. Ступінь прояву детермінованих ефектів залежить від поглинутої дози опромінення. Стохастичні ефекти мають ймовірнісну природу, і, відповідно, або виявляються повною мірою, або зовсім не знаходять прояву. Як вже зазначалося вище, радіобіологічні ефекти, зокрема й цитогенетичні, не мають порогу дії.

Було отримано багато даних щодо мутагенної дії радіонуклідного забруднення довкілля на рослини. Так, виявлено зростання частоти появи хлорофільних мутацій у рослин на забруднених радіонуклідами територіях. У деяких складноцвітих рослин утворення хлорофільних мутацій мало масовий характер. У табл. 2 показано, як зростала кількість мутантів типу albina у жита і ячменю, які вирощували на ґрунті поблизу Чорнобильської АЕС.

Таблиця 3. Цитогенетичні пошкодження клітин апікальних меристем коренів цибулі (*Allium cepa* L.), зростаючої на забрудненому радіонуклідами ґрунті*

Питома радіоактивність ґрунту, кБк/кг	Кількість досліджених клітин	Мітотичний індекс, %	Кількість аберантних клітин, %	Кількість клітин з мікроядрами, %	Кількість деградованих клітин, %
Контроль	15005	4.1	100	100	100
37	33275	4.4	240	171	250
185	29290	4.4	216	129	500
370	23325	1.17	150	229	900

Примітка. * Дані отримані О.А. Кравець.

Таблиця 4. Частота появи клітин різної плоідності у пилку *Arabidopsis thaliana* під впливом хронічного опромінення (перша вегетація), %*

Плоідність клітин	Контроль	Доза, Гр	
		0,5	5
Диплоїдні клітини	91	77	65
Тетраплоїдні клітини	1	9	15
Химерна тканина	8	14	20

Примітка. * Дані отримані О.А. Кравець.

Під впливом хронічного опромінення, як правило, зростає кількість клітин з аберациями, мікроядрами, а також збільшується частота деградованих клітин, що показано у табл. 3.

Явище поліплоїдизації клітин є також типовим для дії іонізуючих випромінювань від радіонуклідного забруднення. Дані, котрі ілюструють цей ефект хронічного опромінення, наведено у табл. 4.

У багатьох видів рослин (*Hieracium murorum*, *Hieracium umbellatum*, *Rubus idaeus*, *Rubus caesius* та інших), які зростають у природних умовах на забруднених радіонуклідами територіях, виявлялися пухлини у формі бактеріального раку, що свідчить про втрату рослинами імунітету до агробактерії. Пухлини у *Sonchus arvensis*, вирощеному на забрудненому радіонуклідами ґрунті, були виявлені у 80% рослин (Чорнобильська ..., 1997).

На культурах тканин ряду рослин було показано, що за впливу хронічного опромінення істотно зменшувалася здатність до організованого морфогенезу, що свідчить про значні порушення у системі позиційного контролю програми розвитку рослин (Коноплева и др., 1993; Konoplyova et al., 1993).

Детальні генетичні дослідження були здійснені на популяціях деяких видів рослин на так званому Східному Уральському Радіоактивному Сліді, який утворився внаслідок потужної аварії, що сталася ще у 1957 році на сховищі радіоактивних відходів (Позолотина и др. 2008). У цих дослідженнях виявлено зростання мінливості рослин під впливом хронічного опромінення, яке на цих територіях триває уже 50 років.

Радіаційна індукція нестійкості геному у рослин. Нестійкість геному полягає у зростанні частот його змін внаслідок спонтанного утворення хромосомних аберацій, мікроядер, а також мутацій. Радіаційна індукція нестійкості геному в останні роки досліджена багатьма радіобіологами і, відповідно, відображена у науковій літературі (Kadhim et al., 2004).

Радіаційно індуквану нестійкість хромосом ми спостерігали у різних видів рослин, котрі після вирощування на радіоактивно забрудненому ґрунті пересажували на «чисті» ґрунти. Як виявилось, підвищені значення частот утворення хромосомних аберацій зберігалися у ряді поколінь (Grodzinsky, 2004). Дані, отримані у одному з таких експериментів, наведено у табл. 5.

Таблиця 5. Кількість клітин з хромосомними абераціями в апікальних меристемах різних видів рослин, котрі зазнавали хронічного опромінення, %*

Види рослин	Контроль	Роки спостережень			
		1986	1987	1988	1989
Люпин (<i>Lupinus alba</i>)	0,9	19,4	20,9	14,0	15,9
Горох (<i>Pisum sativum</i>)	0,2	12,9	14,1	9,1	7,9
Жито (<i>Secale cereale</i>)	0,7	14,9	18,7	17,1	17,4
Пшениця (<i>Triticum aestivum</i>)	0,9	16,7	19,3	17,7	14,2
Ячмінь (<i>Hordeum vulgare</i>)	0,8	9,9	11,7	14,5	9,8

Нестійкість геному, викликана хронічним опроміненням у низьких дозах, протягом більше 20 років спостерігалася у зібраній нами колекції чорнобильських мутантів озимої пшениці (Гродзинський та ін., 1999). Для створення цієї колекції генетично змінені форми пшениці були відібрані на полях, розташованих поблизу аварійного блоку ЧАЕС після дозрівання рослин у 1987 році. Поля озимої пшениці, де збирали змінені форми кількох сортів, зазнали дуже сильного забруднення радіоактивними речовинами. У 1986 році рослини пшениці отримали високі дози зовнішнього і аплікаційного опромінення, а наступного року вони зазнали і внутрішнього опромінення за рахунок засвоєваних радіонуклідів. У другому поколінні пшениці у 1987 році було виявлено до 80% морфологічно змінених форм. Хоча колекція, названа колекцією чорнобильських мутантів, підтримується у місцевості, яка не має надлишкової радіоактивності у ґрунті, високі темпи спонтанної мінливості зберігаються і дотепер. Мінливість морфологічних характеристик рослин дуже широка: це і висота стебла, і тип та розмір колоса, остистість, ранньо- або пізньостиглість, якість клейковини та інші морфологічні, фізіологічні та біохімічні властивості. Мінливість мутантів у колекції вкрай інтенсивна і непередбачувана, що є яскравим прикладом індукованої опроміненням нестійкості геному (Гродзинський та ін., 1999).

Індукована опроміненням нестійкість геному визначається певним механізмом, в якому беруть участь білки, пов'язані також з продуктами гена p53 (Kadhim et al., 2004).

Деякі білки, причетні до репарації ДНК, відіграють певну роль у захисті теломір (Boubriak et al., 2008). Клітини, що мають мутаційні зміни у кодуючих репараційні процеси генах, набувають ряду форм геномної нестабільності. При появі дwonиткових розривів ДНК не захищені теломірами кінці хромосом можуть зазнавати зшивки з фрагментами хромосом, що

призводить до формувань відповідних структурних перебудов генетичного апарату. Крім того, епігенетичні зміни геному, котрі здійснюються завдяки метилуванню цитозинів у молекулі ДНК, а також метилування, ацетилювання і фосфорилування гістонів, можливо, призводять до появи фенотипів з нестійким геномом (Kadhim et al., 2004).

Радіобіологічні відповіді рослини на хронічне опромінення спостерігаються на різних рівнях організації. Індуковані опроміненням генетичні ефекти можуть виявитися небезпечними як для окремих індивідуумів, так і для популяції. Внаслідок нестійкості геному спостерігаються такі явища, як позаплановий апоптоз, розширення спектра фенотипу, зростання частот мітотичних кросинговерів тощо.

Радіобіологічні ефекти, які були досліджені у рослин на забруднених радіоактивними речовинами територіях, характерні не лише для рослинного світу, а й спостерігаються у представників інших царств живої природи.

Висновки

Природний фон радіоактивних випромінювань, який є невід'ємним компонентом зовнішнього середовища протягом усього періоду еволюції життя на Землі, сприймається видами як потрібний для еволюції чинник. Не виключено, що дуже малі дози опромінення, зумовлені калієм і важкими радіоактивними елементами сприймаються як фактор сигнальної природи. Про те, що природна радіоактивність у минулому відіграла у біологічних процесах більш значну роль, ніж у четвертинний період, свідчать дані, згідно з якими більш давні за походженням таксони рослин порівняно з молодими таксонами нагромаджують природні радіоактивні елементи у значно вищих концентраціях.

Проте, пристосованість організмів до малих потужностей доз іонізуючого випромінювання обмежується дуже вузьким інтервалом

доз опромінення. У зв'язку з цим підвищення рівня опромінення живих організмів, зумовлене появою в середовищі техногенних радіонуклідів, здебільшого спричиняє негативний вплив на види і їх популяції. Чи не найбільш небезпечним для біологічних об'єктів є зростання мінливості як прояв стратегії популяційної адаптації. Таке зростання мінливості характеризується спряженістю з такими змінами у структурі геному, які призводять до збільшення частот трансформації клітин, підвищення ризиків захворювання у людей, втрати домінантності в окремих видах, що може супроводжуватися змінами структури популяцій і угруповань.

Є підстави вважати, що підвищення радіоактивності середовища порушує гомеостаз процесів мікроevolюції, що може становити істотну небезпеку для людини і біоти в цілому. Ця небезпека реалізується через багато років, а тому наразі може й не оцінюватися з належною увагою. Проте наслідки відхилення від усталеного гомеостазу видоутворення можуть супроводжуватися проявами зовсім несподіваних віддалених ефектів «зайвого» опромінення, наприклад, виникненням нових форм вірусів, грибних патогенів тощо, не кажучи вже про збільшення частот канцерогенезу.

Відтак, подальші дослідження віддалених ефектів опромінення на територіях, котрі зазнали радіоактивного забруднення, є вкрай актуальними й мають проводитися у широкому колі аспектів від молекулярно-генетичних до популяційних і ценотичних явищ.

ЛІТЕРАТУРА

- Вавилов Н.И.* Исследования происхождения культурных растений // Бюлл. прикл. ботаники и растениеводства. – 1926. – Т. 16, № 2. – С. 1-248.
- Виноградов А.П., Ковальский В.В.* Биологические эффекты радиоактивности К-40 у животных // Докл. АН СССР. – 1957. – Т. 113. – С. 315-318.
- Гродзинский Д.М.* Естественная радиоактивность растений и почв. – Киев: Наукова думка, 1965. – 216 с.
- Гродзинський Д.М., Коломісць О.Д., Бурденюк Л.А.* Колекція чорнобильських мутантів озимої пшениці (Чорнобиль – Київ – Біла Церква, 1986–1999). – Київ, 1999. – 30 с.
- Гродзинский Д.М., Коломиец К.Д., Кутлахмедов Ю.А. и др.* Антропогенная аномалия и растения. – Киев: Лыбедь, 1991. – 160 с.
- Козубов Г.М., Таскаев А.И.* Радиобиологические исследования хвойных деревьев на территории Чернобыльской аварии (1986 – 2001). – М., 2002.
- Коноплева А.А., Гродзинский Д.М., Желтоножская Л.В.* Морфогенетический анализ каллусной культуры *Nicotiana tabacum L.* при хроническом облучении растений // Цитология и генетика. – 1993. – Т. 27. – С. 63-67.
- Кузин А.М.* Природный радиоактивный фон и его значение для биосферы Земли. – М.: Наука, 1991. – 116 с.
- Кузин А.М.* Идеи радиационного гормезиса в атомном веке. – М.: Наука, 1995. – 158 с.
- Кузин А.М.* Природная атомная радиация и феномен жизни // Бюлл. экспериментальной биологии и медицины. – 1997. – Т. 123. – С. 313-315.
- Неручев С.Г.* Уран и жизнь в истории Земли (2-е изд.). – СПб, 2007. – 326 с.
- Перцов Л.А.* Природная радиоактивность биосферы. – М.: Атомиздат, 1964. – 315 с.
- Позолотина В.Н., Молчанова И.В., Караваева Е.Н. и др.* Современное состояние наземных экосистем в Восточном Уральском радиоактивном следе: уровни загрязнения и биологические эффекты. – Екатеринбург, 2008.
- Чорнобильська Катастрофа /* Ред. В.Г. Бар'яхтар. – К.: Экспорт України, 1997. – 590 с.
- Чорнобиль. Зона Відчуження /* Ред. В.Г. Бар'яхтар. – К.: Наукова думка, 2001. – 548 с.
- Babcock E.B., Collins J.L.* Natural ionizing radiation and rate mutation // Nature. – 1929. – V. 124. – P. 227-228.
- Boubriak I.I., Grodzinsky D.M., Polischuk V.P. et al.* Adaptation and impairment of DNA repair function in pollen of *Betula verrucosa* and seeds of *Oenothera biennis* from differently radionuclide-contaminated sites of Chernobyl // Ann. Bot. – 2008. – V. 101. – P. 267-276.
- Eisenbud M.* Environmental radioactivity from natural, industrial, and military sources (3rd edition). – N.Y.: Academic Press, 1987. – 475 p.
- Gevertz D., Friedman A.M., Katz J.J., Kubitchek H.E.* Biological effects of background radiation: mutagenicity of ⁴⁰K // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. – 1985. – V. 82. – P. 8602-8605.
- Grodzinsky D.M.* Late effects of chronic irradiation in plants after the Accident at the Chernobyl Nuclear Power Station // Radiat. Protect. Dosimetry. – 1995. – V. 62. – P. 41-43.

РАДІОАКТИВНІ ІЗОТОПИ І ЖИТТЯ

- Grodzinsky D.M. Consequences of the Chernobyl catastrophe as a prototype of nuclear terrorism // Defence and the Environment: Effective Scientific Communication / Eds. K. Mahutova, J.J. Barich III, R.A. Kreizenberg. – Amsterdam, Netherland: Kluwer, 2004. – P. 119-137.
- Gurwitsch A. Die mitogenetische Strahlung, zugleich zweiter Band der "Probleme der Zellteilung". – Berlin: Springer, 1932.
- Jorgensen B.B., D'Hondt S. A starving majority deep beneath the seafloor // Science. – 2006. – V. 314. – P. 932-934.
- Kadhim M.A., Moore S.R., Goodwin E.H. Interrelationships amongst radiation-induced genomic instability, bystander effects, and the adaptive response // Mutat. Res. – 2004. – V. 568. – P. 21-32.
- Konoplyova A.A., Zseltonozskaya L.V., Conger B.V., Grodzinsky D.M. In vitro response of *Dactylis glomerata* leaf segments as affected by growing donor plants in radioactive soil // Environ. Exp. Bot. – 1993. – V. 33. – P. 501-504.
- Moore F.D., Sastry K.S. Intracellular potassium: ^{40}K as a primordial gene irradiator // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. – 1982. – V. 79. – P. 3556-3559.
- Olson A.R., Lewis G.N. Natural radioactivity and the origin of species // Nature. – 1928. – V. 121. – P. 673-674.
- Planel H., Soleilhavoup J.P., Cottin F. et al. Recherches sur l'action biologique de l'irradiation naturelle: etude de la croissance de *Paramecium Aurelia* *Paramecium caudatum* en laboratoire souterrain // Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences, Série D. – 1969. – V. 52. – P. 1697-1700.
- Planel H., Soleilhavoup J.P., Tixador R. et al. Influence on cell proliferation of background radiation or exposure to very low, chronic gamma radiation // Health Physics. – 1987. – V. 52. – P. 571-578.
- Prise K.M., Folkard M., Michael B.D. A review of the bystander effect and its implications for low-dose exposure // Radiat. Protect. Dosimetry. – 2003. – V. 104. – P. 347-355.
- Vavilov N.I. Origin and geography of cultivated plants. – Cambridge (UK): Cambridge University, 1992. – 498 p.
- Vinogradov A.P. Biological role of potassium-40 // Nature. – 1957. – V. 180. – P. 507-508.

Надійшла до редакції
14.05.2010 р.

RADIOACTIVE ISOTOPES AND LIFE

D. M. Grodzinsky

*Institute of Cell Biology and Genetic Engineering
of National Academy of Sciences of Ukraine
(Kyiv, Ukraine)*

During the all evolution of life on the Earth the alive organisms have felt the act of small doses of ionizing radiation caused by the natural radioactive isotopes which in the interspersed state are present at any components of biosphere. At low doses radiation, apparently, cannot play the role of power source for vital processes, but owing to distributions of interaction of ionizing radiation with substances it causes the mutagen influence and performs the certain information function. The sharp increase of radioactivity of native habitat associated with the accidents of nuclear reactors and the test of nuclear weapon, gains in warning character because excess of natural radioactive background is accompanied by the induction of genome instability, the loss by cells of capacity to perceive the positional information, to regulate ontogenetic development and so forth. The investigations of remote effects of irradiation in territories which have felt radioactive pollution, should be conducted at different levels – from molecular-genetic up to population and genetic.

Key words: natural radioactivity, ^{40}K , cytogenetic radiating damages, effect of witness, DNA reparation, postradiating regeneration, Chernobyl accident

ГРОДЗИНСЬКИЙ

РАДИОАКТИВНЫЕ ИЗОТОПЫ И ЖИЗНЬ

Д. М. Гродзинский

*Институт клеточной биологии и генетической инженерии
Национальной академии наук Украины
(Киев, Украина)*

На протяжении всей эволюции жизни на Земле живые организмы испытывали действие малых доз ионизирующего излучения, обусловленного естественными радиоактивными изотопами, которые в рассеянном состоянии присутствуют в любых компонентах биосферы. При низких дозах радиация, по-видимому, не может играть роль энергетического источника для жизненных процессов, но благодаря особенностям взаимодействия ионизирующих излучений с веществами она вызывает мутагенное действие и выполняет определенную информационную функцию. Резкий рост радиоактивности естественной среды, связанный с авариями атомных реакторов и испытанием ядерного оружия, приобретает угрожающий характер в результате того, что превышение фона естественного радиоактивного излучения сопровождается индукцией нестабильности генома, потерей клетками способности воспринимать позиционную информацию, регулировать онтогенетическое развитие и т. п. Исследования отдаленных эффектов облучения на территориях, которые испытали радиоактивное загрязнение, должны проводиться на разных уровнях – от молекулярно-генетического до популяционного и ценотического.

Ключевые слова: *естественная радиоактивность, ^{40}K , цитогенетические радиационные повреждения, эффект свидетеля, репарация ДНК, пострадиационное восстановление, Чернобыльская катастрофа*