

УДК 502.175+504.61+544.541+551.521+574.24+577.346+677.017.67

Д.М. ГРОДЗИНСЬКИЙ<sup>1</sup>, О.Ф. ДЕМБНОВЕЦЬКИЙ<sup>2</sup>,  
О.М. ЛЕВЧУК<sup>1</sup>, Ф.Н. ПАЦЮК<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Президія Національної академії наук України  
вул. Володимирська, 54, Київ, 01601, Україна

<sup>2</sup> Центр досліджень науково-технічного потенціалу та історії науки ім. Г.М. Доброва  
Національної академії наук України  
бульвар Тараса Шевченка, 60, Київ, 01032, Україна

## РАДІОБІОЛОГІЧНІ ТА РАДІОЕКОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ КАТАСТРОФИ ВЧЕНИМИ НАН УКРАЇНИ

---

*За 26 років, що минули з дня аварії на Чорнобильській АЕС, учені НАН України провели численні всебічні дослідження біологічних наслідків радіонуклідного забруднення екосистем, зокрема впливу на біоту хронічного опромінення іонізуючою радіацією, зумовленого радіоактивним розпадом продуктів поділу урану. Встановлено радіобіологічні ефекти на різних рівнях організації біологічних систем від молекулярного й субклітинного до популяційного. Розкриття закономірностей розвитку радіаційних ушкоджень біосистем та процесів їх післярадіаційного відновлення зумовило розроблення широкого кола практичних заходів, що сприяють пом'якшенню негативних для людини і біоти в цілому наслідків хронічного опромінення і окреслюють можливості використання нових технологій природокористування на забруднених радіонуклідами територіях.*

*Ключові слова: радіоактивне забруднення екосистем, хронічне опромінення, радіобіологічний ефект, зона відчуження, протирадіаційний захист, пострадіаційне відновлення.*

Найстрашніша в історії людства Чорнобильська трагедія сколихнула світ і змусила переглянути багато існуючих пріоритетів, у тому числі й наукових. Традиційні дослідження з різних проблем атомної енергетики, радіаційного приладобудування, радіогеохімії тощо, які нібито не стосувалися екологічних аспектів, набули надзвичайного екологічного значення, оскільки було конче потрібно оперативного й максимально мінімізувати конкретні негативні наслідки, з одного боку, і розробити відповідні заходи на перспективу — з другого. Це зумовило також появу абсолютно нових (часом несподіваних) наукових напрямів і завдань.

З метою їх вирішення в Національній академії наук України було організовано нові цільові наукові підрозділи, в багатьох інститутах істотно розширено тематику з чорнобильських питань, сформовано спеціалізовані наукові програми тощо [1].

Серед зазначених проблем велике значення для зменшення порушень здоров'я людини та захисту біорізноманіття забруднених територій має вирішення радіобіологічних і радіоекологічних аспектів чорнобильського походження. Останні зловісні техногенні події в Японії і Франції ще раз підкреслюють важливість цих проблем. Значення таких досліджень не можна переоцінити, оскільки людство, на жаль, ще не в змозі розробити дієві заходи, які б виключили ядерні аварії хоча б у найближчому майбутньому.

---

© Д.М. Гродзинський, О.Ф. Дембновецький,  
О.М. Левчук, Ф.Н. Пацюк, 2012

Упродовж 25 років після аварії на ЧАЕС науковцями НАН України було виконано значний обсяг відповідних робіт. Їх підсумки підбито на Міжнародній конференції «Радіобіологічні та радіоекологічні аспекти Чорнобильської катастрофи», що відбулася у 2011 р. у м. Славутич під егідою Міжнародної асоціації академій наук, НАН України, РАН, Наукової ради РАН з радіобіології, радіобіологічних товариств України і Росії та інших структур, за участю вчених профільних наукових установ України, Росії, Білорусі, Болгарії, Угорщини та інших країн.

На конференції було констатовано, що в результаті багаторічних досліджень зроблено важливі узагальнення, з'ясовано різні механізми впливу радіації на живу матерію, запропоновано відповідні концепції, стратегії, рекомендації, створено відповідні препарати, визначено підходи до розроблення систем захисту людини і біоти від шкідливих ефектів радіації, встановлено окремі значущі для розуміння дії радіації наукові факти, опрацьовано інші важливі питання, сформульовано відповідні завдання на майбутнє [2].

Останнім часом особливу увагу приділяють оцінюванню ризику опромінення не лише людини, а й інших організмів, адже рослини, гриби, нижчі й вищі тварини, мікроорганізми та віруси зазнають хронічного впливу іонізуючого випромінювання. Вжиті у гострий період аварії на ЧАЕС заходи мали на меті передусім захист населення і персоналу від опромінення. Водночас біота Чорнобильської зони зазнала гострого опромінення, що призвело до формування радіобіологічних ефектів на різних рівнях організації біологічних систем, від клітини чи організму до екосистеми. Тому дослідження впливу іонізуючого випромінювання набули комплексного характеру.

В Інституті клітинної біології і генетичної інженерії НАН України [3–5] з'ясовано механізм формування віддалених наслідків катастрофи на різних рівнях флори зони

відчуження (ЗВ). Установлено, що в перші місяці після аварії зовнішнє опромінення поєднувалося з аплікаційним та внутрішнім, зумовленим позакореневим поглинанням численних нуклідів, потім виокремилася хронічне опромінення рослин (зовнішнє —  $\gamma$ -випромінювання і внутрішнє —  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$ , яке спричинює більш потужний ефект<sup>1</sup>, ніж гостре).

Небезпека внаслідок хронічного опромінення насамперед визначається зростанням негативного генетичного вантажу у видових популяціях і активною реакцією, спрямованою на зменшення частоти появи ушкоджень геному. Серед віддалених радіобіологічних процесів у рослин спостерігаються як безпосередні стохастичні ефекти дії радіації, так і прояви протирадіаційної активності клітин і видових популяцій у цілому.

Тривалість проявів віддалених ефектів дуже велика (про це свідчить збереження високих темпів спонтанної мінливості рослин у колекціях мутантних форм пшениці, відібраних у ЗВ) і на рівні видових популяцій характеризується підвищенням фенотипічної адаптації, а на ценотичному рівні — суцесійними процесами.

На основі отриманих експериментальних даних розроблено стратегію протирадіаційного захисту рослин, що полягає в активації таких процесів: підвищення індивідуальної радіостійкості (радіоадаптація), елімінація генетично змінених клітин (гаплонтний і диплонтний клітинний добір), зростання фенотипічної мінливості (прискорення темпів філогенетичної адаптації).

На основі даних протеоміки<sup>2</sup> насіння сої і льону експериментально обґрунтовано і

<sup>1</sup> Збільшення виходу хромосомних аберацій у клітинах меристеми, геномна нестабільність, зростання вмісту речовин — основи природного радіопротекторного фону, підвищення рівня апоптозу стовбурових клітин, послаблення апікального домінування, зниження насінневої продуктивності рослин, зростання асиметрії морфологічних структур, зсув фенофаз.

<sup>2</sup> Вивчення білкового складу і проведення аналізу метаболічних шляхів.

запропоновано концепцію адаптації аграрних культур, яка дає можливість витримувати шкідливі мутагенні умови Чорнобиля [2]. Для сої вона складається з трьох компонентів:

а) неспецифічний компонент, що нагадує адаптацію до дії важких металів;

б) специфічний захист від радіаційних уражень;

в) зміни в балансі запасних білків.

Висловлено також припущення, що насіння льону в умовах хронічного радіаційного забруднення захищається, змінюючи кількість білків ряду сигнальних каскадів, а також перебудовуючи метаболізм і регуляцію пакування білків.

З метою підвищення теоретичної озброєності радіоекологічних досліджень і продуктивного використання значної кількості наявних наукових даних для оцінювання стану екосистем (наземних, водних, лісових, гірських, лучних та міських) Ю.О. Кутлахмедовим із співробітниками створено теорію і моделі радіємності в сучасній радіоекології [2, 6]. Запропоновані параметри радіємності виявилися здатними чітко відображувати вплив факторів на біоту і випереджати за своїми реакціями біологічні ростові показники. Висловлено припущення, що реакція параметрів радіємності може слугувати чинником для вимірювання стану і благополуччя біоти, а також бути мірою для еквідозиметричного оцінювання впливу радіаційного і хімічного факторів. Побудовано моделі для оцінювання параметрів радіємностей різних типів екосистем.

Крім того, розроблено модель і параметри для визначення синергізму дії комбінованих факторів. Встановлено, що в динаміці розвитку біоти в екосистемах характер взаємодії різних факторів змінюється від синергізму до антагонізму, показано провідну роль процесів відновлення під час дії на біоту радіаційного і хімічного факторів.

У результаті теоретичного аналізу радіємності ландшафтів встановлено, що швидкість переміщення радіонуклідів у ландшафті визначається в основному кількома характеристиками з урахуванням параме-

трів перерозподілу радіонуклідів, складено карти динаміки забруднення ландшафтів та перерозподілу  $^{137}\text{Cs}$  через 10, 20 та 30 років після аварії.

Пізнання механізмів міграції нуклідів у ґрунтових системах надзвичайно актуальне з огляду на масштабність радіаційно уражених територій, а також значну кількість опромінених техногенних матеріалів. Здійснено аналіз досліджень з питань використання і утримання радіаційних земель [7]. У ході цих досліджень було вивчено склад нуклідів (цезій, стронцій, полоній, америцій та інші небезпечні нукліди); характер їх вертикального й горизонтального переміщення у ґрунтах і забруднених техногенних об'єктах; розподіл і накопичення їх у тваринах і рослинах, а також ступені ураженості територій з огляду на безпеку нуклідів для населення<sup>3</sup> тощо.

У результаті проведеного аналізу розроблено такі рекомендації щодо використання і утримання радіаційно уражених земель:

- для заселених «умовно чистих» земель доцільно віддавати перевагу технологіям, що сприяють зменшенню транспорту нуклідів у трофічних зв'язках, зокрема накопиченню їх у рослинній біомасі; для кожного населеного пункту розробити відповідні проекти. Мається на увазі окультурення природних лук і пасовищ, цілеспрямоване внесення оптимальних доз калійних і фосфорних добрив та мікроелементів, а також позакореневе підживлення блокаторами всмоктувальної здатності рослин; широке використання культурних рослин з низькими параметрами виносу нуклідів; запровадження оптимальних сівозмін; проведення роз'яснювальної роботи серед населення;

- радіаційно забруднені території, що не використовуються для господарських потреб, також потребують певних заходів (заліснення, зачагарення, задерніння); на цих землях з часом можна вирощувати для

<sup>3</sup> На прикладі полігона (Рудий ліс) показано можливість «свіжих» випадань у ґрунтах поблизу ЧАЕС [1].

технічних цілей деревину, ріпак та інші культури;

• для абсолютно непридатних до використання земель, у тому числі ЗВ і водойм цієї зони, у найближчі 100–1000 років через наявність у ґрунтах життєво небезпечних нуклідів з великим періодом піврозпаду потрібно забезпечити режим, за якого виключатимуться міграція нуклідів за їх межі та інші небезпечні для прилеглих поселень ситуації (лісові пожежі, паводки, епідеміологічні спалахи хвороб рослин і тварин тощо); на особливу увагу заслуговує ставок-охолодник ЧАЕС, який на сьогодні є унікальним напівприродним сховищем радіаційних продуктів і відходів.

Відомо, що на радіаційно забруднених територіях проживає і працює понад 10 млн осіб, яких на сьогодні практично неможливо позбавити впливу низькодозового випромінювання. Всупереч усе ще поширеній думці щодо безпечності дії допустимо малих доз випромінювання для людини науковцями Л.Ф. Горовим та О.Ф. Сенюк наведено вагомі факти, які свідчать про протилежне. Доведено їх небезпечність, зумовлену тим, що окремих індивідів отримує безпечну дозу, а популяція в цілому — велику колективну дозу і статистично достовірні негативні наслідки для здоров'я [2].

У співпраці з іншими науковцями ними було також встановлено, що мікобіота загалом зазнала масової появи в її складі меланіновмісних радіостійких видів і формування штамів грибів міксоміцетів, з підвищеним вмістом меланінів. У зв'язку з цим у процесі пошуку захисних протирадіаційних засобів було виявлено здатність меланін-глюканового комплексу з вищих базидіальних грибів захищати популяцію стовбурових клітин від дії випромінювання, що пояснюється наявністю у меланінів потужної антиокисної і антирадикальної активності. Крім того, встановлено високу ентеросорбційну здатність випробуваних хітинових препаратів, яка асоціюється з потужними адаптаційними й оксіолітичними властивостями. У результаті запропоновано лікарський засіб із трьох

біополімерів грибного походження (меланінів — антиоксидантів, хітинів — сорбентів нуклідів і глюканів — імуностимуляторів), який досліджують на модульних об'єктах в Інституті проблем безпеки АЕС [2].

Отримані результати свідчать про реальну перспективу розроблення захисних методів від наслідків хронічного низькодозового опромінення.

Крім того, під час вивчення дії малих доз на взаємовідносини фітопатогенних бактерій *Pseudomonas aeruginosa* з триденними проростками кукурудзи сорту Титан Ю.В. Шиліною із колегами було виявлено підвищення агресивності бактерій, зумовлене не лише зниженням хворобостійкості рослин, а й збільшенням швидкості розмноження бактерій [2]. О.П. Дмитрієвим із співробітниками виявлено також нову популяцію збудника стеблової іржі злаків (пшениці, жита, кукурудзи тощо) гриба *Puccinia graminis*, що характеризується високою частотою зустрічальності більш вірулентних клонів порівняно з іншими регіонами України [2, 5].

Науковцями М.Ю. Гриджук та І.П. Дрозд [2] під час вивчення впродовж 1993–1996 рр. за допомогою степ-тесту неспецифічних реакцій людського організму в процесі адаптації до радіаційних умов у ЗВ встановлено такі механізми адаптації: первинний механізм — інтенсивне продукування катехоламінів (адреналіну і норадреналіну) і гіперактивність симпатичного відділу нервової системи, що призводить до зсуву вегетативного індексу в бік ваготонії (коли гіперкінетичний тип кровообігу змінюється на гіпотакінетичний, тобто особи переходять із групи симпатотоніків у групи нормо- та ваготоніків). Далі адаптація відбувається двома шляхами:

1) успішна адаптація (23%) — накопичення в організмі кортикостероїдів завдяки високій симпатoadреналовій активності підкіркових нервових центрів;

2) патологічна адаптація (77%) — вагусне гальмування, перенапруження систем

регуляції і подальший зрив адаптації з патологічними наслідками — спазмування судин, серцево-судинна недостатність, формування стійкої форми гіпертонії тощо. З урахуванням вищенаведеного рекомендовано до тривалої роботи у ЗВ добирати осіб з успішною адаптацією до хронічної дії радіаційного чинника.

Під час дослідження впливу малих доз випромінювання вченими Інституту ядерних досліджень НАН України виявлено виникнення істотних структурних ушкоджень клітин лабораторних тварин та зміни окремих показників життєво важливих систем організму, зростання на рівні цілісного організму частоти розвитку патологічних станів, збільшення ймовірності малігнізації тканин; з'ясовано, що персонал, який працює з радіаційними об'єктами, зазнає зовнішнього і внутрішнього опромінення, сумарна доза якого перевищує дозу зовнішнього опромінення, що пояснюється додатковою дією малих доз внутрішнього опромінення [2].

Науковці інституту запропонували визначати місцезнаходження у ґрунті центру основного вмісту  $^{137}\text{Cs}$  і швидкість його вертикальної імміграції за допомогою зіставлення вмісту  $^{137}\text{Cs}$  у грибах-симбіотрофах, оскільки вони накопичують нукліди у значно більшій кількості, ніж гриби-сапрофіти і ксилотрофи, а також використовувати рівень накопичення радіонуклідів у тілі мишоподібного гризуна — руді полівки<sup>4</sup> для оцінювання радіобіологічної ситуації й моніторингових досліджень ЗВ, бо ця тварина перебуває у верхніх горизонтах ґрунту (10 см), де міститься основна частина нуклідів [2, 8].

Крім того, було встановлено, що з 1987 р. до 2010 р.  $^{90}\text{Sr}$  і особливо  $^{137}\text{Cs}$  є основними дозоформувальними нуклідами для риб прісноводних водойм; при чому їх розподіл в ор-

<sup>4</sup> У клітинах кісткового мозку мишоподібних гризунів, яких відловлюють у біоценозах з підвищеним рівнем радіоактивності, виявляють збільшення цитогенетичних аномалій — метафаз з Робертсоновим міжхромосомним злиттям, а також анеуплоїдів.

ганах і тканинах риб як низьких, так і високих трофічних рівнів відносно стабільний.

Колективом вчених з Науково-інженерного центру радіогідроекологічних полігонних досліджень НАН України на чолі з академіком НАН України В.М. Шестоपालовим було досліджено автореабілітаційні процеси екосистем ЗВ, зроблено висновок про поширення непухлинних патологій не лише серед людської популяції, а й серед інших біологічних видів — мешканців забруднених територій [1].

Крім того, ретроспективний аналіз динаміки показників захворюваності травного каналу у дітей з радіоактивно забруднених територій і з контрольного району показав зростання у 2–10 разів всіх досліджених показників, для вторинної захворюваності — в 11–19 разів упродовж 22-річного періоду спостережень; максимум захворюваності зафіксовано через 10–12 років після аварії [2].

Науковцями Інституту біоорганічної хімії і нафтохімії НАН України В.В. Жирновим із співробітниками було доведено, що  $\beta$ -випромінювання малої потужності модифікує як  $\text{Ca}^{2+}$ -опосередковану, так і  $\text{Ca}^{2+}$ -незалежну клітинну сигналізацію, що регулює стабільність мембран еритроцитів; спрямованість цієї модифікації залежить від вихідної структури мембран і, можливо, визначається якісними й кількісними параметрами тих чи інших змін. Оскільки структурні зміни мембран еритроцитів впливають на їх осмотичну резистентність, останню можна використати як тест на зміни  $\beta$ -випромінювань малої потужності та як індикатор для екомоніторингу радіонуклідного забруднення низької інтенсивності різних середовищ [2].

В Інституті мікробіології і вірусології ім. Д.К. Заболотного НАН України було відкрито новий тип тропізму — стійкий позитивний радіотропізм — здатність грибного міцелію мікроскопічних грибів потягом певного часу (75–250 діб) акумулювати і руйнувати гарячі часточки чорнобильського і

семипалатинського походження внаслідок контактів грибних апексів з поверхнею часточки та деструкції часточок органічними кислотами і ферментами, що виділяються грибами міцелію у зовнішнє середовище [2, 9].

Під час вивчення якісного і кількісного складу ґрунтових міцетів та їх динаміки впродовж кількох років було встановлено домінування їх темнопігментованих родів порівнянно зі світлопігментованими у структурах грибних комплексів. Висловлено припущення, що реалізація їхньої радіоадаптації зумовлена зміною електронної структури меланінів, які посилюють цю властивість.

Встановлено також відмінності у синтезі меланінів у штамів міцетів залежно від місцезнаходження (у чорнобильських штамів спостерігається більший вихід пігменту порівняно з контролем у 1,5–3,0 рази) [2].

Спільно з Інститутом ядерних досліджень створено оригінальну колекцію культур мікроскопічних грибів з позитивною реакцією на певний тип випромінювання, які виявляють радіоадаптивні властивості. Така колекція може бути дуже перспективною в разі використання у біотехнологіях з біоремедіації радіоактивно забруднених об'єктів, її також можна використати у формуванні віддалених прогнозів щодо дії хронічного опромінення та адаптації до нього як у поколіннях грибів, так і, в деякому наближенні, для наступних поколінь опромінених вищих еукаріотів<sup>5</sup> [2].

Науковцями Інституту проблем безпеки АЕС та Інституту мікробіології і вірусології ім. Д.К. Заболотного було доведено, що основним фактором зміни вмісту нуклідів у забруднених матеріалах є життєдіяльність мікроорганізмів завдяки утворенню надійного зв'язку їхніх біослизів з <sup>137</sup>Cs. Це дало можливість розглянути способи застосування їх і мікробних метаболітів для дезактива-

ції і кондиціонування забруднених матеріалів та радіоактивних відходів [2].

В Інституті експериментальної патології, онкології і радіобіології ім. Р.Є. Кавецького НАН України О.Б. Ганжею з колегами під час вирішення однієї з актуальних проблем з радіобіології — визначення природної радіочутливості організму — у дослідженнях на білих щурах-самцях лінії Wistar було встановлено, що визначальними реакціями радіорезистентності організму є перебіг вільно-радикальних процесів у системі крові, й доведено, що динаміка показників окисного метаболізму після дії стрес-агентів (гіпертермія та іммобілізація) відображує радіочутливість організму. Висловлено припущення, що резистентність організму може характеризуватися його можливістю протидіяти порушенню пер- і антиоксидантної рівноваги після дії стрес-агентів [2].

У результаті вивчення різними вченими дії малих доз випромінювання на лабораторних тварин було встановлено такі ефекти:

- формування у тварин специфічного гемопоетичного синдрому (на ранній стадії спостерігається фаза регенерації, в подальшому настає пригнічення як еритроїдного, так і гранулоцитарного ростків кровотворення з порушенням процесів проліферації та дозрівання клітин), що поступово призводить до зниження можливості організму до компенсації та відновлення [10];

- збільшення сумарної дози опромінення внаслідок депонування у кістках нуклідів спричинює хронічне ураження кісткового мозку і пригнічення компенсаторно-приспосувальних реакцій у системі гемопоезу, а також виснажує пул стовбурових кровотворних клітин та радіочутливих клітин-попередників і знижує ефективність колонієутворення клітин-попередників кісткового мозку [2];

- негативні структурні й функціональні зміни систем організму, що істотно (10–28%) скорочують тривалість життя тварин через патологічні процеси (дистрофічні та некротичні), які наростають повільно і

<sup>5</sup> Еукаріоти, або ядерні (лат. Eukaryota) — живі організми, клітини яких містять ядро.

зумовлені порушенням окисного метаболізму [11];

- порушення репродуктивної функції і кровотворних органів, збільшення кількості патологічних мікозів і клітин з мікроядрами, одночасні процеси проліферації і репарації, а також інтенсифікація протилежних процесів — розвиток радіаційних уражень біологічних структур і одночасно репарація радіаційних ушкоджень [2].

Для ранньої діагностики променевого ураження людини розроблено метод оцінювання поглинутої дози і ступеня гострої променевої хвороби в процесі спеціальної терапії опромінених осіб на основі комплексу цитогенетичних показників і адекватної моделі множинної лінійної регресії. Зіставлення клінічних, гематологічних, біодозиметричних (цитогенетичних) та інших даних дає змогу робити висновки щодо ступеня хвороби й визначати стратегію адекватної терапії постраждалих.

Запропоновано принципи нової стратегії первинної профілактики радіогенного раку, яка охоплює такі аспекти: оцінку індивідуальної радіаційної чутливості організму людини; використання нетоксичних ефективних радіопротекторів, наприклад інозину, тималіну, в супроводі повноцінного вітамінного забезпечення; врахування додаткового впливу комагенов (наприклад, кофеїну), які можуть істотно посилювати радіаційно індуковані ефекти малих доз. Зазначену стратегію рекомендовано використовувати під час набору кадрів для роботи в умовах іонізаційного опромінення, в тому числі працівників атомних підприємств, медичних працівників (радіологів, рентгенологів), для населення, що проживає на забруднених радіонуклідами землях [11, 12].

Отримано наукове підтвердження гіпотези про зв'язок між молекулярними механізмами формування раку молочної залози та підвищеним рівнем аберації хромосом, індукованої опроміненням у G2-фазі клітинного циклу, що, у свою чергу, відображує процеси репарації радіаційноіндукованих ушкоджень ДНК [2, 12].

Небезпека малих радіодоз підтверджена також дослідженнями науковців Інституту гідробіології НАН України. На прикладі вищої рослинності, зокрема тростини звичайної *Phragmites australis*, було встановлено істотні негативні зміни цитогенетичних показників, репродуктивної здатності, зниження протипаразитарної стійкості, насінневої продуктивності, аномалію репродуктивних органів, ураження рослинної популяції в цілому паразитичними грибами та іншими шкідниками, що свідчать про тривалу генетичну нестабільність, яка реалізується на фенотипічному і репродуктивному рівнях [13].

Крім того, цитогенетичні й гематологічні дослідження гідробіонтів замкнених радіозабруднених водойм виявили високий рівень аберацій хромосом в ембріональних тканинах молюсків і кореневих меристемах вищих водних рослин, а також збільшення уражень еритроцитів риб у вигляді інвагінацій, відростків, ураженість галотвірними кліщами *Tarsonemidea* і грибом-аскоміцетом — ріжками *Claviceps purpurea* [14].

Під час комплексного дослідження частоти хромосомних аберацій в ембріональних тканинах, складу оформлених елементів мантийної рідини дорослих особин, параметрів яйцевих синкапсул, а також деформації стулок ставковика звичайного *Lymnaea stagnalis* у ЗВ встановлено негативні зміни всіх зазначених показників.

Вивчення показників периферичної крові (частота уражень ядер еритроцитів, мікроядра, інвагінація, відростки, мітоз) у риб (щука, окунь, плітка, карась та ін.) забруднених водойм ЗВ дало змогу встановити істотне їх перевищення порівнянно з даними, отриманими у Київському водосховищі.

На прикладі розвитку плітки *Rutilus rutilus* та плоскирки *Blicca bjoerkna* у забрудненому Київському водосховищі спостерігається індивідуальна мінливість базових ознак: у 83% досліджених риб — мінлива асиметрія плавців і очей, у 100% — внутрішніх структур, у 56–71% лінійна нерівномірність розвитку гонад і у 50–91% — маси, що

свідчить про модифікаційний вплив радіаційного забруднення на їхній організм [2].

В Інституті біології південних морів ім. О.О.Ковалевського НАН України ще до аварії на ЧАЕС було сформовано нові напрями — морська радіохемоекологія і морська динамічна радіохемоекологія; розроблено теорію радіоізотопного і мінерального обміну морських організмів; запропоновано концептуальну модель хронічної дії іонізуючого випромінювання в усьому можливому діапазоні потужностей доз; введено поняття екологічної ємності середовища щодо забруднень [15].

Це дало змогу науковцям цієї установи оперативно і якісно провести необхідні дослідження динаміки накопичення радіонуклідів чорнобильського походження в екосистемах Чорного, Азовського, Егейського і Середземного морів, а також гирлової зони Дунаю, нижньої частини Дніпра, Дніпровсько-Бузького лиману, Каховського водосховища, Північно-Кримського каналу, шельфової зони Криму і Севастопольських бухт. Встановлено, що активність чорнобильського  $^{137}\text{Cs}$ , який надійшов у Світовий океан, становила 16 ПБк, а в Чорне море — 2–3 ПБк; питома вага чорнобильських радіонуклідів відносно загальних дозових навантажень на чорноморські гідробіоти незначна. Водночас внесок природного радіонукліда  $^{210}\text{Po}$  у сумарну дозу, що формується природними й антропогенними чинниками, сягає понад 99%. Тому запропоновано рекомендацію щодо обов'язкових моніторингових вимірювань вмісту цього радіонукліда в основних видах промислових гідробіотів Чорного моря [2].

Отримано також багато інших цікавих наукових даних, які не було висвітлено на підсумковій конференції [1, 5, 6, 11, 15–18]. Це, зокрема:

- плямистий характер радіоактивних відходів (навіть на значних відстанях від місця аварії є забруднені території), через це ймовірність появи радіоактивної сільськогосподарської продукції не є нульовою в будь-якій частині країни;

- інтенсифікація мікроеволюційних претворень у популяціях низки видів; у зв'язку з цим виокремлено два напрями цього процесу — адаптація (збільшення епігенетичної та генетичної мінливості й розширення можливостей адаптації до несприятливих умов) і стабілізаційний добір (відносно низький рівень мінливості популяцій мікромамалій зі збереженням їх чисельності та стабільності);

- загибель у зоні летальних радіаційних уражень (Рудий ліс та інші території) сосен та ялин, утворення на місці загиблих насаджень згарищ за участю бур'янів галявинних видів, мохів і лишайників, а також формування щільних картин самосіву берези, осики і крушини;

- початок формування в зоні сублетального ураження самосівних популяцій листяних порід і злаково-рудеральних ценозів;

- поява в останні роки на межі Рудого лісу нерівномірного самосіву сосни між материнськими деревами;

- початок сукцесійного відновлення на території Рудого лісу рослинності, під пологом якої створюються умови для розвитку хвойних дерев;

- початок відновлення на залишених відселеними мешканцями орних землях природної рослинності шляхом заміни відповідних типів біоценозів, які сприяють відтворенню властивої цій зоні лісової формації, а також формуванню нового видового складу тваринного світу;

- зростання біологічного різноманіття ЗВ за рахунок видів, нормальному розвитку яких заважала людина;

- активізація після зняття антропогенного тиску на відчужених територіях природних механізмів демутаційного самовідновлення і відродження лісоболотних біогеоценозів, характерних для Київського полісся;

- зміни розподілу бактерій по профілю ґрунту: лише у поверхневому шарі (0–20 см) різко зменшилася як чисельність видів, так і загальна бактеріальна маса зі зростанням швидкості утворення мутантних більш радіостійких форм;



- збільшення частоти виявлення на забрудненій радіонуклідами території Чорнобильської зони PVX-, TMV- та PVY-вірусів (значно вищу частоту виявлення вірусів рослин було показано для рослинності ЗВ);

- перетворення ЗВ з її фактичним заповідним режимом на унікальну територію у фауністичному (трапляються види птахів і ссавців, занесені до Червоної книги) і флористичному відношенні (лише в Житомирській області виявлено понад 40 видів рослин, занесених до Червоної книги, в тому числі нові види лишайників, ліхенофільних грибів, макроміцетів, таксони бріофлори).

Наведені дані дали змогу вченим дійти висновку, що високий рівень радіоактивного забруднення ЗВ не призвів до будь-яких помітних негативних наслідків для видового різноманіття біоти, і процеси самоочищення уражених екосистем супроводжуються збільшенням біорізноманіття. Радіаційний вплив, який традиційно розглядають як негативний екологічний фактор, справив помітно менший вплив, ніж практично повна елімінація антропогенного пресу.

Підсумовуючи вищевикладене, без перебільшення можна стверджувати, що за минулі роки практично було сформовано новий розділ радіобіології та радіоекології, скерований на розкриття закономірностей дії хронічного опромінення і розроблення нових підходів до практично досяжних способів захисту людини та всієї біоти від віддалених ефектів надлишкового радіаційного впливу.

Нові знання слугуватимуть основою для створення ефективного захисту середовища, людини і біоти від загрози підвищення радіоактивності довкілля. З другого боку, слід відверто визнати, що на сьогодні зусилля учених і суспільства щодо ефективного розв'язання відповідних практичних та нагальних фундаментальних і прикладних питань усе ще не відповідає рівню небезпеки чорнобильських проблем. Потрібно враховувати й те, що спектр радіобіологічних проблем з роками збільшився внаслідок

підвищення значущості малодосліджених питань, зокрема радіоадаптації, радіаційного старіння, радіаційно індукованого канцерогенезу тощо.

Взагалі сьогодні нелегко визначити, які ще можуть виникнути проблеми, пов'язані з віддаленими наслідками катастрофи (наприклад, може виникнути питання загальної окупності ядерної енергетики з огляду на значні багаторічні витрати для ліквідації різних наслідків можливих ядерних катастроф для суспільства). А тому попереду ще багато роботи. Так, залишаються не з'ясованими до кінця такі проблеми: повне розшифрування специфіки дії інкорпорованих нуклідів; уточнення ефектів малих доз іонізаційної радіації; гетерогенність (тропність) розподілу радіонуклідів у структурах і органах рослин; феноменологія і механізми радіогормезису; радіоадаптація від феноменології до онто- та філогенетичних механізмів; механізми і наслідки мікроеволюційних процесів у 30-кілометровій зоні ЧАЕС, індуковані радіацією; ефекти спільного впливу іонізаційної радіації з іншими факторами; методи ретрорадіодозиметрії; інтегральні (дистанційні, опосередковані, непрямі) реакції біологічних систем на опромінення та наслідки; епігенетичні ефекти; стохастичні ефекти іонізаційної радіації; поглиблення фундаментальності у вивченні радіобіологічних і радіоекологічних аспектів, створення ефективних і нешкідливих радіопротекторів тощо [2, 4, 6].

Водночас занепокоєння вчених викликає тенденція останніх часів – згорання в країні наукових аспектів чорнобильської проблеми. Зокрема, науковці стурбовані зростаючою тенденцією зменшення державної підтримки досліджень з чорнобильської тематики, що призводить до скорочення їх обсягів і зумовленого цим погіршення ефективності наукових робіт [19]. Це суперечить основним цілям держави, інтересам громадськості і ставить під сумнів успішне виконання державних чорнобильських програм, а також забезпечення

належного захисту здоров'я постраждалого населення.

Тому владним структурам не варто забувати, що, як свідчать прогнози дослідження, чорнобильські проблеми загрожуватимуть суспільству не лише України, а й усього світу ще впродовж багатьох десятиліть, і кількість їх сьогодні визначити не може ніхто.

З свого боку, вчені НАН України, маючи напрацьований потужний науковий потенціал, і надалі докладатимуть максимум зусиль для всебічного вивчення і розв'язання сучасних та можливих нових чорнобильських проблем.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Національна академія наук України. 1918–2008: до 90-річчя від дня заснування. — К.: Вид-во КММ, 2008. — 624 с.
2. Радіобіологічні та радіоекологічні аспекти чорнобильської катастрофи: тези доповідей Міжнародної конференції (11–15 квітня 2011 р., Славутич, Україна). — Славутич: Фітосоціоцентр, 2011. — 204 с.
3. Гродзинський Д.М. Віддалені радіобіологічні наслідки хронічного опромінення біоти в зоні впливу чорнобильської катастрофи // Чорноб. наук вісник. Бюл. екол. стану зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення. — 2006. — № 2(28). — С. 5–12.
4. Гродзинський Д.М. Модифікація віддалених наслідків хронічного опромінення // Чорноб. наук вісник. Бюл. екол. стану зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення. — 2009. — № 1 (33). — С. 24–32.
5. Гродзинський Д.М., Гуца М.Т., Дмитрієв О.Д. та ін. Радіобіологічні ефекти хронічного опромінення рослин у зоні впливу Чорнобильської катастрофи. — К.: Наук. думка, 2008. — 373 с.
6. Кутлахмедов Ю.А., Поликарпов Г.Г., Зотов В.П. и др. Медико-биологические последствия Чернобыльской катастрофы: отдаленные радиоекологические и радиобиологические проблемы и анализ эффективности контрмер по защите био- и экосистем от последствий Чернобыльской катастрофы: в 2 ч. — К.: МЕДЭКОЛ, 2000. — 293 с.
7. Гродзинський Д., Дембновецкий О., Левчук О. Перспективи використання та утримання радіаційно уражених земель // Вісн. НАН України. — 2003. — № 4. — С. 15–25.
8. Жданова Н.Н., Захарченко В.А., Василевская А.И. и др. Новый подход к выявлению микромицетов — биоиндикаторов радиационного загрязнения почв Украинского Полесья // Микология и фитопатология. — 1995. — Т. 29, № 1. — С. 23–28.
9. Жданова Н.Н., Лашко Т.Н., Редчиц Т.И. и др. Взаимодействие почвенных микромицетов с «горячими» частицами в модельной системе // Микробиологич. журн. — 1991. — Т. 53, № 1. — С. 9–17.
10. Серкіз Я.І., Липська А.І., Дрозд І.П. та ін. Радіобіологічні ефекти у ссавців: погляд через 20 років після аварії на ЧАЕС // Вісн. НАН України. — 2006. — № 4. — С. 14–27.
11. Дьоміна Е.А., Дружина М.О., Рябченко Н.М. Індивідуальна радіочутливість людини. — К.: Логос, 2006. — 126 с.
12. Дьоміна Е.А., Рябченко Н.М., Дружина М.О. та ін. Цитогенетичний спосіб (G2-assay) визначення індивідуальної радіочутливості людини з метою первинної профілактики радіогенного раку. Методичні рекомендації. — К.: МОЗ України, 2007. — 28 с.
13. Гудков Д.И., Ужеская С.Ф., Назаров А.Б. и др. Поражение тростника галлообразующими членистоногими в водоемах зоны отчуждения Чернобыльской АЭС // Гидробиологич. журн. — 2005. — Т. 41, № 5. — С. 92–99.
14. Гудков Д.И., Шевцова Н.Л., Дзюбенко Е.В. и др. Эффекты хронического радиационного воздействия у гидробионтов Чернобыльской зоны отчуждения // Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде: Мат. VI Междунар. науч.-практич. конф. (4–7 февраля 2010 г., Семипалатинск). — Семей, 2010. — Т. 2. — С. 354–358.
15. Поликарпов Г.Г., Егоров В.Н., Гулин С.Б. и др. Радиоекологический отклик Черного моря на чернобыльскую аварию. — Севастополь: ЭКОСИ-гидрофизика, 2008. — 667 с.
16. Grodzinsky D.M., Kravetz E.A., Khvedinich O.A. et al. Effect of chronic irradiation on reproductive system of winter wheat // Current problems of radiation research: Proc. 35<sup>th</sup> annual Meeting Europ. Rad. Res. Society. — Kyiv, 2007. — P. 26–41.
17. Гродзинський Д.М. Радіоактивні ізотопи і життя // Вісник Харківського національного аграрного університету. Серія біологія. — 2010. — Вип. 2 (20). — С. 6–18.
18. Проблеми й уроки Чорнобиля: матеріали засідання Президії НАН України, присвяченого 25-й річниці аварії на ЧАЕС // Вісн. НАН України. — 2011. — № 5. — С. 3–29.
19. Найбільша техногенна катастрофа ХХ століття: з нагоди 20-річчя аварії на ЧАЕС: Сесія Заг. зборів НАН України // Вісн. НАН України. — 2006. — № 6. — С. 3.

*Д.М. Гродзинский<sup>1</sup>, О.Ф. Дембновецкий<sup>2</sup>,  
О.Н. Левчук<sup>1</sup>, Ф.Н. Пацюк<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Президиум Национальной академии наук Украины  
ул. Владимирская, 54, Киев, 01601, Украина

<sup>2</sup> Центр исследований научно-технического  
потенциала и истории науки им. Г. М. Доброва  
Национальной академии наук Украины  
бульвар Тараса Шевченко, 60, Киев, 01032, Украина

**РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИЕ  
И РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ КАТАСТРОФЫ УЧЕНЫМИ  
НАН УКРАИНЫ**

За 26 лет, прошедших со дня аварии на Чернобыльской АЭС, ученые НАН Украины провели многочисленные всесторонние исследования биологических последствий радионуклидного загрязнения экосистем, в частности влияния на биоту хронического облучения ионизирующей радиацией, обусловленного радиоактивным распадом продуктов деления урана. Установлены радиобиологические эффекты на разных уровнях организации биологических систем от молекулярного и субклеточного до популяционного. Раскрытие закономерностей развития радиационных повреждений биосистем и процессов их послерадиационного восстановления обусловило разработки широкого спектра практических мер, способствующих смягчению негативных для человека и биоты в целом последствий хронического облучения и определяющих возможности использования новых технологий природопользования на загрязненных радионуклидами территориях.

*Ключевые слова:* радиоактивное загрязнение экосистем, хроническое облучение, радиобиологический эффект, зона отчуждения, противорадиационная защита, пострадиационное восстановление.

*D.M. Grodzyns'kyi<sup>1</sup>, O.F. Dembnovets'kyi<sup>2</sup>,  
O.M. Levchuk<sup>1</sup>, F.N. Patsiuk<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Presidium of the National Academy of Sciences  
of Ukraine

54 Vladimirska Str., Kyiv, 01601, Ukraine

<sup>2</sup> Dobrov Center for Scientific and Technological Potential  
and Science History Studies of the National Academy  
of Sciences of Ukraine  
60 Taras Shevchenko Ave., Kyiv, 01032, Ukraine

**RADIOBIOLOGICAL AND RADIOECOLOGICAL  
INVESTIGATIONS OF THE CONSEQUENCES  
OF THE CHERNOBYL CATASTROPHE BY  
SCIENTISTS OF THE NATIONAL ACADEMY  
OF SCIENCES OF UKRAINE**

During 26 years since the Accident at the Chernobyl Nuclear Power Station scientists of the National Academy of Sciences of Ukraine have conducted numerous and extensive researches on the biological effects of radionuclide contamination in ecosystems. Particular attention was paid to the disclosure of the distribution of radioactive substances in the environment and on the impact to biota of chronic exposure due to radioactive decay of fission products of uranium. As a result, disclosed the nature of radiobiological effects at different levels of organization of biological systems from molecular and subcellular to the population levels. Establishing patterns of development of radiation damage to biological systems and processes of postirradiation recovery are a theoretical basis for the development of practical methods for mitigating negative consequences of chronic exposure for biota and human as well as for new technologies of nature management in areas contaminated with radionuclides.

*Keywords:* radioactive contamination of ecosystems, chronic irradiation, radiobiological effect, exclusion zone, radiation protection, postradiation recovery.

Стаття надійшла 11.04.2012 р.