

Є.М. Мамотюк<sup>1</sup>, В.А. Гусакова<sup>1</sup>,  
Н.Є. Узленкова<sup>1</sup>, С.І. Ревенкова<sup>1</sup>,  
О.В. Ненюкова<sup>1</sup>, В.Н. Іващенко<sup>2</sup>,  
Р.Ю. Циганок<sup>2</sup>, В.Г. Бородин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ДУ Інститут медичної  
радіології ім. С.П. Григор'єва  
АМН України,

<sup>2</sup> ТОВ Науково-виробниче  
підприємство «SINTA»,  
Харків

## Дослідження радіопротекторних властивостей наноалмазів в експерименті

### Experimental investigation of radioprotective properties of nanodiamonds

**Цель работы:** Оценить радиопротекторное действие ультрадисперсных наноалмазов детонационного синтеза в эксперименте.

**Материалы и методы:** В опытах на белых беспородных крысах самках (массой 180–210 г) анализировалось радиозащитное действие вводимой перорально водной суспензии наноалмазов (НА) перед рентгеновским облучением в дозе 6,0 Гр. Эффекты отслеживались на 3-и, 7-е, 14-е и 30-е сутки с помощью радиобиологических, гематологических, биохимических и патологоанатомических методов.

**Результаты:** Установлено, что двукратное введение пер ос крысам суспензии НА (0,5 мг/кг) за 1 и 16 часов до рентгеновского облучения (ДД<sub>70/30</sub>), облегчает течение лучевой болезни, уменьшает проявления желудочно-кишечного синдрома и достоверно снижает смертность (ДД<sub>30-36,8/30</sub>). При этом в меньшей степени защитное действие проявляется по данным гематологических и биохимических исследований, что, очевидно, связано с особенностями локального контактного механизма взаимодействия частиц НА с клетками желудочно-кишечного эпителия животных.

**Выводы:** Водная суспензия ультрадисперсных алмазов детонационного синтеза оказывает заметное радиопротекторное действие на облученных крыс в летальной дозе за счет радиозащиты клеток желудочно-кишечного тракта. Состояние других внутренних органов, системы кроветворения и уровни ряда показателей метаболизма у облученных животных в меньшей степени зависят от предварительного введения НА.

**Ключевые слова:** наноалмазы, ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза, ионизирующая радиация, радиопротекторное действие.

**Мета роботи:** Оцінити радіопротекторну дію ультрадисперсних наноалмазів (НА) детонаційного синтезу в експерименті.

**Матеріали і методи:** В дослідях на білих беспородних щурах самицях (масою 180–210 г) аналізували радіозахисну дію водної суспензії НА, що вводили перорально перед ікс-опроміненням в дозі 6,0 Гр. Ефекти відстежували на 3-тю, 7-му, 14-ту і 30-ту добу за допомогою радіобіологічних, гематологічних, біохемічних і патологоанатомічних методів.

**Результати:** Встановлено, що дворазове введення пер ос щурам суспензії НА (0,5 мг/кг) за 1 і 16 годин до ікс-опромінення (ДД<sub>70/30</sub>) полегшує перебіг променевої хвороби, зменшує прояви шлунково-кишкового синдрому й вірогідно знижує смертність (ДД<sub>30-36,8/30</sub>). При цьому меншою мірою захисна дія проявляється за даними гематологічних і біохемічних досліджень, що, певно, пов'язано з особливостями локального контактного механізму взаємодії частинок НА з клітинами шлунково-кишкового епітелію тварин.

**Висновки:** Водна суспензія ультрадисперсних алмазів детонаційного синтезу справляє помітну радіопротекторну дію на опромінені щури в летальній дозі за рахунок радіозахисту клітин шлунково-кишкового тракту. Стан інших внутрішніх органів, системи кроветворення та рівні ряду показників метаболізму у опромінені тварин меншою мірою залежать від попереднього введення НА.

**Ключові слова:** наноалмази, ультрадисперсні алмази детонаційного синтезу, іонізувальна радіація, радіопротекторна дія.

Дослідження наноалмазів (НА) широко розпочалося після розробки методу їх вибухового одержання. Створені ультрадисперсні алмази детонаційного синтезу (УДА) використовуються в промисловості [1], а останніми роками привернули увагу медиків і біологів [2, 3].

Фізико-хімічні дослідження УДА виявили їх аномально високі адсорбційні властивості за

**Objective:** To assess experimentally radioprotective effect of ultradisperse nanodiamonds of detonation synthesis.

**Material and Methods:** Radioprotective effect of oral administration of water suspension of nanodiamonds (ND) before x-ray exposure at a dose of 6.0 Gy was analyzed experimentally on white mongrel female rats weighing 180–210 g. The effects were traced on day 3, 7, 14, 30 using radiobiological, hematological, biochemical and pathoanatomical methods.

**Results:** It was established that two oral administrations of ND suspension to the rats (0.5 mg/kg) 1 and 16 hours before x-ray exposure (LD<sub>70/30</sub>) relieved the course of radiation sickness, reduced manifestations of gastrointestinal syndrome and significantly decreased mortality (LD<sub>30-36,8/30</sub>). Hematological and biochemical investigations demonstrated less protective effect, which could be associated with the peculiarities of local contact mechanism of ND particles interaction with the cells of the gastrointestinal epithelium of the animals.

**Conclusion:** Owing to radiation protection of the cells of the gastrointestinal tract, water suspension of ultradisperse diamonds of detonation synthesis possesses a marked radioprotective effect on the rats exposed to lethal dose. The state of other inner organs, hemopoietic system and the levels of a number of metabolism parameters in the exposed animals depend less on preliminary administration of ND.

**Key words:** nanodiamonds, ultradisperse diamonds of detonation synthesis, ionizing radiation, radioprotective effect.

рахунок високої питомої поверхні, здатність брати участь у вільнорадикальних реакціях і можливість приєднання до нанокристалів біологічно активних сполук [4–6]. Нині УДА використовують як транспортери лікарських засобів у крові для ліквідації патогенних вірусів і бактерій, з діагностичною метою в онкології, для лікування опіків тощо [7]. В деяких роботах

показана відсутність токсичності УДА, хоча це стосується наноалмазів, добре очищених від імовірних домішок [1, 5, 6].

Разом з тим у доступній літературі не зустрічалося інформації щодо застосування наноалмазів у радіобіологічних аспектах. Утім, описані властивості, зокрема, здатність бути «пасткою» для вільних електронів, що виникли, дають підставу припускати наявність в УДА певної радіозахисної активності.

З огляду на викладене вище метою роботи стало вивчення радіопротекторних властивостей УДА в експерименті на щурах при гострій променевої хворобі (ГПХ).

## Методика дослідження

Ультрадисперсні алмази у вигляді водних суспензій (0,1–0,4) % виготовлені ТОВ НВП «SINTA» (Харків). Слід відзначити, що УДА у водному середовищі через високу поверхневу активність окремих часток конгломерується в агрегати (кластери) і суспензія протягом періоду понад місяць змінює активність. Тому дослідження проводили тільки зі свіжоприготовленими зразками (до 1 місяця). Другою особливістю використовуваних вітчизняних УДА є наявність у них фракцій з низькою дисперсністю, що не дозволяє вводити суспензії безпосередньо в кров тварин через можливі негативні реакції. У зв'язку з цим суспензії НА вводили per os.

Дослідження проводили на білих безпородних щурах самицях масою 180–210 г. Тварин розміщували в умовах віварію на стандартному раціоні. Щурам за допомогою зонда вводили перорально 1 мл 0,01 % -вої водної суспензії НА (0,5 мг/кг) за 16 і 1 годину до ікс-опромінення в дозі 6,0 Гр (по м'яких тканинах). Опромінювали тварин попарно в коробках з оргскла при таких технічних умовах: рентгеноапарат РУМ-3М, напруга на трубці 190 кВ, сила струму 12 мА, фільтри 0,5 мм Cu + 1,0 мм Al, тубус 40 см, потужність дози в центрі порожньої клітки — 0,52 Гр/хв.

У досліджах були використані два зразки НА: № 1 (38 щурів) та № 2 (20 щурів). Отримані результати порівнювали зі змінами в щурів при одному опроміненні (46 щурів). Тварин утримували в стандартних умовах віварію. Для перевірки впливу тільки одних НА на стан тварин була взята група з 10 щурів.

В опроміненіх тварин аналізували величини показників виживаності за 30 днів, частоту ознак гострої променевої хвороби (загальний стан, розвиток шлунково-кишкового синдрому та інші клінічні показники). В окремі серії дослідів (34 тварини) на 3-тій, 7-му, 14-ту і 30-ту добу щурів забивали згідно з вимогами евтаназії під ефірним наркозом і проводили гематологічні та біохімічні дослідження крові, патологоанатомічно аналізували внутрішні органи (кишечник, селезінку, печінку, тимус). У крові визначали на автоматичному аналізаторі Sysmex M-2000 (Японія) вміст лімфоцитів, еритроцитів, тромбоцитів, концентрацію гемоглобіну, гематокрит. У сироватці крові за допомогою біохімічного аналізатора Express Plus (Німеччина) визначали вміст загального білірубину, активність ферментів аланін-амінотрансферази (АЛТ), аспартатамінотрансферази (АСТ),  $\alpha$ -амілази, лужної фосфатази (ЛФ), гамма-глутамілтрансферази (ГГТ), лактатдегідрогенази (ЛДГ), загального білка та вміст альбуміну. Контролем слугували величини показників 10 інтактних щурів.

Частотні величини опрацьовували статистично за точним методом Фішера, а кількісні показники — за Стьюдентом з використанням ліцензійної програми Statistica for Windows r.5.0 відповідно до описаних формул [8].

## Результати та їх обговорення

П'ятиденне введення щурам суспензії № 1 (1,0 мл 0,01 %) і наступне спостереження протягом 30 днів не виявляло в них жодних відхилень від біологічного контролю. За відсутності смертності всі тварини були здоровими, набирали вагу так само, як і в контрольній групі. Це підтверджують відомі дані про нетоксичність НА при введенні їх per os [1].

У тварин, опроміненіх у дозі 6,0 Гр, розвивалася типова гостра променева хвороба з характерними синдромами і наявністю смертності протягом 30 днів спостереження. Щури прогресивно худли, шерсть, починаючи з третьої доби, була скуйовджена до кінця експерименту. В опроміненіх тварин у другій половині терміну спостереження виникало запалення слизової рота, з'являлися кірки на вухах та геморагії.

Початок загибелі піддослідних відзначався на 4-ту добу, період їх масової загибелі припадав на 7–10-ту добу (45 %), смертність за 30 днів склала 70 % ( $LD_{70/30}$ ) при середній тривалості життя загиблих тварин 10,3 доби.

Уведення суспензії НА за 16-ту і 1-шу годину до опромінення істотно змінює ступінь тяжкості променевої хвороби. Спрямованість змін частоти появи ознак променевої хвороби і її тяжкості були однаковими для двох зразків. На рис. 1 представлені результати дослідження радіопротекторного впливу УДА на 30-добову виживаність опроміненіх тварин. З них випливає, що виживаність для двох зразків НА, практично не розрізняючись між собою (для зразка № 1  $LD_{36,8/30}$ , для зразка № 2  $LD_{30/30}$  при  $p < 0,2$ ), значуще вища в порівнянні з такою при одному опроміненні ( $LD_{70/30}$ ,  $p > 0,05$ ). Вищою виявляється і середня тривалість життя в опроміненіх щурів, захищених введенням НА (14,8 доби для зразка № 1). Радіаційно спричинена загибель у тварин із введенням НА розпочиналася пізніше (8-ма і 11-та доба для, відповідно, зразка НА № 1; 2-га і 4-та доба — при одному опроміненні). Період масової загибелі тварин припадає на 8–11-ту добу

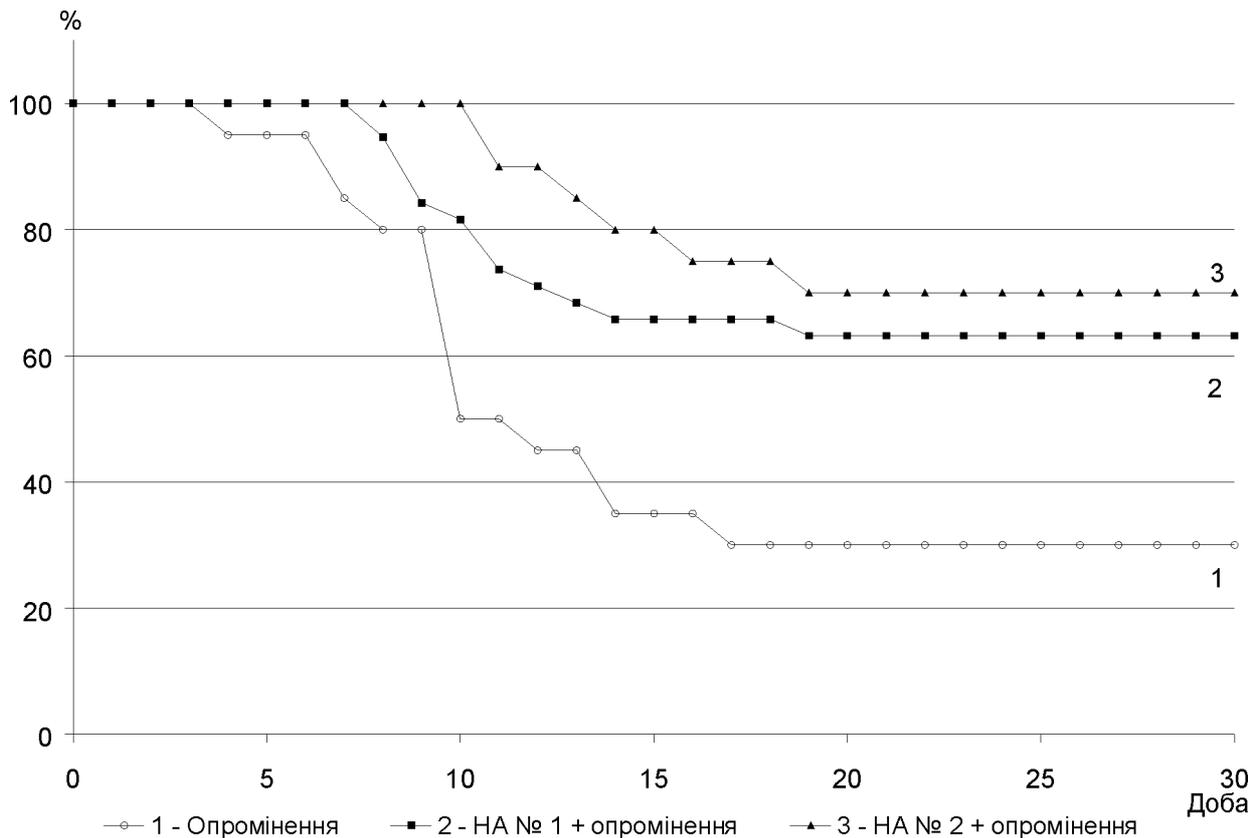


Рис. 1. Вживаність опромінених щурів при введенні суспензії НА (№ 1, 2) як радіопротектора  
 Fig. 1. Survival of irradiated rats at administration of ND suspension (No. 1, 2) as radioprotector

(26,2 %) для зразка НА № 1 і 11–14-ту добу (20 %) для зразка НА № 2 проти 7–10-ї доби (45 %) при одному опроміненні. Слабше виражені клінічні прояви променевої хвороби у щурів із протекторним введенням НА. Особливо чітко це можна побачити за частотою появи ознак шлунково-кишкового синдрому. Таблиця 1 демонструє меншу частоту виникнення ознак розвитку цього раннього важкого променевого ураження ШКТ у щурів, захищених введенням зразка НА № 1 перед опромінюванням (зразок НА № 2 дав аналогічні результати).

У таблиці 1 наведені дані для ранньої ознаки «роздутий живіт» і більш тяжкої, що виникає пізніше, «діарея».

З наведених даних можна побачити, що ознака «роздутий живіт» лише при одному опроміненні з'являється вже на 1-шу добу, максимальна частота відзначається на 2–3-тю добу і далі зникає до 5-ї доби. Введення НА змінює терміни появи і вираженість ознаки на пізніші терміни до 7 діб.

Більш тяжка ознака «діарея» раніше з'являється при одному лише опроміненні, з частотою на 2–6-ту добу вірогідно вищою, ніж у захищених щурів, і її ознаки спостерігаються до 11-ї доби проти 8-ї доби в опромінених тварин із введеними НА.

В окремі серії тільки опромінених тварин і опромінених тварин з введеною суспензією НА № 2 проаналізовані зміни величин гематологічних і біохімічних показників на 3-тю, 7-му, 14-ту і 30-ту добу. Таблиці 2 і 3 демонструють зміни значень цих показників, вміст у периферичній крові формених елементів крові (лімфоцитів, тромбоцитів і еритроцитів) на 3-тю, 7-му, 14-ту і 30-ту добу після опромінювання двох груп щурів. Як впливає з табл. 2, ікс-опромінення тварин призводить у них до вірогідного раннього зниження в крові (1–2-й тиждень) вмісту лімфоцитів і тромбоцитів і такого ж, але невірогідного, зниження числа еритроцитів, що типово для розвитку гострої променевої хвороби. Можна побачити, що введення НА перед опромінюванням практично не позначаєть-

Частота ознак розвитку в щурів гострої променевої хвороби («роздутий живіт», «діарея») у дослідах з рентгеновським опроміненням у дозі 6,0 Гр і з введенням суспензії зі свіжого зразка НА № 1  
Incidence of the signs of acute radiation sickness in rats (abdominal distention, diarrhea) in the experiments with x-ray exposure at a dose of 6.0 Gy with administration of suspension from a fresh ND No. 1 sample

Доба після опромінення	Роздутий живіт				Діарея			
	О, 6,0 Гр, n <sub>заг.</sub> = 46		НА 1 + О, n <sub>заг.</sub> = 38		О, 6,0 Гр, n <sub>заг.</sub> = 46		НА 1 + О, n <sub>заг.</sub> = 38	
	n	%	n	%	n	%	n	%
1	10	21,5	0 **	0	0	0	0	0
2	24	52,2	3 **	7,9	5	10,9	0	0
3	37	80,4	25	65,8	16	34,8	7 **	18,4
4	6	13,0	15 **	39,5	15	32,6	0 **	0
5	0	0	3	7,9	6	13,0	0 **	0
6	0	0	11 **	28,9	7	15,2	4 **	10,5
7	0	0	3	7,9	2	4,3	5	13,2
8	0	0	0	0	2	2,2	0	0
9	0	0	0	0	1	2,2	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	1	2,2	0	0

Примітка. \*\* — вірогідно при порівнянні між групами,  $p < 0,05$ .

Зміна рівнів гематологічних показників у щурів у дослідах з ікс-опроміненням у дозі 6,0 Гр і введенням суспензії НА № 2  
Changes of the levels of hematological parameters in rats in the experiments with x-ray exposure to the dose of 6.0 with administration of suspension from a fresh ND No. 2 sample

№ з/р	Термін дослідження	Опромінення			НА + опромінення		
		n	$\bar{X} \pm S\bar{x}$	$\bar{X} \pm S\bar{x}, \%$	n	$\bar{X} \pm S\bar{x}$	$\bar{X} \pm S\bar{x}, \%$
Вміст лімфоцитів, $10^9/\text{л}$							
1	БК	10	$6,32 \pm 0,44$	$100,0 \pm 7,0$	–	–	–
2	3-тя доба	6	$1,18 \pm 0,10^*$	$18,7 \pm 1,5$	6	$1,22 \pm 0,12^*$	$19,3 \pm 1,9$
3	7-ма доба	6	$0,52 \pm 0,05^*$	$8,2 \pm 0,9$	6	$0,65 \pm 0,08^*$	$10,7 \pm 1,2$
4	14-та доба	6	$3,42 \pm 0,72^*$	$54,1 \pm 11,3$	6	$1,47 \pm 0,13^{***}$	$23,2 \pm 2,0$
5	30-та доба	6	$4,28 \pm 0,44^*$	$67,8 \pm 7,0$	6	$6,87 \pm 0,74^{**}$	$108,7 \pm 11,7$
Вміст тромбоцитів, $10^9/\text{л}$							
6	БК	10	$678,6 \pm 87,5$	$100,0 \pm 12,9$	–	–	–
7	3-тя доба	6	$886,3 \pm 74,5$	$130,6 \pm 11,0$	6	$699,7 \pm 70,1$	$103,1 \pm 10,3$
8	7-ма доба	6	$59,5 \pm 8,1^*$	$8,8 \pm 2,9$	6	$49,8 \pm 8,0^*$	$7,3 \pm 1,2$
9	14-та доба	6	$43,5 \pm 4,3^*$	$6,4 \pm 0,6$	6	$84,7 \pm 7,6^*$	$12,5 \pm 1,1$
10	30-та доба	6	$706,0 \pm 101,4^*$	$104,0 \pm 14,9$	6	$728,0 \pm 126,1$	$107,3 \pm 18,6$
Вміст еритроцитів, $10^9/\text{л}$							
11	БК	10	$7,40 \pm 0,15$	$100,0 \pm 2,0$	–	–	–
12	3-тя доба	6	$7,99 \pm 0,63$	$106,6 \pm 8,5$	3	$6,62 \pm 0,65$	$89,5 \pm 8,8$
13	7-ма доба	6	$6,23 \pm 0,68$	$84,1 \pm 9,2$	3	$5,13 \pm 0,42$	$69,3 \pm 5,7$
14	14-та доба	6	$4,24 \pm 0,50$	$57,3 \pm 6,8$	5	$3,70 \pm 0,94$	$49,9 \pm 12,7$
15	30-та доба	6	$6,56 \pm 0,16$	$88,6 \pm 2,2$	3		$85,4 \pm 3,0$

Примітка. \* — вірогідно при порівнянні з біологічним контролем (БК),  $p < 0,05$ ; \*\* — вірогідно при порівнянні між групами,  $p < 0,05$ .

ся на динаміці характерних змін значень гематологічних показників. Спостерігаються лише невеликі розбіжності щодо вмісту лімфоцитів на 14-ту і 30-ту добу та відсутність вірогідних відмінностей щодо кількості в крові тромбоцитів і еритроцитів. Така ж відсутність розбіжностей відзначається й щодо інших гематологічних параметрів (вміст гемоглобіну, середній об'єм клітин та ін.). Усе це вказує на те, що радіопротекторна дія суспензій НА, введених у ШКТ, помітно не поширюється на діяльність кровотворної системи опроміненних тварин.

За даними біохемічних досліджень, введення щурам НА перед опромінюванням дало не дуже виразний ефект. Так, не виявлено переваг протирадіаційної дії НА за даними білкового метаболізму (вміст загального білка й альбуміну в сироватці). Падіння рівня загального сироваткового білка й альбуміну на 3–7-му добу після опромінювання до (80–85) % з подальшою нормалізацією до 30-ї доби було статистично не помітним в обох групах щурів. Також вірогідно не розрізнялася динаміка змін активності ферменту ЛДГ, рівень якого істотно знизився на 7-му добу до (41,4 ± 3,3) % при одному лише опроміненні і до (37,3 ± 4,8) % від контролю в групі щурів з НА, що статистично не значуще ( $p > 0,05$ ); також вірогідно не розрізняючись, значення показників ЛДГ нормалізувалися до 30-ї доби.

Не виявлено розбіжностей у характері змін при визначенні в двох групах щурів вмісту в сироватці крові загального білірубину.

Децю більш виразно розрізнялися зміни активності деяких сироваткових ферментів, пов'язаних з функціональною діяльністю печінки (див. табл. 3). Так, ферменти АЛТ, АСТ, ГГТ проявили загальний характер змін у двох групах щурів: виражене вірогідне падіння їх активності на 3-тю–7-му добу після опромінювання на (23–62) % і поступове повернення до контрольних значень. Однак у більшості випадків активність зазначених ферментів менше змінювалася й у певний термін вірогідно та швидше поверталася до норми в групі опроміненних щурів, захищених НА.

Аналогічний характер змін відзначений і для ферменту ЛФ. Активність же  $\alpha$ -амілази, більш низька на 3–14-ту добу, після опромінювання

стала вірогідно перевищувати свій рівень у групі щурів з НА в порівнянні з одним лише ікс-опроміненням тільки на 30-ту добу. При цьому її значення вірогідно перевищили і норму (152,7 ± 9,5) %.

Таким чином, біохемічні дослідження крові опроміненних тварин свідчать про наявність виражених зрушень в обміні речовин, які вияв-

Таблиця 3

Активність ферментів сироватки крові у щурів у дослідах з ікс-опроміненням у дозі 6,0 Гр і введенням суспензії НА № 2 (Од/л)  
Blood serum enzyme activity in rats in the experiments with x-ray exposure at a dose of 6.0 Gy at administration of suspension from a fresh ND No. 2 sample (U/l)

№ з/р	Показник	Опромінення	НА + опромінення
		X ± Sx	X ± Sx
Біологічний контроль (n = 10)			
1	АЛТ	87,3 ± 5,68	–
2	АСТ	203,5 ± 9,66	–
3	-амілаза	2019,8 ± 89,5	–
4	ЛФ	500,8 ± 45,8	–
5	ГГТ	7,80 ± 0,70	–
3-тя доба після опромінення (n <sub>1</sub> = 6, n <sub>2</sub> = 6)			
6	АЛТ	33,1 ± 1,89 *	42,6 ± 2,60 *
7	АСТ	155,9 ± 7,11 *	164,2 ± 5,71 *
8	-амілаза	2393,0 ± 290,9	1842,3 ± 44,30
9	ЛФ	126,8 ± 16,0 *	75,0 ± 9,10 ***
10	ГГТ	4,67 ± 0,42 *	6,92 ± 0,82 **
7-ма доба після опромінення (n <sub>1</sub> = 6, n <sub>2</sub> = 6)			
11	АЛТ	52,7 ± 3,56 *	44,4 ± 5,18 *
12	АСТ	126,9 ± 4,4 *	140,9 ± 15,7 *
13	-амілаза	1118,8 ± 97,9 *	777,2 ± 85,0 ***
14	ЛФ	83,8 ± 9,3 *	116,7 ± 16,3 *
15	ГГТ	6,83 ± 0,54	9,42 ± 0,80 **
14-та доба після опромінення (n <sub>1</sub> = 6, n <sub>2</sub> = 6)			
16	АЛТ	68,2 ± 9,79	77,5 ± 8,68
17	АСТ	155,3 ± 11,3 *	162,2 ± 7,67
18	-амілаза	1759,2 ± 252,3	1131,8 ± 127,5 *
19	ЛФ	210,7 ± 24,1 *	364,5 ± 70,6
20	ГГТ	7,33 ± 1,05	9,17 ± 2,02
30-та доба після опромінення (n <sub>1</sub> = 6, n <sub>2</sub> = 6)			
21	АЛТ	52,9 ± 2,98 *	85,5 ± 4,72 **
22	АСТ	196,2 ± 14,2 *	179,6 ± 9,8
23	-амілаза	1887,8 ± 146,9	3084,0 ± 192,8 ***
24	ЛФ	233,0 ± 28,3 *	433,2 ± 48,4 **
25	ГГТ	7,17 ± 0,70	7,75 ± 1,07

Примітка. \* – вірогідно при порівнянні з БК,  $p < 0,05$ ;  
\*\* – вірогідно при порівнянні між групами,  $p < 0,05$ .

ляються зміною активності сироваткових ферментів, пов'язаних з діяльністю печінки, підшлункової залози, порушеннями білково-синтетичної функції організму. Отримані результати узгоджуються з відомими даними літератури про зміну метаболізму у тварин при ГПХ.

Як впливає з викладеного, радіопротекторна дія НА, яка проявилася при ГПХ в пом'якшенні шлунково-кишкового синдрому і зменшенні тяжкості хвороби, меншою мірою позначилася на рівнях показників метаболізму в опромінених тварин і в зміні в них вмісту формених елементів крові. Є підстави припускати, що подібне явище пов'язане з контактною дією НА на радіочутливі клітини кишкового епітелію, при якому адсорбовані на клітинні мембрани частки НА певною мірою захищають ці клітини від променевого ураження. Здатність до адсорбції НА на живі клітини організму показана в праці [9] і підтверджена нами, чому буде присвячене наступне повідомлення.

З огляду на встановлену здатність наноалмазів бути «пасткою» вільних радикалів [1], можливий контакт НА з клітинами мусить вести до підвищення їх радіостійкості, що спостерігається в даному випадку. Проведені патологоанатомічні дослідження щурів в описаних вище експериментах підтверджують наявність захисту тканин ШКТ, що виражається таким чином: у тварин, підданих радіаційному опромінюванню, на ранніх термінах спостереження (3–7-ма доба) передшлунки виражено збільшені, переповнені хімусом, що свідчить про затримку їх евакуаторної функції і порушення травлення. Фундальні відділи шлунків різко скорочені, з рідкувато-кривавим вмістом, який вказує на геморагічний ексудат, рельєф складок фундальної частини шлунків згладжений. Кишкові відділи з яскраво вираженою ознакою кишкового синдрому роздуті, тонкий кишечник з рясним рідким вмістом, пейєрові бляшки визначити складно. Товстий кишечник переповнений рідкими буруватими масами.

Упродовж другої половини променевої хвороби — на 14–30-ту добу відзначали інтенсивний геморагічний стаз капілярної мережі брижі.

У тварин, які одержали перед опромінюванням суспензію НА, патологічних змін стану ШКТ було виявлено значно менше. Так, у першу

половину хвороби зменшувалося співвідношення відділу передшлунка і фундальної частини, що свідчить про поліпшення евакуаторної функції шлунка; був майже відсутній геморагічний ексудат; спостерігалася невелика роздутість і менша набряклість тонкого кишечника. У товстому кишечнику виявлялася незначна кількість буруватих мас випорожнення, або їх зовсім не було. В усі терміни дослідження різні відділи ШКТ мали порівняно менш виражені ознаки променевого ураження. Поряд з цим стан інших внутрішніх органів опромінених щурів у двох групах, маючи загальні ознаки перебігу гострої променевої хвороби такі, як акцидентальна інволюція тимуса, селезінки, сліди геморагічних порушень та інше, мало розрізнялися між собою. Спостерігається тільки тенденція до наявності меншої кількості ушкоджень у захищених щурів. Подібні розбіжності між вираженим радіозахистом ШКТ і відсутністю помітного ефекту від введення НА в інших органах очевидно пов'язані з тим, що введені  $^{90}\text{Sr}$  частки не проникають у помітній кількості через стінки кишечника в кров і практично не чинять радіозахисного впливу на внутрішні органи.

Поліпшення ж загального стану щурів і невиражена позитивна зміна величин біохімічних, гематологічних та інших показників в опромінених щурів мають, на фоні введення НА, опосередкований характер через менше промєнове ушкодження ШКТ. Слід вважати, що використання більш однорідних і більш дрібнодисперсних НА, які можна буде вводити безпосередньо в організм іншим шляхом, дозволить одержати генералізований радіозахисний ефект.

## ВИСНОВКИ

1. Водна суспензія наноалмазів детонаційного синтезу, введена двічі  $^{90}\text{Sr}$  щурам у дозі 0,5 мг/кг за 1 і 16 годин перед ікс-опроміненням (6,0 Гр) полегшує тяжкість гострої променевої хвороби, вірогідно знижуючи смертність тварин із  $LD_{70/30}$  до  $LD_{30-36,8/30}$ .

2. Найбільш чітко це виражається в меншому ураженні шлунково-кишкового тракту, що впливає зі зниження частоти ознак «роздутий

живіт» і «діарея», і меншої виразності ознак його променевого ураження при патологоанатомічному аналізі на 3–30-ту добу.

3. Стан інших внутрішніх органів, рівні гематологічних і біохемічних показників не мають істотних розбіжностей у динаміці змін після ікс-опромінення в щурів із введенням і без введення НА.

4. Механізм установленого радіозахисного ефекту може бути пов'язаний з контактною взаємодією часток НА з мембранами клітин шлунково-кишкового тракту опромінених щурів.

### Література

1. Долматов В.Ю. // Успехи химии. — 2001. — Т. 70, № 7. — С. 687–708.
2. Долматов В.Ю. // Сверхтверд. матер. — 2000. — № 3. — С. 82–85.
3. Иванов А.М. [Електронний ресурс] / А.М. Иванов, И.В. Шугалей, В.В. Тофтунова и др. — Режим доступа: <http://www.infectology.ru>
4. Богатырева В.П. // Сверхтверд. матер. — 1999. — № 6. — С. 42–46.
5. Верещагин А.А. // Сб. докладов IX Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. — Суздаль, 1989. — С. 14–18.
6. Кулакова И.Н. // Сверхтверд. матер. — 2000. — № 1. — С. 46–53.
7. Долматов В.Ю. // Матер. 6-й Всерос. междунар. конференции, 19–23 августа 2002, Томск. — М.: Изд-во МИФИ, 2002. — С. 370–371.
8. Лакин Г.Ф. Биометрия. — М.: Высшая школа, 1990. — 352 с.
9. Safronova V.G. // 3<sup>rd</sup> Internat. Sympos. Detonat. Nanodiamonds: Technol., Propert. and Applicat. «Nano Diamond' 2008», StPetersburg, Russia, July 01–04, 2008. — StPetersburg, 2008. — P. 19–20.

Надходження до редакції 24.02.2009.

Прийнято 04.03.2009.

Адреса для листування:

Мамотюк Євгеній Михайлович,  
ДУ Інститут медичної радіології ім. С.П. Григор'єва АМНУ,  
вул. Пушкінська, 82, Харків, 61024, Україна