

УДК 577.34:595.111 (06)

Н. А. Поморцева✉, Д. І. Гудков*Інститут гідробіології Національної академії наук України, пр-т Героїв Сталінграда, 12, м. Київ, 04210, Україна*

ВПЛИВ ДОДАТКОВОГО ГОСТРОГО ОПРОМІНЕННЯ НА ЦИТОМОРФОЛОГІЧНІ ПОРУШЕННЯ ЕРИТРОЦИТІВ КАРАСЯ СРІБЛЯСТОГО (*CARASSIUS GIBELIO* BLOCH) ІЗ ЗАБРУДНЕНОЇ РАДІОНУКЛІДАМИ ВОДОЙМИ

Мета: оцінка впливу додаткового гострого опромінення (ДГО) у сублетальному діапазоні на особливості формування якісного складу червоної крові та адаптаційні можливості кровотворної системи риб у забруднених радіонуклідами водоймах в межах Чорнобильської зони відчуження (ЧЗВ).

Матеріали і методи досліджень. Досліджували карася сріблястого *Carassius gibelio* Bloch (віком 2–3 роки) з оз. Вершина (імпактна водойма у ЧЗВ) і оз. Діброва (референтна водойма), для яких усереднена потужність поглиненої дози (ППД) становила відповідно 110,80 і 0,07 мкГр/год. Риб одноразово опромінювали на рентгєнівській установці РУМ-17 (ППД – 0,89 Гр/хв) у дозах 2,5; 5,0 або 10,0 Гр. Морфологічні і цитогенетичні дослідження червоної крові виконано в динаміці на 1, 7 і 30-ту добу після опромінення. Кров відбирали з хвостової вени і фарбували за Паппенгеймом. Цитоморфологічні порушення еритроцитів аналізували на 3000 клітин (%).

Результати. У крові риб імпактної водойми (оз. Вершина) на першу добу після ДГО середня кількість всіх типів деформацій клітин еритроцитів зросла у 2,1 раза, а у риб референтної водойми (оз. Діброва) – у 5,2 раза. Загальний спектр порушень еритроцитів у риб оз. Вершина збільшився з 4 до 6 типів (у 1,5 раза), а оз. Діброва – з 2 до 5 (у 2,5 раза). Однак подальші спостереження за динамікою морфологічних порушень еритроцитів риб з оз. Вершина на 7-му і 30-ту добу після ДГО виявили значне посилення патологічних процесів порівняно з референтною водоймою, а саме – збільшення кількості грубих пошкоджень молекул ДНК – амітозів (в середньому в 14,8 раза), еритроцитів з перегородкою в ядрі (в 1,9 раза), а також структурних порушень в клітинах – протуберанців (в 10,5 раза), клітин з вакуолізованою цитоплазмою (в 8,6 раза).

Висновки. Клітини червоної крові риб імпактної водойми виявляють більшу уразливість до ДГО, що проявляється у збільшенні кількості еритроцитів з патологією мітозу і може свідчити про порушення генетичних структур клітин внаслідок тривалого радіаційного впливу.

Ключові слова: Чорнобильська зона відчуження, радіонуклідне забруднення, риби, периферична кров, додаткове гостре опромінення, морфологічні порушення еритроцитів.

Проблеми радіаційної медицини та радіобіології. 2019. Вип. 24. С. 270–283. doi: 10.33145/2304-8336-2019-24-270-283

✉ Поморцева Наталія Анатоліївна, e-mail: natapomorceva@gmail.com

N. A. Pomortseva✉, D. I. Gudkov

Institute of Hydrobiology of the National Academy of Sciences of Ukraine, 12 Heroiv Stalinhgradu Ave., Kyiv, 04210, Ukraine

EFFECT OF ADDITIONAL ACUTE IRRADIATION ON CYTOMORPHOLOGICAL ABNORMALITIES OF ERYTHROCYTES OF THE PRUSSIAN CARP (*CARASSIUS GIBELIO* BLOCH) FROM WATER BODY CONTAMINATED WITH RADIONUCLIDES

Objective. Assessment of the effect of additional acute irradiation (AAI) in sub-lethal range on the peculiarities of formation of qualitative composition of red blood and adaptive possibilities of the hematopoietic system of fish in reservoirs within the Chernobyl Exclusion Zone (CEZ), contaminated with radionuclides.

Materials and methods. We studied the Prussian carp *Carassius gibelio* Bloch (2–3 years old) from Vershyna Lake (impacted reservoir in the CEZ) and Dibrova Lake (reference reservoir), where the average absorbed dose rate (ADR) was, respectively, 110.80 and 0.07 $\mu\text{Gy/h}$. The fish were exposed by a single X-ray dose at the unit RUM-17 (ADR – 0.89 Gy/min) at dose of 2.5, 5.0 and 10.0 Gy. Morphological and cytogenetic studies of red blood cells were performed dynamically for the 1st, 7th and 30th day after irradiation. The blood was taken from the tail vein and stained by Pappenheim's method. Cytomorphological abnormalities of erythrocytes were analyzed for 3000 cells (%).

Results. In blood of fish from the impacted reservoir (Vershyna Lake) on the 1st day after AAI, the average number of all types of deformations of erythrocytes cells increased in 2.1 times, and in fish of the reference reservoir (Dibrova Lake) – in 5.2 times. General spectrum of erythrocyte disturbances in fish of Vershyna Lake has increased from 4 to 6 types (in 1.5 times), and Dibrova Lake – from 2 to 5 types (in 2.5 times). However, further observations of the dynamics of morphological disorders of fish's blood cells from Vershyna Lake on the 7th and the 30th day after AAI showed a significant increase in pathological processes in comparison with the reference reservoir, namely – an increase in the number of gross damage of DNA molecules – amitosis (on average in 14.8 times), erythrocytes with septum in the nucleus (in 1.9 times), as well as structural disorders in the cells – protuberances (in 10.5 times), cells with vacuolate cytoplasm (in 8.6 times).

Conclusions. The red blood cells of the fish of the impacted reservoir show a greater vulnerability to AAI, which manifests itself in an increase in the number of erythrocytes with pathology of mitosis and may indicate a violation of the genetic structures of cells due to long-term radiation exposure.

Key words: Chernobyl Exclusion Zone, radioactive contamination, fish, peripheral blood, additional acute irradiation, morphological disorders of red blood cells.

Problems of Radiation Medicine and Radiobiology. 2019;24:270-283. doi: 10.33145/2304-8336-2019-24-270-283

ВСТУП

Радіонуклідне забруднення водойм спричиняє різної складності ушкодження гідробіонтів, серед яких найбільш радіаційно-уразливими є риби [1–5]. Кровотворна система риб виявляє високу чутливість до дії радіаційного чинника. Відомо, що зміни у складі крові виникають навіть за дії на організм порівняно малих доз іонізуючого опромінення [6, 7]. І хоча гематологічні дослідження в межах Чорнобильської зони відчуження (ЧЗВ) виконувались переважно на ссавцях, наявні дані експериментальних робіт, а також досліджень, виконаних у інших зонах аварійного впливу підприємств ядерного паливного циклу

INTRODUCTION

Radioactive contamination of water bodies causes various difficulties in damaging hydrobionts, among them the most radioactive-vulnerable are fish [1–5]. The hematopoietic system of fish exhibits high sensitivity to the impact of the radiation factor. It is known that changes in blood composition occur even when the body acts on comparatively small doses of ionizing radiation [6, 7]. Although hematological studies within the Chernobyl Exclusion Zone (CEZ) were performed mainly on mammals, available experimental data and studies carried out in other areas of emergency exposure of nuclear fuel cycle enterprises (in particular the Mayak Production

✉Natalia A. Pomortseva, e-mail: natapomorceva@gmail.com

(зокрема, ПО «Маяк», Челябінська обл., РФ), свідчать, що іонізувальне опромінення у малих дозах призводить до порушень системи кровотворення [1, 8] та зростання морфологічних аномалій клітин крові у риб [9–15].

Дослідження [12, 16] свідчать, що за тривалого радіаційного навантаження у малих дозах в клітинах живих організмів не завжди відбуваються грубі, морфологічно помітні порушення. Найчастіше ці порушення носять латентний характер і можуть передаватися у низці поколінь. Тому особливої актуальності набувають дослідження, пов'язані з оцінкою ефективності додаткового гострого опромінення (ДГО) тварин, які мешкають у природних екосистемах в умовах тривалого радіонуклідного забруднення, і які певним чином можуть дати відповідь на питання — чи відбуваються адаптаційні процеси у живих організмів, які зазнали хронічного радіаційного впливу?

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Оцінка впливу ДГО у сублетальному діапазоні на особливості формування якісного складу червоної крові та адаптаційні можливості кровотворної системи риб у забруднених радіонуклідами водоймах в межах ЧЗВ.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Для експериментальних досліджень використали 192 особини карася сріблястого *Carassius gibelio* Bloch (віком 2–3 роки) з оз. Вершина (імпактна водойма у ЧЗВ) і оз. Діброва (референтна водойма з фоновим рівнем радіонуклідного забруднення), для яких середня потужність поглиненої дози (ППД) становила, відповідно, 110,80 і 0,07 мкГр/год. Додаткове опромінення риб проводили на базі Державної установи «Національний інститут раку» МОЗ України. Риб одноразово опромінювали на рентгенівській установці РУМ-17 у дозі 2,5; 5,0 або 10,0 Гр (ППД — 0,89 Гр/хв). Аналізували вісім вибірок риб по 24 особини у кожній — три вибірки, опромінені у різних дозах, і неопромінений контроль для обох озер. Морфологічні й цитогенетичні дослідження виконано в динаміці на 1, 7 і 30-ту добу після опромінення. Від кожної особини відбирали кров з хвостової вени, робили по три препарати периферійної крові і фарбували за Паппенгеймом [17]. Кількісні і якісні морфологічні порушення еритроцитів аналізували на 3000 клітин (‰).

Association, Chelyabinsk region, Russia) indicate that ionizing radiation in small doses leads to violations of the system of hematopoiesis [1, 8] and the growth of morphological anomalies of blood cells in fish [9–15].

The studies [12, 16] show that rough, morphologically significant violations do not always occur in long-term radiation exposure in small doses on living body cells. Often, these violations are latent in nature and can be transmitted in a number of generations. Therefore, studies related to the assessment of the effectiveness of additional acute irradiation (AAI) of animals that live in natural ecosystems under long-term radioactive contamination are of particular relevance, and which can somehow answer the question — are there adaptation processes in living organisms that have undergone by the chronic radiation exposure?

OBJECTIVE

Assessment of the effect of AAI in sub-lethal range on the peculiarities of formation of qualitative composition of red blood and adaptive possibilities of the hematopoietic system of fish in reservoirs within the CEZ, contaminated with radionuclides.

MATERIALS AND METHODS

For experimental research, 192 specimens of the Prussian carp *Carassius gibelio* Bloch (aged 2–3 years) from Verzhyna Lake (impacted reservoir in the CEZ) and Dibrova Lake (reference reservoir with background level of radioactive contamination), for which the average absorbed dose rate (ADR) was, respectively, 110.80 and 0.07 $\mu\text{Gy/h}$. Additional irradiation of fish was carried out on the basis of the National Cancer Institute of the Ministry of Health of Ukraine. The fish were exposed to one-time X-ray irradiation at the unit RUM-17 at dose of 2.5, 5.0 and 10.0 Gy (ADR — 0.89 Gy/min). Eight fish samples were analyzed in 24 individuals in each — three samples, irradiated with different doses, and none-irradiated control for both lakes. Morphological and cytogenetic studies performed dynamics on the 1st, 7th and 30th day after irradiation. Blood was taken from the caudal vein, done on three smears of peripheral blood from each individual and stained by Pappenheim method [17]. Quantitative and qualitative morphological disorders of erythrocytes were analyzed for 3000 cells (‰).

Оцінку ППД для риб у природних водоймах виконували на основі даних питомої активності головних дозоутворювальних радіонуклідів ^{90}Sr і ^{137}Cs у воді, донних відкладах і тканинах риб за допомогою програмного забезпечення ERICA Assessment Tool 1.2.1. Статистичну обробку даних проводили з використанням загальноприйнятих методів [18, 19] і за допомогою програм MS Excel та STATISTICA 5.5.

Патоморфологічні зміни структури еритроцитів ідентифікували згідно з [20] і поділяли їх на структурні порушення і порушення мітозу (рис. 1). До структурних порушень відносили такі:

- 1) деформація ядра, або інвагінація — ядро має неправильну форму при збереженні нормальних розмірів, структура хроматину ядра та розміри самої клітини також відповідають нормі (відзначається при тяжких токсикозах у ставкових і озерних риб);
- 2) пристінкове ядро — розташоване не в центрі, а зміщене до краю цитоплазми, іноді стикається з оболонкою (виникає внаслідок порушення тургору клітини, як правило при набуханні);
- 3) вакуолізована цитоплазма — так зване «закипання» цитоплазми внаслідок набрякання мітохондрій і деструкції мембран органел;
- 4) пікноз — ущільнення базихроматину ядра, яке стає темним і безструктурним, розміри клітини зменшуються (виникає в процесі апоптозу при старінні клітин);
- 5) каріоліз — розчинення частини ядра зі збереженням його нормальної структури;
- 6) мікроцит — зменшені у 4–6 разів еритроцити, які утворюються з дрібних еритробластів у кровотворному органі, або при розпаді самих еритроцитів при проходженні кров'яного русла;
- 7) шистоцити — без'ядерні фрагменти еритроцитів;
- 8) цитоліз — розпад клітини, при якому цитоплазма частіше відсутня, ядро втрачає свою звичайну структуру, а його контури розпливчасті (у тяжких випадках можна виявити тільки залишки ядра і зернистість);
- 9) хроматиноліз — розпад хроматину з втратою його нормальної структури, ядро забарвлюється у світлий колір, його контури зберігаються;
- 10) протуберанці — вихід хроматинових ниток ядра у внутрішньоклітинний простір;
- 11) каріорексис — ядро, зберігаючи оболонку, починає розкладатися на окремі частини.

До порушень мітозу клітин відносили такі форми (рис. 1, М–С):

The assessment of ADR for fish in natural waters was performed on the basis of the data of the specific activity of the main dose-forming radionuclides ^{90}Sr and ^{137}Cs in water, bottom sediments and fish tissues using the ERICA Assessment Tool 1.2.1 software. Statistical data processing was performed using commonly used methods [18, 19] and using MS Excel and STATISTICA 5.5 programs.

Pathomorphological changes in the structure of erythrocytes were identified according to [20] and divided into structural disorders and disorders of mitosis (Fig. 1). Structural disorders include the following:

- 1) deformation of the nucleus, or invagination — the nucleus has an irregular shape while maintaining normal size, the structure of the chromatin of the nucleus and the size of the cell is also correspond to the norm (observed in severe toxicosis in pond and lake fish);
- 2) parietal nucleus — is located not in the center, but displaced to the edge of the cytoplasm, sometimes encounters the shell (occurs as a result of violation of the cell's turgor, as a rule, when swelling);
- 3) vacuolate cytoplasm — the so-called «boiling» of the cytoplasm due to swelling of mitochondria and destruction of organelle's membranes;
- 4) piknosis — the consolidation of the basechromatin of the nucleus, which becomes dark and unstructured, the size of the cells decreases (occurs during apoptosis when aging cells);
- 5) karyolysis — dissolution of a part of nucleus with preservation of its normal structure;
- 6) microcyte — reduced red blood cells in 4–6 times, which are formed from small erythroblast in the hematopoietic organ, or when the erythrocytes collapse at the passage of the bloodstream;
- 7) schistocyte — non-nuclear fragments of erythrocytes;
- 8) cytolysis — cell disintegration, in which the cytoplasm is absent more often, the nucleus loses its usual structure, and its contours are vague (in severe cases it is possible to detect only the remnants of the nucleus and granularity);
- 9) chromatinolysis — the disintegration of chromatin with the loss of its normal structure, the nucleus is painted in light color, its contours are preserved;
- 10) protuberances — the output of the chromatin threads of the nucleus into the intracellular space;
- 11) karyorrhexis — the nucleus, while storing the cell envelope, begins to decompose into separate parts.

The disorders of cells' mitosis were the following forms (Fig. 1, M–S):

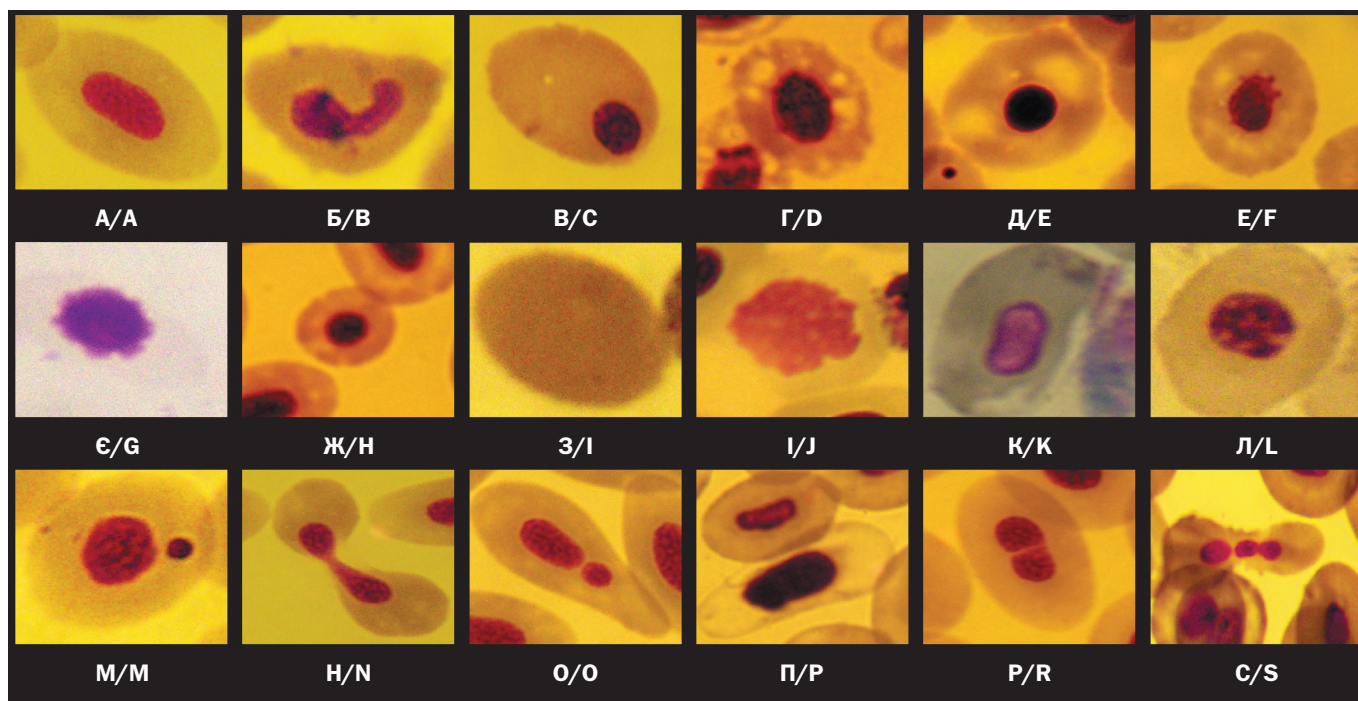


Рисунок 1. Структурні порушення еритроцитів.

(А) нормальний еритроцит; (Б) деформація ядра; (В) пристінкове ядро; (Г) вакуолізована цитоплазма; (Д) пікноз; (Е) протуберанці; (Є) каріоліз; (Ж) мікроцит; (З) шистоцит; (І) цитоліз; (К) хроматиноліз; (Л) каріорексис. Порушення мітозу: (М) мікроядро; (Н) амітоз; (О) двоядерний еритроцит; (П) поліплоїдний еритроцит; (Р) перегородка в ядрі; (С) триядерний еритроцит.

Figure 1. Structural disorders of erythrocytes.

(A) normal erythrocyte; (B) deformation of nucleus; (C) parietal nucleus; (D) vacuolate cytoplasm; (E) piknosis; (F) protuberances (G) kariolysis; (H) microcyte; (I) schitocyte; (J) cytolysis; (K) chromatolysis; (L) karyorrhexis. Disorders of mitosis: (M) micronucleus; (N) amitosis; (O) double-nucleus erythrocyte; (P) polyploid erythrocyte; (R) septum in the nucleus; (S) triple-nucleus erythrocyte.

- амітоз – прямий поділ ядра, при якому воно перешнуровуючись набуває форми гантелі;
- дво- або триядерний еритроцит – в середині нормальної за розміром клітини знаходяться два або три ядра, розміри і форма ядер не відповідають нормам, тоді як структура хроматину візуальних відхилень не має (одна з форм патологічного амітозу);
- поліплоїдний еритроцит – клітина та ядро відрізняються великими розмірами;
- перегородка в ядрі – нормальне за розміром і формою ядро має посередині чітко виражену перегородку, що може розглядатися як порушення цитотомії;
- мікроядро – фрагмент ядра в клітині.

Оцінку достовірності відхилень отриманих результатів для кількісних показників від контрольного рівня проводили за критерієм Стюдента, розходження вважали статистично значущими при $p \leq 0,05$. Зв'язок між деякими показниками оцінювали за допомогою регресійного або кореляційного аналізу.

- amitosis – a direct division of the nucleus, in which it becomes a jumble of forms of dumbbells;
- double- or triple-nucleus erythrocyte – in the middle of a normal sized cell there are two or three nuclei, the size and form of the nuclei do not meet the norms, while the chromatin structure does not have visual deviations (one of the forms of pathological amitosis);
- polyploid erythrocyte – cell and nucleus are large in size;
- septum in the nucleus – the normal in size and form of the nucleus is in the middle of a clearly defined septum, which can be considered as a violation of cytotomy;
- micronucleus – fragment of the nucleus in the cell.

The evaluation of the authenticity of the deviations of the results for the quantitative indicators from the control level was performed according to Student's criterion, the differences were considered statistically significant at $p \leq 0.05$. The relationship between some indicators was estimated using regression or correlation analysis.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Аналіз мазків периферійної крові контрольної вибірки карася з оз. Діброва показав, що середня частота виявлених порушень в клітинах крові становить $(1,7 \pm 0,2) \%$. Серед основних типів порушень у крові переважали еритроцити з деформацією ядра і цитоліз. У додатково неопромінених риб з оз. Вершина серед порушень переважали еритроцити з пристінковими ядрами, деформацією ядра, цитолізом і вакуолізацією цитоплазми. Загальна частота порушень в еритроцитах риб з оз. Вершина становила в середньому $(9,0 \pm 1,5) \%$. При цьому зустрічальність еритроцитів з вакуолізованою цитоплазмою і цитолізом була найбільшою. Порушень мітозу у неопромінених додатково риб з обох озер не зареєстровано.

На 1-шу добу після опромінення у дозі 2,5; 5,0 або 10,0 Гр у риб з обох озер спостерігали загальну тенденцію до збільшення кількості еритроцитів з морфологічними порушеннями. Опромінення риб з оз. Діброва у дозі 2,5 Гр не виявило значного збільшення частки клітин з порушеннями, але зі збільшенням дози опромінення до 5,0 і 10,0 Гр спостерігали зростання кількості порушень в еритроцитах у 5,6 і 8,8 рази, відповідно. Також у 2,5 рази збільшилося різноманіття видів порушень, зокрема, з'явилася значна кількість клітин з вакуолізованою цитоплазмою, пікнозом і каріорексісом (рис. 2 А).

У риб з оз. Вершина на 1-шу добу після ДГО було виявлено збільшення кількості клітин з цитолізом

RESULTS AND DISCUSSION

Analysis of the peripheral blood smears of a control sample of the Prussian carp from Dibrova Lake showed that the average rate of detected disorders in blood cells is $(1.7 \pm 0.2) \%$. Among the main types of abnormalities in the blood, erythrocytes with deformation of the nucleus and cytolysis prevailed. In additionally irradiated fish from Verzhyna Lake among disturbances was dominated by erythrocytes with parietal nucleus, deformation of the nucleus, cytolysis and vacuolate cytoplasm. The general frequency of violations in erythrocytes of fish from Verzhyna Lake was on average of $(9.0 \pm 1.5) \%$. At the same time, the level of erythrocytes with vacuolate cytoplasm and cytolysis was highest. No disturbance of mitosis in additionally non-irradiated fish from both lakes is not registered.

On the 1st day after irradiation at a dose of 2.5, 5.0 and 10.0 Gy in fish from both lakes, a general trend was observed in the increase of number of erythrocytes with morphological disorders. Irradiation of fish from Dibrova Lake in a dose of 2.5 Gy did not show a significant increase in proportion of cells with disorders, but with increase in radiation dose to 5.0 and 10.0 Gy, an increase in the number of violations in erythrocytes was observed in 5.6 and 8.8 times, respectively. Also, the variety of types of disorders increased in 2.5 times, in particular, a significant number of cells with vacuolate cytoplasm, piknosis and karyorrhexis appeared (Fig. 2 A).

The fish from Verzhyna Lake for the 1st day after AAI was found to increase the number of cells with cytoly-

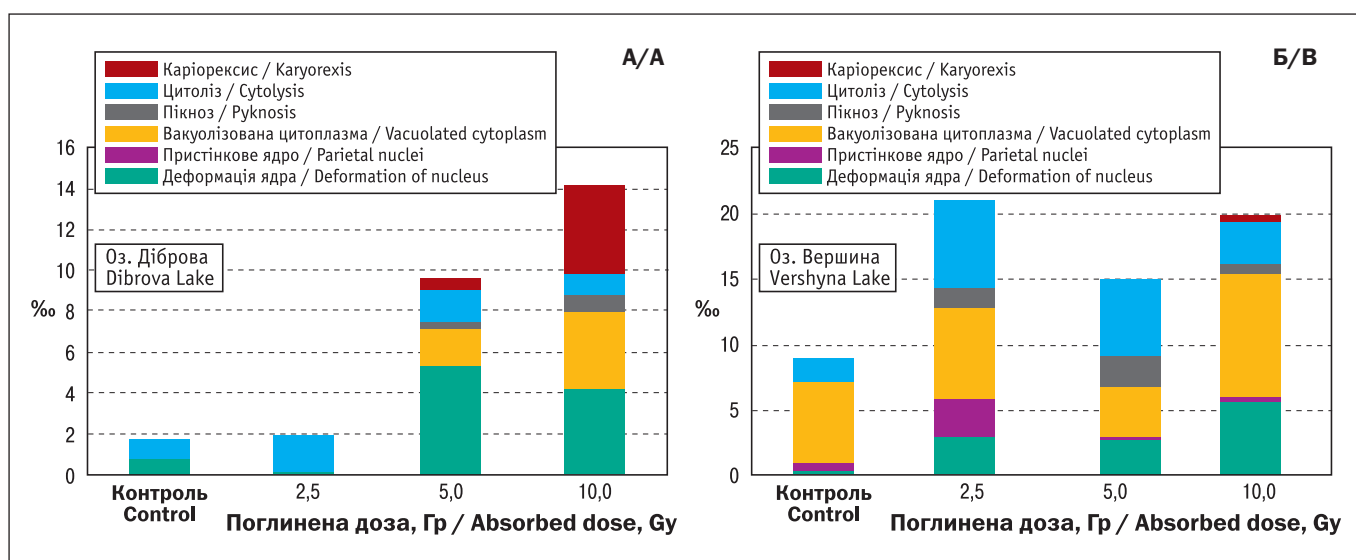


Рисунок 2. Структурні порушення еритроцитів у крові риб з оз. Діброва (А) і оз. Вершина (Б) на першу добу після ДГО

Figure 2. Structural disorders of erythrocytes in the blood of fish from Dibrova Lake (A) and Verzhyna Lake (B) on the first day after AAI

у 3,5 раза при опроміненні риб у дозі 2,5 Гр, при опроміненні у дозі 5,0 Гр у 2,4 раза зріс вихід клітин з пікнозом (рис. 2 Б). Згідно з дослідженнями [21] пікноз ядер є однією з характерних ознак інтерфазної загибелі клітинних популяцій периферійної крові. Крім того, автори наголошують, що малий вихід клітин з пікнозом ядер може бути обумовлений активацією фагоцитарної системи, зокрема, за рахунок збільшення кількості нейтрофілів і моноцитів. При опроміненні риб у дозі 10,0 Гр спостерігали збільшення клітин з деформацією ядра — до $(5,7 \pm 0,6) \%$ і з вакуолізованою цитоплазмою — до $(9,6 \pm 1,9) \%$, а також з'явилися клітини з каріорексисом. Однак найбільшу загальну кількість порушень еритроцитів спостерігали в крові риб, опромінених у мінімальній дозі 2,5 Гр.

Таким чином, на 1-шу добу після ДГО у риб з оз. Вершина вихід максимального числа клітин з такими структурними порушеннями, як цитоліз, пікноз, вакуолізована цитоплазма і деформація ядра, зареєстрований за мінімальної дози опромінення — 2,5 Гр. У карасів з оз. Діброва був відзначений чіткий дозозалежний ефект — зі збільшенням дози опромінення спостерігали підвищення кількості деструктивних клітин еритроцитів. Порушень мітозу в клітинах еритроцитів на першу добу після ДГО для риб обох озер не виявлено.

Зазвичай до 7-ї доби після опромінення поновлюється проліферація клітин, що вижили в кровотворних органах, значна частина їх була пошкоджена і стала нездатною до багаторазового поділу [7]. Аналіз структурних порушень еритроцитів крові у риб з оз. Вершина на сьому добу після ДГО виявив збільшення різноманітності видів порушень еритроцитів у периферійній крові. Певні дозозалежні зміни спостерігали для клітин з деформацією ядра, частота порушень яких збільшилася з підвищенням поглиненої дози ДГО (рис. 3 А).

Решта типів порушень виявилася більш чутливою до опромінення у дозах 2,5 і 5,0 Гр, при яких на сьому добу відбувався максимальний вихід аномальних клітин. Було відмічено збільшення кількості клітин з пристінковими ядрами до 1,3‰ при опроміненні у дозі 5,0 Гр і з пікнозом — до 2,6‰ при опроміненні у дозі 2,5 Гр.

На 7-му добу після ДГО у крові риб з обох досліджуваних водойм вперше з'явилися еритроцити з патологією мітозу. Так, у риб оз. Діброва були виявлені еритроцити з перегородкою після опромінення у дозі 2,5 і 5,0 Гр, у риб з оз. Вершина на

sis in 3.5 times with irradiation of fish at dose of 2.5 Gy, as well as in 2.4 times increased rate of cells with piknosis at irradiation in dose of 5.0 Gy (Fig. 2 B). According to studies [21], the nucleus piknosis is one of the hallmarks of the interphase death of cellular populations of peripheral blood. Also, the authors emphasize that the small output of cells with nucleus piknosis may be due to the activation of the phagocytic system, in particular, due to the increase in the number of neutrophils and monocytes. At irradiation of fish in dose of 10.0 Gy, an increase in cells with deformation of the nucleus was observed — up to $(5.7 \pm 0.6) \%$ and with a vacuolate cytoplasm — up to $(9.6 \pm 1.9) \%$, as well as cells with karyorrhexis. However, the largest total number of erythrocyte disturbances was observed in the blood of fish exposed to a minimum dose of 2.5 Gy.

Thus, on the 1st day after AAI in fish from Vershyna Lake the maximum number of cells with structural disorders such as cytolysis, piknosis, vacuolate cytoplasm and deformation of the nucleus was registered at a minimum dose of irradiation — 2.5 Gy. In fish from Dibrova Lake a clear dose-dependent effect as increase in the dose of irradiation resulted in an increase in the number of destructive cells of red blood cells was determined. Disturbances of mitosis in erythrocyte cells on the 1st day after AAI for fish of both lakes were not detected.

Usually until the 7th day after irradiation, the proliferation of cells, that survived in the hematopoietic organs, a significant part of which was damaged and became incapable of multiple fragmentations [7]. Analysis of structural abnormalities of red blood cells in fish from Vershyna Lake on the 7th day after AAI showed an increase in the diversity of types of erythrocyte disorders in the peripheral blood. Certain dose-dependent changes were observed for cells with deformation of the nucleus, the frequency of violations of which increased with an increase in absorbed dose of AAI (Fig. 3 A).

Other types of violations were more sensitive to irradiation in doses of 2.5 and 5.0 Gy, at which on the 7th day there was a maximum rate of abnormal cells. An increase in the number of cells with parietal nuclei up to 1.3 ‰ was observed at irradiation at dose of 5.0 Gy and with piknosis — up to 2.6 ‰ at irradiation at dose of 2.5 Gy.

At the 7th day after AAI in the blood of fish from both studied reservoirs, for the first time appeared erythrocytes with pathology of mitosis. That is in fishes of Dibrova Lake revealed erythrocytes with septum in nucleus after irradiation at dose of 2.5 and 5.0 Gy, in

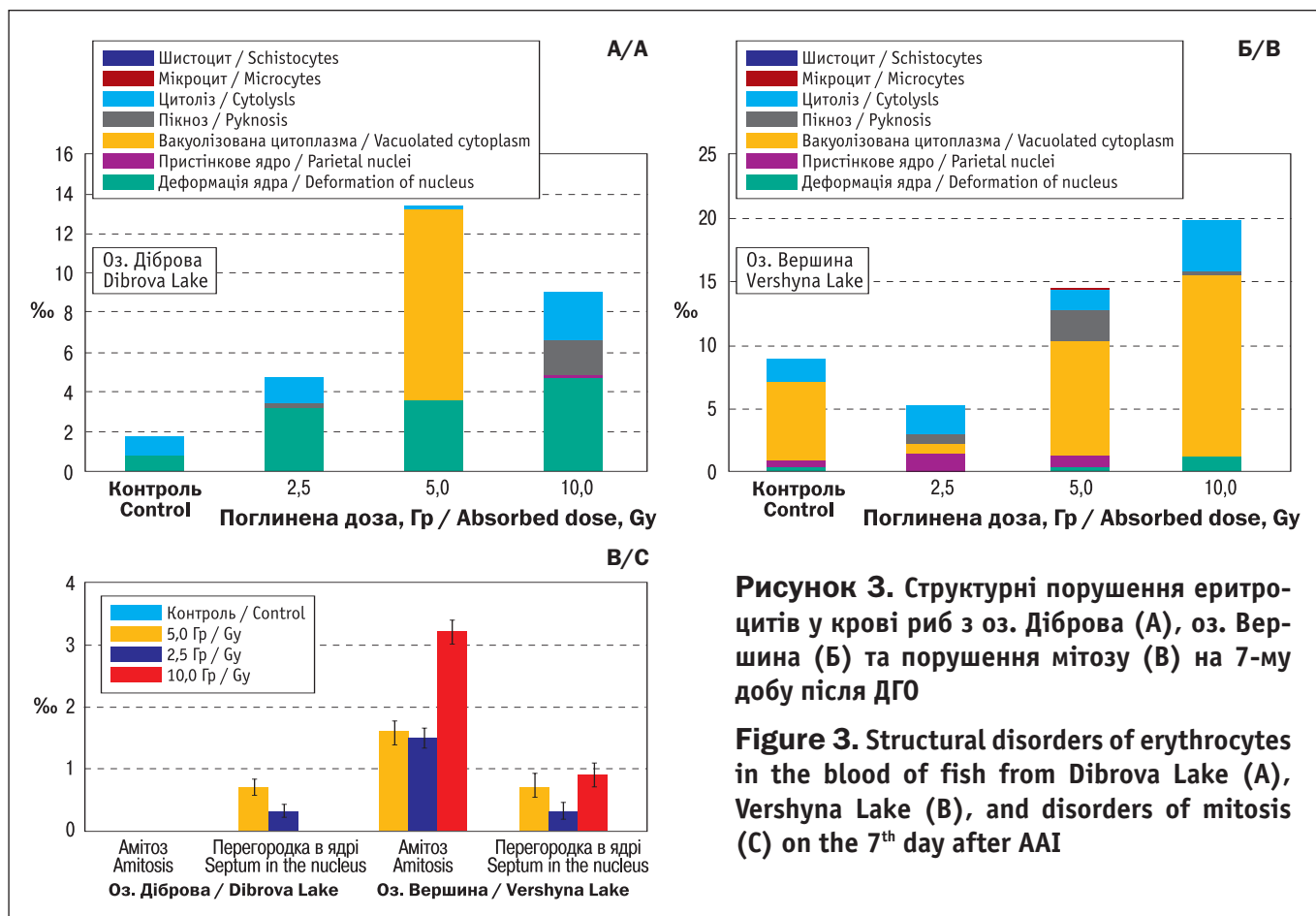


Рисунок 3. Структурні порушення еритроцитів у крові риб з оз. Діброва (А), оз. Вершина (Б) та порушення мітозу (В) на 7-му добу після ДГО

Figure 3. Structural disorders of erythrocytes in the blood of fish from Dibrova Lake (A), Verzhyna Lake (B), and disorders of mitosis (C) on the 7th day after AAI

всіх препаратах були відзначені клітини з двома типами патології мітозу — амітозом і з перегородкою в ядрі (рис. 3 В).

Відомо, що амітоз еритроцитів є одним з патоморфологічних станів клітин червоної крові, який може бути віднесено до проліферативних порушень клітини. Зростання кількості еритроцитів з амітозом, в свою чергу, може мати компенсаторний характер і бути проявом адаптаційних реакцій організму при радіаційному впливі [12, 14]. За опромінення у дозі 10,0 Гр цей показник для риб з оз. Вершина мав найбільше значення — $(3,2 \pm 0,7) \%$.

У вибірці риб з оз. Вершина, опромінених у дозі 2,5 Гр, реєстрували зменшення загальної кількості порушень в еритроцитах з 21,1 до 7,6 $\%$ (у 2,8 раза). При цьому, у вибірках, які були опромінені у дозах 5,0 і 10,0 Гр, кількість порушень зростає з 15,0 до 17,1 $\%$ (у 1,1 раза) та із 19,9 до 23,9 $\%$ (у 1,2 раза), відповідно (рис. 4 А–В). Аналіз препаратів крові карася з оз. Діброва на 7-му добу експерименту показав збільшення загальної кількості еритроцитів зі структурними порушеннями. Таким чином, на 7-му добу спостережень відзначено достовірне збільшення клітин червоної крові з порушеннями патології мітозу — амітозом, пере-

fish of Verzhyna Lake in all smears was marked by cells with two types of mitosis' pathology — amitosis and erythrocytes with septum in the nucleus (Fig. 3 C).

It is known that amitosis of erythrocytes is one of the pathomorphological states of red blood cells that can be attributed to proliferative cell disorders. The growth of the number of erythrocytes with amitosis, in turn, may have a compensatory character and be an expression of the adaptive reactions of the organism with radiation effects [12, 14]. At irradiation in dose of 10.0 Gy, this indicator for fish from Verzhyna Lake was most significant — $(3.2 \pm 0.7) \%$.

In the sample of fish from Verzhyna Lake, which were irradiated at dose of 2.5 Gy, recorded a decrease in the total number of erythrocytes from 21.1 to 7.6 $\%$ (in 2.8 times). At the same time, in samples that were irradiated with doses of 5.0 and 10.0 Gy, the number of violations increased from 15.0 to 17.1 $\%$ (in 1.1 times) and from 19.9 to 23.9 $\%$ (in 1.2 times), respectively (Fig. 4 A–C). Analysis of blood smears of the Prussian carp from Dibrova Lake on the 7th day of the experiment showed an increase in the total number of erythrocytes with structural disorders. Thus, on the 7th day of observation, a significant increase in red blood cells with disturbances of the pathology of

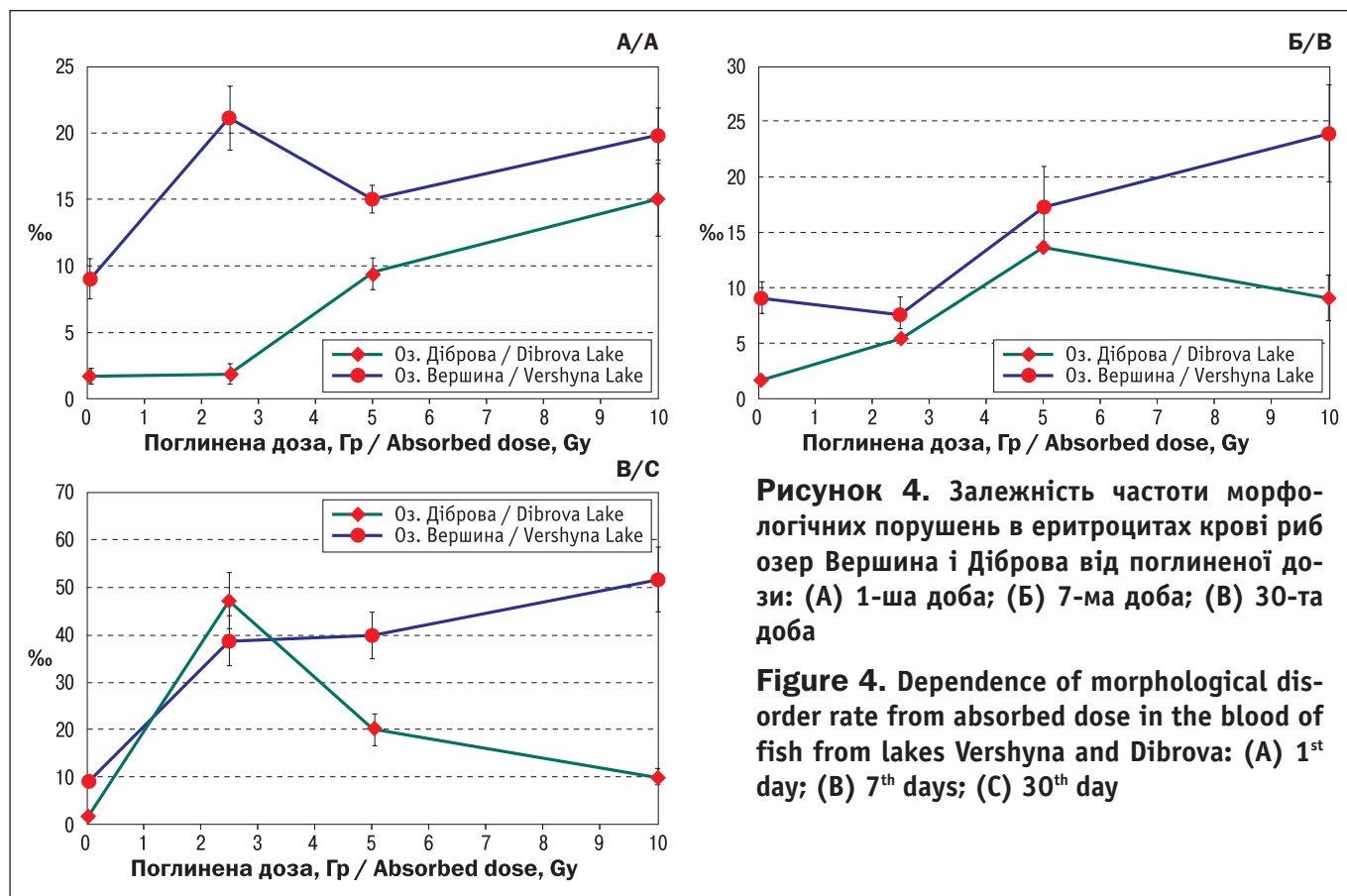


Рисунок 4. Залежність частоти морфологічних порушень в еритроцитах крові риб озер Вершина і Діброва від поглиненої дози: (А) 1-ша доба; (Б) 7-ма доба; (В) 30-та доба

Figure 4. Dependence of morphological disorder rate from absorbed dose in the blood of fish from lakes Vershyna and Dibrova: (A) 1st day; (B) 7th days; (C) 30th day

городкою в ядрі, а також клітин зі структурними порушеннями. Відзначена пряма дозова залежність для таких порушень, як деформація ядра і амітоз.

Після ДГО на 30-ту добу зазвичай настає фаза відновлення, яка розвивається повільно і характеризується початком репопуляції кровотворних органів. Терміни відновлювальних процесів кров'яних клітин розтягнуті в часі і можуть відбуватися зі значними коливаннями [7, 22]. У власних дослідженнях на 30-ту добу спостережень після опромінення у дозі 2,5 Гр в периферійній крові риб оз. Діброва спостерігали аномальне збільшення кількості клітин з порушеннями порівняно з 7-ю добою — з 1,9 до 47 ‰ (у 24,7 раза), переважно за рахунок еритроцитів з пристінковими ядрами — $(20,2 \pm 4,3) \%$, вакуолізованою цитоплазмою — $(8,0 \pm 1,2) \%$ і цитолізом — $(6,7 \pm 1,3) \%$, що може свідчити про порушення цілісності мембран клітинних органел (рис. 5 А).

У всіх вибірках риб з оз. Вершина після ДГО на 30-ту добу вперше реєстрували еритроцити з протуберанціями з частотою від 9,9 до 13,5 ‰. Виявлено збільшення частоти клітин крові з порушеннями в результаті патології мітозу, такими як амітоз і перегородка в ядрі, що можна пояснити тривалим

mitosis — amitosis, a septum in the nucleus, and also cells with structural disorders was noted. Direct dose dependence for such disorders as deformation of the nucleus and amitosis was noted.

After AAI at the 30th days usually comes a phase of recovery, which develops slowly and characterized by the beginning of repopulation of the hematopoietic organs. The terms of the recovery processes of the blood cells are stretched over time and can occur with significant fluctuations [7, 22]. In our own studies, at the 30th day of observation after irradiation at dose of 2.5 Gy in the peripheral blood of fish from Dibrova Lake observed an abnormal increase in the number of cells with disorders compared with the 7th day — from 1.9 to 47 ‰ (in 24.7 times), mainly due to erythrocytes with parietal nucleus — $(20.2 \pm 4.3) \%$, vacuolate cytoplasm — $(8.0 \pm 1.2) \%$ and by cytolysis — $(6.7 \pm 1.3) \%$, which may indicate a violation of the integrity of the membranes of cellular organelles (Fig. 5 A).

In all samples of fish from Vershyna Lake after AAI for the 30th day was recorded for the first time with erythrocytes with protuberances with frequency from 9.9 to 13.5 ‰. An increase in the frequency of blood cells with disturbances resulting from mitosis pathology, such as amitosis and septum in the nucleus, is

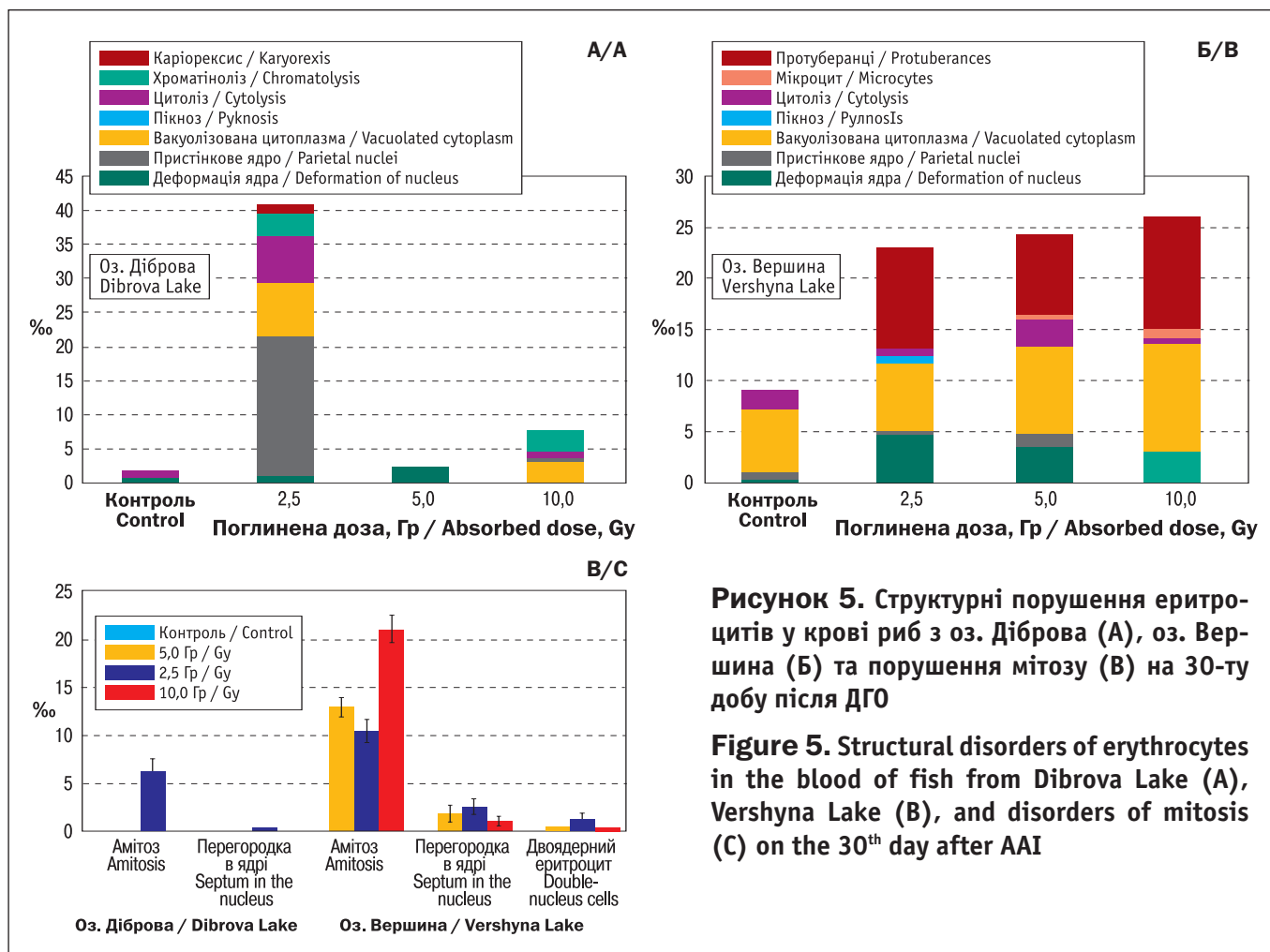


Рисунок 5. Структурні порушення еритроцитів у крові риб з оз. Діброва (А), оз. Вершина (Б) та порушення мітозу (В) на 30-ту добу після ДГО

Figure 5. Structural disorders of erythrocytes in the blood of fish from Dibrova Lake (A), Vershyina Lake (B), and disorders of mitosis (C) on the 30th day after AAI

часом збереження процесів порушення проліферації ранніх клітин-попередників гемопоєзу і виходом аномальних еритроцитів до периферійного русла (рис. 5 Б).

У вибірці риб, опромінених у дозі 10,0 Гр, на 30-ту добу вперше за час проведення експерименту були зареєстровані поодинокі поліплоїдні клітини. До кінця експерименту загальна кількість патоморфологічних еритроцитів у крові риб зростає в середньому з 9 ‰ в контролі до 43,3 ‰ (в 4,8 рази) і з 18,7 ‰ — після опромінення на 1-шу добу до 43,3 ‰ — на 30-ту добу (в 2,3 рази) (рис. 5 В). Крім того, значно розширився спектр порушень — з 4 до 12 типів.

Таким чином, у риб оз. Діброва за опромінення у дозі 2,5 Гр зареєстровано запізнювану реакцію клітин еритроцитарної ланки на додатковий радіаційний вплив, показники якої на першу добу після ДГО були на рівні контрольних значень. Проте на 30-ту добу кількість морфологічних порушень еритроцитів досягла найвищих значень — 47 ‰. Поглинена доза 5,0 Гр упродовж 30 діб призвела до поступового підвищення аномалій еритроцитів з 9,6 до 19,9 ‰,

revealed, which can be explained by the prolonged preservation of proliferation processes in the early precursor hemopoiesis cells and the release of abnormal erythrocytes to the peripheral channel (Fig. 5 B).

In a sample of fish irradiated in a dose of 10.0 Gy, at the 30th day for the first time during the experiment, the single polyploid cells were registered. By the end of the experiment, the total number of pathomorphological erythrocytes in the blood of the fish increased from 9 ‰ in the control to 43.3 ‰ (in 4.8 times) and from 18.7 ‰ — after irradiation for the 1st day to 43.3 ‰ — at 30th day (in 2.3 times) (Fig. 5 C). In addition, the spectrum of violations — from 4 to 12 types considerably expanded.

Thus in fish of Dibrova Lake, irradiated in dose of 2.5 Gy, regulated delayed reaction of cells of the erythrocytes' group for additional radiation influence, which indexes on the 1st day after AAI were at the level of control values. However, at the 30th day, the number of morphological erythrocyte abnormalities reached the highest values — 47 ‰. The absorbed dose of 5.0 Gy for 30 days resulted in a gradual increase in erythrocyte anomalies from 9.6 to 19.9 ‰,

а 10,0 Гр — до зниження з 15,1 до 9,9 ‰ у риб оз. Діброва. У риб оз. Вершина за усіх доз ДГО відбувалося зростання кількості морфологічних порушень еритроцитів в середньому з 18,7 до 43,4 ‰, досягнувши максимальних значень на 30-ту добу за дози 10 Гр — 51,6 ‰.

Кількісний аналіз мікроядер в клітинах еритроцитів, який вважається одним з найбільш швидких тестів на виявлення генотоксичної дії середовища на організм тварин, у даному випадку не був ефективним, але показав певне підвищення радіочутливості до додаткового опромінення у риб з оз. Вершина і залежність від дози опромінення протягом 1-ї доби експерименту: контроль — 0; 2,5 Гр — $(0,2 \pm 0,01) \%$; 5,0 Гр — $(0,3 \pm 0,05) \%$; 10,0 Гр — $(0,5 \pm 0,03) \%$, що не перевищує спонтанний рівень мутагенезу. У риб з оз. Діброва на 1-шу добу експерименту вихід кількості мікроядер виявили тільки за додаткового опромінення у дозі 10,0 Гр — $(0,2 \pm 0,08) \%$. На 7-му добу експерименту мікроядра спостерігали у риб обох озер при опроміненні у дозі 5,0 і 10,0 Гр. При цьому максимальний вихід мікроядер — $(1,8 \pm 0,5) \%$ — відзначали у карася з референтної водойми. На 30-ту добу експерименту частота мікроядер збільшилася за мінімальної дози опромінення і знизилася за максимальної, тобто припускається, що більша кількість клітин з мікроядрами була елімінована фагоцитарною системою до кінця експерименту. Найвищу кількість клітин з мікроядрами відзначали у карася з оз. Діброва — $(1,2 \pm 0,3) \%$ при опроміненні у дозі 2,5 Гр тільки наприкінці експерименту.

ВИСНОВКИ

1. Одноразове ДГО у дозі 2,5; 5,0 або 10,0 Гр у крові карася сріблястого оз. Діброва (референтні умови, ППД — 0,07 мкГр/год) упродовж 1-ї доби після опромінення спричиняло дозозалежне збільшення кількості структурних порушень еритроцитів з 1,7 до 1,9; 9,6 і 15,1 ‰, відповідно (в середньому у 5,2 раза). У крові риб оз. Вершина (імпактна популяція у ЧЗВ, ППД — 110,8 мкГр/год) середня кількість всіх типів деформацій клітин еритроцитів після ДГО зросла у 2,1 раза. Загальний спектр порушень еритроцитів у риб оз. Діброва збільшився з 2 до 5 (у 2,5 раза), а оз. Вершина — з 4 до 6 типів (у 1,5 раза).

2. Після ДГО на 7-му добу спостережень вірогідних дозозалежних змін кількості порушень еритроцитів у крові риб не виявлено, але спостерігали

and 10.0 Gy — to decrease from 15.1 to 9.9 ‰ in fish of lakes. In fish of Verzhyna Lake at all doses of AAI there was an increase in the number of morphological erythrocyte disorders on average from 18.7 to 43.4 ‰, reaching the maximum values for 30th days at dose of 10 Gy — 51.6 ‰.

A quantitative analysis of the micronucleus in erythrocyte cells, which is considered one of the fastest tests to detect the genotoxic impact of the environment on the animal organism, in this case was not effective, but showed a certain increase in radiosensitivity to AAI in fish from Verzhyna Lake and dependence on the dose of irradiation during the 1st day of the experiment: control — 0; 2.5 Gy — $(0.2 \pm 0.01) \%$; 5.0 Gy — $(0.3 \pm 0.05) \%$; 10.0 Gy — $(0.5 \pm 0.03) \%$, which does not exceed the spontaneous level of mutagenesis. In blood of fish from Dibrova Lake on the 1st day of the experiment was detected the micronuclei only for additional irradiation at dose of 10.0 Gy — $(0.2 \pm 0.08) \%$. On the 7th day of the experiment, the micronucleus was observed in fish from both lakes at radiation dose of 5.0 and 10.0 Gy. At the same time, the maximum quantity of micronuclei — $(1.8 \pm 0.5) \%$ was noted in blood of fish from reference reservoir. At the 30th day of experiment, the micronucleus frequency increased at the minimum dose of irradiation and decreased by a maximum one that is assumed that a greater number of cells with micronuclei were eliminated by phagocytic system at the end of experiment. The highest number of cells with micronuclei was observed in the Prussian carps from Dibrova Lake — $(1.2 \pm 0.3) \%$ at radiation dose of 2.5 Gy only at the end of experiment.

CONCLUSIONS

1. One-time AAI at dose of 2.5, 5.0 and 10.0 Gy in blood of the Prussian carp from Dibrova Lake (reference conditions, ADR — 0.07 μ Gy/h) during the 1st day after irradiation caused a dose-dependent increase in the number of structural erythrocyte disorders from 1.7 to 1.9, 9.6 and 15.1 ‰, respectively (an average in 5.2 times). In the blood of fish from Verzhyna Lake (affected population in the CEZ, ADR — 110.8 μ Gy/h) the average number of all types of deformation of erythrocyte cells after AAI increased in 2.1 times. General spectrum of erythrocyte disturbances in fish of Dibrova Lake has increased from 2 to 5 types (in 2.5 times), and in Verzhyna Lake — from 4 to 6 types (in 1.5 times).

2. After AAI on the 7th day of observation, there were no detectable dose-dependent changes in the number of

зниження кількості порушень, в середньому до 4,3 і 1,2 раза, відповідно, для риб озер Діброва і Вершина, порівняно з першою добою експерименту. На 30-ту добу спостережень виявлено повторне зростання загальної кількості порушень — в середньому до 9,1 і 2,8 раза, відповідно, у риб озер Діброва і Вершина порівняно з неопроміненим контролем.

3. Спостереження за динамікою морфологічних порушень еритроцитів риб з оз. Вершина на 7-му і 30-ту добу після ДГО виявили значне посилення патологічних процесів, а саме — збільшення кількості грубих пошкоджень молекул ДНК — амітозів (в середньому в 14,8 раза), еритроцитів з перегородкою в ядрі (в 1,9 раза), а також структурних порушень в клітинах — протуберанців (в 10,5 раза), клітин з вакуолізованою цитоплазмою (в 8,6 раза) у порівнянні з референтною водою.

4. Клітини червоної крові риб імпаکتної водою виявили більшу уразливість до додаткового опромінення, що проявляється у збільшенні кількості еритроцитів з патологією мітозу і може свідчити про порушення генетичних структур клітин внаслідок тривалого радіаційного впливу.

ВИСЛОВЛЕННЯ ВДЯЧНОСТІ

Автори висловлюють щире подяку ст. наук. співр., канд. біол. наук Н. К. Родіоновій (Інститут експериментальної патології, онкології і радіобіології ім. Р. Є. Кавецького НАН України) за важливу консультативну допомогу, а також колегам з Державної установи «Національний інститут раку» МОЗ України, Інституту гідробіології НАН України та Державного спеціалізованого підприємства «Екоцентр» ДАЗВ України — за сприяння у відборі біологічного матеріалу і виконанні експериментальних досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шеханова И. А. Радиоэкология рыб. М.: Легк. и пищ. пром-сть, 1983. 208 с.
2. Рябов И. Н. Радиоэкология рыб водоемов в зоне влияния аварии на Чернобыльской АЭС: по материалам экспедиционных исследований. М.: Тов-во научн. изд. КМК, 2004. 216 с.
3. Romanenko V. D., Gudkov D. I., Volkova Ye. N., Kuzmenko M. I. Radioecological problems of aquatic ecosystems: 25 years after the accident at the Chernobyl nuclear power station. *Hydrobiological Journal*. 2011. Vol. 47, no. 4. P. 3–23. DOI: 10.1615/HydrobJ.v47.i4.10.
4. Gudkov D. I., Kuzmenko M. I., Kireev S. I., Nazarov A. B., Shevtsova N. L., Dzyubenko E. N., Kaglyan A. E. Radioecological problems of

erythrocytes in the blood of fish, but there was a decrease in the number of violations, on average up to 4.3 and 1.2 times, respectively, for fish from lakes Dibrova and Vershyna, compared with the 1st experiment day. At the 30th day of observation, a repeated increase in the total number of violations was detected — an average in 9.1 and 2.8 times, respectively, in fish of Dybrova and Vershyna lakes compared to non-irradiated controls.

3. Observation of the dynamics of morphological disorders of red blood cells from Vershyna Lake at the 7th and the 30th days after AAI showed a significant increase in pathological processes, namely, an increase in the number of gross damages of DNA molecules — amitosis (on average in 14.8 times), erythrocytes with septum in the nucleus (in 1.9 times), as well as structural violations in cells — protuberances (in 10.5 times), cells with vacuolate cytoplasm (in 8.6 times) compared to the reference reservoir.

4. The red blood cells of fish from the impacted reservoir revealed a greater vulnerability to additional irradiation, which manifests itself in an increase in the number of erythrocytes with pathology of mitosis and may indicate a violation of the genetic structures of cells due to long-term radiation exposure.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors express their sincere gratitude to Dr. Natalia Rodionova (R.E. Kavetsky Institute of Experimental Pathology, Oncology and Radiobiology of the NAS of Ukraine) for important advisory assistance, as well as colleagues from the National Cancer Institute of the Ministry of Health of Ukraine, Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine and State Specialized Enterprise «Ecocentre» of the State Agency of Ukraine on Exclusion Zone Management — for assistance in the biological material sampling and implementation of experimental research.

REFERENCES

1. Shekhanova IA. [Radioecology of fish]. Moscow: Light and food industry; 1983. 208 p. Russian.
2. Ryabov IN. [Radioecology of fish of ponds in the zone of influence of the Chernobyl nuclear power plant accident: based on the materials of expeditionary research]. Moscow: Soc. Sci. Ed. KMK; 2004. 216 p. Russian.
3. Romanenko VD, Gudkov DI, Volkova YeN, Kuzmenko MI. Radioecological problems of aquatic ecosystems: 25 years after the accident at the Chernobyl nuclear power station. *Hydrobiological Journal*. 2011;47(4):3-23. DOI: 10.1615/HydrobJ.v47.i4.10.
4. Gudkov DI, Kuzmenko MI, Kireev SI, Nazarov AB, Shevtsova NL, Dzyubenko EN, Kaglyan AE. Radioecological problems of aquatic

- aquatic ecosystems of the Chernobyl exclusion zone. *Biophysics*. 2010. Vol. 55, no. 2. P. 332–339. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0006350910020272>.
5. Gudkov D. I., Shevtsova N. L., Pomortseva N. A., Dzyubenko E. V., Kaglyan A. E., Nazarov A. B. Radiation-induced cytogenetic and hematologic effects on aquatic biota within the Chernobyl exclusion zone. *J. Environ. Radioact.* 2016 a. Vol. 151. P. 438–448. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.09.004>.
6. Бонд В. П. Основы радиобиологии, необходимые для понимания влияния ионизирующих излучений на кроветворение. *Руководство по радиационной гематологии (Совместное издание Международного агентства по атомной энергии и Всемирной Организации здравоохранения)*. М. : Медицина, 1974. С. 63–70.
7. Инграм М. Гематологические основы для оценки степени лучевого поражения. Малые дозы, хроническое облучение и отдаленные эффекты. *Руководство по радиационной гематологии (Совместное издание Международного агентства по атомной энергии и Всемирной Организации Здравоохранения)*. М. : Медицина, 1974. С. 221–230.
8. Шлейфер Г. С., Шеханова И. А. Влияние ионизирующей радиации на некоторые факторы иммунитета рыб. *Радиоэкология животных*. М. : Наука, 1977. С. 93–94.
9. Al-Sabti K., Metcalfe C. D. Fish micronuclei for assessing genotoxicity in water. *Mutat. Res.* 1995. Vol. 343. P. 121–135. DOI: [https://doi.org/10.1016/0165-1218\(95\)90078-0](https://doi.org/10.1016/0165-1218(95)90078-0).
10. Смагин А. И., Лугаськова Н. В., Меньших Т. Б. Цитогенетическое исследование рыб из водоема-хранилища отходов ПО «МАЯК». *Проблемы радиоэкологии и пограничных дисциплин*. 2005. Вып. 7. С. 97–118.
11. Anbumani S., Mary N. Mohankumar. Gamma radiation induced micronuclei and erythrocyte cellular abnormalities in the fish *Catla catla*. *Aquat. Toxicol.* 2012. Vol. 122–123. P. 125–132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2012.06.001>.
12. Пряхин Е. А., Тряпицына Г. А., Стяжкина Е. В., Шапошникова И. А., Осипов Д. И., Аклев А. В. Оценка уровня патологии эритроцитов в периферической крови у плотвы (*Rutilus rutilus* L.) из водоемов с разным уровнем радиоактивного загрязнения. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2012. Т. 52, № 6. С. 616–624.
13. Mikryakov V. R., Gudkov D. I., Mikryakov D. V., Pomortseva N. L., Balabanova L. V. Comparative characteristics of leucocytes compositions in the crucian carp *Carassius carassius* (Cyprinidae) from the waterbodies of the Chernobyl exclusion zone and from the Rybinsk reservoir. *J. Ichthyol.* 2013. Vol. 53, No 9. P. 753–757. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0032945213060076>.
14. Стяжкина Е. В. Генотоксические эффекты в клетках крови плотвы (*Rutilus rutilus* L.) из водоемов с разным уровнем радиоактивного загрязнения: автореф. дисс. канд. биол. наук. М., 2014. 24 с.
15. Gudkov D. I., Shevtsova N. L., Pomortseva N. A., Dzyubenko E. V., Yavnyuk A. A., Kaglyan A. Ye., Nazarov A. B. Aquatic plants and animals in the Chernobyl exclusion zone: effects of long-term radiation exposure on different levels of biological organization. *Genetics, ecosystems of the Chernobyl exclusion zone. Biophysics*. 2010; 55(2):332-9. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0006350910020272>.
5. Gudkov DI, Shevtsova NL, Pomortseva NA, Dzyubenko EV, Kaglyan AE, Nazarov AB. [Radiation-induced cytogenetic and hematologic effects on aquatic biota within the Chernobyl exclusion zone]. *J Environ Radioact.* 2016a;151:438-48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.09.004>.
6. Bond VP. [Basics of Radiobiology, necessary for understanding the effect of ionizing radiation on blood formation]. In: [*Manual of Radiation Hematology (Joint publication of the International Atomic Energy Agency and the World Health Organization)*]. Moscow: Medicine; 1974. p. 63-70. Russian.
7. Ingram M. [Hematological basis for assessing the degree of radiation damage. Low doses, chronic exposure and long-term effects]. In: *Manual of Radiation Hematology (Joint publication of the International Atomic Energy Agency and the World Health Organization)*. Moscow: Medicine; 1974. p. 221-30. Russian.
8. Shleifer GS, Shekhanova IA. [The influence of ionizing radiation on some factors of fish immunity]. In: [*Radioecology of animals*]. Moscow: Science; 1977. 93-4. Russian.
9. Al-Sabti K, Metcalfe CD. [Fish micronuclei for assessing genotoxicity in water]. *Mutat Res.* 1995;343:121-35. DOI: [https://doi.org/10.1016/0165-1218\(95\)90078-0](https://doi.org/10.1016/0165-1218(95)90078-0).
10. Smagin AI, Lugas'kova NV, Smaller TB. [Cytogenetic study of fish from the reservoir of waste storage of the PE «МАЯК»]. *Problems of radioecology and border disciplines*. 2005;(7):97-118. Russian.
11. Anbumani S, Mohankumar MN. Gamma radiation induced micronuclei and erythrocyte cellular abnormalities in the fish *Catla catla*. *Aquat Toxicol.* 2012;122-123:125-32. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2012.06.001>
12. Pryakhin EA, Tryapitsyna GA, Styazhkina EV, Shaposhnikova IA, Osipov DI, Akleyev AV [Evaluation of the level of erythrocyte pathology in peripheral blood of the roach (*Rutilus rutilus* L.) from reservoirs with different levels of radioactive contamination]. *Radiatsionnaya biologiya, radioecologiya / Rossijskaja akademija nauk*. 2012;52(6):616-24. Russian.
13. Mikryakov VR, Gudkov DI, Mikryakov DV, Pomortseva NL, Balabanova LV. Comparative characteristics of leucocytes compositions in the crucian carp *Carassius carassius* (Cyprinidae) from the waterbodies of the Chernobyl exclusion zone and from the Rybinsk reservoir. *J Ichthyol.* 2013;53(9):753-7. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0032945213060076>.
14. Styazhkina, EV. [Genotoxic effects in the blood cells of the roach (*Rutilus rutilus* L.) from the ponds with different levels of radioactive contamination] [the dissertation author's abstract]. Moscow; 2014. 24 p. Russian.
15. Gudkov DI, Shevtsova NL, Pomortseva NA, Dzyubenko EV, Yavnyuk AA, Kaglyan AYe, Nazarov AB. Aquatic plants and animals in the Chernobyl exclusion zone: effects of long-term radiation exposure on different levels of biological organization. In:

- Evolution and Radiation* / ed. By V. Korogodina, C. Mothersill, S. Inge-Vechtomov, C. Seymour. Cham : Springer International Publishing AG, 2016. P. 287–302.
16. Пелевина И. И., Афанасьев Г. Г., Готлиб В. Я., Альферович А. А., Антошина М. М., Рябченко Н. И., Саенко А. С., Рябцев И. А., Рябов И. Н. Экспозиция клеток в культуре ткани и животных (мышей) в 10-километровой зоне аварии на ЧАЭС. Влияние на чувствительность к последующему облучению. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 1993. Т. 33, № 1 (4). С. 508–520.
 17. Давыдов О. Н., Темниханов Ю. Д., Куровская Л. Я. Патология крови рыб. К. : Инкос, 2005. 212 с.
 18. Лакин Г. Ф. Биометрия: Учеб. пособие для биол. спец. вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М. : Высшая школа, 1990. 352 с.
 19. Большев Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. М. : Наука. Главная редакция физико-математическом литературы, 1983. 416 с.
 20. Житенева Л. Д., Полтавцева Т. Г., Рудницкая О. А. Атлас нормальных и патологически измененных клеток крови рыб. Ростов н/Д : Кн. изд-во, 1989. 112 с.
 21. Жербин Е. А., Чухловин А. Б. Радиационная гематология. М. : Медицина, 1989. 176 с.
 22. Петрович И. К. Изменение картины крови у животных в отдаленные сроки после введения в организм радиоактивных веществ. Влияние радиоактивного стронция на живой организм. М. : Медгиз, 1961. С. 104–119.
 - Korogodina V., Mothersill C., Inge-Vechtomov S., Seymour C., editors. *Genetics, Evolution and Radiation*. Cham: Springer Int. Pub.; 2016b. p. 287-302.
 16. Pelevina II, Afanasyev GG, Gotlib VYa, Alferovich AA, Antoshchina MM, Ryabchenko NI, Saenko AS, Ryabtsev IA, Ryabov IN. [Exposure of cells in tissue culture and animals (mice) in the 10-kilometer zone of the Chernobyl NPP accident. Impact on sensitivity to subsequent exposure]. *Radiatsionnaia biologii, radioecologia / Rossiiskaya akademiia nauk*. 1993;33;1(4):508-20. Russian.
 17. Davydov ON, Temnikhanov YuD, Kurovskaya LYa. [Pathology of the blood of fish]. Kiev: Inkos; 2005. 212 p. Russian.
 18. Lakin GF. [Biometrics]. 4th ed. Moscow: Highest school; 1973. 343 p. Russian.
 19. Bolshov LN, Smirnov NV. [Tables of mathematical statistics]. Moscow: Science. Main edition of the physical and mathematical literature; 1983. 416 p. Russian.
 20. Zhiteneva LD, Poltavtseva TG, Rudnitskaya OA. [Atlas of normal and pathologically altered fish blood cells]. Rostov-on-Don: Book ed.; 1989. 112 p. Russian.
 21. Zherbin EA, Chukhlovin AB. [Radiation hematology]. Moscow: Medicine; 1989. 176 p. Russian.
 22. Petrovich IK. [Changes in the blood picture of animals in the long-term period after input administration of radioactive substances into the body. The effect of radioactive strontium on living organism]. Moscow: Medgiz; 1961: 104-19. Russian.

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ

Поморцева Наталія Анатоліївна – провідний інженер відділу водної радіоекології, Інститут гідробіології НАН України

Гудков Дмитро Ігорович – завідувач відділу водної радіоекології, доктор біологічних наук, старший науковий співробітник, Інститут гідробіології НАН України

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Natalia A. Pomortseva – Principal Engineer of Department aquatic of radioecology, Institute of Hydrobiology of the National Academy of Sciences of Ukraine

Dmytro I. Gudkov – Head of Department aquatic of radioecology, D. Sc., Principal Research Scientist, Institute of Hydrobiology of the National Academy of Sciences of Ukraine

Стаття надійшла до редакції 15.04.2019

Received: 15.04.2019