

---

УДК: [574. 5: 577. 34:556] (477)

**М. И. Кузьменко**

## **РАДИОЭКОЛОГИЯ ПРИРОДНЫХ ВОД В УКРАИНЕ: СТАНОВЛЕНИЕ И РАЗВИТИЕ**

Выполненные в конце XIX — начале XX столетия первые экспериментальные исследования влияния рентгеновского, гамма-излучения и других источников ионизирующего излучения на организмы разных таксонов послужили основой для формирования радиационной биологии — радиобиологии — фундаментальной науки, изучающей действие всех видов ионизирующих излучений на биологические системы разных уровней структурно-функциональной организации, от молекул и внутриклеточных структур до сообществ и биосферы. Радиоэкология природных вод как область исследований общей радиобиологии и радиоэкологии зарождалась и формировалась на основе экспериментальных исследований действия ионизирующих излучений на гидробионтов, а также изучения активности и поведения искусственных радионуклидов, поступивших в гидросферу в результате испытаний, использования ядерного оружия и развития атомной энергетики. Научно-технический прогресс современной цивилизации в значительной степени обеспечивается ядерными технологиями, широко применяемыми в энергетике, военной промышленности, космической технике, субмаринах, медицине и разных направлениях научно-практических исследований. В числе приоритетных проблемных задач, над которыми работают исследователи в области радиоэкологии природных вод, — процессы распределения и миграции природных и техногенных радионуклидов в абиотических и биотических компонентах водных экосистем, формирование доз ионизирующего облучения в экологических нишах, эффекты в биосистемах разных структурно-функциональных уровней и преодоление радиационных рисков в жизнедеятельности растительного, животного мира и *Homo sapiens*.

**Ключевые слова:** радиобиология, водная радиоэкология, водные экосистемы, радионуклидное загрязнение, становление и развитие радиоэкологии, приоритеты водной радиоэкологии.

В развитии радиоэкологии по главным научным целям и практическим приоритетам условно были выделены следующие этапы [42]. 1896—1920 гг. — получение ориентировочных данных и разработка методов; 1920—1930 гг. — вырисовывается первый этап — экологические аспекты природной радиоактивности организмов, их радиочувствительности (поражаемости) и решение практических задач, связанных с поиском урановых руд. 1940—1960 гг. — второй этап отмечен названием научной дисциплины «радиоэкология»: радиоэкологические исследования искусственных радионуклидов, поступивших в биосферу в результате производства, испытаний и применения ядерного оружия в военных целях. 1970—1980 гг. — третий

© **М. И. Кузьменко**, 2019

этап: исследования радиэкологических проблем, обусловленных интенсивным развитием атомной энергетики. Начало продолжающемуся четвертому этапу развития радиэкологии положила катастрофа на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) 26 апреля 1986 г. (СССР, Украина): изучение экологических последствий ядерных аварий и разработка научных принципов экологической безопасности в условиях прогрессирующего радионуклидного и химического загрязнения биосферы. Каждый из указанных этапов включал изучение содержания и миграции радионуклидов в биогео (гидро)-ценозах с целью оценки влияния радионуклидов на биотические компоненты разных иерархических уровней. С утверждением в 1960-е гг. количественных принципов в радиобиологии и радиэкологии была решена важнейшая методическая задача, обеспечивающая связь биологических эффектов с поглощенными дозами ионизирующего облучения организмов.

Развитие радиэкологии природных вод неразрывно связано с триумфальными взлетами и трагическими событиями, происходящими в важнейшей области научно-технического прогресса — в области ядерных технологий. Несмотря на более чем 30 лет, прошедших после глобальной экологической катастрофы на ЧАЭС, для Украины нерешенные радиэкологические проблемы продолжают сохранять особую жизненно важную актуальность. Из разрушенного реактора на различные расстояния было выброшено около 1850 ПБк продуктов деления урана. После аварии благодаря большой медицинской, творческой, технической и экологической помощи ООН, ЮНЕСКО, Европейской комиссии, ФРГ, США, Франции, Чехословакии, Японии и многих других стран, был выполнен самый сложный комплекс трудоемких и высокочувствительных работ: над разрушенным реактором был построен объект «Укрытие»; на территории зоны отчуждения были созданы пять пунктов временной локализации радиоактивных веществ суммарной активностью ~ 1,71 ПБк и три хранилища радиоактивных отходов, суммарная активность которых составляла около 3,96 ПБк [2]. В 1991 г. Законом Украины «О правовом режиме радиоактивно загрязненной территории в результате Чернобыльской катастрофы» территория площадью около 2800 км<sup>2</sup> официально была определена зоной отчуждения и выведена из хозяйственного использования как непригодная для полноценной жизнедеятельности человека и социального развития. Зона отчуждения расположена в районе Полесья, в верхней части бассейна Днепра. По ее территории протекают реки Припять, Уж, Сахан, Брагинка, Глиница. На правобережной пойме р. Припять расположены озера Азбучин, Яновский затон, антропогенно созданный и трансформируемый водоем-охладитель ЧАЭС, а на левобережной — озера Далекое, Глубокое, Красненская старица и др. В зону отчуждения включен северо-западный участок Киевского водохранилища.

*Актуальность радиэкологических исследований* в Украине усиливается эксплуатацией четырех мощных АЭС: Запорожской — 6 реакторов ВВЭР-1000<sup>1</sup>; Ровенской — 2 реактора ВВЭР-440 и 2 реактора ВВЭР-1000; Хмельницкой — 2 реактора ВВЭР-1000 и Южно-Украинской — 3 реактора ВВЭР-1000. В бассейне р. Десны на территории России работают Курская —

---

<sup>1</sup> ВВЭР — водно-водяной реактор.

4 реактора РБМК-1000<sup>2</sup> и Смоленская — 3 реактора РБМК-1000. Потенциальную радиационную опасность представляют пять горнодобывающих комбинатов, два гидрометаллургических завода по переработке урана и многие предприятия, использующие в производственных технологиях источники ионизирующих излучений [17].

### ***Истоки возникновения и развития радиобиологии и радиоэкологии природных вод***

В конце XIX — начале XX в. в физике были осуществлены эпохальные открытия, послужившие истоками возникновения и развития целого созвездия наук, среди которых почетные места занимают радиобиология и ее составляющая радиоэкология. В 1885 г. немецкий ученый К. Рентген открыл проникающее излучение — «X-лучи», которые впоследствии были названы рентгеновскими. В 1886 г. французский физик А. Беккерель, обнаружив спонтанное испускание ураном ранее неизвестного проникающего излучения, открыл явление радиоактивности. В 1898 г. французские ученые П. Кюри и М. Складовская-Кюри из урановой руды впервые выделили радиоактивные элементы Ra и Po и положили начало развитию учения о радиоактивности — спонтанном изменении атомными ядрами своего состава (заряда и атомного числа) путем излучения элементарных частиц, или ядерных фрагментов. В 1905 г. английский физик Э. Резерфорд, создавший основу теории строения атома, установил, что радиоактивный распад атомных ядер осуществляется со строго постоянной скоростью и такие естественные радиоактивные элементы, как  $^{40}\text{K}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и др., с длительными периодами полураспада могут быть геологическими часами.

Эпохальные открытия в физике создавали широкие перспективы для осознания мироздания. Однако даже среди ученых значение открытий в физике поняли немногие. Среди этих немногих был гениальный ученый, основоположник геохимии, биогеохимии и учения о биосфере, первый президент Академии наук Украины академик В. И. Вернадский. В 1911 г. В. И. Вернадский после стажировки по радиогеологии в лабораториях Англии и Франции организовал первую в России радиогеологическую экспедицию, результаты которой в 1926—1927 гг. были отражены в работе «Этюды по биогеохимии» [6, 7]. В трагические 1918—1919 гг. В. И. Вернадский работал в Киеве, проводил огромную работу по созданию Украинской академии наук; его избрали председателем комиссии по организации академии, а со временем — президентом Украинской академии наук. Несмотря на большую научно-организационную работу, связанную с разработкой и планированием структуры и направлений деятельности академии, В. И. Вернадский сплотил вокруг себя киевских естествоиспытателей, одним из которых был будущий академик Н. Г. Холодный. Исследования проводились на расположенной на берегу Днепра Старосельской научной биологической станции под Киевом. В. И. Вернадский увлеченно и целенаправленно изучал накопление химических элементов организмами разных таксонов, впервые установил закономерности накопления радиоактивного Ra пресноводными водорослями и наземными растениями и положил начало систематическим ра-

<sup>2</sup> РБМК — реактор большой мощности канальный.

диоэкологическим исследованиям. В. И. Вернадский ввел в науку новое понятие — отношение концентрации радиоэлементов в организме (в расчете на сырую массу) и в воде, которое как меру накопления радионуклида организмом из водной среды в исследовательской практике стали называть коэффициентом накопления (концентрирования). В 1920—1930 гг. В. И. Вернадский и его ученики — исследователи из Санкт-Петербурга, Москвы и Киева изучали накопление радиоактивных элементов организмами разных таксонов, проводили биогеохимические и радиоэкологические исследования с целью поиска видов-индикаторов накопления естественных радионуклидов U, Th, Ra и продуктов их распада в окружающей природной среде. В. И. Вернадский, изучая процессы биогеохимической миграции химических элементов, впервые раскрыл важнейшую роль живого вещества в структуре и функционировании биосферы планеты Земля.

С распространением знаний о радиоактивности среди специалистов возрастал интерес к использованию в лечебных целях минерализованных вод и грязей. В 1910 г. в Одессе при отделении Русского технического общества была создана радиологическая лаборатория, в которой С. В. Гольдберг и Л. М. Лейбфред исследовали радиоактивность атмосферы, природных вод, почв и горных пород. В 1920 г. с медицинскими целями для диагностики и лечения создаются Киевский рентгеновский институт, а в Харькове — Украинская рентгеновская академия, которые включали подразделения, выполнявшие радиоэкологические исследования.

Большие успехи в области исследований были достигнуты в Украинском физико-техническом институте (УФТИ, ныне Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»). В октябре 1932 г. сотрудники этого Института К. Д. Синельников, А. И. Лейпунский, А. К. Вальтер и Г. Д. Латышев ускоренными протонами расщепили ядро лития. Успех в УФТИ был достигнут спустя полгода после подобного эксперимента в Кавендишской лаборатории Э. Розерфорда в Кембридже. Интенсивные работы, проводимые в УФТИ по определению нейтронных констант, предопределили вначале физический, а затем и технический успешный запуск реактора по производству плутония [3,23].

В 1950—1960-х гг. в Институте физиологии растений АН УССР Д. М. Гродзинский возглавил широкомасштабные исследования природной радиоактивности воздуха, вод, почв и растений на территории Украины. На основании определения содержания U, Th, Ra, Rn, радиоактивного изотопа К и др. для всех почвенно-климатических зон были разработаны карты с выделением провинций, отличающихся повышенной радиоактивностью почв, в Черкасской, Винницкой, Киевской, Житомирской, Запорожской и Кропивницкой (Кировоградской) областях, что обуславливалось, как правило, выходом на поверхность гранитов. Многочисленные данные об удельной радиоактивности растений разных таксонов, теоретический анализ значения природной радиоактивности в развитии и формировании фитоценозов Д. М. Гродзинский обобщил в 1965 г. в фундаментальной монографии «Естественная радиоактивность растений и почв» [10], которая до последнего времени служит документальным подтверждением активности природных

радионуклидов в компонентах природной среды до начала промышленной добычи урана в Украине.

После аварии на ЧАЭС Д. М. Гродзинский и сотрудники возглавляемого им отдела биофизики и радиобиологии в Институте клеточной биологии и генной инженерии НАН Украины активно включились в исследования биологических последствий радионуклидного загрязнения и разработку эффективных контрмер, направленных на активацию реабилитационных процессов в экосистемах и снижение дозовых нагрузок на растительный, животный мир и население [12].

Ученики и последователи Д. М. Гродзинского — известные исследователи и преподаватели вузов И. Н. Гудков, А. П. Дмитриев, А. П. Кравец, О. Д. Коломиец, Ю. А. Кутлахмедов, А. Н. Михеев, Б. В. Сорочинский и многие другие внесли весомый вклад в решение актуальных проблем радиобиологии, биофизики и радиоэкологии наземных и водных экосистем [14, 22]. В 1990 г. Ю. А. Кутлахмедов и А. Н. Михеев участвовали в двухмесячной экспедиции по Северо-Крымскому каналу. В этой экспедиции, возглавляемой Г. Г. Поликарповым, работали итальянские радиоэкологи А. Чинья, М. Росси и другие. В результате выполненных в экспедиции исследований были получены количественные данные, характеризующие транспорт радионуклидов по каскаду днепровских водохранилищ, каналу и вынос в Черное море, дозовые нагрузки на население за счет использования днепровской воды на орошение и питьевое потребление. В числе предложенных исследователями эффективных контрмер особый интерес представляют работы по разработке методов и технологий фитодезактивации загрязненных радионуклидами, тяжелыми металлами и др. ксенобиотиками водных экосистем.

В Институте физиологии им. А. А. Богомольца АН УССР группой исследователей, возглавляемой А. И. Даниленко, на тысячах проб почв, растений, сельскохозяйственных животных и продуктов жизнедеятельности человека, отобранных в разных регионах Украины, с целью нормирования и определения допустимого воздействия на человека, была изучена природная  $\beta$ -активность, обусловленная преимущественно  $^{40}\text{K}$ . Начиная с 1957 г. и в течение последующих десятилетий коллективы Институты биофизики Минздрава СССР и Коммунальной гигиены Минздрава УССР в регионе Полесья изучали активность  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в компонентах природной среды и их миграцию по трофическим цепям, ведущим к человеку.

Проведение в 1945—1980 гг. испытаний ядерного оружия обусловили глобальные выпадения радионуклидов. Начиная с 1949 г. было проведено 8 сверхвысотных ядерных испытаний, 91 — в атмосфере и 25 — под землей, общей мощностью 6,4 Мт в тротиловом эквиваленте [33]. Глобальные и локальные выпадения  $^{90}\text{Sr}$  в атмосфере оценивались в 12 МКи, из них 10 — в Мировом океане. Общая активность  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и других радионуклидов в биосфере достигла десятков мегакюри [24]. Последствия испытаний ядерного оружия и развивающаяся атомная энергетика заострили жизненно важную необходимость более широких радиоэкологических исследований наземных и водных экосистем.

5 сентября 1956 г. Г. Г. Поликарпов на Севастопольской биологической станции им. А. О. Ковалевского АН СССР (с 1963 г. — Институт биологии южных морей АН УССР) возглавил лабораторию морской радиобиологии (впоследствии преобразованной в отдел радиационной и химической биологии) и положил начало многолетним систематическим радиоэкологическим исследованиям морей и океанов. В результате были изучены активность природных и искусственных радионуклидов в абиотических и биотических компонентах водных экосистем и их действие на гидробионтов [25—28]. Признание и большой интерес мировой научной общественности к этим исследованиям и практические радиационно-гигиенические рекомендации сыграли важную роль при подписании в 1963 г. в Москве Договора о запрещении испытаний ядерного оружия в атмосфере, под водой и в космосе. После запрещения ядерных испытаний в трех средах количество глобальных выпадений начало снижаться [1].

Особенности миграции радионуклидов в наземных и водных экосистемах, а также научные интересы гидробиологии, с одной стороны, и целого семейства «ядерных наук» (ядерной физики, радиохимии, биогеохимии радиоэлементов, радиобиологии) — с другой послужили основанием для становления и развития водной радиоэкологии, «морской и пресноводной радиоэкологии в самостоятельную область знаний» [26, 27, 42]. Главная цель в области водной радиоэкологии была направлена на «изучение закономерностей миграции радионуклидов в водной среде, их накопления в гидробионтах и действия ионизирующих излучений на водные организмы, а главной практической задачей — научное обоснование мероприятий по обеспечению радиационной безопасности гидробиосферы» [42], с. 63.

Г. Г. Поликарпов, активно изучая радиоэкологические процессы в водной среде, большое внимание уделял подготовке высококвалифицированных научных кадров для Украины, Литвы, России. Среди его учеников сформировались яркие исследователи В. Н. Егоров, С. Б. Гулин, Г. Е. Лазоренко и многие другие, которые успешно продолжают и обогащают водную радиоэкологию выдающимися результатами. Научные достижения Г. Г. Поликарпова и его учеников отражены в получивших мировое признание монографиях [25, 28, 44 и др.]. Особенно большого внимания заслуживает монография «Радиоэкологический отклик Черного моря на Чернобыльскую аварию» [29], в которой изложены результаты многолетних оригинальных исследований загрязнения радионуклидами  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и трансурановыми элементами воды, донных отложений и гидробионтов разных таксонов, приведены балансовые оценки содержания радионуклидов в водной среде после аварии на ЧАЭС, на основе радионуклидного загрязнения даны характеристики гидрологических, биохимических, биофизических и экологических процессов в Черном море, определены пространственно-временные масштабы и дозовые цены отклика биотических компонентов экосистемы моря на загрязнение радионуклидами после аварии на ЧАЭС, по сравнению с природным радионуклидом  $^{210}\text{Po}$ . Предложенные Г. Г. Поликарповым и его учениками принципы и обобщения в области радиационной защиты морских экосистем с учетом прогрессирующего химического загрязнения служат фундаментальной основой для дальнейшего развития методологии и

практической реализации технологического обновления цивилизации и защиты биогидросферы [29].

В 1961 г. в НИИ гидробиологии, ныне НИИ биологии Днепропетровского национального университета им. Олеся Гончара, И. П. Лубянов положил начало систематическим исследованиям активности радионуклидов в воде прудов, днепровских водохранилищ и их притоков. Если в начальный период радиоактивность в воде оценивалась по общей  $\beta$ -активности, то с 1969 г. в водоемах степной зоны Украины определялась активность радионуклидов  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . В 1969—1977 гг. в воде Запорожского водохранилища исследователи регистрировали активность  $^{90}\text{Sr}$  в пределах 0,03—0,04 Бк/л. С 1980-х гг. А. И. Дворецкий возглавил комплексные, включающие и радиоэкологические, исследования Запорожского водохранилища. В 1972—1985 гг. активность  $^{137}\text{Cs}$  в воде водохранилища регистрировали в пределах 0,008—0,016 Бк/л. Большое значение этих исследований было оценено после аварии на ЧАЭС. В 1987 г., даже при таких действующих мощных факторах, как расстояние от ЧАЭС, время «добегания» и разбавление высокорadioактивных водных масс, активность  $^{90}\text{Sr}$  увеличилась в 20—25 раз [15].

В 1970—1980-х гг. в Украине развернулось строительство и ввод в эксплуатацию АЭС. В бассейне Днепра строились Запорожская, Ровенская, Хмельницкая, Чернобыльская, на р. Южный Буг — Южно-Украинская АЭС — в Украине; Курская и Смоленская — на территории России. Интенсивное использование объектами атомной энергетики воды сопровождалось возникновением широкого спектра практических не изученных гидроэкологических проблем, среди которых особое значение приобретала возможность радионуклидного загрязнения водной среды [17, 31].

В 1976 г. в Институте гидробиологии АН УССР была создана лаборатория радиобиологии, в 1986 г. реорганизованная в отдел пресноводной радиоэкологии, который возглавил М. И. Кузьменко. Сотрудники отдела проводили исследования новосозданного водоема-охладителя ЧАЭС, верхнего в Днепропетровском каскаде Киевского водохранилища и Дуная в пределах Украины. Актуальность радиоэкологических исследований Дуная обуславливалась, с одной стороны, интенсивным развитием атомной энергетики в придунайских странах, в которых на то время эксплуатировалось 10 АЭС и продолжалось наращивание их мощностей, а с другой — перспективами так и не реализованного проекта строительства канала Дунай — Днепр с целью переброски дунайской воды для орошения засушливых южных областей Украины. Исследования В. Г. Кленуса, О. И. Насвита, Ю. М. Сытника свидетельствовали о том, что активность  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в воде, донных отложениях и гидробионтах разных таксонов регистрировалась на уровне, характерном для периода глобальных выпадений, и радиоэкологическая ситуация в экосистеме Килийской дельты Дуная оценивалась как благополучная [18].

Жизненно важная необходимость систематических радиоэкологических исследований водоемов определилась после аварии на ЧАЭС 26.04.1986 г., в результате которой природная среда была подвергнута широкомасштабному интенсивному радионуклидному загрязнению. Выброшенные из разрушенного реактора радиоактивные вещества отличались широким спектром

физико-химических свойств, среди них были газообразные, аэрозоли, в разной степени растворимые и нерастворимые частицы ядерного топлива, так называемые «горячие» частицы. Последние представляли особую опасность при поступлении в организмы животных и людей.

Среди приоритетных объектов радиоэкологических исследований были определены водоемы, расположенные в 30-километровой зоне ЧАЭС: озера Вершина, Глубокое, Далекое, водоем-охладитель и Красненская старица. Сотрудники отдела В. В. Беляев, В. Г. Кленус, А. Е. Каглян, Л. П. Матвиенко, О. И. Насвит, И. В. Паньков установили аномально высокие активности аварийных радионуклидов и их распределение между компонентами экосистем водоемов. Так, в Красненской старице и оз. Вершина, расположенных в 10-километровой зоне, в воде в растворенном состоянии содержалось  $^{90}\text{Sr}$  — 0,7,  $^{137}\text{Cs}$  —  $9,7 \cdot 10^{-2}\%$  их общей активности в экосистемах. Активность радионуклидов, сорбированных на взвесах, составляла соответственно  $1,1 \cdot 10^{-2}$  и  $2,4 \cdot 10^{-2}\%$ . Наибольшие активности  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  сосредоточены в донных отложениях: соответственно 99,1—99,3 и 99,8%. Результаты этих исследований имели важное значение для разработки и реализации практических мероприятий, направленных на ограничение выноса радионуклидов с территории поймы р. Припяти и экологическую реабилитацию водоемов [4, 5, 9, 16, 19, 20, 21].

Для разработки контрмер и рекомендаций для населения важное значение имело определение транспорта радиоактивных веществ с площади водосбора и с водными массами р. Припяти, депонирование в каскаде днепровских водохранилищ, оценка радиоэкологической ситуации в акваториях водозаборов питьевого водоснабжения и удельной активности радионуклидов в рыбе как продукте питания населения. В воде и гидробионтах регистрировались  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{95}\text{Zn}$ ,  $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{140}\text{Ba}$ ,  $^{140}\text{La}$ ,  $^{141}\text{Ce}$ ,  $^{144}\text{Ce}$  и др. Активность отдельных радионуклидов в воде отмечалась в пределах от 0,04 до 2294 Бк/л. Около 70—90% суммарной активности радионуклидов в организмах гидробионтов приходилось на  $^{131}\text{I}$ . 10 мая 1986 г. в Каневском водохранилище возле г. Киева Е. Н. Волкова и И. В. Паньков выловили плотву, спектрометрический анализ которой свидетельствовал о невероятно высокой удельной гамма-активности — 347 800 Бк/кг. Стало очевидно, что стремительно усложняющаяся радиоэкологическая ситуация не соответствовала требованиям нормативных документов «Нормы радиационной безопасности НРБ -76» и др. [8, 30, 34].

В первые недели-месяцы после аварии контроль за динамично усложняющейся радиоэкологической ситуацией, включающий определение содержания радионуклидов в воде, особенно в акваториях водозаборов, и рыбе, количественные показатели транспорта радионуклидов по каскаду днепровских водохранилищ, приобрел жизненно важное значение. Большой массив нарабатываемой информации передавался в Институт математических машин и систем АН УССР. В возглавляемую М. И. Железняком рабочую группу по анализу информации и верификации математической модели радиоэкологических процессов в днепровских водохранилищах от Института гидробиологии входили А. Д. Андреев, В. Г. Кленус и М. И. Кузьменко. Радиоэкологи, владеющие достоверной информацией, и специалисты в области



математического моделирования на основе использования современной вычислительной техники обеспечивали оценку в пространстве и времени и прогноз динамических радиоэкологических процессов. Обобщенная информация о радиоэкологической ситуации в Днестре, его притоках и водохранилищах оперативно передавалась в Президиум Академии наук и Правительство Украины.

За годы, прошедшие после аварии на ЧАЭС, Е. Н. Волкова, И. В. Паньков, В. В. Беляев, А. Е. Каглян, З. О. Широкая, Л. П. Юрчук провели широкомасштабные и целенаправленные радиоэкологические исследования наибольших рек Европы — Волги, Дуная, Днестра и его водохранилищ, водоемов Полесья, озер и прудов рыбохозяйственного назначения Волынской, Житомирской, Киевской, Ровенской и Черниговской областей. В результате многолетних экосистемных исследований водоемов Украины были составлены карты-схемы, наглядно отображающие радионуклидное загрязнение гидробионтов; рассчитаны параметры моделей ретроспективных и прогнозных оценок активности радионуклидов в гидробионтах; на основе анализа соотношения активности  $^{137}\text{Cs}$  в абиотических и биотических компонентах разработан метод определения пригодности водоемов (озер и прудов) для рыбохозяйственного использования, который был представлен Е. Н. Волковой в Ганновере на международной выставке «Biotechnica -2001»; предложены инженерно-экологические методы снижения радионуклидного загрязнения прудовых экосистем и разработаны практические рекомендации для ведения рыбного хозяйства и получения экологически чистой рыбной продукции в водоемах.

В условиях острого дефицита научно достоверной информации о радиочувствительности и поражаемости биосистем особая актуальность возникла в связи с необходимостью оценки влияния радионуклидного загрязнения на представителей биогидроценозов. Н. Л. Шевцова впервые на ценоотическом уровне изучила действие внешнего острого гамма-облучения на модельный пресноводный планктонный альгоценоз и установила пороги поражаемости и полудетальные дозы для доминантных видов летнего и осеннего фитопланктона. Результаты Н. Л. Шевцовой свидетельствовали о том, что первичный трофический уровень, представленный в водоемах преимущественно фитопланктоном, отличается достаточно высокой радиорезистентностью и тем самым обеспечивает надежность функционирования водных экосистем. Именно благодаря отмершему фитопланктону, взвесьями осуществляется седиментация радионуклидов и их соединений из водной среды в донные отложения водоемов, что является доминантной составляющей природных процессов очищения воды от радионуклидного загрязнения [46—49]. Исследования поражаемости гидробионтов осуществил М. Г. Мардаревич, который изучил отдельное и совместное действие  $^{90}\text{Sr}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  и облучение  $^{60}\text{Co}$  на выживание, продукционные, физиолого-биохимические и цитогенетические показатели гидробионтов *Hydra attenuata* Pallas, *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg, *Daphnia magna* Straus, *Carrassius qibelio* Bloch.

Среди экологических проблем ядерной энергетики приоритетной была определена проблема трития как основного радиоактивного компонента газообразных выбросов и жидких сбросов атомных электростанций с реакто-

рами ВВЭР, которыми оснащены все действующие АЭС в Украине. Д. И. Гудковым впервые была исследована активность трития в водоемах регионов размещения АЭС и днепровских водохранилищах; оценено влияние Запорожской АЭС на содержание трития в воде Каховского водохранилища, а также вынос трития с водами Днепра в Черное море. Экспериментально установленные цитогенетические и соматические эффекты острого и хронического действия тритиевой воды наблюдались в снижении морфологических и продукционных показателей, цитогенетических изменениях и увеличении негативных изменений в ряду поколений высших водных растений, беспозвоночных и рыб. Начиная с 1998 г. и в последующие годы научные интересы Д. И. Гудкова и сотрудников отдела водной радиоэкологии направлены на фундаментальные исследования поведения и воздействия на биоту длительно существующих радионуклидов  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$  в водных экосистемах Чернобыльской зоны отчуждения: распределение в абиотических и биотических компонентах, динамика, специфичность концентрирования радионуклидов, дозовые нагрузки, цитогенетические и соматические нарушения у гидробионтов разных таксонов.

Результаты радиоэкологических исследований свидетельствовали, что с течением времени существенно трансформировались физико-химические формы аварийных радиоактивных веществ, увеличилась их мобильность, биологическая доступность и, соответственно, динамика и перераспределение в абиотических и биотических компонентах. В замкнутых водоемах зоны отчуждения процессы радиоэкологического восстановления осуществляются очень медленно, в результате до последнего времени пойменные озера, старицы и затоны отличаются высокими уровнями активности радионуклидов. По данным А. Е. Кагляна, в рыбах оз. Азбучин удельная активность  $^{90}\text{Sr}$  составляла 660—139 500 Бк/кг, в оз. Далекое —  $^{137}\text{Cs}$  — 810—27 000 Бк/кг [35—41].

Одной из ключевых задач пресноводной радиоэкологии была и остается оценка нарушений в биосистемах в результате интенсивного радионуклидного загрязнения водоемов. Исследование высших водных растений в Чернобыльской зоне отчуждения, проводимые Н. Л. Шевцовой, свидетельствуют о том, что хроническое низкоинтенсивное облучение растений индуцирует высокий уровень генетической изменчивости, который поддерживается за счет увеличения частоты генетических рекомбинаций и за счет роста интенсивности ошибочной репарации. Это находит отражение в высоких показателях частоты хромосомных аберраций и, особенно, нетипичных множественных аберраций в клетках корневых меристем. Установлена прямая зависимость показателей жизнеспособности семенного потомства тростника обыкновенного из водоемов Чернобыльской зоны отчуждения от мощности поглощенной дозы в диапазоне 0,05—34,0 мкГр/ч. Показатели всхожести семян были в среднем на 30% ниже, энергия прорастания и выживаемость ростков в 2,0—2,5 раза ниже, а выход аномалий у жизнеспособных проростков (хлорофильные аномалии, нарушения органогенеза и геотропизма) — в 1,5—3,8 раза выше аналогичных показателей семенного потомства растений водоемов с природным радиационным фоном.

Исследования цитологических нарушений в клетках *Lymnea stagnalis*, выполненные Е. В. Дзюбенко, показали, что частота аберраций хромосом в среднем составляла 25%, что более чем в 10 раз превышало уровень спонтанного мутагенеза у гидробионтов. У моллюсков количество мертвых агранулоцитов достигало 43,8%, фагоцитов — 45,0%, в то время как в условно «чистых» водоемах отмечалось на уровне 5,3 и 4,2% соответственно. Н. А. Поморцева, изучая кроветворную систему рыб, населяющих водоемы Чернобыльской зоны отчуждения, показала, что в результате хронического облучения происходят нарушения широкого спектра, в частности морфологические изменения клеток белой и красной крови, которые могут передаваться в поколениях.

Начиная с 2000 г. и до последнего времени Д. И. Гудков и сотрудники в озерах Красненской поймы р. Припяти наблюдают за новым для Украины явлением массового поражения *Phragmites australis* галлообразующими членистоногими и сумчатыми грибами и нарушениям в эволюционно сформированных структурно-функциональных связей в биогеоценозах.

Е облучаемых гидробионтов происходят ответные каскадные структурно-функциональные изменения, проявляемые в таких типах реакций, как чувствительность, стимуляция, поражаемость, адаптация, стойкость, сокращение продолжительности жизни и преждевременный летальный исход. Вполне очевидно, что определенные дозы ионизирующего облучения могут стимулировать развитие одних видов, не оказывать сколько-нибудь заметного воздействия на организмы других и ингибировать развитие третьих видов. Эффективность реализации радиационно индуцируемых реакций биосистем определяется, с одной стороны, поглощенными дозами ионизирующего облучения, а с другой — эволюционно сформированными генетическими и структурно-функциональными свойствами компонентов разных иерархических уровней: субклеточных структур, клеток, органов, организмов, популяций и сообществ. Основными свойствами, отражающими радиоэкологическую валентность и потенциал реализации жизненной стратегии организмов разных таксонов и их популяций, подверженных стрессовому воздействию хронического ионизирующего облучения в загрязненных радионуклидами экосистемах, являются радиоадаптация и радиостойкость. Проведенный нами системный анализ современных представлений и предложенные определения реакций организмов на ионизирующее облучение могут служить основой для дальнейших исследований и разработки методов изучения сверхсложных и взаимосвязанных процессов поражения ↔ восстановления биосистем в загрязненных радионуклидами водных и наземных экосистемах.

Большая научно-информационная база, наработанная сотрудниками отдела водной радиоэкологии Института гидробиологии НАН Украины за более чем 40-летний период, послужила основанием для определения главных гидроэкологических уроков Чернобыльской катастрофы, которые состоят в следующем: до последнего времени отсутствуют надежные технологии защиты бассейнов рек от загрязнения при авариях на экологически опасных объектах и выбор площадок для их строительства в верховьях рек с позиций гидроэкологии неприемлем; радиоактивные вещества, поступившие на пло-

щади водосборов и акваторий водоемов, вовлекаются во внутриводоемные динамичные гидрофизические, гидрохимические и гидробиологические процессы, мигрируют и распределяются в абиотических и биотических компонентах; крайне медленное экологическое восстановление замкнутых водных экосистем, подвергнутых загрязнению радионуклидами, во времени соизмеримо с их физическим распадом; биологические последствия радионуклидного загрязнения водоемов и хронического облучения организмов в диапазоне доз от близких к фоновым до летальных растянуты на многие десятилетия и проявляются в далеко не всегда в прогнозируемых нарушениях эволюционно сформированных биосистем разных структурно-функциональных уровней, от субклеточных до сообществ.

Результаты многолетних оригинальных и широкоплановых радиоэкологических исследований разных типов водных экосистем, выполненных научными коллективами НИИ НАН Украины (биологии южных морей, гидробиологии, клеточной биологии и генетической инженерии, геологических наук, геохимии окружающей среды), Украинского научно-исследовательского гидрометеорологического института, Государственной службы чрезвычайных ситуаций, Украинского НИИ экологических проблем Министерства охраны окружающей природной среды и др. в тесном сотрудничестве с коллегами многих стран, в соответствии с принципами беспороговой концепции действия ионизирующих излучений на биосистемы разных структурно-функциональных уровней, обобщены в многочисленных статьях, материалах конференций, съездов и монографиях и составляют большой вклад в развитие радиоэкологии природных вод, а также информационный базис для прогнозирования и практического преодоления радиационных рисков в жизнедеятельности биоразнообразия растительного и животного мира и современной цивилизации [12, 14, 18, 21, 29, 43].

### *Заключение*

В современную эпоху эволюции нашей планеты Земля, эпоху ноосферы, наряду с природными радионуклидами и другими естественными источниками ионизирующих излучений, формирующими естественный радиоактивный фон, в результате широкомасштабного промышленного производства и использования радиоактивных веществ увеличилось глобальное загрязнение водных и наземных экосистем искусственными радионуклидами. Для современной цивилизации проблема радиационной защиты биосферы приобрела жизненно важную актуальность. Атомные бомбардировки Японских городов Хиросима и Нагасаки (6 и 9 августа 1945 г.), интенсивные испытания ядерного оружия в США и СССР, а впоследствии в Великобритании, Франции, Китае, Израиле, Индии, Пакистане и КНДР, распространение ядерного оружия уже на территории 60 стран, эксплуатация более чем в 30 странах мира АЭС общей мощностью ~ 380 ГВт, аварии на АЭС в Чернобыле (СССР, Украина, 1986 г.), на «Фукусима-1» (Япония, 2011 г.) и других странах, утонувшие в морских глубинах атомные субмарины «Комсомолец» (СССР, 1989 г.), «Курск» (Россия, 2000 г.), «Thresher» (USA, 1963) [45] и др., выбросы радионуклидов на предприятиях ядерно-топливного цикла, накопление и захоронение радиоактивных отходов, глобальное повышение ядерно-индустриальной и военной активности — это далеко не полный перечень плановых и непредсказуемых, свершившихся и продолжающихся событий и процессов, ко-

торые сопровождаются прогрессирующим и ранее неизвестным в эволюции биосферы загрязнением искусственными радионуклидами, надфоновым ионизирующим облучением и усиливающимися радиационными рисками в жизнедеятельности растительного, животного мира и *Homo sapiens* [29].

Среди широкого спектра техногенных радионуклидов, поступающих в наземные и водные экосистемы, особую биологическую опасность представляют  $^3\text{H}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , радионуклиды плутония,  $^{241}\text{Am}$  и другие, отличающиеся длительным периодом полураспада, миграционной активностью, депонированием в трофических цепях и высокой радиотоксичностью. Поведение радионуклидов в экосистемах характеризуется гетерогенной тропностью как по экологическим нишам, так и в биотических структурах. Преимущественное депонирование радионуклидов может обуславливать формирование достаточно высоких поглощенных доз внешнего и внутреннего ионизирующего облучения и индуцировать глубокие нарушения в биосистемах разных структурно-функциональных уровней [17, 29, 32, 43].

Для решения глобальной актуальной проблемы радиационной защиты гидросферы и биосферы, разработки на основе принципа экоцентризма стратегии и тактики для практического преодоления радиационных рисков в развитии биоразнообразия и современной цивилизации назрела необходимость объединения финансового, научного и технологического потенциала промышленно развитых и, в первую очередь, стран, владеющих ядерным оружием и эксплуатирующих предприятия ядерно-топливного цикла.

Приоритетными теоретическими и практическими задачами радиоэкологических исследований экосистем континентальных водоемов и Мирового океана представляются следующие:

1) разработка методологии, принципов и методов дозиметрии и эквидозиметрии, экологического нормирования радионуклидного загрязнения и оценки радиационных рисков для биосистем разных структурно-функциональных уровней в условиях хронического облучения и воздействия модифицирующих факторов;

2) усовершенствование и реализация систем регионального и глобального радиоэкологического мониторинга, включающего формирование банка данных о радионуклидном загрязнении гидробиосферы, математическое моделирование, прогнозирование и оптимальные решения, направленные на минимизацию и устранение радиационных рисков для представителей биоты водных экосистем и разных категорий водопользователей;

3) изучение пространственно-временной миграции радионуклидов как трасеров тесно взаимосвязанных гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических процессов, происходящих в водных экосистемах;

4) изучение реакций биосистем разных структурно-функциональных уровней на надфоновое ионизирующее облучение;

5) анализ микроэволюционных и сукцессионных процессов в гидробиоценозах техногенных радионуклидных аномалий;

6) разработка технологий очистки воды, защиты источников питьевого водоснабжения, биологических ресурсов водоемов и орошаемых земель от радионуклидного загрязнения.

Современная цивилизация располагает всеми необходимыми и, прежде всего, научными и технологическими ресурсами для того, чтобы уберечь биоразнообразие биосферы планеты Земля и человека от глобальных рисков ядерного переоблучения.

\*\*

*Радіоекологія природних вод як галузь досліджень загальної радіобіології та радіоекології зароджувалась і формувалась на основі експериментальних досліджень дії іонізуючого опромінення на гідробіонтів. Розвиткові науки сприяло також вивчення активності та поведінки штучних радіонуклідів, які надійшли в гідросферу в результаті випробувань і застосування ядерної зброї та використання атомної енергетики. У статті розглянуто історію становлення та розвитку радіоекології природних вод в Україні починаючи із створення в 1910 р. в м. Одесі радіологічної лабораторії і по теперішній час.*

\*\*

*Radioecology of natural waters as an area of research of general radiobiology and radioecology originated and was formed on the basis of experimental studies of the effects of ionizing radiation on hydrobionts, as well as studying the activity and behavior of artificial radionuclides introduced into the hydrosphere as a result of tests, the use of nuclear weapons and the development of nuclear energy. The article describes the history of the formation and development of radioecology of natural waters in Ukraine, starting with the creation of a radiological laboratory in Odessa in 1910 and up to the present.*

\*\*

1. Алексахин Р. М. 47-я сессия научного комитета ООН по действию атомной радиации // Радиационная биология. Радиоэкология. — 1998. — Т. 38, вып. 4. — С. 631—633.
2. Антропов В. М., Кумшаев С. Б., Скворцов В. В. Уточнения данных про радиоактивіні відходи, розміщені у сховищах зони відчуження ЧАЕС // Бюл. екол. стану зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення. — 2004. — № 2. — С. 17—26.
3. Атомный проект СССР. Документы и материалы // Под общ. ред. Л. Д. Рябова. — М.: Наука, 1998. — Т. 1, Ч. 1. — 432 с.
4. Беляєв В. В., Волкова Е. Н. Моделирование процессов самоочищения водных масс от радиоактивных веществ // Ядерна енергетика та довкілля. — 2014. — № 1. — С. 34—38.
5. Беляєв В. В., Волкова О. М., Пришляк С. П. Моделювання динаміки формування радіоактивності водних рослин // Ядерна енергетика та довкілля. — 2015. — № 1. — С. 44—49.

6. Вернадский В. И. Etudes biogeochimiques: 1. Sur la vitesse de la transmission de la vie dans la biosphere // Изв. АН СССР. Сер. 6. — 1926. — Т. 20, № 9. — С. 727—744.
7. Вернадский В. И. Etudes biogeochimiques: 2. La vitesse maximum de la transmission de la vie dans la biosphere: (presente a l'Academie des sciences le 22 Septembre 1926) // Изв. АН СССР. Сер. 6. — 1927. — Т. 21, № 3/4. — С. 250—254.
8. Войцехович О. В. Радиоэкология водных объектов зоны влияния аварии на Чернобыльской АЭС. — Т. 1. Мониторинг радиоактивного загрязнения природных вод Украины (обзор исследований, выполненных за период 1986—1996 гг. ). — Киев: Чернобыльинтеринформ, 1997. — 308 с.
9. Волкова Е. Н., Беляев В. В., Пархоменко А. А., Пришляк С. П. Механизмы формирования радиационной дозы облучения пресноводных рыб на эмбриональной стадии развития // Гидробиол. журн. — 2013. — Т. 49, № 5. — С. 80—89.
10. Грозинский Д. М. Естественная радиоактивность растений и почв. — Киев: Наук. думка, 1965. — 250 с.
11. Грозинский Д. М. Биофизика растений. — Киев: Наук. думка, 1972. — 256 с.
12. Грозинский Д. М. Радиобиология растений. — Киев: Наук. думка, 1989. — 384 с.
13. Грозинский Д. М., Гудков И. Н. Защита растений от лучевого поражения. — М.: Атомиздат, 1973. — 232 с.
14. Гудков И. Н., Кудяшева А. Г., Москалев А. А. Радиобиология с основами радиоэкологии. — Сыктывкар: Издательство Сыкт. гос. ун-та, 2015. — 512 с.
15. Дворецкий А. И., Рябов Ф. П., Емец Г. П. и др. Запорожское водохранилище. — Изд-во Днепропетр. ун-та, 2000. — 172 с.
16. Евтушенко Н. Ю., Кузьменко М. И., Сиренко Л. А. и др. Гидроэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС. — Киев: Наук. думка, 1992. — 267 с.
17. Коваленко Г. Д. Радиоэкология Украины. — Харьков: ИНЖЭК, 2008. — 264 с.
18. Кузьменко М. И., Кленус В. Г., Насвит О. И. и др. Искусственные радионуклиды в экосистеме р. Дунай // Вод. ресурсы. — 1990. — № 4. — С. 58—63.
19. Кузьменко М. И. Радіонуклідна аномалія. — К.: Академперіодика, 2013. — 394 с.
20. Кузьменко М. И., Гудков Д. И., Кірсєв С. І. та ін. Техногенні радіонукліди у прісноводних екосистемах. — К.: Наук. думка, 2010. — 262 с.
21. Кузьменко М. И., Романенко В. Д., Деревець В. В. та ін. Радіонукліди у водних екосистемах України. — К.: Чернобыльинтеринформ, 2001. — 318 с.
22. Кутлахмедов Ю. А. Дорога к теоретической радиоэкологии. — Киев: Фитосоцицентр, 2015. — 360 с.

23. Павленко Ю. В., Ранюк Ю. Н., Храмов Ю. А. «Дело» УФТИ. — Киев: Феникс, 1998. — 324 с.
24. Поликарпов Г. Г. Нерешенные проблемы водной радиоэкологии // Радиобиология. — 1970. — Т. 10, вып. 2. — С. 242—252.
25. Поликарпов Г. Г. Радиоэкология морских организмов // Под ред. В. П. Шведова. — М.: Атомиздат, 1964. — 295 с.
26. Поликарпов Г. Г. Развитие радиационной гидробиологии моря // Гидробиол. журн. — 1977. — Т. 8, № 5. — С. 57—65.
27. Поликарпов Г. Г. Развитие радиоэкологических исследований на морских и пресноводных водоемах СССР // Гидробиол. журн. — 1987. — Т. 23, № 6. — С. 29—38.
28. Поликарпов Г. Г., Егоров В. Н. Морская динамическая радиохемозология. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 176 г.
29. Поликарпов Г. Г., Егоров В. Н., Гулин С. Б. Радиоэкологический отклик Черного моря на Чернобыльскую аварию. — Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. — 669 с.
30. Романенко В. Д., Кузьменко М. И., Евтушенко Н. Ю. и др. Радиоактивное и химическое загрязнение Днепра и его водохранилищ после аварии на Чернобыльской АЭС. — Киев: Наук. думка, 1992. — 194 с.
31. Томілін Ю. А., Григор'єва Л. І. Радіонукліди у водних екосистемах південного регіону України. — Миколаїв, 2008. — 260 с.
32. Трапезникова А. В., Трапезникова В. Н. Пресноводная радиоэкология. — Екатеринбург: Академнаука, 2012. — 544 с.
33. Aarkrog A. Global radioecological impact of nuclear activities in the former Soviet Union // Environ. Impact Radioact. Releases: Proc. Int. Symp. — Vienna, 1995. — P. 13—22.
34. Volkova E., Belyaev V., Shirokaya Z., Karapysh V. Behaviour of Cs-137 and Sr-90 on fish ponds in Ukraine Equidosimetry — Ecological Standardization and Equidosimetry for Radioecology and Environmental Ecology / eds. F. Brechignac and G. Desmet (NATO Security through Science Series — C: Environmental security. — Vol. 2 — Netherlands: Springer, 2005. — С. 293—298.
35. Gudkov D., Nazarov A., Shevtsova N. et al. Dose rates and effects of chronic environmental radiation on hydrobionts within the Chernobyl exclusion zone // Radiation Risk Estimates in Normal and Emergency Situations / Ed. by A. A. Cigna and M. Durante. — Dordrecht: Springer, 2006. — P. 69—76.
36. Gudkov D. I., Dzyubenko E. V., Shevtsova N. L. et al. Aquatic biota within the Chernobyl accident exclusion zone: consequences of the long-term radiation exposure // Radiobiology and Environmental Security / Ed. by C. Mothersill, V. Korogodina, C. Seymour, NATO Science for Peace and Security, Series C: Environmental Security. — Dordrecht: Springer, 2012. — P. 233—244.
37. Gudkov D. I., Kireev S. I., Kuzmenko M. I. et al. Peculiarities of radionuclides distribution in the main components of aquatic ecosystems within the Chernobyl accident exclusion zone // Aquatic Ecosystems Research Trends / Ed. by G. N. Nairne. — New-York: Nova Science Publishers, Inc., 2009. — P. 383—403.



38. Gudkov D. I., Kuzmenko M. I., Derevets V. V., Nazarov A. B. Aquatic ecosystems within the Chernobyl NPP exclusion zone: The latest data on radionuclide contamination and absorbed dose for hydrobionts // *Equidosimetry — Ecological Standardization and Equidosimetry for Radioecology and Environmental Ecology* / Ed. by F. Brechignac, G. Desmet, Series C: Environmental Security. — Vol. 2. — Dordrecht: Springer, 2005. — P. 333—342.
39. Gudkov D. I., Kuzmenko M. I., Kireev S. I. et al. Radionuclides in components of aquatic ecosystems of the Chernobyl accident restriction zone // *20 Years after the Chernobyl Accident: Past, Present and Future* / Ed. by E. B. Burlakova, V. I. Naidich. — New-York: Nova Science Publishers, Inc., 2006. — P. 265—285.
40. Gudkov D. I., Shevtsova N. L., Dzyubenko E. V. et al. Problems of the long-term radiation exposure of aquatic biota within the Chernobyl accident exclusion zone // *The Lessons of Chernobyl: 25 Years Later* / Ed. by E. B. Burlakova, V. I. Naidich. — New-York: Nova Science Publishers, Inc., 2012. — P. 301—315.
41. Gudkov D. I., Shevtsova N. L., Pomortseva N. A et al. Aquatic plants and animals in the Chernobyl exclusion zone: effects of long-term radiation exposure on different levels of biological organization // *Genetics, Evolution and Radiation* / Ed. by V. Korogodina, C. Mothersill, S. Inge-Vechtomov, C. Seymour. — Cham: Springer International Publishing AG, 2016. — P. 287—302.
42. Kuzmenko M. I., Polikarpov G. G. Radioecology of nature waters at the eve of millenium // *Hidrobiol. J.* — 2000. — Vol. 36, N 2. P. 60—76.
43. Kuzmenko M. I. Reaction of hydrobionts on ionizing radiation // *Ibid.* — 2018. — Vol. 54, N 2. — P. 3—16.
44. Polikarpov G. G. Radioecology of Aquatic Organisms / Ed. by V. Schults and A. Klement, Jr. — Amsterdam: North — Holland Publ. Co. New-York: Reinhold Boox Division, 1966. — 314 p.
45. Polmar N. Death of the Thresher. — Philadelphia & New-York: Chilton Company, 1964. — 2004 p.
46. Shevtsova N. L., Gudkov D. I. Cytogenetic Damages in the Common Reed *Phragmites australis* in the Water Bodies of the Chernobyl Exclusion Zone // *Hydrobiol. J.* — 2013. — Vol. 49, N 2. — P. 85—98.
47. Shevtsova N. L., Gudkov D. I. Cytogenetic effects of long-term radiation on higher aquatic plants within the Chernobyl accident exclusion zone // *Radioprotection.* — 2009. — Vol. 44, N 5. — P. 937—940.
48. Shevtsova N. L., Shvets D. I., Yablonskaya L. I. Effect of gamma irradiation on certain species of fresh-water planktonic algae // *Hydrobiol. J.* — 1990. — Vol. 25, N 5. — P. 92—98.
49. Shevtsova N. L., Yavniuk A. A., Gudkov D. I. Effect of rest period on germination of the common reed seeds from the water bodies of the Chernobyl exclusion zone // *Ibid.* — 2014. — Vol. 50, N 5. — P. 78—88.