DOI: 10.21870/0131-3878-2017-26-1-35-43

Подходы к решению проблем теоретической радиоэкологии. Обзор

Жураковская Г.П., Петин В.Г.

МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России, Обнинск

Анализ существующих проблем теоретической радиоэкологии с позиций представлений о радиоёмкости – цель настоящей работы. Радиоёмкость – это предельное радионуклидное загрязнение, при котором не наблюдаются серьёзные изменения функционирования биоты в целом или её отдельных составляющих. Количественное изменение параметров радиоёмкости даёт чёткое представление о качественном «благополучии» биосистемы. Этой проблеме посвящён ряд трудов известного украинского эколога Ю.А. Кутлахмедова, обобщение которых наряду с обзором работ других авторов, представлены в статье. Теория радиоёмкости экологических систем применена для определения нормативов на допустимые сбросы и выбросы радионуклидов в окружающую среду, а также для оценки экологических рисков вследствие поступления их в экосистему. С использованием математического аппарата установлены возможные предельные нагрузки радионуклидного загрязнения на биологические системы. Показана эвристичность теории радиоёмкости в применении её к реальным условиям загрязнения окружающей среды, являющегося результатом различных техногенных процессов. На основании экспериментальных данных влияния множества сопутствующих климатических, физических и химических факторов на распределение и перераспределение радионуклидов как в водных, так и наземных экосистемах, предложено использовать параметр радиоёмкости не только для оценки радионуклидного загрязнения, но и для «эквидозиметрической унифицированной» оценки нагрузки воздействующих на биоту факторов самой различной природы.

Ключевые слова: радиоёмкость, теория надёжности, теоретическая экология, ионизирующее излучение, загрязнители, экосистема, математические модели, радионуклиды, радиоустойчивость биосистем, математическое моделирование.

Одной из известных теоретических моделей действия ионизирующего излучения на клеточном уровне является вероятностная модель [1, 2], объединяющая идеи теории попадания и мишени [3] с биологической стохастикой [4]. В соответствии с этой моделью, величина поглощённой энергии в чувствительном объёме клетки не определяет строго детерминировано гибель клетки, как в классических моделях теории попаданий, а обуславливает снижение вероятности успешного деления клетки. Другими словами, вероятностная модель учитывает стохастичность как взаимодействия ионизирующих излучений с веществом, так и стохастичность реализации повреждений на биохимическом этапе формирования радиационных повреждений. Было показано, что, если вероятность формирования повреждений на единицу дозы облучения b , а распределение повреждений по клеткам является Пуассоновским при среднем значении числа повреждений $a = bD$, где D – доза ионизирующего излучения, тогда выживаемость клеток есть:

$$S(a) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{e^{-a} a^i}{i!} \left\{ 1 - \left[\frac{1 - (1 - \alpha)^i}{(1 - \alpha)^i} \right]^2 \right\}, \quad (1)$$

где α – вероятность отказа на одно повреждение, а вероятность успешного деления клеток, содержащих i повреждений, определяется выражением $(1 - \alpha)^i$.

Аналогичные параметры можно ввести для каждой подсистемы сложной иерархической системы. Такой подход был использован Ю.А. Кутлахмедовым [5, 6]. Автор продемонстрировал

Жураковская Г.П.* – вед. научн. сотр., д.б.н.; Петин В.Г. – зав. лаб., д.б.н., профессор. МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России.

*Контакты: 249036, Калужская обл., Обнинск, ул. Королева, 4. Тел.: (484) 399-70-08; e-mail: zhgalina@mail.ru.

возможность создания модели радиационного поражения на всех уровнях организации биологических систем. Количественно описаны кривые доза-эффект субпопуляций клеток, выживаемости клеток органов и тканей организма, а также целостного организма. Для анализа радиобиологических особенностей многоклеточных растений использованы идеи и методы теории надёжности биологических систем, суть которых сводится к математическому моделированию реакций на облучение клеток, формирующих растительную ткань. От сложности организации ткани из субпопуляций клеток зависит характер радиобиологических реакций. Для каждой из этих иерархических систем введены параметры, характеризующие вероятность успешного деления клеток, детерминирующие надёжность каждого уровня биологической организации. При этом автор учитывает вероятности обратных успешных переходов или отказов между различными уровнями радиационного поражения, приводящие к снижению эффективности действия ионизирующих излучений. Тем самым показано, что высокая надёжность биологических систем не может существовать сама по себе, а должна обеспечиваться эффективными системами восстановления и резервирования. Восстановление является одним из основных механизмов, обеспечивающих надёжность функционирования биосистем.

Важным направлением современной радиоэкологии является разработка теоретических представлений о распределении, накоплении и миграции радионуклидов в природных экосистемах. Необходимым условием этих исследований является оценка допустимых доз, экологического нормирования, а также определение радиоёмкости экосистем [7-9]. Понятие радиоёмкости экосистем, определяющее меру надёжности биоты, было введено для оценки распределения радиоактивных загрязнений в непроточном водоёме [10]. В наиболее полном объёме представление об экологической ёмкости и радиоёмкости обобщено в недавней монографии Ю.А. Кутлахмедова [11], в которой автор провел анализ существующих проблем теоретической радиоэкологии с единых позиций.

Для определения состояния биоты Ю.А. Кутлахмедов вводит общее понятие радиоёмкости, определяющее предельное радионуклидное загрязнение экосистемы, при котором не наблюдаются серьёзные изменения её функционирования. В терминах теории надёжности, часто используемой автором, каждая компонента экосистемы характеризуется вероятностью удержания в ней радионуклидов. Если радиоёмкость экосистемы равна 1, то это означает, что все компоненты экосистемы способны удерживать поступающую в неё радиоактивность: на выходе из экосистемы радиоактивные вещества практически не появляются. Данный случай относится к идеальной экосистеме. Другой крайний случай – радиоёмкость равна 0, т.е. экосистема совершенно не способна удерживать радиоактивные вещества: сколько радионуклидов поступает в экосистему, столько и выходит из неё. Была продемонстрирована высокая радиоёмкость и надёжность экосистемы, состоящей из каскада плавно перетекающих водоёмов [11]. Результаты экспериментальной работы позволили установить факт прямой взаимосвязи фактора радиоёмкости и надёжности биоты в экосистеме: «чем выше фактор радиоёмкости, тем выше уровень благополучия и надёжности биоты в этой экосистеме». Так, на растительных экосистемах было показано, что высокая степень удерживания растениями радионуклида ^{137}Cs , как и минерального элемента питания калия, свидетельствует об изначальной устойчивости и надёжности растительной экосистемы. Изменение показателя радиоёмкости биоты растительной экосистемы в силу различных обстоятельств (присутствие химических поллютантов или дополнительное воздействие физическими факторами), «чётко отображает снижение благополучия

биоты и надёжности экосистемы». Это означает, что параметр радиоёмкости способен выступать в качестве меры надёжности каждого элемента экосистемы, а также экосистемы в целом. Чем выше фактор радиоёмкости, тем выше вероятность удержания трассера (радионуклида) в каждом из элементов экосистемы и, следовательно, надёжность экосистемы в целом.

На примере двухкамерной модели экосистемы, которая включает среду (воду) и биоту, приводится пример теоретического и экспериментального анализа, убедительно демонстрирующий, что изменение параметра радиоёмкости является эффективным показателем состояния биоты экосистем. Экспериментальное испытание надёжности биологических систем проведено автором на примере популяции растений Спироделлы многокоренной. Эти исследования позволили количественно описать радиобиологические реакции на различных уровнях интеграции и получить совпадения прогнозов математических моделей и экспериментальных данных [11]. Приведены экспериментальные данные по выживаемости клеток, органов и тканей, целостных организмов. При этом обнаружено позитивное влияние фракционирования токсического фактора на показатели радиоёмкости модельной экосистемы, что может свидетельствовать о роли процессов восстановления растительной компоненты экосистемы в защите от токсического воздействия. Последовательное введение математических моделей нижнего уровня иерархии в модель следующего уровня иерархии позволяет строить количественную модель радиационного поражения практически на любом уровне интеграции. На этом основании разработаны принципы и методы оценки радиоёмкости экологических систем, определяющие их надёжность.

Общую надёжность экосистемы, если на неё влияют k загрязнителей, определяют как:

$$F = \prod_{i=1}^k (1 - F_i), \quad (2)$$

где F_i – фактор ёмкости экосистемы по конкретным загрязнителям [9].

В качестве меры радиоёмкости F в работе [10] введён параметр, учитывающий глубину водоёма, толщину сорбирующего слоя грунта и средневзвешенный коэффициент накопления радионуклидов в этом слое. Для стационарного режима коэффициент F характеризует ту часть поступившей в водоём радиоактивности, которая связывается донными отложениями, а величина $(1 - F)$ – радиоактивность, остающаяся в воде и поступающая в следующий водоём каскада. Показано, что для медленно текущих водоёмов фактор радиоёмкости варьирует от 0,6 до 0,8.

Экосистема обладает высокой надёжностью при условии сохранения продукционной функции и кондиционирования среды. Продукционная функция обеспечивает способность этой системы поддерживать биомассу, разнообразие видов и других параметров. Кондиционирование среды обеспечивает поддержание качества среды обитания. Эти две функции должны выполняться в условиях удержания радионуклидов в экосистеме длительное время.

Общую экологическую ёмкость Ю.А. Кутлахмедов рассматривает как меру надёжности экосистемы. Была оценена надёжность продукционной функции фитопланктона первого из водоёмов Киевского водохранилища [9]. Для оценки биомассы B использовали формулу:

$$B = \beta \left(\sum_{i=1}^n (B_i / B_{\max}) \right) N, \quad (3)$$

где β – коэффициент значимости показателя, равный 0,567; B_i – биомасса отдельных видов от 1 до n в экосистеме; B_{max} – максимальная биомасса в ряду видов. Используя это выражение, была оценена общая экологическая ёмкость по продуктивности P_i по годам наблюдений. Если учесть фактор радиоёмкости F , то значение общей экологической ёмкости (мера надёжности) оценивается как произведение $P = P_i F$. Показано, что на среднем участке Киевского водоёма надёжность экосистем в 1965-1967 гг. составляла $\approx 0,5$. Мощное антропогенное воздействие на водоём уменьшило экологическую ёмкость до значения 0,3, которая через несколько лет восстановилась до исходного значения. Был сделан вывод, что каскадные системы водоёмов могут хорошо работать как системы дезактивации в течение ряда лет.

Полезным и актуальным является направление работ автора, связанное с определением роли различных факторов, действующих перед радионуклидным загрязнением или одновременно с ним. Впервые выявлено снижение показателя радиоёмкости биоты в растительной экосистеме под влиянием химических поллютантов и при гамма-облучении растений, количественно и качественно отобразившее изменение состояния биоты и надёжности экосистемы. В работах [7, 11, 12] анализируются методы регуляции радиоёмкости. В опытах с проростками кукурузы регистрировали изменение поглощения радионуклида ^{137}Cs (трассер) под влиянием действия однократного предварительного облучения ионизирующего излучения или воздействия химического поллютанта (CdCl_2). Первоначально трассер находился в воде, т.е. радиоёмкость растения была близка к нулю. С увеличением дозы предварительного облучения поглощение трассера растением увеличилось в 2 раза, что могло быть обусловлено возрастанием проницаемости клеточной мембраны в результате действия облучения. Ещё большее увеличение радиоёмкости (в 5 раз) наблюдалось под действием поллютанта. Это указывает на большую способность растений поглощать радионуклид в присутствии поллютанта по сравнению с действием одного ионизирующего излучения. По результатам проведённых экспериментов по действию ионизирующего излучения и тяжёлых металлов предложены параметры, способные описывать результат влияния факторов на биоту. Показано, что параметры радиоёмкости могут использоваться для оценки состояния и благополучия биоты.

С учётом поведения параметра радиоёмкости Ю.А. Кутлахмедов анализирует оценку состояния биоты экосистемы. Автор представляет модели радиоёмкости [11] различных экосистем и предлагает параметры, способные адекватно описывать реакцию биоты на воздействие разных факторов. Были проведены расчёты радиационной ёмкости и экологической ёмкости, которые учитывают как сценарии штатных выбросов опасных предприятий и предприятий ядерного энергетического цикла, так и возможные аварийные ситуации. Фактор экологической ёмкости и радиоёмкости конкретного элемента ландшафта F_j или экосистемы на базе камерных моделей определяется следующим образом:

$$F_j = \sum a_{ij} / (\sum a_{ij} + \sum a_{ji}), \quad (4)$$

где $\sum a_{ij}$ – сумма скоростей перехода поллютантов из разных составляющих экосистемы в конкретный элемент ландшафта или экосистемы, а $\sum a_{ji}$ – сумма скоростей оттока поллютантов из исследуемой j -ой камеры в другие составляющие компоненты экосистемы.

Конкретные количественные расчёты, основанные на этом подходе [11], были использованы для создания карт радиоёмкости и экологической ёмкости территории Украины в зоне влияния опасных для окружающей среды предприятий. В частности, были составлены карты-схемы экологической ёмкости (надёжности) и экологической опасности в результате ветрового переноса поллютантов в районе добычи и переработки урановых руд на горно-обогатительном комбинате (вблизи г. Жёлтые Воды), а также на территории расположения действующих АЭС (Южно-Украинская, Хмельницкая, Запорожская).

Теоретические разработки Ю.А. Кутлахмедова, а также модели радиоёмкости и надёжности позволяют адекватно описать закономерности миграции и перераспределения радионуклидов в склоновых экосистемах и провести математическое моделирование изучаемого явления, открывают возможность применять специальные контрмеры. Важным результатом математических моделей и проведённых на их основе количественных оценок является доказательство возможности прогнозировать радиоустойчивость биосистем, исходя из данных по радиоустойчивости отдельных подсистем. Идеи, методы и математический аппарат теории надёжности может быть использован в радиобиологии многоклеточных систем.

В случае радионуклидных выбросов и сбросов в окружающую среду встаёт задача определения предельных значений поступления радионуклидов в экосистему, когда в результате их действия ещё не следует серьёзных изменений в самой экосистеме. Естественной границей для оценки предельно допустимого сброса радионуклидов в экосистемы является дозовая нагрузка или мощность годовой дозы облучения. В работах Г.Г. Поликарпова была введена шкала дозовых нагрузок на экосистемы в виде 4-х основных дозовых пределов [13, 14]. На основе шкалы дозовых нагрузок на экосистемы и их элементы [11, 15] удалось оценить предельные концентрации радионуклидов (экологические нормативы), выше которых можно ожидать заметного влияния на структуру, биологические характеристики и параметры радиоёмкости экосистем. Теория радиоёмкости экосистем использована для определения экологических нормативов на допустимые сбросы и выбросы радионуклидов в окружающую среду. Установлен конкретный предел радионуклидного загрязнения биоты, который может быть положен в основу экологического нормирования (200-1000 кБк/кг). Обнаружено, что норматив на бентос в 10-100 раз жёстче, чем экологический норматив на планктон и нектон. Показано, что существующие уровни радионуклидного загрязнения склоновых экосистем 30-километровой зоны ЧАЭС превышают предлагаемые экологические нормативы. Это демонстрирует эффективность применения теории радиоёмкости к реальным экосистемам.

Существующая в мире система гигиенического нормирования не решает проблему безопасности биоты экосистем, которая оказывается в зоне влияния радиационных аварий и выпадений. Как показал опыт оценки влияния радионуклидов на биоту в случаях Кыштымской и Чернобыльской аварий, такие заметные влияния имеют место. Поэтому в рекомендациях МКРЗ [16] была поставлена проблема создания специальной системы экологического нормирования. МКРЗ предлагает путь выбора особо чувствительных видов в экосистеме, а по их реакции уже можно судить о превышении и/или не превышении допустимых уровней загрязнения биоты экосистем. По мнению Ю.А. Кутлахмедова, разработка системы экологических нормативов на допустимые сбросы и выбросы поллютантов в биоту экосистем требует особого подхода и создания специальных моделей, учитывающих надёжность экосистем. В существующей системе гигиенического нормирования действуют относительно простые подходы и модели оценки допус-

тимых уровней загрязнения воздуха, воды и продуктов питания. Задача установления экологических нормативов на допустимые уровни загрязнения биоты намного сложнее.

Действующий закон по охране окружающей среды обязывает вредные производства и объекты для осуществления производственной деятельности оформлять лицензию на всякую работу, потенциально опасную для персонала, населения и окружающей среды. Необходимо предусмотреть при получении такой лицензии обязательное экологическое страхование предприятия и других опасных объектов. Такое обязательное страхование от возможных аварий и аварийных ситуаций обеспечит страховую защиту персоналу, населению и окружающей среде. Система страхования от аварий и аварийных ситуаций на вредных и опасных производствах и объектах эффективно действует во многих странах Европы. Экологическая страховая защита населения, персонала и окружающей среды является основным средством защиты от аварий и катастроф природного и техногенного происхождения. В силу сложности описания, понимания и прогнозирования экологических процессов, особенно в ситуациях аварий и катастроф, основным средством защиты является оценка рисков, ущербов и экологическое страхование от этих рисков. Радиационный риск в размере 10^{-4} в год на Украине оценивается примерно в 4000 долларов США, согласно закону о радиационной защите населения.

Решение проблем теоретической радиоэкологии должно учитывать синергическое взаимодействие различных физических и химических агентов окружающей среды, при котором наблюдается взаимное усиление вредного действия. Эта проблема разработана во многих недавних публикациях [17-20].

Общий вывод, который следует из работ Ю.А. Кутлахмедова, можно кратко резюмировать следующим образом. Автор, опираясь на разработанную им теорию экологической ёмкости и радиоёмкости, провёл анализ и исследование существующих проблем теоретической радиоэкологии с единых позиций. Разные экосистемы рассматриваются автором как системы транспорта радионуклидов в разных типах экосистем. Способность компонент экосистем накапливать и удерживать радионуклиды предлагается рассматривать как характеристику надёжности экосистем в плане их способности к транспорту радионуклидов от окружающей среды к человеку и биоте. Это позволило автору привлечь к решению задач радиоэкологии теорию и модели надёжности сложных систем.

Литература

1. Капульцевич Ю.Г., Петин В.Г. Анализ кривых выживания и соотношения форм инактивации облученных дрожжевых клеток с помощью вероятностной модели //Радиобиология. 1972. № 12. С. 864-872.
2. Капульцевич Ю.Г. Количественные закономерности лучевого поражения клеток. М: Атомиздат, 1978. 232 с.
3. Тимофеев-Ресовский Н.В., Иванов В.И., Корогодин В.И. Применение принципа попадания в радиобиологии. М: Атомиздат, 1968. 228 с.
4. Хуг О., Келлерер А. Стохастическая радиобиология. М: Атомиздат, 1969. 254 с.
5. Кутлахмедов Ю.А. Исследование надёжности растительного организма радиобиологическими методами //Формы пострadiaционного восстановления растений. Киев: Наукова думка, 1980. С. 116-157.
6. Кутлахмедов Ю.А., Матвеева И.В., Родина В.В. Надёжность экологических систем. Теория, модели и практические результаты. Saarbrücken, Deutschland: Palamarium Academic Publishing, 2013. 317 с.
7. Кутлахмедов Ю.А., Гродзинский Д.М., Михеев А.Н., Родина В.В. Методы управления радиоёмкостью. Методическое пособие. Киев: КГУ, 2006. 172 с.
8. Кутлахмедов Ю.А., Корогодин В.И., Родина В.В., Матвеева И.В., Петрусенко В.П., Саливон А.Г., Леншина А.Н. Теория и модели радиоёмкости в современной радиоэкологии //Материалы международной конференции «Радиоэкология: итоги, современное состояние и перспективы». М., 2008. С. 177-193.
9. Кутлахмедов Ю.А., Поликарпов Г.Г., Корогодин В.И. Принципы и методы оценки радиоёмкости экологических систем //Феномен жизни. Избранные труды В.И. Корогодина. М: Наука, 2012. Т. 2. С. 18-23.
10. Агре А.Л., Корогодин В.И. О распределении радиоактивных загрязнений в непроточном водоёме //Медицинская радиология. 1960. № 1. С. 63-73.
11. Кутлахмедов Ю.А. Дорога к теоретической радиоэкологии. Киев: Фитосоциоцентр, 2015. 360 с.
12. Кутлахмедов Ю.А., Корогодин В.И., Кольтовер В.К. Основы радиоэкологии. Киев: Вища школа, 2003. 319 с.
13. Поликарпов Г.Г. Экологическое введение в проблему надёжности самоочистной функции водной экосистемы //Надёжность биологических систем. Киев: Наукова думка, 1985. С. 172-179.
14. Поликарпов Г.Г., Егоров В.Н. Морская динамическая радиохемозология. М: Энергоатомиздат, 1986. 476 с.
15. Матвеева И.В. Радиоёмкость различных типов экосистем и принципы их экологического нормирования //Международный научный журнал «ScienceRise». 2014. № 4/2 (4). С. 73-79.
16. МКРЗ. Рекомендации 2007 года Международной комиссии по радиационной защите //Труды МКРЗ. Публикация 103 МКРЗ. М., 2009. 344 с.
17. Евсеева Т.И., Гераськин С.А. Сочетанное действие факторов радиационной и нерадиационной природы на транскацию. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 156 с.
18. Sucher N.J. Searching for synergy *in silico*, *in vitro* and *in vivo* //Synergy. 2014. V. 1, Issue 1. P. 30-43.
19. Жураковская Г.П., Петин В.Г. Принципы математического моделирования комбинированных воздействий в биологии и медицине (обзор литературы) //Радиация и риск. 2015. Т. 24, № 1. С. 61-73.
20. Petin V.G., Kim J.K. Synergistic Interaction and Cell Responses to Environmental Factors. New York: Nova Sciences Publisher, 2016. 337 p.

Approaches to solving problems of theoretical radioecology. Review

Zhurakovskaya G.P., Petin V.G.

A. Tsyb MRRC, Obninsk

The analysis of the existing problems in theoretical radioecology from the standpoint of ideas about radiocapacity is the purpose of the present work. Radiocapacity is highest level of radionuclide contamination, that does not cause changes in the functioning of either the biota on the whole or its individual components. Quantitative change in radiocapacity parameters gives a precise picture of the qualitative "well-being" of the biosystem. This problem is analyzed in a series of works of famous Ukrainian ecologist Yu. A. Kutlahmedov, synthesis of which, along with an overview of the work of other authors, are presented in the article. Theory of ecological systems radiocapacity is applied to establish a standard of the permissible of emissions and discharges of radionuclides into the environment, as well as to evaluate the ecological risks connected with their receipt in ecosystem. Using the mathematical apparatus possible limiting load of radionuclide contamination of biological systems is established. Heuristic of radiocapacity theory has been shown for its application to the real conditions of environmental pollution induced by various industrial processes. Based on experimental data concerning the influence of a number of related climatic, physical and chemical factors on the distribution and redistribution of radionuclides in aquatic and terrestrial ecosystems, it is suggested to use radiocapacity parameter not only for the evaluation of radionuclide contamination, but also for "equidosimetric unified" assessment of the biota load resulted from factors of various natures.

Key words: *radiological capacity, theory of reliability, theoretical ecology, ionizing radiation, pollutants, ecosystem, mathematical models, radionuclids, radioresistance of biosystems, mathematical modeling.*

References

1. **Kapultsevich Yu.G., Petin V.G.** Analysis of survival curves and inactivation forms of irradiated yeast cells with the help of the probable model. *Radiobiologiya – Radiobiology*, 1972, no. 12, pp. 864-872. (In Russian).
2. **Kapultsevich Yu.G.** Quantitative regularities of cell radiation damage. Moscow, Atomizdat, 1978. 232 p. (In Russian).
3. **Timofeev-Resovsky N.V., Ivanov V.I., Korogodin V.I.** Application of hit principle in radiobiology. Moscow, Atomizdat, 1968. 228 p. (In Russian).
4. **Hug O., Kellerer A.** Stochastic radiobiology. Moscow, Atomizdat, 1969. 254 p. (In Russian).
5. **Kutlahmedov Yu.A.** The study of plant organism reliability by radiobiological methods. In: Forms postradiation plant recovery. Kiev, Naukova Dumka, 1980, pp. 116-157. (In Russian).
6. **Kutlahmedov Yu.A., Matveeva I.V., Rodina V.V.** Reliability of ecological systems. Theory, models, and practical results. Saarbrücken, Deutschland, Palmarium Academic Publishing, 2013. 317 p. (In Russian).
7. **Kutlahmedov Yu.A., Grodzinskiy D.M., Mikheev A.N., Rodina V.V.** Radiocapacity management methods. Technical paper. Kiev, Kiev State University, 2006. 172 p. (In Russian).
8. **Kutlahmedov Yu.A., Korogodin V.I., Rodina V.V., Matveeva I.V., Petrusenko V.P., Salivon A.G., Lenshin A.N.** Theory and radiocapacity model in modern radioecology. Proceedings of the International Conference "Radioecology: results, current status and prospects". Moscow, 2008, pp. 177-193. (In Russian).
9. **Kutlahmedov Yu.A., Polikarpov G.G., Korogodin V.I.** Principles and methods of assessment of radiocapacity of ecological systems. In: The phenomenon of life. V.I. Korogodin's selected works. Moscow, Nauka, 2012, vol. 2, pp. 18-23. (In Russian).

10. **Agre A.L., Korogodin V.I.** On the distribution of radioactive contamination in a stagnant reservoir. *Medicinskaja radiologija – Medical Radiology*, 1960, no. 1, pp. 63-73. (In Russian).
11. **Kutlahmedov Yu.A.** The road to theoretical radioecology. Kiev, Phitosotsiocentr, 2015. 360 p. (In Russian).
12. **Kutlahmedov Yu.A., Korogodin V.I., Koltover V.K.** Basics of radioecology. Kiev, Vishha Shkola, 2003. 319 p. (In Russian).
13. **Polikarpov G.G.** Ecological introduction to the problem of the reliability of self-cleaning function of the aquatic ecosystem. In: Reliability of biological systems. Kiev, Naukova Dumka, 1985, pp. 172-179. (In Russian).
14. **Polikarpov G.G., Egorov V.N.** Marine dynamic radiochemoecology. Moscow, Energoatomisdat, 1986. 476 p. (In Russian).
15. **Matveeva I.V.** Radiocapacity of different types of ecosystems and the principles of their environment regulation. *ScienceRise*, 2014, no. 4/2 (4), pp. 73-79. (In Russian).
16. ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Ann. ICRP*, vol. 37, no 2-4.
17. **Evseeva T.I., Geraskin S.A.** Combined effect of radiation and nonradiation factors on tradescantia. Ekaterinburg, Ural Division RAS, 2001. 156 p. (In Russian).
18. **Sucher N.J.** Searching for synergy *in silico*, *in vitro* and *in vivo*. *Synergy*, 2014, vol. 1, issue 1, pp. 30-43.
19. **Zhurakovskaya G.P., Petin V.G.** Principles of mathematical modeling of combined effects in biology and medicine. Review of the literature. *Radiacija i risk – Radiation and Risk*, 2015, vol. 24, no. 1, pp. 61-73. (In Russian).
20. **Petin V.G., Kim J.K.** Synergistic Interaction and Cell Responses to Environmental Factors. New York, Nova Sciences Publisher, 2016. 337 p.