
РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

УДК 319.16:504

СОВРЕМЕННАЯ ПАРАДИГМА РАДИОЭКОЛОГИИ И СИСТЕМА РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

М. Г. ГЕРМЕНЧУК¹⁾

¹⁾Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова,
Белорусский государственный университет,
ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь

Представлена современная парадигма радиоэкологии, которая рассматривает человека и окружающую среду как равноправные объекты радиационной защиты и определяет биосферу в качестве деятельной силы, влияющей на радиационную безопасность. Система радиационного мониторинга окружающей среды как система в строгом математическом смысле подчиняется общесистемным законам, имеет свои основные цели и свойства, а также является типологически неоднородной, динамической, открытой, иерархической, многоуровневой и обладает обратными связями. В исследовании представлены строгие определения эффективности системы радиационного мониторинга окружающей среды в терминах лингвистического и теоретико-множественного подходов. Показано, что необходимо дальнейшее ее изучение для создания целостного описания системы и прогноза поведения в различных типах ситуаций облучения, что актуально в условиях ввода в эксплуатацию Белорусской АЭС.

Ключевые слова: парадигма радиоэкологии; радиационная безопасность; Белорусская АЭС; катастрофа на Чернобыльской АЭС; ситуации облучения; свойства системы радиационного мониторинга окружающей среды; типологическая неоднородность системы.

Образец цитирования:

Герменчук МГ. Современная парадигма радиоэкологии и система радиационного мониторинга окружающей среды. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2020;2:26–35.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2020-2-26-35>

For citation:

Germenchuk MG. Modern paradigm of radioecology and environmental radiation monitoring system. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2020;2:26–35. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2020-2-26-35>

Авторы:

Мария Григорьевна Герменчук – кандидат технических наук, доцент; заместитель директора по научной работе.

Authors:

Maria G. Germenchuk, PhD (engineering), docent; deputy director research.
margermen@gmail.com

MODERN PARADIGM OF RADIOECOLOGY AND ENVIRONMENTAL RADIATION MONITORING SYSTEM

M. G. GERMENCHUK^a

^a*International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Daihabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus*

The article presents the modern paradigm of radioecology, which considers people and the environment as equal objects of radiation protection and defines the biosphere as an active force affecting radiation safety. Using the result of environmental radiation monitoring in the Republic of Belarus after the Chernobyl disaster, it was shown that the environmental radiation monitoring system, as a mathematical system, obeys system-wide laws, has its main system goals and properties and is typologically heterogeneous, dynamic, open, hierarchical, multi-level and has feedbacks. The article presents rigorous definitions of the effectiveness of the environmental radiation monitoring system in terms of linguistic and set-theoretic approaches. This implies that further research is needed to create a holistic description of the system and a forecast of its behavior in various types of exposure situations, which is relevant in the context of commissioning of the Belarusian NPP.

Key words: paradigm of radioecology; radiation safety; Belarusian NPP; disaster at the Chernobyl NPP; exposure situations; properties of the radiation monitoring system of the environment; typological heterogeneity of the system.

Введение

В первой четверти XXI в. проблемы обеспечения радиационной безопасности человека и биосферы относятся к основным угрозам и рискам, угрожающим человечеству. Повсеместное развитие и применение ядерных технологий, а также последствия глобального радиоактивного загрязнения биосферы после испытаний ядерного оружия в окружающей среде, аварий на радиационно-опасных промышленных объектах и, наконец, катастроф на Чернобыльской и Фукусимской АЭС обусловили высокий уровень радиационной опасности и уязвимости настоящих и будущих поколений людей, а также биосферы в целом. Более того, дальнейшее развитие ядерных технологий и атомной энергетики, в том числе строительство первой атомной электростанции (далее – АЭС) в Республике Беларусь, усиливают действующие и потенциальные угрозы и риски в сфере радиационной безопасности [1].

Современное общество нуждается в защите от этих угроз и рисков, реализуемых через систему радиационной безопасности человека и окружающей среды, как это предусматривает новая редакция Закона Республики Беларусь «О радиационной безопасности» [2].

Для обеспечения радиационной безопасности на социально-приемлемом уровне государство и общество должны иметь эффективные механизмы управления рисками для их предотвращения или последующей минимизации, основанные на информации об оценке и прогнозе радиационной обстановки, дозовых нагрузках на человека и доказательствах защищенности объектов окружающей среды. Таким образом, радиационный мониторинг окружающей среды является необходимой частью таких механизмов.

Развитие радиоэкологии как науки во всем мире и в Республике Беларусь (особенно после катастрофы на Чернобыльской АЭС) позволило получить эмпирический материал, который является основой для изучения взаимодействия ионизирующего излучения (далее – ИИ) с веществом, оценки и прогнозирования радиационной обстановки в окружающей среде, а также текущих и прогнозных дозовых нагрузок на человека в условиях известных угроз и рисков [3; 4].

В практике обеспечения радиационной безопасности радиационный мониторинг окружающей среды по умолчанию уже определен как система, которая имеет генеральные цели, внешнюю и внутреннюю среду, а также входит во внешние надсистемы, например, радиационной безопасности или национальную систему мониторинга окружающей среды. Отметим, что, согласно общей теории систем (далее – ОТС), радиационная безопасность человека и биосферы выступает в качестве проблемосодержащей области в качестве внешней среды системы – угрозы, риски и информационные потребности общества в сфере радиационной безопасности, в качестве внутренней среды – системы измерений: приборы и оборудование, база данных, расчетные модели и т. д.

Анализ состояния радиационной безопасности в Республике Беларусь показывает, что к известным действующим угрозам и рискам относятся радиоактивное загрязнение окружающей среды после катастрофы на Чернобыльской АЭС, 4 АЭС вдоль границ, а также Белорусская АЭС [1]. Кроме того, по данным Департамента по ядерной и радиационной безопасности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, по состоянию на 31 декабря 2019 г. в стране зарегистрированы 22932 источника ИИ (далее – ИИИ).

К потенциальным угрозам и рискам следует отнести актуальные угрозы ядерного (радиологического) терроризма, несанкционированное перемещение ИИИ и ядерных материалов, трансграничное

радиоактивное загрязнение, а также утерянные ИИИ. Отметим, что принятая ранее в прошлом столетии парадигма так называемой «сельскохозяйственной» радиоэкологии уже не соответствует современным научным и практическим потребностям в сфере обеспечения радиационной безопасности [5].

Таким образом, на современном этапе обеспечения радиационной безопасности при описании радиационного мониторинга как системы возникает методологическая проблема, которая в настоящее время не имеет удовлетворительного научного разрешения.

Суть проблемы заключается в том, что в отсутствие целостного строгого описания радиационного мониторинга как системы невозможно дать научно обоснованное заключение о том, что радиационная безопасность человека и биосферы будет обеспечена на социально-приемлемом уровне в различных ситуациях облучения и радиоактивного загрязнения окружающей среды с учетом действующих и потенциальных рисков и угроз.

Важно отметить, что категории рисков, угроз и информационных потребностей органов государственного управления в сфере радиационной безопасности, критической инфраструктуры государства, научной общественности, СМИ и населения имеют социальную природу и типологически отличаются от научно-технической части мониторинга, что затрудняет или делает невозможным целостное описание системы и прогноз ее поведения с использованием традиционных методов.

Это связано с тем, что, как правило, радиационный мониторинг рассматривается в качестве научно-технической системы, которая включает в себя приборы и оборудование, системы сбора и передачи информации и т. д. По результатам функционирования научно-технической системы формируются базы эмпирических данных, которые в дальнейшем используются для оценки и прогнозирования радиационной обстановки, иными словами, в системе действуют прямые связи «снизу вверх»: «наблюдения» → «оценка и прогноз».

Однако анализ и обобщение практического опыта в сфере обеспечения радиационной безопасности, в том числе негативного, требует, чтобы для обеспечения ожидаемой эффективности радиационного мониторинга существовали не только прямые связи «снизу вверх», но и обратные – «сверху вниз»: «угрозы и риски» → «информационные потребности» ↔ «оценка и прогноз» ↔ «наблюдения» (рис.). Это означает, что в случае, если система в текущем периоде не обеспечивает достижения своих целей, как это произошло в 1986 г. во время катастрофы на Чернобыльской АЭС, обратные связи, которые в том числе имеют социальные аспекты, должны привести систему в такое состояние, когда полностью удовлетворены информационные потребности общества для обеспечения радиационной безопасности и система станет эффективной.

Для разрешения этой научной проблемы необходимо разработать единый методологический подход, который позволит установить связи между внешней и внутренней средой системы радиационного мониторинга, ее техническими и социальными аспектами и предоставит научно обоснованные методы для оценки и прогнозирования ее состояния и эффективности в различных условиях с учетом типологической сложности (неоднородности).

Изучая процессы обеспечения радиационной безопасности на социально-приемлемом уровне, необходимо учитывать, что для современной стадии ускоренных социальных изменений характерны неупорядоченность, неустойчивость, разнообразие, неравновесность, нелинейность и темпоральность [6].

Цель исследования: представить современную парадигму радиоэкологии и обосновать применение принципов общесистемных изоморфизмов для целостного описания системы радиационного мониторинга окружающей среды.

В статье изучены и описаны общие свойства радиационного мониторинга как системы в строгом математическом смысле, а также дано определение эффективности системы.

Материалы и методы исследования

Основные методологические подходы. Первый из этих подходов (эмпирический) включает анализ и обобщение практического опыта использования системы радиационного мониторинга для обеспечения радиационной безопасности и предоставляет решения для конкретных ситуаций облучения и базируется на индуктивном методе. Второй (теоретический) с использованием гипотетико-дедуктивного метода позволяет рассматривать и описывать радиационный мониторинг как систему в строгом смысле, с ее свойствами и характеристиками, дает оценку и прогноз ее состояния и поведения.

Для описания радиационного мониторинга окружающей среды как целостной системы представляется эффективным использовать основные принципы научного познания: детерминизма, соответствия и дополнительности, а также принцип общесистемных изоморфизмов, индуктивный и гипотетико-дедуктивный, логико-исторический подходы и методы, применяемые в математической логике, ОТС в системном и теоретико-множественном анализе.



Модель внешней и внутренней среды системы радиационного мониторинга окружающей среды

Model of the external and internal conditions of the system of the environmental radiation monitoring

Принцип детерминизма. Исходя из этого принципа, в его современном понимании сформулирована в общем виде основная гипотеза исследования. Ее содержание составляет наличие объективно существующих, но не формализованных в строгой форме, существенных связей между типологически неоднородными объектами системы радиационного мониторинга. Эти связи определяют поведение системы во времени и в фазовом пространстве решений (состояний), важных для радиационной безопасности.

Кроме того, необходимо учитывать тот факт, что для системы радиационного мониторинга большое значение имеют неопределенности, связанные со статистическим (случайным) характером поведения внешней среды, ее неупорядоченностью, неустойчивостью и нелинейностью. Это означает, что правильные решения в области радиационной безопасности необходимо формулировать с использованием вероятностных оценок и интервальных величин.

Принцип соответствия. Применение этого принципа позволяет осуществить переход от традиционного понимания мониторинга как научно-технической системы к существенно более широкому научно обоснованному представлению как о системе, состоящей из неживых материальных элементов (приборы, системы наблюдений, измерений, связи и т. д.) и живых (персонал и лица, принимающие решения), а также виртуальных элементов (базы данных, системы законодательства и нормирования в сфере обеспечения радиационной безопасности и т. д.).

Принцип дополненности. Научная результативность и обоснованность применения общесистемных изоморфизмов в сфере радиационной безопасности и, соответственно, в системе радиационного мониторинга, наиболее ясно подтверждается принципом дополненности. Это принцип, в том числе постулирует правомерность и равноправие различных научных описаний. И в нашем случае – это применение

разнообразных научных подходов, описывающих одни и те же объекты и предметы исследования: логико-исторический и логико-математический подходы, теоретико-множественный и системный анализ, а также методы, используемые в теории риска и ОТС.

Критерии подтверждения и научной обоснованности. В качестве подтверждения научной обоснованности теоретических результатов использованы критерии, которые, с одной стороны, определяют правила оперирования абстракциями для их введения и удаления в рамках применения теоретико-множественного анализа и ОТС, с другой стороны, позволяют оценивать теоретические результаты с точки их реализации на практике.

Самым наглядным способом, подтверждающим обоснованность полученных результатов, является научная интерпретация результатов общественной практики в сфере обеспечения радиационной безопасности, например, потребность изменения парадигмы радиоэкологии. Исходя из научно обоснованных результатов анализа и обобщения практики радиационной защиты и безопасности в различных типах ситуаций облучения, разработаны, внедрены и проверены на практике рекомендации по развитию системы радиационного мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь.

Результаты исследования и их обсуждение

Итак, для удовлетворительного разрешения научных проблем системы радиационного мониторинга окружающей среды на базе описанных выше методов представим научно обоснованную современную парадигму радиоэкологии и основные определения системы радиационного мониторинга окружающей среды.

Основная гипотеза исследования радиационного мониторинга как системы состоит в том, что радиационный мониторинг окружающей среды является системой в строгом смысле и подчиняется общесистемным законам, имеет свои основные, генеральные цели, свойства и характеристики, которые описываются специально разработанным логико-математическим аппаратом. Последнее позволяет оценивать и прогнозировать ее поведение в различных типах ситуаций облучения для обеспечения радиационной безопасности на социально-приемлемом уровне. При этом система радиационного мониторинга окружающей среды является важнейшим механизмом радиоэкологических исследований в биосфере и ее успешность существенным образом зависит от действующей парадигмы радиоэкологии. Модель внешней и внутренней среды системы радиационного мониторинга окружающей среды представлена на рис.

Научная и практическая необходимость обновления парадигмы радиоэкологии. Первоначально в конце 40 – начале 50-х гг. прошлого века в условиях глобального радиоактивного загрязнения вследствие испытаний ядерного оружия в атмосфере и последующего использования ядерной энергии в экономике российским ученым В. М. Ключевским была предложена парадигма «сельскохозяйственной» радиоэкологии: «При широком использовании ядерной энергии в мирных целях, связанным с выведением в окружающую среду искусственных радионуклидов и интенсификацией круговорота естественных радионуклидов, основное значение имеет не прямое воздействие на сельскохозяйственные растения и животных, хотя эту проблему нельзя игнорировать, а накопление ими радионуклидов, поступающих с сельскохозяйственными продуктами в организм человека, что приводит к его дополнительному (сверхфоновому) облучению».

Этот постулат на долгие годы предопределил основные направления исследований в радиоэкологии исходя из того, что основным объектом радиационной защиты является человек: изучение физико-химических закономерностей взаимодействия радионуклидов с почвенными комплексами и оценке количественных параметров их накопления в сельскохозяйственной продукции.

Однако в XXI в. проблемы в области радиационной безопасности потребовали в качестве объекта защиты признать не только человека, но и окружающую среду, что соответствующим образом отражено в рекомендациях МАГАТЭ МКРЗ. Кроме того, в практику обеспечения радиационной безопасности введены понятия типа ситуации облучения (планового, существующего и аварийного) [7; 8]. Новые подходы существенным образом повлияли на характер проведения радиоэкологических исследований поведения радионуклидов в биосфере, оценок радиационной обстановки и, соответственно, на систему радиационного мониторинга.

Таким образом, необходимо найти научное решение проблемы обеспечения радиационной безопасности человека и, одновременно, обеспечения радиационной безопасности наиболее уязвимых объектов окружающей среды (биосферы).

Для описания радиоэкологических аспектов обеспечения радиационной безопасности используем прием ввода и вывода абстракций и их замену конструктивными элементами, следующими из анализа и обобщения практического опыта в сфере радиационной безопасности.

Такой подход позволяет из неограниченного множества абстракций в сфере радиационной безопасности выделить только радиоэкологические и заменить их конструктивными элементами, которые являются базовыми и в радиоэкологии: «радиационная обстановка», «радиационное состояние» и «радиоактивное загрязнение окружающей среды». В таком случае, процессы воздействия природных и антропогенных факторов, которые приводят к радиоактивному загрязнению окружающей среды, рассматриваются в качестве функторов. Отметим, что такой выбор конструктивных элементов следует из практики обеспечения радиационной безопасности согласно требованиям Закона Республики Беларусь «О радиационной безопасности», «Об охране окружающей среды» и рекомендаций МАГАТЭ и МКРЗ [2; 7–9].

Применительно к радиационному мониторингу в качестве процессов воздействия на состояние и радиоактивное загрязнение окружающей среды рассматриваются механизмы переноса массы и энергии радионуклидов природного и искусственного происхождения за счет природных и антропогенных факторов. При этом «окружающая среда» для целей обеспечения радиационной безопасности теперь должна рассматриваться в широком смысле как «биосфера» и понятно, что биосфера в целом становится не только фоном, на котором разворачиваются события, важные для обеспечения радиационной безопасности, но и деятельной силой, которая проявляется через перенос энергии и массы.

Особенности радиоактивного загрязнения биосферы. Отметим, что именно при таком комплексном биосферном подходе появляются методологические возможности выявить, описать и учесть две важные особенности присутствия и поведения радионуклидов в биосфере. Во-первых, важно указать на конечность присутствия радионуклидов в биосфере, которая обусловлена фундаментальным свойством радиоактивного распада и определяет временные периоды, значимые для оценки воздействия ИИ на объекты биосферы. Эта особенность имеет как радиологическую значимость с точки зрения оценки и прогнозирования дозовых нагрузок, так и практическую – для формирования программ мониторинга, что позволяет оптимально использовать доступные ресурсы. Отметим, что поведение системы радиационного мониторинга в фазовом пространстве состояний (решений) в сфере радиационной безопасности имеет высокую темпоральность, которая существенным образом влияет на эффективность самой системы.

В подтверждение значимости этой особенности уместно привести два примера, важных для программ «чернобыльского» мониторинга и имеющих разную временную направленность: радиоактивное загрязнение короткоживущими радионуклидами, в том числе йодом-131 и долгоживущим америцием-241. Понятно, что измерения удельной активности йода-131 в биотических и абиотических объектах были чрезвычайно важны для оценки доз и дальнейших радиологических рисков для населения в «острый» период катастрофы, однако его активность быстро уменьшалась и через 90 дней после катастрофы практически не поддавалась измерениям. В результате, из-за недостатков программного планирования радиационного мониторинга на этом этапе не были получены надежные экспериментальные данные для репрезентативных оценок доз и рисков. В случае с америцием-241 временной тренд имеет обратное направление, его удельная активность была незначительна в момент катастрофы и будет возрастать вплоть до 2058 г. В наше время программы уже предусматривают его включение в состав множества параметра мониторинга.

Во-вторых, после попадания в окружающую среду, радионуклиды включаются в общий процесс переноса энергии и массы между резервуарами биосферы и, несмотря на крайне незначительные массовые количества и преимущественно «рассеянную» форму, встречаются повсеместно. В терминах геохимии можно говорить о вовлечении радионуклидов в геохимический трансфер вещества, что, помимо миграции радионуклидов из одного резервуара биосферы в другой, создает условия для их накопления в отдельных элементах биосферы. Таким образом, для создания новых источников радиоактивного загрязнения, сформированных природными процессами, это также должно находить отражение в программах мониторинга.

В качестве иллюстрации такого механизма можно рассматривать хорошо известные эмпирические результаты многолетнего радиационного мониторинга накопления радиоактивного цезия-137 на так называемых геохимических барьерах в почвах. Другим ярким примером является накопление радионуклидов, в том числе цезия-137, в донных отложениях поверхностных водных объектов, где их удельная активность может достигать 80 тыс. Бк/кг (р. Брагинка, Полесский государственный радиоэкологический заповедник, Республика Беларусь).

В обоих случаях в отдельном резервуаре биосферы идет увеличение удельной активности радионуклидов (по сравнению с прилегающими резервуарами), что создает условия для возникновения нового источника радиоактивного загрязнения.

Наиболее показательным примером формирования новых источников радиоактивного загрязнения в биосфере после катастрофы на Чернобыльской АЭС является процесс появления и накопления в отдельных резервуарах биосферы америция-241, который является продуктом распада плутония-241

и, как указано выше, первоначально в аварийном выбросе практически отсутствовал. Однако сейчас его удельная активность в объектах окружающей среды увеличивается, в том числе в тех «местах», где, согласно определению радиоактивного загрязнения, которое дает МАГАТЭ, его присутствие «не ожидалось или нежелательно» [3; 10].

Итак, теоретическими и практическими предпосылками к созданию новой парадигмы радиоэкологии являются: расширение объектов защиты «человек и окружающая среда» (ранее – только человек), введение новых требований в сфере радиационной безопасности в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ и МКРЗ, а также признание биосферы как деятельной силы геохимического трансфера радиоактивности в биосфере.

Современная парадигма радиоэкологии предлагается в следующем виде: «В настоящее время в связи с широким поступлением радиоактивных изотопов в окружающую среду, обуславливающих возникновение аварийных и существующих ситуаций облучения, значение приобретает не только прямое воздействие на биоту и накопление в ней радионуклидов, но и их вовлечение в геохимический трансфер вещества в биосфере, что создает предпосылки к созданию новых источников радиоактивного загрязнения и приводит к дополнительному облучению объектов окружающей среды и человека».

Современная парадигма радиоэкологии, которая основывается на признании различных типов ситуаций облучения, позволяет формировать и реализовывать эффективные программы радиационного мониторинга окружающей среды, обеспечивая радиационную безопасность человека и объектов окружающей среды.

Описание радиационного мониторинга окружающей среды как целостной системы в строгом математическом смысле с учетом ее типологической неоднородности. Согласно Закону Республики Беларусь «О радиационной безопасности», радиационный мониторинг – это «система длительных регулярных наблюдений, оценки и прогноза радиационной обстановки» [3]. Согласно Закону Республики Беларусь «Об охране окружающей среды», мониторинг окружающей среды, в том числе радиационный, – это «система наблюдений за состоянием окружающей среды, оценки и прогноза изменений состояния окружающей среды под воздействием природных и антропогенных факторов» [11].

Исходя из того, что с точки зрения ОТС, понятие система имеет свои особенности, предлагается «нормативные» понятия радиационного мониторинга интерпретировать в терминах системного анализа с использованием лингвистического и теоретико-множественного подходов.

В связи с необходимостью учитывать предложенную и обоснованную выше типологическую неоднородность системы, определение радиационного мониторинга в наиболее общем виде возможно сформулировать в терминах лингвистического подхода, который подразумевает, что каждое высказывание содержит две основные абстрактные категории – денотаты и функторы.

В терминах теоретико-множественного подхода примем, что взаимные отображения денотатов-объектов (например, множества угроз и рисков, информационных потребностей) через функторы (существенные связи в системе) создают множества решений $\{R\}$ в сфере радиационной безопасности, одним из подмножеств которых является собственное подмножество правильных решений $\{R''\}$, в том числе подмножество параметров радиационного мониторинга, адекватно оценивающих радиационную обстановку на местности, например, при необходимости включая измерения удельной активности америция-241, как это показано выше.

Используя принцип дополненности, введем в рассмотрение некий класс абстракций A , которые, в общем случае, определяют понятия внешней и внутренней среды целостной системы радиационного мониторинга, при этом пусть множества абстракции T , N и P являются собственным подмножеством A .

Исходя из практического опыта, введем новые конструктивные элементы и примем, что абстракция T есть множество угроз и рисков (*Threats*) в сфере радиационной безопасности, абстракция N – множество информационных потребностей (*Needs*), а абстракция P – множество параметров радиационного мониторинга (*Parameters*).

Покажем, что система радиационного мониторинга окружающей среды является типологически неоднородной, динамической, открытой, иерархической, многоуровневой и обладает обратными связями.

Свойство типологической неоднородности уже описано выше, а динамичность системы определяется наличием в ней существенных связей/функторов, которые в общем случае с позиций системного изоморфизма можно рассматривать как силы.

На интуитивном уровне, согласно ОТС, открытой называют систему, которую нельзя удовлетворительным образом представить в виде некой аналитической функции. Понятно, что для системы радиационного мониторинга окружающей среды именно это свойство открытости является атрибутивным признаком.

В классическом смысле ОТС-система считается открытой, если [11]:

1. На систему оказывается воздействие, источником которого или поведением которого невозможно управлять.
2. На систему оказывается воздействие, которое невозможно непосредственно или без искажений (ошибок) наблюдать.

Рассмотрим случай (1) на примере системы обеспечения радиационной безопасности на Фукусимской АЭС во время катастрофы в марте 2011 г., считая систему радиационного мониторинга ее подсистемой. Из общих соображений следует, что управлять стихийными явлениями, в данном случае – землетрясением и цунами, невозможно. Анализ показал, что для персонала Фукусимской АЭС оказалось также невозможным управлять и технологическими системами жизнеобеспечения АЭС во время такого воздействия, например, оперативно восстановить электропитание систем безопасности. На этом примере видно, что система обеспечения радиационной и ядерной безопасности на Фукусимской АЭС, как и любая другая система радиационной безопасности, в том числе система радиационного мониторинга, обладает рисками, которые могут быть отнесены к категории чистых, природных, социальных, а также организационных. Перечисленные риски позволяют характеризовать или определить их как открытые системы.

Несколько сложнее обстоят дела в случае (2), где примеры не кажутся столь очевидными. Анализ и обобщение опыта и общественной практики в сфере безопасности показывает, что чрезвычайные ситуации могут быть «обычными» (быстрыми – часы и дни) и «медленными» (ползучими – от месяца до десятилетий) [12]. Однако на примере катастрофы на Чернобыльской АЭС показано, что некоторые «обычные (быстрые)» чрезвычайные ситуации могут являться закономерным результатом «медленных» (ползучих) [5]. В этом случае радиационный мониторинг также может быть определен как открытая система, поскольку изменения в ее внешней среде под антропогенными воздействиями, которые могут создать «медленные» (ползучие) чрезвычайные ситуации, которые практически невозможно «непосредственно и без искажений наблюдать».

В качестве доказательства, что система радиационного мониторинга является открытой, отметим, что множества $\{T\}$ и $\{N\}$ могут иметь неограниченное число членов, поскольку угрозы и риски радиационной безопасности имеют как глобальный характер, например, испытания ядерного оружия в окружающей среде или катастрофы на Чернобыльской, Фукусимской АЭС, так и региональный и локальный характер, например, авария на ПО «Маяк» или утеря ИИИ. Такой вывод закономерен и обоснован с точки зрения ОТС, поскольку для системы радиационного мониторинга множества $\{T\}$ и $\{N\}$ обусловлены внешней средой, которая по определению является открытой.

Анализ практики функционирования системы радиационного мониторинга окружающей среды свидетельствует, что она эффективна в случае, если на каждом уровне ставится своя отдельная задача, правильные решения которой являются затем исходным условием для решения задач более высокого уровня. Например, подсистемы наблюдений, измерений, обработки и хранения данных формируют основу для подсистем оценки, моделирования, прогнозирования и представления результатов различным информационным группам для обеспечения радиационной безопасности населения и окружающей среды на социально-приемлемом уровне (см. рис.).

Анализ и обобщение практики обеспечения радиационной безопасности в Беларуси позволяют сделать вывод, что сложившаяся на практике многоуровневая иерархическая структура системы радиационного мониторинга с обратными связями, как это описано во Введении и отражено на рис., наиболее адекватна для достижения системных (генеральных) целей.

Определение эффективности системы в общем виде. Согласно ОТС, любая система может находиться в одном из трех состояний:

- «функционирования», когда обеспечено достижение системных целей;
- «сохранения», когда система не обеспечивает достижение системных целей, сохраняя характеристики предыдущего цикла;
- «развития», когда внутренняя структура системы приводится в соответствие изменившемуся состоянию внешней и внутренней среды для достижения системных целей, иными словами, возвращается в состояние функционирования в новых условиях.

Эффективная система должна находиться в состоянии функционирования и быть готовой к любым изменениям во внешней и внутренней среде и соответствующим образом удовлетворять информационные потребности критической инфраструктуры государства, СМИ и населения.

Следовательно, такое требование можно рассматривать как определение эффективности системы радиационного мониторинга окружающей среды в терминах лингвистического подхода. В терминах теоретико-множественного анализа система радиационного мониторинга является эффективной, если в результате взаимного отображения множеств $\{T\}$, $\{N\}$ и $\{P\}$ возникает непустое подмножество правильных решений $\{R\}$. Иными словами, система находится в состоянии функционирования и обеспечивает радиационную безопасность человека и объектов окружающей среды при оптимальном использовании доступных ресурсов.

Заключение

В исследовании научно обоснована, описана и представлена современная парадигма радиоэкологии, которая основывается на признании, что человек и окружающая среда, как часть биосферы, являются объектами радиационной защиты, при этом биосфера является деятельной силой, влияющей на радиационную безопасность. Современная парадигма радиоэкологии, основанная на признании различных типов ситуаций облучения, позволяет формировать и реализовывать программы мониторинга, адекватные существующим угрозам и рискам, а также информационным потребностям критической инфраструктуры государства, СМИ и населения.

Впервые выявлена и описана методологическая проблема развития радиационного мониторинга как системы в строгом математическом смысле, суть которой заключается в отсутствии целостного описания типологически неоднородной системы для оценки соответствия ее состояния системным (генеральным) целям с учетом существующей и прогнозируемой динамики угроз и рисков и, соответственно, информационных потребностей общества.

Научно обосновано и показано, что система радиационного мониторинга окружающей среды как система в строгом смысле, подчиняется общесистемным законам, имеет свои основные системные (генеральные) цели и свойства, которые могут быть описаны специально разработанным логико-математическим аппаратом.

Обоснована теоретически и практически возможность применения метода общесистемных изоморфизмов, который позволяет дать целостное описание системы радиационного мониторинга с учетом ее типологической неоднородности.

Определены и описаны основные денотаты системы, обоснован выбор конструктивных элементов для их замены.

Показано, что система радиационного мониторинга окружающей среды является типологически неоднородной, динамической, открытой, иерархической, многоуровневой системой и обладает обратными связями.

Представлены строгие определения эффективности системы радиационного мониторинга окружающей среды в терминах лингвистического и теоретико-множественного подходов.

Однако полученные результаты решают лишь часть задачи создания целостного научного описания радиационного мониторинга как системы в строгом смысле. Необходимо продолжить исследования по дальнейшей разработке и совершенствованию единого методологического подхода на основе развития предложенного логико-математического метода описания системы радиационного мониторинга окружающей среды. Представляется целесообразным продолжить изучение поведения системы радиационного мониторинга окружающей среды в фазовом пространстве состояний, для чего требуется разработать логико-математическую модель исследования и предложить основы математически формализованных подходов к прогнозированию состояния системы в различных условиях, в том числе с учетом ее темпоральности.

Библиографические ссылки

1. Концепция национальной безопасности Республики Беларусь, утверждена Указом Президента Республики Беларусь от 9 ноября 2010 г. № 575.
2. Закон Республики Беларусь от 18.06.2019 N 198-З О радиационной безопасности.
3. Герменчук МГ и др. *Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси*. Израэль ЮА, Богдевич ИМ, редакторы. Минск: Белкартография; 2009. 135 с.
4. Maskevich S, Germenchuk M. Radiation monitoring of the environment: Innovative technologies and informatization. In: *International (15th Regional) Scientific Conference on Technogenic Systems and Environmental Risk, 2018 April 19–20*. Obninsk: [publisher unknown]; 2019. Volume 487, issue 1.
5. Герменчук МГ. *Управление системой радиационного мониторинга окружающей среды*. Минск: ИВЦ Минфина; 2018. 121 с.
6. Пригожин И, Стенгерс И. *Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой*. Москва: Прогресс; 1986. 432 с.
7. Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 103. *Annals of ICRP*. 2008;37:344.
8. ICRP, 2014. Protection of the Environment under Different Exposure Situations. ICRP Publication 124. *Annals ICRP*. 2014;43(1).
9. Закон Республики Беларусь «Об охране окружающей среды» от 17 июля 2017 г. № 51-З.
10. Глоссарий по вопросам безопасности. Терминология, используемая в области ядерной безопасности и радиационной защиты. IAEA – SPI/PUB/1290. Вена: [б. и.]; 2007. 303 р.
11. Месарович М, Мако Д, Такаха И. Теория иерархических многоуровневых систем [перевод с английского и редакция И. Ф. Шахнова]. Москва: Мир; 1973. 343 с.
12. Авдотьин ВП, Дзыбов ММ, Самсонов КП. Оценка ущерба от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Монография. Москва: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ); 2012. 468 с.

References

1. *Kontseptsia natsionalnoy besopasnosti Respubliki Belarus, utvershdена Ukazom Prezidenta Respubliki Belarus ot 9 nojabra 2010 g. № 575* [The concept of national security of the Republic of Belarus, approved by Decree of the President of the Republic of Belarus of November 9, 2010 №. 575]. Russian.
2. *Zakon Respubliki Belarus ot 18.06.2019 o radiatsionnoy besopasnosti* [Law of the Republic of Belarus dated 18.06.2019 on radiation safety]. Russian.
3. Germenchuk MG, et al. *Atlas sovremennykh i prognosnykh aspektov posledstviy avarii na Chernobylskoy AES na postradayshikh territoriakh Rossii i Belarusi. Israel YuA, Bohdevich IM, redaktory* [Atlas of modern and forecast aspects of the consequences of the Chernobyl accident in the affected territories of Russia and Belarus]. Minsk: Belkartografiya; 2009. 135 p. Russian.
4. Maskevich S, Germenchuk M. Radiation monitoring of the environment: Innovative technologies and informatization. In: *International (15th Regional) Scientific Conference on Technogenic Systems and Environmental Risk, 2018 April 19–20*. Obninsk: [publisher unknown]; 2019. Volume 487, issue 1.
5. Germenchuk MG. *Upravlenie sistemoy radiatsionnogo monitoringa okruzhayushey sredy* [Management of the system of radiation monitoring of the environment]. Minsk: UVTs Minfina; 2018. 121 p. Russian.
6. Prigozhin I, Stengers I. *Poradok uz khaosa. Novyy dialog cheloveka s prirodoy* [Order out of chaos. A new dialogue between man and nature]. Moscow: Progress; 1986. 432 c. Russian.
7. Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 103. *Annals of ICRP*. 2008;37:344.
8. ICRH, 2014. Protection of the Environment under Different Exposure Situations. ICRP Publications 124. *Annals ICRP*. 2014;47(1).
9. *Zakon Respubliki Belarus «Ob okhrane okruzhayushchey sredy» ot 17 iula 2017 g. 353-Z* [The Law of the Republic of Belarus «On Environmental Protection» dated July 17, 2017 №. 51-3]. Russian.
10. *Glossariy po voprosam besopasnosti. Terminologia, ispolsuemaya v oblasti jadernoy besopasnosti i radiatsionnoy zashity. IAEA – SPI/PUB/1290* [Safety Glossary “Terminology Used in the Field of Nuclear Safety and Radiation Protection” / IAEA - SPI / PUB / 1290. Vienna: [publisher unknown]; 2007. 303 p. Russian.
11. Mesarovich M, Macko P, Takhara Y. *Teory of hierarchical multilevel systems*. New York; London: Akademik press; 1970. 344 p.
12. Avdotin VP, Dzybov NM, Samsonov KP. *Otsenka ushcherba otcrezvyhajnykh situatsiy prirodnogo i tekhnogennogo kharaktera* [Damage assessment from natural and man-made emergencies, Russian Emergency Situations Ministry]. Moscow: FGBU VNII GOChS (FTs); 2012. 468 p. Russian.

Статья поступила в редакцию 24.04.2020.
Received by editorial board 24.04.2020.