

Г. Н. БЕЛОЗЕРСКИЙ

РАДИАЦИОННАЯ ЭКОЛОГИЯ

УЧЕБНИК

Допущено

Учебно-методическим объединением по классическому университетскому образованию в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Экология»



Москва
Издательский центр «Академия»
2008

УДК 574(075.8)
ББК 20.1я73
Б435

Рецензенты:

зав. кафедрой ядерной физики Санкт-Петербургского государственного университета, д-р физ.-мат. наук, профессор *К. А. Гриднев*;
профессор кафедры рационального природопользования географического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, д-р биол. наук *Е. И. Голубева*

Белозерский Г. Н.

Б435 Радиационная экология : учеб. для студ. высш. учеб. заведений / Г. Н. Белозерский. — М. : Издательский центр «Академия», 2008. — 384 с.
ISBN 978-5-7695-3962-6

Изложены теоретические положения, необходимые для анализа экологических последствий работы ядерных реакторов атомных электростанций, функционирования ядерного топливного цикла, последствий испытания ядерного оружия и накопления радиоактивных отходов. Приведен анализ экологических последствий некоторых радиационных аварий. Даны современные представления о рисках (экологическом и радиационном), о коэффициентах риска и ущербе от различных видов деятельности. Рассмотрены научные основы оценки воздействия поллютантов на биоту, необходимые для решения экологических задач в случае загрязнения биоты радионуклидами.

Для студентов, обучающихся по специальностям «Экология», «Природопользование», «Биоэкология», «Геоэкология» естественно-научных факультетов университетов.

УДК 574(075.8)
ББК 20.1я73

*Оригинал-макет данного издания является собственностью
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом
без согласия правообладателя запрещается*

© Белозерский Г. Н., 2008
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2008
ISBN 978-5-7695-3962-6 © Оформление. Издательский центр «Академия», 2008

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- A — массовое число
 \mathcal{A} — активность
 B_K — энергия связи электрона на K -оболочке
 C — концентрация
 c — скорость света
 D — доза (поглощенная) излучения
 $D_{T,R}$ — доза излучения R , поглощенная в органе (или ткани) T
 D_{37} — доза, при которой доля живых клеток уменьшается в e раз
 D_{exp} — доза экспозиционная
 E — доза эффективная
 E_0 — энергия покоящегося тела
 E_b — энергия связи ядра
 E_α — энергия α -частицы
 E_e — энергия конверсионного электрона
 E_γ — энергия γ -перехода
 $F_{равн}$ — фактор равновесия
 f_1 — коэффициент всасывания (ресорбции)
 $H_{T,R}$ — эквивалентная доза от излучения R в органе (или ткани) T
 I — интенсивность излучения
 $j(t)$ — скорость поступления радионуклидов в жидкости тела
 K — коэффициент размножения нейтронов
 k — константа скорости реакции
 L_Δ — линейная передача энергии
 M — масса тела
 M_0 — масса покоящегося тела
 M_n — масса нейтрона
 $M(A, Z)$ — масса нуклида
 $M_{ат}$ — масса атома
 N_0 — исходное количество радионуклида
 P — вероятность проявления рассматриваемого события или процесса
 P_{exp} — мощность экспозиционной дозы
 P_{ij} — коэффициент переноса из камеры i в камеру j
 $p(x)$ — вероятность того, что частица пройдет путь длиной x
 Q — магнитуда (мера) ожидаемого ущерба
 Q_α — энергия, выделяемая при α -распаде
 Q_β — энергия, выделяемая при β -распаде

- $Q_{\text{ИП}}$ — энергия, выделяемая при изомерном переходе
 $Q_{\text{ЭЗ}}$ — энергия, выделяемая при электронном захвате
 $Q_{\text{ЭК}}$ — энергия, выделяемая при электронной конверсии
 R — радиус ядра; риск, обусловленный событием или процес-
 сом
 R_{α} — радиус α -частицы
 $R_{\text{отд}}$ — энергия отдачи
 r_0 — характерный размер нуклона
 r — специфическая скорость размножения вида
 S — радиочувствительность биосистемы
 T — температура
 $T_{1/2}$ — период полураспада нуклида
 $T_{\text{биол}}$ — период биологического полувыведения радионуклида
 $T_{\text{пер}}$ — период цепной реакции деления
 v — скорость заряженной частицы
 W_T — взвешивающий коэффициент для ткани T
 W_R — взвешивающий коэффициент для излучения R
 X — символ элемента в Периодической системе элементов
 Z — число протонов в ядре
 α — коэффициент внутренней конверсии
 $\langle\alpha\rangle$ — средняя на один распад энергия α -частиц
 $\langle\beta\rangle$ — средняя на один распад энергия β -частиц
 $\langle e\rangle$ — средняя на один распад энергия электронов, появившихся
 не при β -распаде
 β — доля запаздывающих нейтронов
 $\langle\gamma\rangle$ — средняя на один распад энергия γ -квантов
 Δ — дефект массы
 ΔE — пороговая энергия
 ϵ_{α} — энергия отделения α -частицы от ядра
 ϵ_b — средняя энергия связи на нуклон
 ϵ_n — энергия присоединения нейтрона к ядру
 ϵ_p — энергия отделения протона от ядра
 ϵ — дозовый коэффициент для внутреннего облучения
 λ — постоянная распада; средняя длина свободного пробега
 λ_i — скорость выведения стабильных изотопов элемента из i -й
 камеры
 μ — полный линейный коэффициент ослабления излучения
 μ_l — линейный коэффициент ослабления излучения
 ν — среднее количество мгновенных нейтронов
 ξ — дозовый коэффициент для внешнего облучения
 ρ — плотность вещества; реактивность
 σ_s — плотность загрязнения
 τ — время жизни поколения нейтронов
 $\tau_{\text{зап}}$ — время запаздывания
 $\tau_{\text{яд}}$ — ядерное время
 $\bar{\nu}$ — антинейтрино
 ν — нейтрино

ВВЕДЕНИЕ

Радиоактивность* — одно из самых фундаментальных физических явлений — и ионизирующие излучения, сопровождающие это явление или возникающие в рентгеновских трубках, оказались вскоре после их открытия теснейшим образом связанными с медициной, биологией, а затем и с экологией. Возник новый раздел экологии — радиоэкология, занимающийся изучением экологических последствий воздействия ионизирующих излучений. Термин «радиоэкология» был независимо предложен А.А. Передельским в СССР и Е. П. Одумом в США в 1950-е гг., т. е. спустя более чем 50 лет после открытия явления радиоактивности. Существенно позднее для обозначения этой области знаний стали использовать термин «радиационная экология». Мы будем использовать эти понятия как синонимы. Таким образом, *радиационная экология* — наука, изучающая закономерности миграции радионуклидов в биосфере и последствия воздействия ионизирующих излучений на живые организмы в среде их обитания и на экосистемы в целом. Существенным является то, что эта наука всесторонне изучает особенности проявления ионизирующего излучения как важного экологического компонента внешней среды и способствует охране природы от радиоактивных загрязнений.

Естественные науки, получившие развитие во второй половине XX в., привели к внедрению в экологию новых методов изучения сложных систем и проведению современных экспериментальных исследований. Эти тенденции особенно ярко проявились там, где дело касалось радиации и ее воздействия на человека и окружающую среду. В радиационной экологии впервые в экологиче-

* Явление радиоактивности будет рассмотрено во второй главе (см. с. 65). Пока же мы предварительно скажем, что *радиоактивность* — это явление спонтанного (самопроизвольного) превращения изотопа одного химического элемента (радионуклида) в изотоп другого элемента. *Радиоактивный распад* — экзотергический, статистически случайный процесс, в результате которого из ядра испускаются элементарные частицы или более легкие ядра. Если нуклид, образовавшийся в результате радиоактивного распада, оказывается в возбужденном состоянии, то он будет переходить в основное состояние путем испускания γ -излучения или электронов внутренней конверсии.

ской практике точность, достоверность измерений, методы обработки и интерпретации экспериментальных данных оказались такими же, как и при самых современных физических и химических исследованиях.

Учебники по радиоэкологии, написанные в разные годы, отражали изменения в отношении ученых и общественности к радиации и радионуклидам. Вначале звучало беспокойство, связанное с загрязнением окружающей среды в результате испытаний ядерного оружия, но в то же время был и определенный оптимизм, обусловленный решением энергетических проблем и проблем кислотных дождей в результате развития ядерной энергетики. Серьезные инциденты на ядерных энергетических установках, в том числе авария на Чернобыльской атомной электростанции, ставшие известными радиационные катастрофы на Южном Урале, засекреченные в течение длительного времени, привели к радиофобии и свертыванию многих программ в области ядерной энергетики.

Постепенно менялись цели и задачи, которые ставились при проведении экологических исследований и природоохранных мероприятий. Шаг за шагом становилось ясно, что наблюдать в явном виде пострadiационные эффекты на биоте* можно только в тех случаях, когда возникают такие концентрации радионуклидов, как в пойме реки Течи около комбината «Маяк» или в загрязненных местах внутри 30-километровой зоны вокруг Чернобыльской АЭС. В центре внимания оказались в первую очередь гигиенические аспекты таких событий.

Несмотря на то что в 1990-е гг. в мире начался период разоружения и взаимного контроля, возникли новые опасности, связанные с процессом прекращения эксплуатации судов с ядерными реакторами, с демонтажем примерно 50 тыс. ядерных боеголовок и загрязнением окружающей среды вокруг военных баз и складов. Расширился список стран, обладающих ядерным оружием, и появилась опасность локальных конфликтов с его применением. Возникла опасность ядерного терроризма. В настоящее время усиливается интерес к ретроспективным оценкам доз от радиационных воздействий предыдущих ядерных инцидентов.

При рассмотрении экологических и природоохранных проблем необходимо иметь в виду то, что радионуклиды** в химическом

* *Биота* — совокупность организмов (флора и фауна) определенного района. В отличие от биоценоза может характеризоваться отсутствием экологических связей между видами.

** Радионуклиды в экологической литературе, а также в литературе по охране окружающей среды часто называют радиоактивными атомами. Поскольку в окружающей среде радионуклиды всегда существуют в виде атомов или ионов, мы будем рассматривать термины «радионуклиды» и «радиоактивные атомы» как синонимы.

отношении, т.е. в плане химического воздействия на биоту, не отличаются от тех атомов, внутри которых находятся стабильные нуклиды данного элемента. Источником воздействия являются теперь не атомы, приводящие к тем или иным нежелательным эффектам в организмах благодаря своим химическим свойствам (строению электронной оболочки), а излучения ядер этих атомов. Хотя загрязняют среду радионуклиды, воздействие оказывают только испускаемые ими излучения, момент появления которых для отдельных ядер не известен заранее. Время проявления последствий воздействия часто также не известно.

Целью учебника является формирование у студентов реалистического и целостного представления об ионизирующих излучениях, их роли и месте среди других экологических факторов естественного и антропогенного происхождения, определяющих в настоящее время экологическую обстановку, а также представления о влиянии их не только на здоровье людей, но и на социальную напряженность в обществе. Кроме того, целью является ознакомление с методами использования радионуклидов как индикаторов в различных экологических исследованиях.

Хотя радиоэкология базируется на экологии, биологии, радиологии, ядерной физике и химии, а также дозиметрии, она явно вышла из их рамок, оформившись в новую интегрированную дисциплину, которая связывает не только физические и биологические явления, но и образует мост между естественными и гуманитарными науками. Роль социального фактора в радиоэкологии стала особенно значимой.

ПРЕДМЕТ РАДИОЭКОЛОГИИ

1.1. Исторический экскурс: изучение воздействия ионизирующих излучений на биосферу до начала испытаний ядерного оружия

Говоря о любом разделе современной экологии, кроме ее классического, главного, биологического раздела, мы постоянно, в большей или меньшей степени, имеем в виду человека. Речь идет о прямом или косвенном воздействии на человека того или иного фактора, им же порожденного или усиленного, либо о воздействии человека на компоненты среды обитания, в первую очередь на флору и фауну. На первых этапах развития большинства разделов современной экологии центр тяжести исследований мог быть далек от непосредственных интересов человека и только впоследствии возможные точки соприкосновения отчетливо проявлялись. Иная ситуация сложилась в случае радиационной экологии.

Экологический фактор — ионизирующие излучения — сразу проявил себя воздействием на ткани и органы человека. Источником излучения вначале явились совершенно непонятные в конце XIX в. X-лучи, открытые В. Рентгеном в 1895 г. и названные затем в Германии и России рентгеновским излучением. Работая с трубкой Крукса, В. Рентген понял, что она является источником неизвестного ранее проникающего излучения, которое он назвал X-лучами. Последние вызывали не только люминесценцию, но и приводили к почернению фотографических пластинок, завернутых в черную бумагу и находящихся в коробках. За открытие X-лучей В. Рентген был удостоен первой Нобелевской премии по физике.

Рентгеновское излучение по своему воздействию на живые ткани неотлично от γ -излучения. Первые источники рентгеновского излучения оказывали воздействия на биологические ткани (организм человека) еще до того, как само излучение было открыто*. Последствия воздействия этих лучей на человека оказались неоднозначными. С одной стороны, в 1896 г. Э. Грубе в Чикаго поста-

* X-лучи проявили себя почти за 40 лет до открытия В. Рентгена в опытах Ю. Плюккера по наблюдению флюоресценции стекла в вакуумной трубке, к которой было приложено высокое напряжение. И. Ю. Плюккер и его последователи облучались X-лучами, о существовании которых они не догадывались. Затем У. Крукс усовершенствовал эту трубку, и она стала использоваться во многих лабораториях мира, вызывая облучение все новых экспериментаторов.

вил первые эксперименты по лечению злокачественных опухолей молочной железы. С другой стороны, уже в 1897 г. был опубликован обзор, в котором упоминались 69 случаев заболевания в результате облучения рентгеновским излучением. Это были результаты облучения (при работе с трубками Крукса), имевшего место в основном еще до открытия В. Рентгена.

Явление радиоактивности было открыто А. Беккерелем в 1896 г. Сопровождающие это явление излучения имели место в течение всего времени существования Солнечной системы, однако ни у человека, ни у других представителей биоты нет органов, позволяющих непосредственно идентифицировать их. Так, еще в XVI в. в Европе было известно о высокой смертности шахтеров, занятых добычей в шахтах тяжелых металлов*. Однако только в начале 1940-х гг. стало ясно, что именно явление радиоактивности приводит к образованию достаточно большой концентрации радона в воздухе шахт и, как следствие, к внутреннему облучению шахтеров. Это способствует заболеванию бронхиальной карциномой. Что касается радионуклидов антропогенного происхождения**, то в количествах, достаточных для заметного воздействия на компоненты окружающей среды, они появились намного позднее.

Источники ионизирующего излучения, с которыми работал А. Беккерель, были очень слабыми. Прямое наблюдение биологического действия ионизирующих излучений, обусловленных радиоактивностью, стало возможным только после того, как в 1898 г. Мария и Пьер Кюри выделили из урановой смолки новый химический элемент — радий. Воздействие излучения одного грамма нового элемента было несравненно большим, чем от такого же количества урана. Наконец, появился источник, с которым можно было ставить биологические эксперименты, и П. Кюри специально облучал в течение нескольких часов свою руку источником, содержащим примерно 100 мг радия, чтобы убедиться в том, что воздействие будет аналогичным воздействию X-лучей. Это был сильный источник, по современным понятиям, и результат проявился незамедлительно.

Подобное воздействие наблюдали и другие ученые. Одним из них был А. Беккерель, который носил некоторое время в кармане жилета препарат радия. После того как он обнаружил у себя на

* Об этом, например, в 1556 г. писал известный немецкий врач Средневековья Георгий Агрикола.

** Понятие «радионуклиды антропогенного происхождения» употребляется в двух значениях: во-первых, для обозначения всех радионуклидов, оказавшихся в воздухе, гидросфере или на поверхности Земли в результате любой деятельности человека; во-вторых, только для обозначения радионуклидов, образовавшихся в результате работы ядерных реакторов и ускорителей заряженных частиц. Если это специально не оговаривается, мы будем использовать второе значение этого понятия.

теле сильное покраснение, он первым официально сообщил о данном факте* в 1901 г. В конечном итоге это привело к зарождению радиационной медицины.

Инциденты, подобные этому, вначале не привлекали широкого внимания, и известие об открытии радиоактивности было встречено широкой общественностью с энтузиазмом. Многие полагали, что в руках человечества оказался мощный инструмент исцеления от всевозможных недугов. Ход рассуждений часто сводился примерно к следующему. Еще с незапамятных времен минеральные воды ряда источников использовались для лечения. В Европе подобные места начали называть курортами. Какой именно фактор способствует там улучшению здоровья, до конца не было понятно ни тогда, ни в настоящее время. Однако после открытия радиоактивности было обнаружено, что в водах минеральных источников содержится больше радионуклидов, чем в обычной питьевой воде. В связи с тем что такая вода считалась полезной для здоровья, был сделан вывод, что радионуклиды полезны для здоровья. В СССР до начала 1960-х гг. на этикетках бутылок с минеральной водой всегда указывалось содержание в воде радионуклидов (например, это всегда делалось на бутылках «Боржоми»).

В 1910—1930-е гг. радий нашел широкое применение в различных лечебных средствах. Использовали, например, различные ингаляторы, содержащие радий и продукт его распада — радон. В массовом количестве изготавливали компрессы, пропитанные солями радия (рис. 1.1). При лечении болезней головного мозга больным делали внутривенные инъекции растворов солей радия, часто в достаточно больших, по современным представлениям, количествах. Со временем оказалось, что положительного эффекта от таких процедур нет.

Неиспользованные радиоактивные препараты и радиоактивные отходы различного происхождения обычно просто закапывали в землю рядом с больницей или спускали в канализацию. Впоследствии в 1970—1990-е гг. в центрах крупнейших европейских городов в самых неожиданных местах (парках и скверах) начали находить такие захоронения. В Санкт-Петербурге, например, подобные захоронения были обнаружены после аварии на Чернобыльской АЭС в результате массовых проверок загрязненности территорий радионуклидами.

К началу 1940-х гг. в мире было произведено ~1 кг радия, точнее ^{226}Ra . Типичной сферой его применения было изготовление различных светящихся циферблатов для часов и различной военной техники. Работники таких производств воспринимали исполь-

* Тем не менее в течение долгого времени многие ученые носили в карманах подобные источники, несмотря на введение в 1930-е гг. первых норм радиационной безопасности, категорически запрещающих это делать.

Рис. 1.1. Этикетка компресса, содержащего 0,1 мг ^{226}Ra и имеющего сертификат Радиового института в Париже. Такие компрессы использовали для лечения различных болевых ощущений



зуемый состав как обычную краску и оказались первой группой людей, подвергшихся существенному воздействию излучения в результате технического применения радионуклидов.

В эти же годы развиваются два направления исследований, составивших затем основу радиационной экологии. Во-первых, это изучение биологических эффектов, возникающих под действием радиации; во-вторых — изучение радиоактивности объектов природной среды. В результате изучения биологических эффектов оформились два направления:

- 1) гигиенические исследования, связанные с медицинскими проблемами и приведшие впоследствии к возникновению радиационной медицины — радиологии;
- 2) экспериментальные биологические исследования — радиационная биология (радиобиология).

После открытия рентгеновского излучения стало ясно, что вызываемые им у человека ожоги на коже могут превращаться в хронические язвы и в тяжелых случаях переходить со временем в новообразования. Кроме того, было обнаружено выпадение волос под действием радиации*.

Среди наиболее ранних работ можно отметить исследования русского ученого И. Ф. Гарханова, установившего уже в 1896 г. в опытах на лягушках и насекомых реакции их на облучение. В опытах на животных в 1897 г. была замечена способность радиации вызывать катаракту хрусталика глаза у облученных животных. В начале XX в. стало ясно, что ионизирующая радиация может вызывать стерильность и изменения в составе крови. Затем оформились

* Точное количество людей, пострадавших от рентгеновского облучения до начала XX в., неизвестно.

представления об остром облучении, приводящем к комплексу признаков, получившему впоследствии название «острый лучевой синдром». Одновременно с этим исследователи поняли, что раковые ткани также подвержены радиационному воздействию. Начали расширяться исследования по использованию ионизирующих излучений в терапии рака.

При изучении биологических эффектов наибольшее количество исследований проводилось на растениях, так как с растительными объектами было проще работать. Вместе с тем уже в то время «закладывались» многие из проблем, которые дали о себе знать в дальнейшем. Речь идет об отсутствии стандартизации методик, о точности измерений и воспроизводимости результатов и всего того, что связано с междисциплинарным характером исследований, большой изменчивостью свойств отдельных особей внутри вида и разной реакцией их на изменения характеристик окружающей среды.

К началу 1920-х гг. был сформулирован ряд теорий о начальных процессах, происходящих в организмах животных и в растениях при радиационном воздействии. Оформились первые теории лучевого поражения, из которых можно отметить следующие: теорию прямого действия, теорию непрямого действия и теорию мишени. Были обнаружены мутации, вызываемые воздействием радиации. Классическими стали исследования Г. Мюллера (H. J. Muller) в 1926 г. по индуцированию рентгеновскими лучами мутаций у дрозофил. Он заложил основы радиогенетики — новой области в исследованиях генетических эффектов, которые были отмечены в 1946 г. Нобелевской премией по медицине.

Достаточно широко развивались исследования по изучению последствий воздействия радиации на основные химические вещества клетки, физико-химические свойства протоплазмы, физиологические и биохимические процессы в растениях. Были проведены опыты по изучению радиочувствительности и начальных изменений при лучевом поражении клеток. Были обнаружены огромные различия в радиочувствительности различных клеток, тканей, органов и видов растений и животных.

В центре внимания ученых оказались вопросы, связанные с биологической ролью природного фона ионизирующих излучений и его значением для процесса эволюции. Изображенная на рис. 1.2 схема дает общие представления о формировании фона ионизирующих излучений, действующего в настоящее время на человека.

Это направление исследований не потеряло своей актуальности и по-прежнему привлекает внимание ученых. Его можно разделить на отдельные периоды. К рассматриваемому периоду можно отнести два этапа.

Первый — до 1930-х гг., когда основное внимание было уделено количественной характеристике основных компонентов фона.

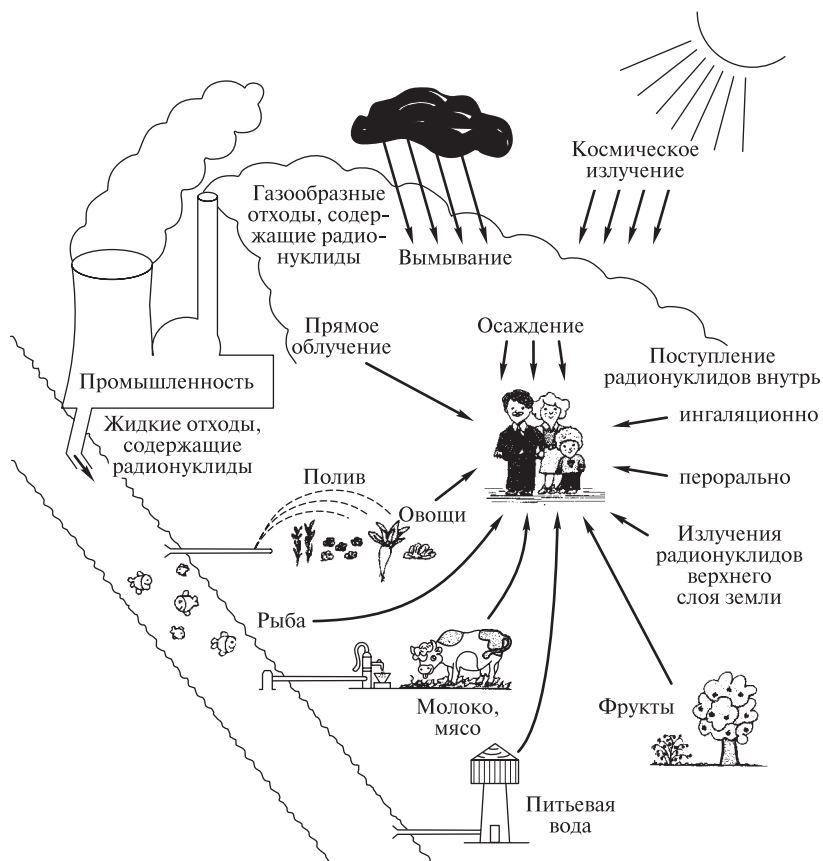


Рис. 1.2. Схематическое представление источников ионизирующих излучений, воздействующих на человека, и пути поступления радионуклидов в организм

Естественно, что подобные исследования начинали проводить в тех местах, где наблюдалось поверхностное залегание урановых или ториевых руд.

На втором этапе — до 1940-х гг. — в центре интересов ученых оказались исследования особенностей распределения в различных природных средах долгоживущих радионуклидов. Речь шла в первую очередь об изотопах ^{238}U , ^{232}Th и ^{226}Ra . Потребности практики обусловили задачу разработки биогеохимических методов поиска урановых месторождений.

Оглядываясь назад, мы можем сказать, что к середине 1940-х гг. радиоактивность окружающей среды была довольно хорошо изучена, но информация имела лишь в немногих лабораториях, специализировавшихся на таких исследованиях. Количество ис-

кусственных радионуклидов, произведенных в конце 1930-х гг. на циклотронах, а затем и на первом реакторе, было невелико. Поэтому исследования того времени характеризуют природный фон, не возмущенный еще деятельностью человека.

Среди отечественных ученых, внесших большой вклад в исследования в данной области, следует отметить прежде всего В. И. Вернадского, А. П. Виноградова, В. Г. Хлопина и В. И. Баранова.

Происходит становление дозиметрии, которая приобретает современные очертания после введения в начале 1930-х гг. представлений об экспозиционной дозе и единице ее измерения — «рентгене».

Для разных случаев были определены летальные дозы и выработаны представления о предельно допустимых дозах. Для разработки стандартов радиационной защиты персонала была создана Международная комиссия по радиологической защите* (МКРЗ) и ее национальные и региональные организации.

Таким образом, в это время были заложены основы современной радиационной гигиены. Радий и радон на некоторое время вошли в арсенал широко используемых медицинских средств. Начались обширные исследования индуцированных излучениями генетических и наследственных эффектов.

К сожалению, значительная часть информации была получена в результате неосторожной работы с источниками ионизирующих излучений. Число смертельных случаев или серьезного ущерба для здоровья людей точно не известно, но ясно, что речь идет о нескольких сотнях.

До пуска первых циклотронов в США и СССР, а затем первого реактора в Чикаго в 1942 г. основное воздействие на здоровье людей оказывало рентгеновское излучение и внутреннее облучение за счет поступления радия в организм людей**.

К началу 1940-х гг. огромный интерес научного сообщества и широких слоев населения к явлению радиоактивности постепенно угас. Это вполне понятно. Что касается науки, явление радиоактивности и появившаяся в связи с этим ядерная физика прочно заняли свое место и здесь шла напряженная, непонятная для людей непосвященных работа. Что касается общественности, то первые восторженные ожидания появления «панацеи от всех болез-

* Международная комиссия по радиологической защите (International Commission on Radiological Protection — ICRP) была организована в 1928 г. в соответствии с решением Второго Международного конгресса по радиологии и называлась Международным комитетом по защите от рентгеновского излучения и излучения радия. В 1950 г. она была реорганизована и переименована.

** Из-за неправильного обращения с радием, выделенным к началу 1940-х гг., зарегистрировано, по крайней мере, 100 случаев гибели людей. Появление норм радиационной безопасности, в первую очередь при обращении с ^{226}Ra , позволило ввести высокие стандарты безопасности на такие работы.

ней» угасли и интересы людей были прикованы к нарастающей опасности мировой войны, а затем и к самой войне со всеми ее бедами.

1.2. Интенсификация исследований и становление радиоэкологии

Принципиальное значение для интенсификации исследований в области радиационной экологии имели открытия явлений искусственной радиоактивности и деления тяжелых ядер, создание ядерных реакторов и последующее освоение человеком ядерной энергии. Несмотря на то что физический пуск первого ядерного реактора был осуществлен в 1942 г., а промышленное производство плутония на заводах в Хэнфорде (штат Вашингтон, США) началось в 1943 г., об опасности воздействия искусственно произведенных радионуклидов на биосферу до 1945 г. почти никто не задумывался. Это касается и ученых, которые занимались экологией в тот период. В значительной степени это было обусловлено военным временем и секретностью, всегда окружавшей все работы по созданию новых видов оружия.

Завеса секретности в отношении ядерного оружия частично спала в августе 1945 г., когда США успели взорвать над уже разгромленной, но еще не капитулировавшей Японией две атомные бомбы: над городами Хиросима и Нагасаки. Закончился пятидесятилетний период после открытия ионизирующих излучений, в течение которого экологические исследования в современном понимании не проводились. В окружающей среде до этих пор просто не было экосистем или значительных территорий, существенно загрязненных радионуклидами антропогенного происхождения. Конечно, исследования по воздействию ионизирующих излучений на отдельные компоненты биоценозов проводили, но систематических исследований биоценозов в целом не было.

Такие работы начались в середине 1940-х гг. Первые исследования по изучению поведения различных радионуклидов в окрестностях Хэнфордских (США) реакторов стали классическими*. Практическая сторона этих исследований была связана с разработкой методов переработки и хранения радиоактивных отходов**.

В СССР в 1947 г. Н. В. Тимофеев-Ресовский организовал лабораторию радиационной биологии на Южном Урале. Условно можно считать, что взрывы над Хиросимой и Нагасаки завершили

* Следует подчеркнуть, что это были именно исследования по изучению поведения различных радионуклидов на выбранных территориях, а не экологические исследования в строгом их понимании.

** В конце XX в. эта территория стала первым полигоном по разработке методов реабилитации территорий, серьезно загрязненных радионуклидами.

первый, инкубационный этап развития радиационной экологии. Радиоэкологические проблемы оказались теперь в центре внимания общества.

Начали формироваться несколько направлений изучения воздействия ионизирующих излучений на живую природу. Первое направление было связано с работой непосредственно в природных условиях — зонах радиоактивного загрязнения вокруг предприятий атомной промышленности, второе — с облучением природных сообществ потоками γ -квантов и нейтронов от мощных источников, третье — с натурным биофизическим моделированием, введенным Н. В. Тимофеевым-Ресовским с сотрудниками.

В практическом плане существенной становится проблема низкоактивных отходов, которые вначале просто сбрасываются в гидросферу (в основном в морскую среду), в то время как высоко- и среднеактивные отходы хранились, как правило, в герметичных контейнерах. Предполагалось, что большой коэффициент разбавления при сбросе радиоактивных отходов в пресные или морские воды обеспечивает безопасность, а емкость океана как резервуара для захоронения радиоактивных отходов практически безгранична. Прошло немало времени, пока от этой практики отказались.

В 1955 г. в дополнение к МКРЗ появилась вторая международная организация, имеющая дело с радиацией. На десятой сессии Генеральной Ассамблеи ООН в 1955 г. был создан Научный комитет по действию атомной радиации Организации Объединенных Наций (НКДАР ООН, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation — UNSCEAR), задачей которого явилось исследование загрязнения окружающей среды радионуклидами и действия радиации на человека.

Произошли кардинальные изменения в экспериментальной базе, используемой для обнаружения и изучения процессов миграции любых радионуклидов в организмах, экосистемах и в биосфере в целом. Наибольший вклад внесли сюда две науки — экспериментальная ядерная физика и радиохимия. Последняя обеспечила не только получение плутония для создания атомного оружия, но и предоставила возможность экологам находить в объектах окружающей среды те радионуклиды антропогенного происхождения, которые трудно идентифицировать классическими физическими методами, например ^{90}Sr и ^{239}Pu .

В историческом плане в радиационной экологии произошло следующее чередование приоритетов:

1) вначале — анализ последствий глобального загрязнения окружающей среды радионуклидами и обеспечивающий эти исследования мониторинг радионуклидов, образующихся при ядерных взрывах и в процессе эксплуатации ядерных установок; поскольку экспериментальные методы позволяют контролировать содержание радионуклидов практически в любом объекте на всей

планете, зона воздействия от каждого источника оказывается равной площади планеты;

2) затем приоритет в исследованиях переходит к проблемам, связанным с защитой биосферы от воздействия радиоактивных отходов;

3) наконец, пришло понимание того, что произошедшее загрязнение радионуклидами поверхности планеты (т. е. глобально) не привело к экологической катастрофе; в центре научных интересов оказались исследования последствий регионального загрязнения окружающей среды, например в результате аварии на Чернобыльской АЭС.

В начале XXI в. наиболее актуальными являются следующие направления исследований:

1) поиск путей предсказания реакции экосистемы на облучение определенных видов организмов; анализ различий реакций организмов, облучаемых в искусственно созданных условиях лабораторного эксперимента и в природных условиях, где действие ионизирующих излучений сочетается с другими экологическими факторами;

2) решение самой трудной задачи — может ли радиационное воздействие на некоторые группы организмов в облученных экосистемах привести из-за нарушения взаимодействия между организмами и средой их обитания к изменению свойств этой среды; если может, то насколько длительными окажутся такие изменения;

3) в связи с обостренным вниманием к проблемам воздействия малых доз излучений усиливается интерес к анализу роли природного радиационного фона;

4) изучение круговорота в биосфере радионуклидов и движения их по трофическим цепям;

5) решение разнообразных задач переноса радионуклидов, имеющих отношение к общим проблемам экологии; дальнейшее развитие метода радиоактивных индикаторов для изучения природной среды;

6) эпидемиологические исследования — совершенствование подходов и методов математического моделирования для расчета доз, получаемых разными организмами, и оценки последствий их воздействия.

После взрывов ядерных бомб над мирными городами происходят радикальные изменения в отношении общества к ионизирующему излучению и ядерной энергии. В 1940—1950-е гг. в разных странах это происходило по-разному. В США, например, страну захватила волна «атомного энтузиазма» и это продолжалось не менее двадцати лет, что способствовало прогрессу в области создания ядерной энергетики, строительству АЭС. В Европе возникли и постепенно нарастали «антиядерные» настроения в обществе.

После успешных испытаний ядерного оружия в СССР эти тенденции наметились и в США. В СССР страхи, обусловленные наличием ядерного оружия у потенциального противника, сменились ростом самосознания, обусловленного паритетом в обладании таким оружием.

Потрясенные ужасными разрушениями в городах Хиросиме и Нагасаки многие начали приписывать основную причину гибели людей там последствию воздействия ионизирующих излучений. Они, естественно, не задумывались о том, что расстояние, на котором происходит смертельное поражение людей от взрывной волны и теплового излучения, больше расстояния, на котором происходит поражение от ионизирующих излучений. В определенной степени они были правы, так как источник был один: энергия, высвобождающаяся при делении атомных ядер. Все это привело в конечном итоге к движению за запрещение ядерного оружия и иррациональному страху перед ионизирующими излучениями любой интенсивности.

Начиная с пуска в 1943 г. первого реактора, построенного для военных целей в Хэнфорде, количество радионуклидов антропогенного происхождения возрастало с каждым выделенным килограммом плутония, а затем, когда началась эксплуатация АЭС, и с каждым выработанным гигаватт-часом электроэнергии. Радиоактивные материалы оказались сконцентрированными в двух группах веществ: отработанном ядерном топливе и радиоактивных отходах. В связи с этим с самого начала возникла задача их переработки и хранения.

Значительный по сравнению с жизнью человека период полураспада многих из образующихся радионуклидов внушает определенные опасения, так как количество вновь наработанного оказывается значительно большим, чем распавшегося. В обиход начал входить термин «потенциальная опасность». Любой, самый незначительный инцидент на АЭС в США и Западной Европе раздувался прессой до уровня глобальной катастрофы. В некоторых «благополучных» странах начала проявляться радиофобия.

Следует отметить, что ситуация во многом еще была под контролем у заинтересованных в этом вопросе правительств и деловых кругов. Так, например, во Франции последовательная разъяснительная работа не давала общественным эмоциям выливаться через край.

1.3. Современный этап развития радиационной экологии

Условно можно связать современный этап развития радиационной экологии с началом 1980-х гг., а в качестве знаменательного события — принять аварию на американской АЭС «Трехмиль-

ный остров» (Three Mile Island) в 1979 г. Наступивший этап не ознаменовался какими-либо принципиальными открытиями непосредственно в области радиоэкологии, в ее экспериментальной или теоретической базах. Единственным крупным событием явилось начало широкого применения математического моделирования при решении разных задач. Этот этап характеризуется тем, что социальная компонента стала определяющей при проведении большинства радиоэкологических исследований, иногда, может быть, и независимо от авторов исследований. Авария в 1979 г., будучи ничтожной в радиационном отношении, явилась крупной промышленной аварией. Она привела к значительным экономическим потерям и гибели троих рабочих. Обычно очень напряженный и жесткий мировой рынок энергоресурсов находился в это время в состоянии относительного благополучия, и авария была раздута до огромных масштабов. Один из очевидных мотивов заключался в том, чтобы потеснить конкурента на рынке энергоресурсов. Антиядерные настроения вспыхнули с новой силой и стали серьезным вопросом в межпартийной конкуренции в США и странах Западной Европы (в качестве примера можно привести историю с партией «зеленых» в ФРГ).

Бесспорным положительным следствием этой аварии явилось резкое ужесточение требований к системам безопасности на АЭС. Авария заставила по-новому оценить проблемы надежности и безопасности действующих и строящихся реакторов, ускорителей и хранилищ радиоактивных материалов. За прошедшие после этой аварии три десятилетия в промышленно развитых странах не произошло ни одной сколько-либо заметной радиационной аварии.

Единственной из крупных промышленных стран, отказавшейся делать какие-либо выводы из аварии на АЭС «Трехмильный остров», был Советский Союз. Диссонансом с настроением общественного мнения прозвучали официальные заявления о том, что нас это не касается. К сожалению, жизнь показала, что это не так, и в ночь с 25 на 26 апреля 1986 г. на Чернобыльской АЭС произошла авария, не имевшая аналогов в мировой практике. Как можно видеть теперь, спустя длительный период времени, действия правительства и многие советы официальных ученых, к сожалению, были неправильными или не адекватными действительности. Чернобыльская АЭС нанесла ущерб здоровью населения и экономике страны. Развилась радиофобия и под воздействием сильнейшего социально-психологического стресса у многих людей на этой почве возникли дополнительные трудности со здоровьем.

Все, связанное с радиоактивностью, радионуклидами, атомной энергетикой, стало восприниматься через призму аварии на Чернобыльской АЭС. Более того, люди стали сомневаться в любой информации из этой области даже в тех случаях, когда она

исходит от профессионально грамотных, политически не ангажированных ученых. Создалась такая ситуация, когда кажется, что только время, повышение уровня образования и снижение уровня коррупции могут преодолеть последствия произошедшего.

С точки зрения радиационной экологии на первый план выдвигается задача более глубокого осмысления результатов огромного числа уже выполненных работ. Стало ясно, что при постановке новых исследований нужно уделять больше внимания вопросам точности и воспроизводимости результатов, учету и нерадиационных факторов, определяющих реакцию системы или биологических организмов на облучение. Три вопроса становятся доминирующими: оценка полученных ранее или получаемых доз; ретроспективное восстановление событий, происходивших при тех или иных катастрофах, и воздействие малых доз радиации. Даже второй вопрос, имеющий, казалось бы, чисто техническую сторону, наталкивается при своем решении на недостаток информации и незаинтересованность управленческого аппарата в выяснении всех обстоятельств событий.

Что касается восстановления доз облучения, ценой больших усилий был достигнут значительный прогресс в области определения доз, полученных в результате бомбардировки городов Хиросима и Нагасаки. Это относится, по крайней мере частично, и к некоторым другим эпизодам. Однако в области определения доз, полученных людьми в результате Чернобыльской аварии, ситуация оказалась явно неудовлетворительной. В то же время знание доз необходимо для решения одной из главных задач радиэкологии — нахождения зависимостей «доза — эффект».

Успехи дозиметрии и математического моделирования позволили определять дозы для отдельных представителей биосферы и, прежде всего, для наиболее трудного случая — представителей низших звеньев морских трофических цепей. Назрела необходимость разработать принципы и правила экологического нормирования.

Наконец, социальная напряженность и политическое положение в мире вторглись в область интересов радиэкологии совершенно неожиданным образом. В настоящее время ученым и специалистам приходится пересматривать многие положения, связанные с переработкой ядерного топлива, в связи с угрозой серьезных террористических актов на хранилищах отработанного топлива и высокоактивных отходов.

1.4. Радиэкология — один из разделов экологии

Когда мы говорим о радиационной экологии, следует помнить по крайней мере о трех существенных ее особенностях.

1. Экологический фактор, самый фундаментальный, — ионизирующие излучения. Его отличительной особенностью является то, что у человека нет органов чувств для обнаружения ионизирующих излучений. Первичные результаты воздействий очевидны — ионизация и возбуждение и, как следствие, возможный разрыв одних химических связей и образование других связей, молекул или свободных радикалов. В то же время последствия этих процессов в некоторых случаях не ясны до конца. Они зависят не только от суммарной величины воздействий, но и от их интенсивности, а утверждение о наличии вредных последствий при малых воздействиях вызывает острые дискуссии и в настоящее время. Ионизирующие излучения, приводящие к образованию в облученном веществе ионов разного знака*, в значительной степени определяют современное состояние биосферы, эволюцию Земли и жизни на Земле, элементный состав Солнечной системы.

2. После возникновения военной атомной промышленности, а затем и гражданской, на изучение последствий загрязнения окружающей среды радионуклидами и смягчение этих последствий, на проблемы охраны здоровья людей, так или иначе связанных с этой промышленностью, выделялись такие ассигнования, которые превосходили все остальные инвестиции в экологические и природоохранные исследования.

3. Исследования по изучению воздействия ионизирующих излучений на все живое всегда были связаны с использованием наиболее современных на момент проведения исследований физических, химических и математических методов анализа. Эта ситуация совершенно уникальна для экологии.

В методическом отношении это позволило радиационной экологии стать своеобразным флагманом экологических исследований. Разработанные в ходе исследований радиоэкологические методы, а также методы оценки последствий воздействия на окружающую среду и здоровье человека нашли применение при решении разнообразных экологических проблем. Атомная энергетика — не единственный путь поступления радионуклидов в биосферу. Существование на нашей планете множества независимых стран, рост численности населения и научно-технический прогресс сопровождаются необходимостью для каждой страны поддерживать оборону, энергетическое обеспечение, медицинское обслуживание и то, что можно назвать научно-техническим потенциалом. Удовлетворение каждой из этих фундаментальных потребностей неизбежно сопровождается загрязнением окружающей среды радионуклидами, токсическими химическими соединениями и не характерными для биосферы элементами. Основные источники или

* Ультрафиолетовое излучение и видимый свет в радиоэкологии не относят к ионизирующим излучениям.

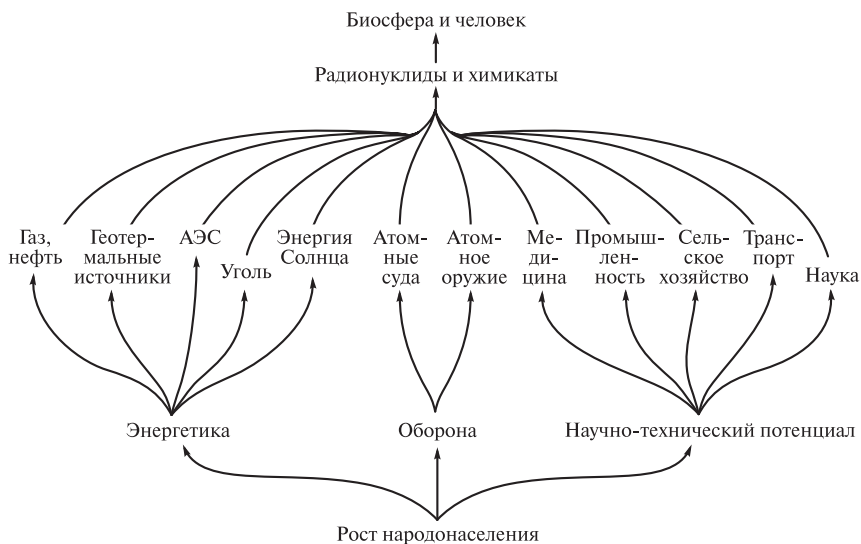


Рис. 1.3. Основные потребности общества, приводящие к загрязнению природной среды радионуклидами в результате их удовлетворения

пути таких загрязнений изображены на диаграмме, представленной на рис. 1.3.

В настоящее время между науками, занимающимися изучением воздействия радиации на биотические компоненты, сложилась вполне определенная дифференциация. Так, наука, изучающая воздействие ионизирующих излучений на организмы и растения на организационных уровнях от молекул до организмов, называется радиобиологией. Предметом изучения в радиационной медицине или радиологии являются отдельные особи и органы, хотя исследования воздействий радиации на отдельные клетки и популяции часто также представляют интерес для радиологии. Место радиоэкологии среди наук, изучающих воздействие ионизирующих излучений на все живое, позволяет представить известная концепция уровней организации Ю. Одума. Упомянутые выше области исследований, систематизированные в соответствии с этой концепцией, представлены на рис. 1.4. Таким образом, если в известной схеме в абиотические компоненты мы включаем ионизирующее излучение, то четко вырисовывается место радиоэкологии среди наук, изучающих воздействие радиации на живое. Она изучает воздействие радиации на уровни, находящиеся в правой части спектра, а также на всю биосферу в целом.

Для широких слоев населения слово «радиоэкология» ассоциируется в первую очередь с проблемой загрязнения окружающей среды радионуклидами или со здоровьем человека, подвергнутого-

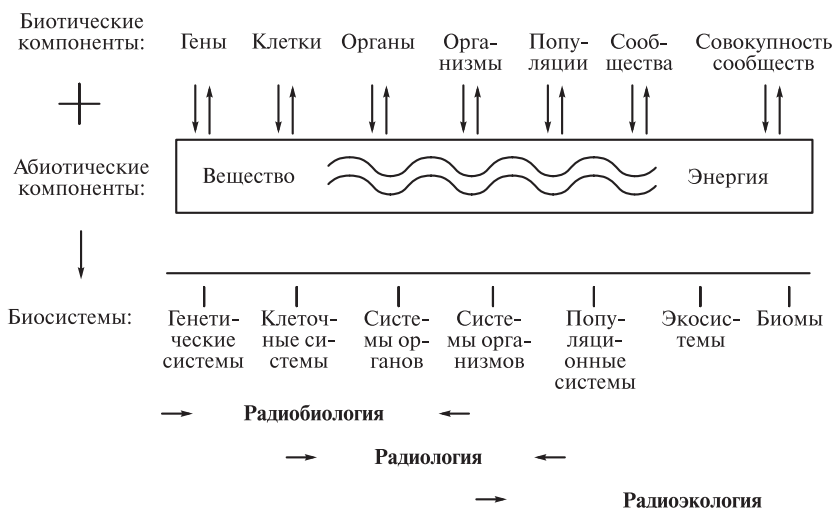


Рис. 1.4. Области исследований радиоэкологии, радиологии и радиобиологии, а также взаимное проникновение этих наук (под системой подразумевается упорядоченно взаимодействующие и взаимозависимые компоненты, образующие единое целое)

ся облучению. Радиоэкологический мониторинг загрязнения окружающей среды — это первая и наиболее наглядная фаза исследований. Что касается здоровья человека, то это, естественно, волнует каждого и на начальном этапе дискуссии не требуется специальных знаний.

Радиоэкология качественно и количественно демонстрирует то обстоятельство, что любая деятельность человека сопровождается не только получением желаемых частных результатов, но и экологическими последствиями. Следует отметить и существенное отличие глобальных проблем, связанных с загрязнением окружающей среды радионуклидами, от «традиционных» проблем, связанных с ростом населения, урбанизацией территорий, деятельностью горнодобывающей, угольной, нефтяной или газовой промышленности. Загрязнение радионуклидами в процессе хозяйственной деятельности человека не оказывает, как правило, влияния на крупномасштабные природные процессы. Основной вопрос заключается в следующем: каким образом некоторое возрастание концентрации и изменение состава радионуклидов (не изменяющее сколько-нибудь существенно химический состав среды) вдали от источника эмиссии может в результате миграции и разнообразных процессов концентрирования сказаться на организмах, находящихся в данном месте.

На первое место выдвинулась проблема влияния малых доз и малых интенсивностей излучений и того, какой критерий следует

применять при оценках пользы или вреда от действия ионизирующих излучений.

После Чернобыльской аварии радиоэкологические и радиологические исследования стали существенным компонентом социоэкологических исследований. Однако люди, занимающиеся такими исследованиями, не находят, обычно, нужным освоить основы радиоэкологии и судят о предмете из своих априорных соображений. Положение особенно усугубилось тем, что интерпретацией результатов исследований занялись политики, журналисты и писатели, не имеющие не только специальных знаний, но часто и просто знаний в области естественных наук. Эти энергичные люди, полные разных желаний, в том числе и благих, очень хотят сказать здесь свое слово. Чтобы не нервировать население, эти люди, также из благих побуждений, пытаются скрыть различные аварии, а если это не удается, то дают о них неадекватную информацию. Обман быстро становится явным, и население окончательно перестает верить и информации ученых.

Ученые должны уделять серьезное внимание не только естественно-научным аспектам проблемы, но рассматривать проблемы комплексно, с учетом социальной составляющей, иначе общественная ценность исследований значительно снижается. В любом случае радиоэкология позволяет подойти к решению наиболее фундаментальных экологических проблем: иерархической соподчиненности элементов, пониманию структуры, продуктивности и устойчивости экосистем.

Это можно проиллюстрировать на простом примере. Возьмем в качестве элементарных единиц особи, которые образуют элементарную подсистему — популяцию. Допустим, что совокупность популяций, выполняющих сходную функциональную роль в экосистеме, образует следующую подсистему — ассоциацию, или сообщество. Для того чтобы доказать или опровергнуть наличие целостных свойств экосистем, необходимо изучить связи между элементами, определяющими функционирование экосистемы как единого целого. Радиоэкологические методы подходят для этих целей и позволяют однозначно отслеживать движение питательных веществ внутри сообщества и на всех трофических уровнях экосистемы. Они позволяют также контролировать ареал распространения и миграции отдельных особей.

Контрольные вопросы

1. Когда и кем был введен термин «радиоэкология»?
2. Что представляет собой радиоэкология?
3. Докажите, что радиоэкология — это интегрированная дисциплина, связывающая естественные, гуманитарные и социально-экономические науки.

4. Перечислите три существенные особенности радиационной экологии и определите ее место среди наук, изучающих воздействие радиации на живое.

5. Покажите на примере радиоэкологии, что любая деятельность человека сопровождается экологическими последствиями.

6. Объясните, почему радиоэкология, являясь точной наукой, оказалась в центре социальных потрясений и политической активности в нашей стране.

7. Когда были сделаны великие открытия В. Рентгена и А. Беккереля?

8. Каковы были отношения людей к ионизирующим излучениям в течение первых 30 лет после их открытия?

9. Какие исследования, проводившиеся до 1940-х гг., явились основой для возникновения радиоэкологии?

10. Каким образом происходило чередование приоритетов исследований в радиоэкологии?

11. Перечислите наиболее актуальные направления исследований в начале XXI в.

12. Назовите основные международные и национальные организации, анализирующие воздействие радиации.

13. Объясните, почему радиоэкология является тем разделом экологии, который способствует развитию фундаментальных основ экологии.