

**Конец 1895 г. открытые В.К. Рентгеном X-лучей.**

**1896 г. открытие А. Беккерелем явления радиоактивности**

Одно из самых фундаментальных физических явлений — **радиоактивность** и **ионизирующие излучения**, сопровождающие это явление или возникающие в рентгеновских трубках, оказались после их открытия тесным образом связанными с медициной, биологией, а затем и с экологией.

**Предварительно** скажем, что **радиоактивность** — это явление спонтанного (самопроизвольного) превращения изотопа одного химического элемента (радионуклида) в изотоп другого элемента.

**Радиоактивный распад** — экзоэнергетический, 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  $\gamma$ -излучения или внутренней конверсии.

В окружающей среде радионуклиды всегда существуют вместе со своими электронными оболочками. Мы будем рассматривать термины **радионуклиды и радиоактивные атомы как синонимы.**

В 1950-х гг. возник раздел экологии — **радиоэкология.**

Термин “радиоэкология” был независимо предложен А.А. Передельским в СССР и Е.П. Одумом в США более, чем через 50 лет после открытия радиоактивности. Позднее появился термин “**радиационная экология**”.

**Радиоэкология** — наука, изучающая закономерности миграции радионуклидов в биосфере, действия ионизирующих излучений на живые организмы в среде их обитания и на экосистемы в целом. Существенным является то, что она всесторонне изучает особенности проявления ионизирующих излучений как важного экологического фактора и способствует охране природы от радиоактивных загрязнений.

**В радиационной экологии впервые в экологической практике точность, достоверность измерений, методы обработки и интерпретации экспериментальных данных оказались такими же, как и при самых современных физических и химических исследованиях.**

При рассмотрении экологических и природоохранных проблем необходимо иметь в виду то, что **радионуклиды в химическом отношении, т. е. в плане химического воздействия на биоту, не отличаются от тех атомов, внутри которых находятся стабильные нуклиды данного элемента.**

**Источником воздействия являются не атомы,** приводящие к тем или иным нежелательным эффектам в организмах (так как количество их пренебрежимо мало) благодаря своим химическим свойствам (строению электронной оболочки), **а излучения ядер этих атомов.**

## Пример

Возьмем в качестве примера радионуклиды  $^{40}\text{K}$ . Как и все вещество Земли, они образовались  $\sim 4,7$  Млрд. лет тому назад и  $\sim 8,5\%$  их дожили до настоящего времени. Один конкретный атом может последовательно на протяжении десятков миллионов лет входить в состав клеток различных растений и животных, участвуя во всех тех процессах, для которых необходим калий. Иными словами он непосредственно способствует существованию жизни на Земле. Затем случайно может произойти радиоактивный распад и наш атом превратится в атом или  $^{40}\text{Ar}$ , или  $^{40}\text{Ca}$ . Воздействие возникшего при этом излучения на клетки будет кратковременным — доли секунды. Последствия от распада одного конкретного атома если и будут, то проявятся через годы (латентный период).

**Загрязняют среду радионуклиды, но воздействие оказывают излучения, ими испускаемые.**

**Момент появления этих излучений никогда не известен заранее.**

**Время проявления последствий воздействия от распада одного радионуклида также не известно.**

**Если же в течении достаточно короткого времени распадается огромное количество радионуклидов, то последствия могут проявиться очень быстро (лучевая болезнь, эритема) .**

**Без освоения достаточно трудных разделов наук, не связанных напрямую с экологией, не возможно понять характер загрязнения окружающей среды радионуклидами, воздействия, ими оказываемые, и последствия этих воздействий.**

**Без этого совершенно невозможно разобраться и в радиоэкологических методах, позволяющих количественно изучать процессы миграции веществ как во всей биосфере, так и в отдельных организмах, проводить многие физиологические исследования, широко использовать метод радиоактивных индикаторов в экологии.**

**Нашей целью является формирование реалистического и целостного представления об ионизирующих излучениях, их роли и их месте среди других экологических факторов естественного и антропогенного происхождения, определяющих в настоящее время экологическую обстановку**, о влиянии их не только на здоровье людей, но и на социальную напряженность в обществе.

**Моментом, усложняющим получение адекватного представления о радиоэкологии и о действии ионизирующих излучений является то, что большинство студентов, приступающих к изучению курса, находятся в плену многочисленных мифов и предрассудков**, широко распространяемых как СМИ и различными «зелеными» с одной стороны, так и «атомным лобби» с другой стороны.

**Следует пользоваться только рекомендованными источниками информации.**

Радиоэкология является интегрированной дисциплиной, не только связывающей физические и биологические явления, но и образующей **мост между естественными и гуманитарными науками. Роль социального фактора в радиоэкологии стала особенно значимой.**

## **Воздействия ионизирующих излучений на биосферу**

(период до начала испытаний ядерного оружия)

Ионизирующие излучения были всегда, но человек долгое время «не замечал» их.

Работая с трубкой Крукса, В.К. Рентген первым понял, что она является источником неизвестного ранее проникающего излучения, которое он назвал X-лучами. Эти лучи вызывали не только люминесценцию, которую он изучал, но и приводили к почернению фотографических пластинок, завернутых в черную бумагу. За открытие X-лучей В.К. Рентген был удостоен первой Нобелевской премии по физике.

**Рентгеновское излучение по своему воздействию на живые ткани неотлично от  $\gamma$ -излучения.**

**Наблюдаются разные последствия воздействия этих лучей на человека.** Так **с одной стороны**, в 1896 г Э. Грубе в Чикаго поставил первые эксперименты по лечению злокачественных опухолей молочной железы. **С другой стороны**, уже в 1897 г. был опубликован обзор, где упоминались **69 случаев заболевания в результате облучения рентгеновским излучением** (при работе с трубками Крукса), имевшего место до 1896 г.

Ионизирующие излучения, сопровождавшие явление радиоактивности, имели место в течение всего времени существования Солнечной системы, однако ни у человека, ни у других представителей биоты нет органов, позволяющих непосредственно идентифицировать их и люди о них просто не знали.

**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.**

Что касается **косвенного наблюдения** последствий воздействия, то с XVI в. в Европе было известно о **высокой смертности шахтеров**, работающих в шахтах по добыче тяжелых металлов (Об этом, например, писал известный немецкий врач периода средневековья Георгий Агрикола в 1556 г.). 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.

**В 1910-30-е гг. радий нашел достаточно широкое применение в различных лечебных средствах.** Использовались, например, различные ингаляторы, содержащие радий и продукт его распада — радон. В массовом количестве изготавливались компрессы, пропитанные солями радия.

Этикетка компресса, содержащего 0,1 мг  $^{226}\text{Ra}$  и имеющего сертификат Радиевого института факультета естественных наук в Париже. Такие компрессы использовались для лечения различных болевых ощущений.



Попытки более радикального применения радия положительных результатов не дали. Так, при лечении болезней головного мозга больным делались внутривенные инъекции растворов солей радия, часто в достаточно больших, по современным представлениям, количествах. К сожалению, со временем оказалось, что положительного эффекта от таких процедур нет. **Неиспользованные радиоактивные препараты и радиоактивные отходы различного происхождения обычно просто зарывали в землю рядом с больницей или спускали в канализацию.** Как следствие этого, в 1970 – 90-х гг. в центрах крупнейших европейских городов, в самых неожиданных местах (в парках и скверах) начали находить такие захоронения.

**К началу 1940-х гг. в мире было произведено ~1 кг радия, точнее  $^{226}\text{Ra}$ .** Типичной сферой его применения стало изготовление различных светящихся циферблатов для часов и различной военной техники. Работники таких производств воспринимали используемый состав как обычную краску и оказались первой группой людей, подвергшихся существенному воздействию от технического применения радионуклидов.

Среди нарождающихся **составляющих** будущей **радиационной экологии** основными, бесспорно, были следующие **два**.

**1.** — изучение биологических эффектов, возникающих под действием радиации и

**2.** — изучение радиоактивности объектов природной среды.

В результате изучения биологических эффектов оформились **два направления**:

**гигиеническое**, связанное с медицинскими проблемами и приведшее к возникновению радиационной медицины — **радиологии**, и **направление экспериментальных биологических исследований** — радиационная биология (**радиобиология**).

Среди самых ранних работ отметим исследования нашего соотечественника И. Ф. Тарханова, установившего уже в 1896 г. в опытах на лягушках и насекомых реакции их на облучение X-лучами.

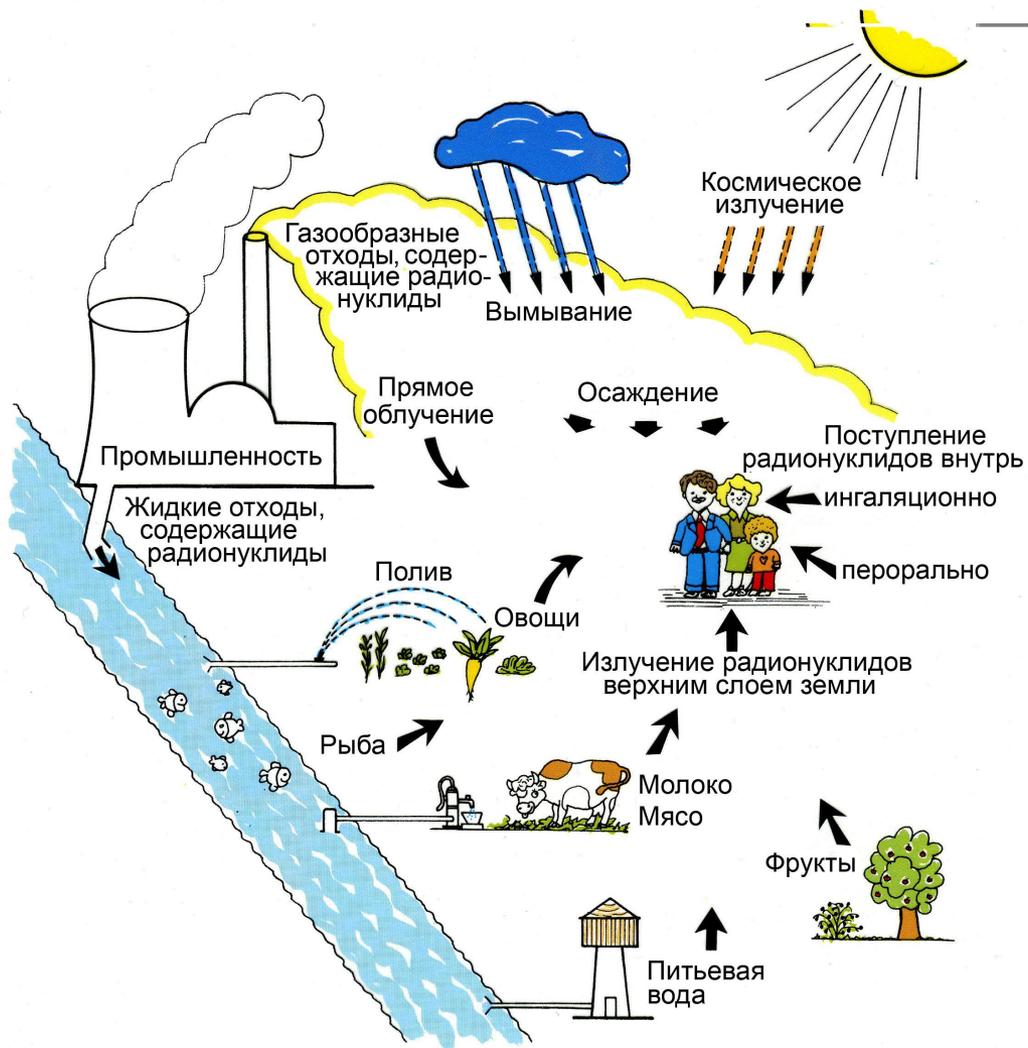
Среди работ рассматриваемого периода стоит выделить:

Ставшие классическими исследования Г. Мюллера (Muller H.J.) по индуцированию рентгеновскими лучами мутаций у дрозофил — 1926 г. Он заложил основы радиогенетики — новой области в исследованиях генетических эффектов, и его исследования были отмечены в 1946 г. Нобелевской премией по медицине.

Исследования биологической роли природного фона ионизирующих излучений и его значением для процесса эволюции.

Основным источником информации о воздействии излучений на человека являлись изучения последствий несчастных случаев.

# Схематическое представление источников ионизирующих излучений, воздействующих на человека, и пути поступления радионуклидов внутрь человека.



## **Интенсификация исследований в области радиоэкологии**

Пятидесятилетний период после открытия радиоактивности закончился в августе 1945 г., когда США успели взорвать над уже разгромленной, но еще не капитулировавшей Японией две атомные бомбы: над Хиросима и над Нагасаки.

**В окружающей среде появились экосистемы или значительные территории, существенно загрязненные радионуклидами антропогенного происхождения.**

Первые исследования по изучению поведения различных радионуклидов в окрестностях Хэнфордских (США) реакторов стали классическими (Это были именно исследования по изучению поведения различных радионуклидов на выбранных территориях, а не экологические исследования в строгом их понимании). Практическая сторона этих исследований была связана с разработкой методов переработки и хранения радиоактивных отходов (В конце XX в. эта территория стала первым полигоном по разработке методов реабилитации территорий, серьезно загрязненных радионуклидами).

У нас в 1947 г. Н.В. Тимофеев-Ресовский организовал лабораторию радиационной биологии на Южном Урале.

Можно считать, что взрывы над Хиросима и Нагасаки завершили первый, инкубационный этап развития радиационной экологии. Наука оказалась теперь действительно востребованной.

В историческом плане в радиационной экологии происходили следующие **чередования 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. Так как экспериментальные методы позволяют контролировать содержание радионуклидов практически в любом объекте на всей планете, то оказалось возможным изучать воздействие на всю биосферу от каждого источника.
2. **Затем** приоритет в исследованиях переходит к проблемам, связанным с защитой биосферы от воздействия радиоактивных отходов.
3. **Наконец**, пришло понимание того, что произошедшие глобальные загрязнения радионуклидами не стали серьезной экологической угрозой. В центре научных интересов стали исследования последствий регионального загрязнения окружающей среды, например, вследствие аварии на ЧАЭС.

В начале XXI в. наиболее **актуальными направлениями исследований являются:**

- 1.** Поиск путей предсказания реакции экосистемы на облучение определенных видов организмов. Анализ различий реакций организмов, облучаемых в условиях лабораторного эксперимента и в природных условиях, где действие ионизирующих излучений сочетается с другими экологическими факторами.
- 2.** Решение 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. Вопрос о выпадении из состава сообщества наиболее радиочувствительных видов или вытеснение одних видов другими является чрезвычайно важным в экологии.
- 3.** Анализ роли природного радиационного фона. Значение исследований в этой области усиливается в связи с обостренным вниманием к проблемам воздействия малых доз излучений.
- 4.** Изучение движения радионуклидов всех типов по трофическим цепям.
- 5.** Решение разнообразных задач переноса, 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 воздействий этих доз.

## **Отношение общества к ионизирующим излучениям и к ядерной энергии.**

В разных странах это происходило по-разному. **В США** после 1945 г. страну захватила волна «**атомного энтузиазма**» и это длилось не менее двадцати лет. Это способствовало прогрессу в области создания ядерной энергетики, строительству АЭС .... **В Европе** возникли и окрепли «антиядерные» настроения в значительной части общества. **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 обладанием этим оружием. Затем пришла радиофобия после аварии на ЧАЭС. Потрясенные разрушениями в Хиросима и Нагасаки, многие стали приписывать основной вклад в гибель людей последствию воздействия ионизирующих излучений. Они, естественно, не задумывались о том, что расстояние, на котором происходит смертельное поражение людей от взрывной волны и от 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 к иррациональному страху перед ионизирующими излучениями любой интенсивности.

## **Современный этап развития радиационной экологии.**

После аварии на ЧАЭС у многих все, связанное с радиоактивностью и атомной энергетикой, воспринимается через призму этой аварии. Люди стали сомневаться в любой информации из этой области. Это крайне удобно для СМИ и различных «зеленых» движений. Многочисленное чиновничество начало эксплуатировать ситуацию в своих целях, призывая преодолеть радиофобию, но непрерывно подогревая ее своим практическим поведением. Создалась такая патовая ситуация, когда только время, повышение уровня образования и снижение уровня коррупции могут преодолеть последствия произошедшего.

Что касается естественно-научной стороны исследований в области радиационной экологии, то на первый план выдвигается задача более глубокого осмысления результатов огромного числа уже сделанных 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 организмов на облучение.

Ретроспективное восстановление доз облучения крайне необходимо для решения одной из главных задач радиоэкологии — нахождения зависимостей доза — эффект.

Все более настоятельно звучат призывы разработать принципы и правила экологического нормирования.

Проблема анализа природного радиационного фона становится, вероятно, в научном отношении более значимой, чем в предыдущие моменты времени, так как четкие представления в этой области оказываются необходимыми для решения проблемы малых доз.

## Радиоэкология — один из разделов экологии

Когда мы говорим о радиационной экологии, мы должны помнить, по крайней мере, о трех существенных ее особенностях:

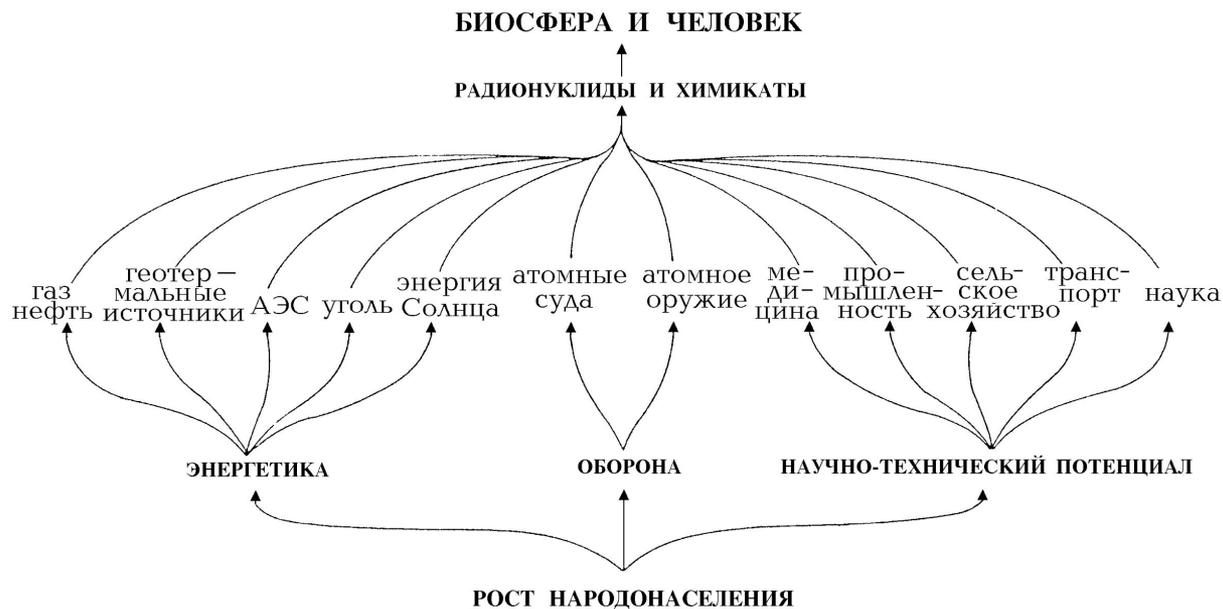
**1. Экологический фактор, самый фундаментальный** — ионизирующие излучения. Отличительной его особенностью является то, что у человека нет органов чувств для обнаружения ионизирующих излучений. **Первичные результаты воздействий очевидны** — ионизация и возбуждение и, как следствие, возможный разрыв одних химических связей и образование других связей, молекул или свободных радикалов. В то же время **последствия всего этого в ряде случаев не ясны до конца**. Они зависят не только от суммарной величины воздействий, но и от их интенсивности, а наличие вредных последствий при малых воздействиях вызывает острые дискуссии и сегодня, через 100 лет после наблюдения первых эффектов.

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

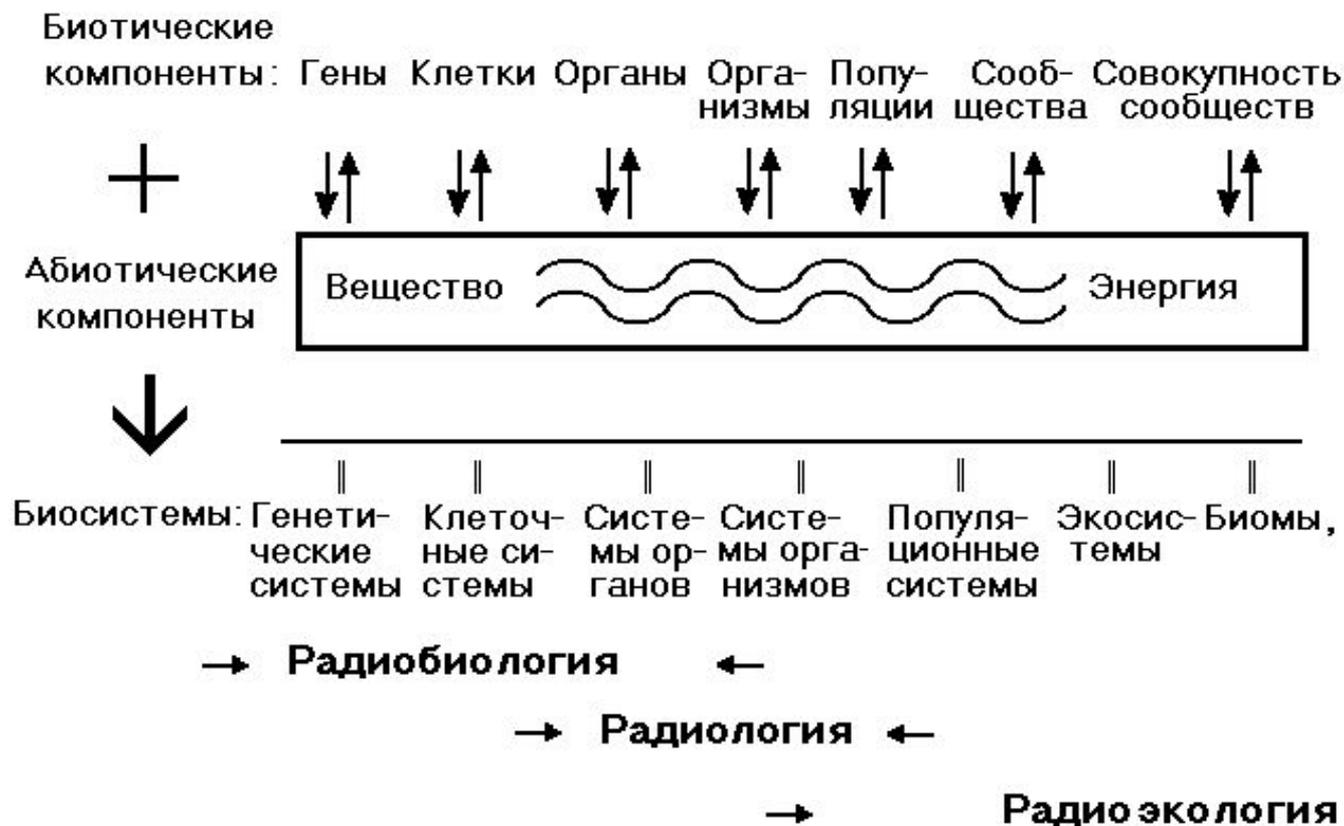
**3.** Исследования по изучению воздействия ионизирующих излучений на все живое всегда были **связаны с использованием самых современных на момент проведения исследований физических, химических и математических методов анализа**. Эта ситуация совершенно уникальна для экологии.

Атомная энергетика — не единственный путь поступления радионуклидов в биосферу. Существование множества независимых стран, рост народонаселения и научно-технический прогресс сопровождаются необходимостью для каждой страны поддерживать: оборону, энергетическое обеспечение, медицинское обслуживание и то, что можно назвать научно-техническим потенциалом. Удовлетворение этих фундаментальных потребностей неизбежно сопровождается загрязнением окружающей среды радионуклидами, повышением фона ионизирующих излучений и, что также опасно, но менее контролируемо, загрязнением окружающей нас среды токсическими химическими соединениями. Основные источники или пути таких

загрязнений изображены на диаграмме.



Между науками, занимающимися изучением воздействия радиации на биотические компоненты, в настоящее время сложилась вполне определенная дифференциация. Место радиоэкологии среди этих наук позволяет представить себе известная концепция уровней организации Ю. Одума. Радиоэкология 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, подвергшегося облучению. **Чисто экологические проблемы часто остаются на втором плане.** Это не удивительно, так как радиологический 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.**

**Радиоэкология — точная наука** в том смысле, что она использует концепции, методы и приборы из химии, физики, других естественных наук и математики. В то же время, особенно после Чернобыльской аварии, она оказалась в центре социальных потрясений и политической активности в нашей стране.

**Радиологические и радиологические исследования стали существенным компонентом социо-экологических исследований.**

**Радиоэкология позволяет на физическом уровне строгости подойти к решению самых фундаментальных экологических проблем: иерархической соподчиненности элементов, пониманию структуры, продуктивности и устойчивости экосистем.**

