

6. РАДИОЭКОЛОГИЯ ВОДНЫХ СИСТЕМ

6.1 Радиоактивное загрязнение пресноводных систем

После аварии на ЧАЭС радиоактивному загрязнению подверглись природные воды на площадях 46450 км², главным образом в бассейнах рек Припять и Сож, где проживает около 2 млн. человек. Большая часть радионуклидов осела в 30-километровой зоне и на ближайших территориях, на водосборе и акватории Припяти, Сожа, Днепра и в меньшей степени Немана и Западной Двины. До аварии в воде Припяти содержание цезия и стронция было очень низким и составляло 0,0066–0,0085 Бк/л и 0,0033–0,0185 Бк/л соответственно. После аварии в районе ЧАЭС концентрация цезия и стронция доходила до 3000 Бк/л, но к концу мая 1986 года снизилась до 200 Бк/л. К 1993 году средняя концентрация цезия и стронция в Припяти снизилась в 8 раз, в Соже – в 10 раз, в Днестре – в 4 раза. В настоящее время содержание радионуклидов во всех водах значительно превышает доаварийный уровень, но не превышает РДУ на питьевую воду (¹³⁷Cs = 10 Бк/л, ⁹⁰Sr = 0,37 Бк/л).

В первые дни аварии загрязнение водных экосистем характеризовалось как **первичное**, происходило 2 путями: 1) при непосредственном осаждении радиоактивных аэрозолей и частиц на водную поверхность и дно; 2) конденсации радиоактивных аэрозолей из атмосферы на холодную водную поверхность.

Вторичное загрязнение происходило после дождей за счет смыва радионуклидов с растительности и почвы загрязненных водосборов.

В настоящее время загрязнение происходит за счет: вторичных эффектов водосборного смыва; подъема радионуклидов с донных отложений; приноса водами, впадающими в реки притоков; сброса в реки различных отходов, содержащих радионуклиды.

На территории с плотностью загрязнения ¹³⁷Cs 1-5 Ки/км² находится около 70 % различных водных систем. Весной концентрация цезия и стронция в воде и на взвесах возрастает в 1,5–3 раза. Летом снижается и возрастает на взвесах, которые увеличивают активность вод на 11–15 % по цезию и на 4–5 % по стронцию.

6.2 Миграция радионуклидов в пресноводных системах

Гидрологический перенос является одним из возможных путей миграции радионуклидов. Главными гидродинамическими механизмами переноса радионуклидов в водоемах являются дисперсия (диффузионная, турбулентная и иная) и конвекция.

Миграционная цепь в водных системах может быть закрытой, когда миграция осуществляется в пределах этой системы, и открытой, когда радионуклидов выносятся за ее пределы. Радионуклиды, попавшие в реки, выносятся с течением в места впадения рек. Перераспределение радионуклидов по руслу рек происходит за счет их переноса водными потоками по направлению течения. Активность выноса со временем снижается, так как снижается активность вод в результате самоочищения рек.

Причины самоочищения воды: 1) постоянная смена водной массы; 2) осаждение взвесей на дно; 3) сорбция радионуклидов минеральными и органическими частицами взвесей и совместное осаждение их на дно; 4) сорбция радионуклидов органическим веществом донных отложений и донными минералами.

По сравнению с 1987 годом к 2000-м годам средняя концентрация цезия-137 и стронция-90 в водах Припяти снизилась в 20 раз, Ипути – в 52 раза, Днепра – в 30 раз, Сожа – 78 раз. Припять протекает по загрязненной территории. С ее вод радионуклиды выносятся за 800 км в каскад Днепровских водохранилищ, воды которых постоянно загрязнены.

Воды Припяти загрязняются по двум основным причинам: ежегодное затопление загрязненной поймы Припяти в 30-километровой зоне; высвобождение и переход радионуклидов из торфяно-болотных почв затопленной поймы в воды реки.

В настоящее время установлено, что радиационная обстановка на реках стабилизировалась. Смыв радионуклидов с водосборов наиболее значим для рек, водосборы которых находятся в 30-километровой зоне. Трансграничный перенос радионуклидов с поверхностными водами Припяти на границе Беларусь-Украина оказывает существенное влияние на загрязнение поверхностных вод Припяти на территории Республики Беларусь. В Ипути и Беседи трансграничный перенос цезия-137 водами практически не наблюдается.

В водохранилищах вынос или миграция радионуклидов происходит при: сбросе талых и дождевых вод в весенне-летний период; сбросе вод осенью; заборе вод для хозяйственных нужд.

Эти причины обуславливают снижение концентраций радионуклидов в воде. Концентрация радионуклидов может возрастать при впадении в водохранилища различных речных систем, в воде которых содержатся радионуклиды.

В закрытых водоемах самоочищение воды происходит за счет: поглощения радионуклидов водными растениями и живыми организмами; осадения на дно отмерших биологических объектов; поглощения радионуклидов минеральными и органическими взвесьями. В закрытых водоемах и водохранилищах очень высокое содержание радионуклидов в донных отложениях. Содержание радионуклидов в поверхностных водах зависит от: плотности загрязнения почвы водосбора; интенсивности твердого и жидкого стока с почвы водосбора; площади и заболоченности водосбора; типа почв; вида растительности водосбора; антропогенного

фактора. Радиоактивность воды возрастает от поверхности ко дну. Изменение концентрации радионуклидов по вертикальному профилю рек зависит от: активности донных отложений; глубины реки; скорости водного потока. Уровень загрязнения донных отложений в 2–6 раз выше, чем воды. Загрязнение вод в настоящее время обусловлено в основном цезием и стронцием.

Цезий-137 хорошо поглощается взвешенным органическим веществом и глинистыми частицами, в составе которых и мигрирует. Основное количество цезия связано с мелкодисперсной глинистой фракцией взвесей, которые оседают на дно и могут легко подниматься со дна в верхние слои воды при паводках и ускорении течения. **По содержанию цезия в воде установлен убывающий ряд: непроточные водоемы > полупроточные водоемы > гидромелиоративные каналы > реки.** Стронций-90 мигрирует в растворенной форме (90%) и на органических взвесах (5 %). Концентрация радионуклидов в болотных водах всегда выше, чем в речных и озерных.

6.3 Радиоактивное загрязнение водных организмов

6.3.1 Накопление радионуклидов водной растительностью

Накопление радионуклидов водными растениями связано со следующими особенностями: слабая минерализация воды; большое разнообразие и различия физико-химических свойств водной среды и биологическое состояние растений; значительные колебания климатических условий в течении года; концентрация радионуклидов в водной среде возрастает быстрее, чем в морской так как низкий коэффициент разбавления; антропогенное воздействие.

Эти особенности делают пресноводные экосистемы более уязвимыми к действию радиационного фактора, чем системы морей, океанов и суши.

Первые работы по изучению накопления радионуклидов водной растительностью были проведены В. И. Вернадским в 30-е годы двадцатого столетия. Он в модельных аквариумах исследовал закономерности поступления и накопления растениями естественных радионуклидов (урана, тория и радия).

Для количественной характеристики поступления радионуклидов в водные организмы используется коэффициент перехода, который также иногда называют коэффициентом накопления. **Коэффициент перехода (накопления)** – это отношение содержания радионуклида в водном организме к его содержанию в воде. У водных организмов коэффициенты перехода более высокие в сравнении с наземными организмами. Это связано с формами нахождения радионуклидов в среде обитания и с особенностями поступления радионуклидов в организмы гидробионтов. Чем выше концентрация радионуклидов в воде, тем больше коэффициенты перехода. Коэффициенты перехода ^{90}Sr во все водные организмы выше, чем ^{137}Cs . Это связано с более высокой подвижностью ^{90}Sr в воде.

Факторы, влияющие на накопление радионуклидов водной растительностью:

1. Филогенез (более высокий коэффициент накопления у низкоорганизованных водных растений. Установлено, что одноклеточные и нитчатые водоросли накапливают больше радионуклидов, чем водные растения. А среди водных растений больше накапливают радионуклиды те растения, которые имеют более раннее эволюционное происхождение).

2. Экотип и биологические особенности растений

Водные растения делятся на 5 групп: 1 – плавающие по водной поверхности; 2 – погруженные в воду и не имеющие связи с дном; 3 – погруженные в воду, прикрепленные ко дну; 4 – погруженные в воду, прикрепленные ко дну с плавающими на поверхности воды листьями; 5 –прибрежная водная растительность.

Из пяти групп экотипов водных растений максимальное накопление ^{137}Cs и ^{90}Sr наблюдается у погруженных в воду растений, не имеющих связи с дном, а также плавающих на поверхности воды (ряска). Меньше накапливают радионуклиды растения таких групп, как погруженные в воду прикреплённые ко дну, погружённые в воду и прикреплённые ко дну с плавающими на поверхности листьями (кубышка) и прибрежно-водные. Из водной растительности высокой аккумулярующей способностью обладают ряска малая, элодея, кубышка.

Содержание радионуклидов в органах водных растений может превышать содержание в воде в 2 раза. Основной механизм поступления радионуклидов в растения – ионно-обменные реакции и диффузия.

Пути поступления: через вегетативные органы (основное поступление); через корни.

Виды с высоким накоплением цезия-137 и стронция-90 используются как биоиндикаторы.

3. Химические свойства радионуклидов

Установлен убывающий ряд радионуклидов, которые характеризуются высоким $K_{\text{нак}}$: $^{32}\text{P} > ^{59}\text{Fe} > ^{60}\text{Co} > ^{91}\text{Y} > ^{141}\text{Ce}$. В меньшей степени растения накапливают Ru, Rb, Sr, Cs. Накопление радионуклидов обуславливается их потребностью для растений.

4. Концентрация в воде неизотопных носителей радионуклидов

Накопление стронция-90 находится в обратной зависимости от содержания в воде его химических аналогов – кальция и магния, а цезия-137 – от калия, поэтому $K_{\text{нак}}$ этих радионуклидов растительностью снижается при увеличении содержания в воде калия, кальция и магния.

5. Кислотность оказывает влияние на растворимость различных соединений радионуклидов. В кислой водной среде возрастает $K_{\text{нак}}$ всех радионуклидов.

6. Трофность водоема

Континентальные водоемы подразделяются на олиготрофные; мезотрофные; эвтрофные; дистрофные.

В воде дистрофных водоемов мало калия, кальция и магния, поэтому высокий $K_{\text{нак}}$ цезия и стронция. В проточных водоемах $K_{\text{нак}}$ цезия и стронция меньше, чем в непроточных, так как не устанавливается равновесие в пределах водоема в распределении радионуклидов между водной и грунтовой растительностью.

7. Сезон года

Максимальный $K_{\text{нак}}$ наблюдается осенью, зимой – снижается, так как заканчивается прирост растительной массы.

8. Освещенность и температура

Влияние освещенности изучено недостаточно, но установлено, что с ее увеличением $K_{\text{нак}}$ кобальта, цезия и стронция возрастает в 2–5 раз. С увеличением температуры возрастает $K_{\text{п}}$ радионуклидов в 1,5–2 раза.

6.3.2 Накопление радионуклидов водными организмами и рыбой

Накопление радионуклидов планктоном и организмами зообентоса варьирует в очень широких пределах и зависит от многих факторов. Среди них выделяют вид, возраст, анатомическое строение организмов, а также тип водной системы, характеристику среды обитания, сезон года и концентрацию радионуклидов в воде.

Организмы по накоплению радионуклидов располагаются в следующем убывающем порядке: низшие ракообразные > моллюски и высшие ракообразные > рыбы > насекомые > животные. Коэффициенты накопления радионуклидов данными классами организмов имеют значения от 10 до 250, т.е. характеризуются высоким уровнем и варьированием.

Планктон, состоящий из низших ракообразных, микроводорослей и инфузорий, может иметь высокие концентрации ^{106}Ru , ^{137}Cs , ^{90}Sr . У высших организмов ^{137}Cs и ^{90}Sr распределяются по определенным органам. Так, до 95 % ^{90}Sr накапливается в раковинах, хитиновых кутикулах, костной ткани, а цезий-137 – в мягких тканях.

Из всех водных организмов пресноводной экосистемы только рыбы и раки связаны с пищевыми цепочками человека. Поступление радионуклидов в их организм осуществляется двумя путями: алиментарным и осмотическим. **Алиментарный путь** – это поступление радионуклидов с водой и пищей через рот. При низкой концентрации радионуклидов в воде этот путь является основным. **Осмотический путь** – это поступление радионуклидов из воды непосредственно через кожу, жабры, слизистые оболочки, хвостовой плавник. Такое поступление радионуклидов приводит к повышению их концентрации в организме рыб на несколько порядков в сравнении с их концентрацией в среде обитания (воде).

Установлено, что до 90 % стронция-90 и кальция поступают в организм рыб через жабры и слизистую оболочку ротовой полости, а 10 % этих элементов поступает с кормом. Исключением из этой закономерности является карп, у которого до 92 % ^{90}Sr поступает с кормом и только 8 % из воды. Радиоцезий в основном поступает с кормом.

Поступившие в организм радионуклиды концентрируются в органах и тканях. До 95 % стронция-90 концентрируется в костной ткани (голова, скелет, плавники) и в чешуе. В мышцах и внутренних органах содержание ^{90}Sr на 1–3 порядка ниже, чем в костях. Радиоцезий накапливается преимущественно в мышцах и внутренних органах.

Накопление радионуклидов рыбой разных видов зависит от их биологических особенностей (хищные или мирные рыбы), способа питания, места обитания в водном биоценозе, типа водной системы и концентрации в ней калия, кальция, натрия, магния и радионуклидов, от сезона года, возраста и размера рыб и ряда других факторов.

В теле хищных рыб (окунь, щука, судак) содержание ^{137}Cs в 2–5 раз больше, чем в теле мирных рыб (лещ, плотва, карась). Это связано с особенностями типа питания рыб. Хищные рыбы (ихтиофаги) питаются молодью других рыб. Мирные рыбы (бентофаги) питаются личинками, моллюсками, водорослями. Высокую концентрацию ^{137}Cs в организме обычно имеют те виды рыб, которые обитают в придонном слое водоемов (карась, линь, карп, сом). Минимальное количество ^{137}Cs накапливают виды, обитающие в основном в верхних слоях водной системы (плотва, судак, голавль, лещ).

Имеющиеся литературные данные по уровню накопления ^{90}Sr разными видами рыб весьма разнообразны. Установлено, что придонные виды рыб, как правило, накапливают всегда больше ^{90}Sr в сравнении с верховыми видами, однако различия в накоплении этого радионуклида между ними незначительны. Максимальное накопление ^{90}Sr наблюдается у плотвы и леща при потреблении основных кормов с высоким содержанием данного радионуклида.

Уровень накопления ^{137}Cs и ^{90}Sr организмом рыб зависит от проточности водной системы. Концентрация ^{137}Cs в органах и тканях озёрных рыб выше, чем у речных рыб, в 2,7–30 раз. Тип озера и связанное с ним содержание в воде калия и кальция оказывает прямое влияние на поступление радионуклидов в организм рыб. Максимальное количество радионуклидов накапливается органами и тканями рыб, обитающими в дистрофных

озёрах. Установлена прямая связь между накоплением радионуклидов рыбой и степенью загрязнения водных систем. Как правило, у более крупных и старых рыб в сравнении с молодыми особями содержится больше ^{137}Cs в мышцах и больше ^{90}Sr в костях.

Существуют сезонные колебания в накоплении радионуклидов в организме рыб. Обычно максимум накопления радионуклидов наблюдается зимой и минимум – осенью. Весной и в начале лета накопление радионуклидов выше, чем осенью. Концентрация радионуклидов (особенно ^{137}Cs) в организме рыб повышается перед нерестом и во время него. Такая зависимость объясняется разным режимом и интенсивностью питания по временам года и биологическим циклам рыб.

В водной среде во время нереста рыбы радионуклиды также аккумулируются икрой. Радионуклиды, находящиеся в воде на поверхности взвешенных частичек и в виде коллоидов, сорбируются преимущественно на оболочке икры. Нуклиды, находящиеся в воде в ионной форме, могут проникать во внутреннее содержимое икринок и вызывать их облучение. Это вызывает снижение выхода мальков, появление у них различных морфологических аномалий, изменения в развитии, снижение интенсивности роста и продуктивности.

Из организма всех видов рыб ^{90}Sr выводится значительно медленнее, чем ^{137}Cs . При смене более загрязнённой радионуклидами среды обитания на менее загрязнённую происходит самоочищение организма рыб за счёт выделения радионуклидов в водную среду через поверхностные ткани и систему выделения. Биологический период полувыведения ^{90}Sr составляет около 1000 суток, ^{137}Cs – около 100 суток.

6.3.3 Распределение радионуклидов в организме рыбы, личинок и икры. Выведение радионуклидов из организма рыб

Радионуклиды поступают в организм рыбы, всасываются и разносятся по органам. Около 90 % стронция-90 откладывается в костной ткани, в печени, икре и молоках. Примерно 90 % цезия-137 – в мышечной ткани. Выведение радионуклидов происходит через выделительную систему с мочой и экскрементами, а также через поверхностные ткани кожи и с икрой и молоками при нересте. При миграции рыб из грязных водных систем в более чистые происходит самоочищение за счет усиления выведения через кожу. Период полувыведения цезия 100 суток, стронция более 1000 суток. Выведение радионуклидов с икрой и молоками – естественный процесс самоочищения рыб. Коэффициент перехода цезия и стронция из организма в икру высокий, содержание цезия и стронция одинаково в икре и мышечной ткани. С икрой выводится 20 % калия, 14 % цезия, 2,5 % стронция и 0,001 % кальция.

Во время нереста икра поступает в воду, где могут находиться радионуклиды, которые попадут в икру. Коэффициент перехода радионуклидов возрастает по мере развития икры. **По величине коэффициента перехода в икру радионуклиды можно расположить в убывающий ряд: $^{144}\text{Ce} > ^{106}\text{Ru} > ^{91}\text{Y} > ^{137}\text{Cs} > ^{90}\text{Sr}$.**

Максимальный коэффициент перехода цезия и стронция в икру отмечен в первые часы нахождения икры в радиоактивной воде. Затем коэффициент перехода стабилизируется и не изменяется до конца развития икры.

Радионуклиды, находящиеся в воде на взвешенных частицах и в виде коллоидных соединений, сорбируются на оболочке икры. Частицы и коллоиды не способны проникать через оболочку. Перенос икры в чистую воду способствует ее самоочищению за 1–2 суток. Из икры выклеваются личинки и попадают в воду. В первые дни жизни содержание радионуклидов в организме очень низкое, и $K_{\text{нак}}$ из воды низкий, так как личинка не питается и радионуклиды поступают только через покровные ткани. Через 7 дней $K_{\text{нак}}$ возрастает, что связано с переходом на самостоятельное питание и началом формирования скелета. Личинка переходит в стадию малек и накопление радионуклидов возрастает.

6.3.4 Фиксация и миграция радионуклидов в живой и отмершей растительной массе, донных отложениях и грунтах

В воде с радионуклидами происходят следующие процессы: растворение подвижных форм; сорбция взвешенными частицами; поглощение планктоном, флорой и фауной; включение в миграционную цепь: вода – планктон – мелкая фауна – рыбы – млекопитающие – птицы – человек.

Радионуклиды мигрируют недолго и быстро превращаются в донные отложения, при этом происходит самоочищение воды, которое идет в 10–100 раз интенсивнее, чем почвы. Значительное естественное самоочищение идет только в реках и зависит от скорости течения. При оценке миграции радионуклидов в водных системах учитывают накопление их растительностью, прочность фиксации в живой и отмершей растительности, выделение поглощенных радионуклидов в воду.

Максимальную прочность фиксации имеет ^{55}Fe , ^{60}Co и ^{144}Ce фиксируются слабее и переходят в воду из живых и мертвых тканей на 10–50 %. Минимальная фиксация у Sr^{90} и Cs^{137} . В живых и мертвых тканях цезий-137 закрепляется прочнее стронция-90. Выход стронция-90 составляет 95–99 %, а цезия-137 – 40–60 %. Все радионуклиды прочнее фиксируются в живых тканях, чем в мертвых. Это связано с коэффициентом накопления, то есть, чем он выше, тем прочнее фиксация. Прочность фиксации зависит также от свойств раствора и времени нахождения радионуклидов в воде.

После отмирания основная масса растений опускается на дно и формирует слой донных отложений. Эта масса обладает высокой сорбцией и способствует переходу и закреплению радионуклидов в донных отложениях. Большинство радионуклидов из отмершей массы переходит в воду в подвижной ионной форме и

включается в повторные циклы миграции. Из отмершей массы стронций-90 мигрирует интенсивнее цезия-137, поэтому $K_{пер}$ стронция в 1,5–2 раза выше. Кроме радионуклидов из отмершей массы в воду переходят макро- и микроэлементы, биологически активные вещества, которые оказывают влияние на поведение радионуклидов в воде, снижая при этом их поступление в растительность.

В донные отложения радионуклиды поступают следующими путями: с твердым и жидким стоком с территории водосбора; при оседании взвесей на дно; при переносе взвесей по течению реки; при донном переносе грунта; при отмирании флоры, фауны, низших организмов.

Распределение радионуклидов в водных системах характеризуется *коэффициентом накопления* – отношение содержания радионуклидов в водном объекте к содержанию радионуклидов в воде, а также *коэффициентом распределения* – отношение концентрации радионуклидов в твердой фазе к содержанию радионуклидов в жидкой фазе. Высокий $K_{распр}$ у изотопов плутония, так как он хорошо коагулируется гуминовыми кислотами и их соединениями с кальцием, железом и алюминием, при этом образуются сложные комплексы.

Компоненты органического вещества донных отложений: 1) декальцинат – подвижная часть отложений, содержащая свободные низкомолекулярные кислоты и их соединения с подвижными гидроксидами. Здесь преимущественно фиксируются водорастворимые радионуклиды; 2) фульвокислоты – с ними радионуклиды образуют комплексы анионного типа, хорошо растворимые в воде; 3) гуминовые кислоты – обладают высокой емкостью катионного обмена, поэтому хорошо и прочно соединяются с радионуклидами с образованием легкорастворимых гуматов; 4. остаток.

Стронций и америций более подвижны и интенсивнее мигрируют, чем цезий и плутоний.

Максимальная концентрация радионуклидов в донных отложениях в марте. При замерзании льда возрастает минерализация и снижается растворимость цезия и стронция, которые образуют карбонатные соли, в виде каких они оседают в донных отложениях. В них содержание цезия и стронция может снижаться, так как они легко могут подниматься из донных отложений в верхние слои воды. При таянии снега концентрация цезия и стронция увеличивается. Из донных отложений радионуклиды мигрируют вниз по профилю. Сначала в верхние слои грунта, затем в нижние. Выделяют несколько типов грунта: песчаный; известковый; илистый; кремнеземный; торфяной; смешанный.

Максимальная сорбция радионуклидов в илистом грунте, особенно в сапропели под отложениями харовых водорослей. Высокая сорбция радионуклидов отмечается на торфяных грунтах, а самая низкая – на песчаных.

6.4 Загрязнение радионуклидами грунтовых и глубинных подземных вод

Подземные воды делятся на грунтовые и артезианские. Грунтовые воды расположены непосредственно под поверхностью почвы. Они могут питать ручьи, реки, колодцы. Артезианские воды расположены на глубине 30–50 м. Они практически не содержат техногенных радионуклидов. Из артезианских скважин забирают питьевую воду, в которой может содержаться много естественных радионуклидов.

Фоновое значение удельной активности грунтовых вод по цезию-137 и стронцию-90 до аварии на ЧАЭС составляло тысячные доли Бк/л. После аварии на ЧАЭС максимальное загрязнение грунтовых вод отмечалось в 30-километровой зоне и на территории до 250 км от АЭС. К 1987–1988 гг. удельная активность подземных вод была в 10–100 раз выше, чем до аварии. В 1993 году содержание цезия-137 в подземных водах изменялось пропорционально плотности загрязнения почвы: 1–5 Ку/км² – 1,3 Бк/л; 15–40 Ку/км² – 2,6 Бк/л (при РДУ на воду – 10 Бк/л).

Поступление радионуклидов в воду происходит в основном за счет диффузии, интенсивность которой зависит от следующих факторов:

1. Физико-химические свойства и миграционная способность радионуклидов по вертикальному профилю зоны аэрации. Из свойств радионуклидов наибольшее влияние оказывает заряд иона, атомный или ионный радиус, атомная масса. Радионуклиды с минимальным атомным радиусом и валентностями мигрируют интенсивнее. В воде радионуклиды находятся в ионной и комплексной форме. На зонах аэрации стронций-90 находится преимущественно в водорастворимой или обменной форме, а цезий-137 – в прочносвязанной;

2. Особенности питания водоносных горизонтов. Особенностью питания водоносных горизонтов является их связь с климатическими условиями и с геологией зоны аэрации. При влажных почвах зоны аэрации в грунтовые воды поступает больше радионуклидов. На водоразделах и высоких террасах питание грунтовых вод и поступление в них радионуклидов в течение года происходит за счет просачивания атмосферных осадков через зону аэрации. На низких террасах и в пойме к инфильтрации добавляется поступление радионуклидов с поверхностными водами во время весеннего паводка и летних разливов рек. В грунтовые воды также поступают радионуклиды, которые смываются с площади водосбора. Летом инфильтрация происходит медленно и равномерно, весной интенсивнее, а минимальная – зимой;

3. Соотношение радионуклидов в зоне аэрации и их форма.

Искусственное загрязнение радионуклидами происходит при бурении и эксплуатации водозаборных скважин, при выпадении радиоактивных осадков на приоткрытые колодцы. В грунтовых водах радионуклиды могут находиться во всех формах.

