

## ХИМИЯ ПОЧВ

УДК 577.391:577.41/46

Почвенно-растительный покров — одно из начальных звеньев миграции радионуклидов в сельскохозяйственной сфере после их поступления в окружающую среду. Значимость этого звена определяется, во-первых, тем, что растения как компонент рациона играют важную роль в формировании дозы облучения человека и, во-вторых, ведущей ролью кормовых растений в поступлении радионуклидов в продукцию животноводства. В ряде случаев с миграцией радионуклидов по сельскохозяйственным цепочкам почва — продукция растениеводства и "почва — растения — продукция животноводства и далее в рацион человека связано до 70—90% дозы внутреннего облучения его организма. Существенный вклад в дозовую нагрузку может вносить и внешнее облучение, обусловленное излучениями радионуклидов, содержащихся непосредственно в почве. Абсолютные значения радиационных нагрузок от внешнего и внутреннего облучений по территории суши изменяются в очень широких пределах.

Радиационный мониторинг почвенно-растительного покрова, т. е. постоянный или периодический контроль содержания радионуклидов в почвах и растениях, обеспечивает оценку краткосрочных быстротечных изменений содержания радионуклидов в почвенно-растительном покрове и определение долгосрочных тенденций в общей радиологической ситуации на данной территории на основе прогностических математических моделей. Радиационный мониторинг почвенно-растительного покрова поставляет службе радиационной безопасности информацию, необходимую для расчета доз облучения организма человека и для определения предельно допустимых концентраций радионуклидов в почвах и растениях.

Имеются четыре группы источников ионизирующих излучений, формирующих радиоактивность почвенно-растительного покрова: естественные радионуклиды, глобальные радиоактивные выпадения продуктов ядерных испытаний, ядерный топливный цикл (ЯТЦ), химические удобрения (в первую очередь фосфорные) и мелиоранты, используемые в сельском хозяйстве, а также зольные выбросы электростанций, работающих на каменном угле (Алексахин, 1982). На разных этапах научно-технического прогресса соотношение вкладов этих источников в формирование суммарных дозовых нагрузок на организм человека меняется во времени. На современном этапе доминирующая роль принадлежит естественному радиационному фону, на долю которого приходится свыше 80% дозы облучения. Однако с течением времени будет существенно возрастать значимость других источников поступления радиоактивных веществ в окружающую среду, особенно если рас-

сма́тривать этот процесс не в глобальном, а в локальных масштабах, т. е. с позиций оценки радиационной обстановки на территориях, примыкающих к источникам выбросов радиобактивных веществ. Для прогноза развития этой обстановки необходимо, прежде всего, располагать исходными данными, характеризующими естественный радиационный фон и его распределение по площади контролируемых территорий.

Естественная радиоактивность почвенного покрова обусловлена в основном тяжелыми естественными радионуклидами (ТЕРН) —  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  и их дочерними продуктами распада, а также  $^{40}\text{K}$ . Концентрации важнейших ТЕРН в почвенном покрове нашей страны колеблются примерно в 10-кратных размерах в зависимости от типа почвообразующей породы и характера почвообразовательного процесса. Значительные вариации содержания ТЕРН в почвах наблюдаются даже в пределах сравнительно малых по площади территорий вследствие перераспределения ТЕРН в системе сопряженных ландшафтов, преимущественно в результате выноса из элювиальных ландшафтов и аккумуляции на геохимических барьерах, т. е. в пойменных и других гидроморфных почвах. В целом в почвах зонального ряда прослеживается увеличение концентрации в них ТЕРН с севера на юг — от почв гумидных областей к почвам аридных зон. Широкие вариации концентраций ТЕРН в почвах как в региональном, так и в локальном масштабах выдвигают в качестве актуальной задачи радиационного мониторинга определение фоновых содержаний ТЕРН в почвах (особенно в районах предполагаемого размещения источников выбросов аналогичных ТЕРН техногенных радиоактивных веществ) как исходной точки отсчета при последующем контроле радиационной обстановки вокруг этих источников.

Следующим по значимости источником радиоактивного загрязнения почвенного и растительного покрова в настоящее время являются глобальные выпадения  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  — долгоживущих продуктов ядерных испытаний в атмосфере, проводившихся в северном полушарии до 1963 г. (Павлоцкая, 1970). Максимальные содержания этих радионуклидов в почвенном покрове были достигнуты к 1967 г.; в последующий период процессы радиоактивного распада и выноса  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  из почвенного профиля, а также резкое сокращение притока их из стратосферы привели к снижению их содержания в почвах — на сегодняшний день примерно в 2 раза по сравнению с максимальным. Поэтому глобальное загрязнение почв продуктами ядерных испытаний сейчас можно рассматривать как компонент радиационного фона, значимость которого снижается во времени. При этом необходимо учитывать, что вклад этого компонента в радиационный фон почвенного покрова так же, как и в случае ТЕРН, имеет широтную зависимость: наибольшая интенсивность глобальных выпадений приходится на широты 50—60°. Кроме того, за истекшие два десятилетия произошло существенное перераспределение продуктов глобальных выпадений в системах сопряженных ландшафтов и аккумуляции их в почвах речных пойм, долин и в бесточных понижениях рельефа (Тюрюканова, 1976). Получение необходимой информации о содержании радионуклидов глобальных выпадений в почвенно-растительном покрове и распреде-

лении их в сопряженных ландшафтах в зонах проявления источников техногенных радиоактивных загрязнений составляет важную задачу фоновой радиационной мониторинга.

Все более важное значение как поставщику радионуклидов в окружающую среду придается ядерно-энергетической отрасли народного хозяйства. ЯТЦ создает большое число источников сбросов и выбросов разнообразных техногенных радионуклидов, различающихся не только по физическим, но и по биогеохимическим свойствам. Следует, однако, отметить, что количество радиоактивных отходов, поступающих в окружающую среду от предприятий ЯТЦ, строго регламентируется и подлежит тщательному контролю. Эти отходы представлены рудничными отвалами и шахтными водами в местах добычи, переработки и обогащения урановых руд, радиоактивными выбросами и сбросами АЭС и заводов по переработке отработанного ядерного топлива; некоторые количества отходов могут поступать в окружающую среду из мест их захоронения. К наиболее значимым в радиологическом отношении техногенным радионуклидам относятся продукты деления  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , радионуклиды иода; продукты нейтронной активации (третий,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{65}\text{Zn}$  и другие), тяжелые естественные радионуклиды ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ) и трансурановые элементы. Все они характеризуются большими периодами полураспада, могут накапливаться в корнеобитаемом слое почвы и поступать в продукцию сельского хозяйства.

Основные пути загрязнения почвенно-растительного покрова радионуклидами ЯТЦ — это непосредственное осаждение из атмосферы в аэрозольной или газовой формах или выпадение с атмосферными осадками ( $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ), поступление с поливными ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{65}\text{Zn}$  и др.), паводковыми и шахтными водами ( $^{90}\text{Sr}$ , ТЕРН).

Существенную значимость как источник антропогенного радиоактивного загрязнения почв в обозримом будущем могут приобрести фосфорные удобрения, содержащие повышенные по сравнению с почвами концентрации ТЕРН (Дричко и др., 1976). В связи с постепенным истощением запасов фосфоритов в сферу сельскохозяйственного использования могут вовлекаться месторождения с содержанием ТЕРН в руде на один-два порядка более высоким, чем в почвах. При этом следует учитывать, что ТЕРН в составе удобрений находятся обычно в, более миграционно подвижных формах, чем их соответствующие изотопные аналоги в исходных (неудобренных) почвах. Радиационные последствия использования таких удобрений необходимо научиться предвидеть до того, как содержание ТЕРН в почвах вследствие внесения удобрений существенно возрастет. Помимо фосфорных удобрений, характеризующихся повышенными концентрациями ТЕРН, в сферу сельскохозяйственного использования могут поступать и другие мелиоранты с относительно высокими содержаниями радионуклидов (фосфогипс, отвалы горных пород и т. п.). Существенные количества естественных радионуклидов поступают в составе каменноугольной зоДы в окрестностях тепловых электростанций.

При разработке конкретных программ радиационного мониторинга растительного и почвенного покрова необходим, прежде всего, корректный выбор соответствующих качественных и количественных показателей — вида анализируемых образцов, частоты их отбора во времени и по площади. При этом следует учитывать ряд факторов: физико-химическое состояние и биогеохимические свойства техногенных радионуклидов, способ их перехода в окружающую среду, режим их поступления во времени, специфические особенности почвенного и растительного покрова, специфику ведения сельскохозяйственного производства на контролируемой территории.

Удобным индикатором, отражающим степень загрязнения атмосферы и интенсивность радиоактивных выпадений в течение вегетационного периода, может служить надземная фитомасса однолетних травянистых растений, а многолетние хвойные древесные и кустарниковые растения — на протяжении и зимнего периода. О многолетней динамике поступления долгоживущих радиоактивных веществ на земную поверхность позволяет судить мониторинг почвенного покрова. В зависимости от сочетания факторов радиационный мониторинг может предусматривать отбор и анализ образцов только растений, только почв или тех и других.

В наибольшей степени вопросы радиационного мониторинга разработаны для атмосферных радиоактивных выпадений. Непосредственно в период выпадений наиболее быстрый и интенсивный путь перехода радионуклидов в рацион человека — аэральное загрязнение надземных частей сельскохозяйственных растений. К настоящему времени разработаны количественные модели и оценены параметры аэрального загрязнения растительного покрова наиболее важными в радиологическом отношении нуклидами (Архипов, Февралева, 1978; Тихомиров, 1983). Особое внимание при радиационном мониторинге в этих условиях следует уделять оценке роли метеорологических и геофизических факторов во взаимодействии радиоактивных выпадений с надземной фитомассой. При длительных выбросах в атмосферу сравнительно короткоживущих радионуклидов (с периодом полураспада до 1 года) можно ограничиваться анализом проб надземной фитомассы, так как в этом случае почва как источник загрязнения продукции растениеводства не играет существенной роли, а доминирует переход радионуклидов в растения воздушным путем.

При сравнительно небольшой продолжительности выбросов в атмосферу долгоживущих радионуклидов с большими массовыми числами, таких как  $^{129}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ , которые характеризуются относительно низкими коэффициентами накопления в надземной фитомассе при поступлении через корни, радиационный мониторинг также можно ограничить отбором и анализом проб надземной фитомассы. Длительные выбросы (десятки и более лет), сопровождающиеся аккумуляцией радиоактивных веществ в почве, или внесение их непосредственно в почву, минуя атмосферу, могут потребовать периодического контроля за их содержанием в почвенном покрове. Такие радионуклиды могут в заметных количествах сорбироваться в подземных частях растений и в надземной фитомассе с частицами пыли, осаждаемой на ее

поверхность. Поэтому радиационный мониторинг в этих случаях должен предусматривать контроль содержания радионуклидов в сельскохозяйственных культурах, потребляемые части которых составляют не только надземные органы, но и находящиеся в почве (картофель, корнеплоды). Для ряда долгоживущих радионуклидов ( $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ) с высокими коэффициентами накопления их растениями тем более необходим контроль радиоактивности как почв, так и растений, начиная с момента поступления этих радионуклидов на поверхность почвенно-растительного покрова.

В свете решения экологических вопросов развития ядерной энергетики необходима разработка методических подходов к мониторингу в почвах и растениях этих радионуклидов, особенно методов моделирования. Первостепенной задачей радиационного мониторинга почвенно-растительного покрова в связи с ЯТЦ является установление количественных параметров передвижения радионуклидов в почвах разных типов и накопления в важнейших сельскохозяйственных культурах. Для трансурановых элементов важны количественные показатели их внекорневого поступления в растения. Информация по этим вопросам весьма ограничена. Для получения коэффициентов накопления радионуклидов ЯТЦ в сельскохозяйственных растениях необходимо проведение комплекса вегетационных и микрополевых опытов, как это было сделано в 60-е годы для наиболее важных в радиологическом отношении нуклидов в составе глобальных выпадений —  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  (Гулякин, Юдинцева, 1968).

Самостоятельную задачу радиационного мониторинга составляет изучение миграции в системе почва — растение тяжелых естественных радионуклидов  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  и продуктов их распада в связи с ростом поступления их в окружающую среду на первых этапах ЯТЦ — при добыче уранового сырья и его первичной переработке, а также с повышенным внесением их в почву с фосфорными удобрениями. В этом плане следует более полно оценить концентрации этих радионуклидов в минеральных удобрениях с учетом сырья, из которого они производятся. Настоятельной задачей радиационного мониторинга почв являются поиски корреляций между содержанием форм тяжелых естественных радионуклидов и их поступлением в сельскохозяйственные растения. Важный элемент программы радиационного мониторинга — детальное изучение кларкового содержания этих радионуклидов в основных типах почв и ведущих сельскохозяйственных культурах в различных природных зонах СССР; в этой области продолжает ощущаться недостаток сведений.

Существенная особенность радиационного мониторинга почвенного покрова — необходимость дифференцированного подхода к почвам с учетом их свойств, агроклиматических и почвенно-экологических условий, влияющих на способность почв к закреплению загрязняющих веществ и к самоочищению (Тихомиров, 1985). Известно, что в легких по механическому составу почвах, особенно расположенных на склонах, радионуклиды закрепляются менее прочно, чем в тяжелых; они быстрее вымываются инфильтраци-

онными и поверхностными водами и выносятся за пределы почвенного профиля и ландшафта.

С практической точки зрения информация об интенсивности выноса загрязняющих веществ поверхностными и грунтовыми водами представляет интерес с двух диаметрально противоположных позиций. С одной стороны, интенсивная миграция радиоактивных веществ из легких почв с водными потоками может приводить к повышению концентрации загрязняющих веществ в водоемах. Их интенсивный вынос может нанести ущерб источникам водоснабжения на прилегающих территориях. С другой стороны, более интенсивной водной миграции сопутствует быстрое очищение легких почв от загрязнения. В этой ситуации загрязненные угодья могут быть очищены от радионуклидов в относительно более короткий период. Вследствие медленного очищения тяжелых по механическому составу почв вторичное загрязнение водоемов и резервуаров подземных вод не столь существенно, но такие почвы при высоких уровнях загрязнения могут на длительный период оказаться непригодными для сельскохозяйственного использования. В связи с большими различиями вертикальной и горизонтальной миграции радионуклидов с инфильтрационными и грунтовыми, водами радиационный мониторинг почвенного покрова следует дополнить и мониторингом водного стока — лизиметрических и поверхностных вод в «критических» ландшафтах. К последним относятся почвы среднерусских полесий (Белорусского, Мещерского и др.). Они же характеризуются и более высокими размерами накопления техногенных радионуклидов в урожае сельскохозяйственных культур.

В связи с развитием орошаемого земледелия все большую актуальность в нашей стране приобретает радиационный мониторинг орошаемых угодий. Дело в том, что в условиях орошения интенсивность перехода естественных и искусственных радионуклидов по сельскохозяйственной цепочке существенно возрастает (Буфатин, Парашуков, 1983). Например, при дождевании как наиболее рациональном способе орошения интенсивность перехода многих естественных и искусственных радионуклидов в растения возрастает в 10—100 раз по сравнению с неорошаемыми (богарными) условиями. В наибольшей мере это относится к биологически малоподвижным радионуклидам. Интенсификация переноса радионуклидов в продукцию растениеводства связана с тем, что при дождевании исключается влияние сорбционных свойств почвы, так как радионуклиды поступают в растения непосредственно из воды, минуя почву. Учитывая это, следует признать важным радиационный мониторинг поливных вод, включающий не только определение концентраций в них радиоактивных веществ, но и радионуклидного состава, а также степени минерализации этих вод и их гидрохимического состава. Роль радиационного мониторинга почвенно-растительно-го покрова при орошении становится особенно очевидной, если учесть, что большинство объектов атомной энергетики планируется разместить на территориях с недостаточным увлажнением (Украина, ЦЧО, Заволжье, Северный Кавказ).

Отдельную группу вопросов составляют разработка и оценка эффективности комплекса агротехнических и агрохимических мероприятий, на-

правленных на снижение перехода радионуклидов в сельскохозяйственную продукцию. Ряд таких приемов разработан, и выявлена их высокая эффективность. К ним относятся внесение органических и минеральных удобрений, известкование кислых почв, гипсование и др. Все мероприятия, направленные на повышение уровня плодородия почв, как правило, приводят к снижению перехода радионуклидов из почвы в продукцию растениеводства (Тихомиров, 1985).

Радиационный мониторинг почвенно-растительного покрова, с одной стороны, является важнейшим элементом оценки общей радиоэкологической обстановки на территориях, прилегающих к предприятиям ЯТЦ. С другой стороны, он должен рассматриваться как составная часть общего мониторинга почв и растений, подвергающихся антропогенному воздействию. Комплексное изучение техногенного влияния химического, теплового и иных воздействий наряду с радиационным фактором позволит более объективно и корректно оценить влияние этого фактора на почву и растения.

**F. A. Tikhomirov, R. M. Alexakhin**

#### **SOIL AND VEGETATION RADIOACTIVITY MONITORING**

The main task of monitoring consists in estimation of radioactivity origins efficiency and its temporal changes. Individual approach to the elaborating of monitoring program seems to be necessary taking into account variable properties of soils, those of radioactive substances and the system of land management particularly under conditions of irrigation.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

Алексахин Р.М. Ядерная энергия и биосфера. М., 1982. Архипов Н.П., Февралева Л.Т. Некоторые особенности внекорневого загрязнения сельскохозяйственных растений в разных почвенно-климатических зонах страны. М., 1978. Буфатин О.И. и др. Накопление искусственных радионуклидов рисом//Сельхоз. биол. 1983. № 6. Гулякин И.В., Юдинцева Е.В. Агрохимия радиоактивных изотопов стронция и цезия. М., 1968. Дричко В.Ф. и др. Переход некоторых естественных радиоактивных нуклидов из почвы в растения. М., 1976. Павлоцкая Ф.И. Глобальное распределение радиоактивного стронция по земной поверхности. М., 1970. Тихомиров Ф.А. Радиоэкология иода. М., 1983. Тихомиров Ф.А. Современные проблемы и научно-прикладные задачи радиоэкологии//Биол. науки. 1985. № 1. Тюрюканова Э.Б. Экология стронция-90 в почвах. М., 1976.

\* Поступила в редакцию 31.10.85