

Распределение техногенных и естественных радионуклидов в почве зоны наблюдения Балаковской атомной станции

© 2013. А. Е. Шмелёв, к.т.н, в.н.с., В. В. Мартынов, д.т.н. профессор, С. В. Рязанов, к.т.н., с.н.с., Д. А. Силантьев, инженер, А. Ю. Хубецов, с.н.с., Государственный научно-исследовательский институт промышленной экологии, e-mail: info@sar-ecoinst.org

В статье проводится анализ данных многолетних наблюдений за содержанием радионуклидов в почве в районе расположения Балаковской АЭС. Обосновано применение радиационных параметров, характеризующих закономерности распределения радионуклидов в почвах, для мониторинга состояния наземных экосистем в районе расположения АЭС.

The article analyzes the data of long-term observations in the area of Balakovo. The application of radiation parameters that characterize the patterns of distribution of radionuclides in soil, monitoring of terrestrial ecosystems in the area of nuclear power plants was grounded.

Ключевые слова: экологический мониторинг, радиационные параметры, оценка распределения радионуклидов

Keywords: environmental monitoring, radiation parameters, assessment of the distribution of radionuclides

Материалы многолетних работ по мониторингу состояния наземных экосистем в районе расположения Балаковской атомной станции (АЭС), выполненные ФБУ «ГосНИИ-ЭНП», позволили установить, что их состояние, в целом являясь стабильным, продолжает испытывать повышенную нагрузку. Однако если процесс формирования состояния биотических компонентов длится достаточно долго, следствием чего являются, например, суховершинность значительной части деревьев, слабо выраженный ярус подроста, устоявшийся видовой состав фитоценозов, и его изменения проявляются незначительно, то изменения состояния почвы выглядят более явно, прежде всего, по вариациям содержания в ней различных загрязняющих веществ. Однако связывать эти вариации только с действием антропогенных факторов можно лишь при условии получения данных об изменении содержания в почве как веществ, поступление которых связано с хозяйственной деятельностью, так и веществ, связанных с естественными природными процессами. Наилучшим образом это можно сделать, изучая состояние почвы в местах предположительно повышенного содержания загрязняющих веществ, где могут формироваться области её локального загрязнения. В районе расположения Балаковской АЭС такими оказались места, в которых

отобранные пробы почвы показали среднюю степень загрязнённости при биоиндикационной оценке по всхожести семян кресс-салата и умеренную степень токсичности при их тестировании на инфузориях туфельках, что может быть связано с повышенным (по сравнению с остальной частью зоны наблюдения за АЭС) содержанием естественных (ЕРН) и техногенных (ТРН) радионуклидов.

Исследования проб на содержание ЕРН и ТРН были проведены на спектрометрическом комплексе МКС-01А «Мультирад», имеющем в своём составе α -радиометрический и сцинтилляционный β - γ -спектрометрические измерительные тракты.

Пробоподготовка и изготовление счётных образцов выполнялись в соответствии с рекомендациями, приведёнными в технической документации на комплекс. Перед циклом измерений для каждого радионуклида определялась его минимально измеряемая активность (МИА).

Выполненные на первом этапе измерения на γ -спектрометрическом тракте позволили достаточно надёжно установить, что содержание ^{137}Cs в пробах почвы находится на уровне 2 Бк/кг, а ЕРН – на уровне их фоновых значений. На основании данных измерений удельных активностей ($A_{\text{уд}}$) ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th в соот-

МОНИТОРИНГ АНТРОПОГЕННО НАРУШЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

ветствии с НРБ-99/2009 была рассчитана величина их удельной эффективной активности ($A_{эф}$) [1].

На втором этапе исследований измерялись суммарные α - и β -активности радионуклидов. Измерения проводились на α -радиометрическом и β -спектрометрическом измерительном трактах спектрометрического комплекса.

Отобранная для измерений суммарной активности усреднённая навеска пробы измельчалась до 0,1 мм. При анализе каждой пробы проводилось не менее трёх параллельных измерений. Пробы были разделены на 4 наиболее характерные для почв в исследуемых местах группы [2]: I – чернозём обыкновенный, II – чернозём с солонцами, III – чернозём выщелоченный остаточно-луговой, IV – чернозём южный. Кроме этого разделение проводилось по месту отбора проб – лево- или правобережный районы Саратовского водохранилища.

На основании проведённых измерений была выполнена оценка средних уровней удельной активности изотопа ^{137}Cs и ЕРН, величины $A_{эф}$, а также показателей суммарной α - и β -активности радионуклидов в выделенных группах почв. Удельные активности других изотопов, выброс которых нормируется

для реакторов типа ВВЭР, не превышали МИА спектрометрического комплекса.

По данным спектрометрических и радиометрических измерений были определены средние значения радиационных параметров почвы, приведённые в таблице 1. Наибольшие значения $A_{уд}^{137}\text{Cs}$ и ЕРН наблюдаются во II группе почв – чернозём с солонцами. Среднее значение $A_{уд}^{137}\text{Cs}$ в почве правобережного района зоны наблюдения почти в 2 раза превышает аналогичное значение в почве левобережного района.

Сравнительный анализ массива данных по показателю частоты наблюдения образцов почв данной группы в заданном диапазоне $A_{уд}$ показывает, что полученные данные аналогичны показателям средней $A_{уд}$ почв равнинной зоны Европейской части РФ: совпадение для ^{40}K и ^{232}Th и отличия для ^{226}Ra и ^{137}Cs . Превышение $A_{уд}^{137}\text{Cs}$ в пробах из правобережного района можно объяснить наличием следов Чернобыльских выпадений, зафиксированных здесь ещё в конце 80-х годов XX века.

Пониженные значения $A_{уд}^{226}\text{Ra}$ можно объяснить особенностью методики измерения на сцинтилляционном детекторе (по дочерним продуктам распада ^{214}Pb и ^{214}Bi). С це-

Таблица 1

Среднестатистические значения радиационных параметров почвы
в зоне наблюдения Балаковской АЭС

| Тип почвы | Проба | Удельная активность, Бк/кг | | | | Суммарная активность, Бк/кг | | $A_{эф}$, Бк/кг |
|---------------------|-------|----------------------------|-----------------|-------------------|-------------------|-----------------------------|---------------|------------------|
| | | ^{137}Cs | ^{40}K | ^{226}Ra | ^{232}Th | α -изл. | β -изл. | |
| Левобережный район | | | | | | | | |
| II | 1 | 3,00 | 484,00 | 17,45 | 35,90 | 126,4 | 717,5 | 110,68 |
| | 2 | 7,10 | 487,00 | 14,40 | 39,60 | 128,0 | 800,0 | 116,81 |
| | 3 | МИА | 376,00 | 16,10 | 28,18 | 101,7 | 583,0 | 84,01 |
| | 4 | МИА | 396,00 | 16,50 | 31,50 | 120,0 | 595,0 | 93,10 |
| | 5 | МИА | 451,00 | 13,80 | 27,80 | 124,0 | 615,0 | 90,54 |
| III | 1 | 3,20 | 401,00 | 13,40 | 27,40 | 86,4 | 660,0 | 88,31 |
| | 2 | 7,50 | 362,00 | 13,30 | 28,40 | 96,4 | 555,0 | 90,30 |
| | 3 | 3,30 | 407,00 | 14,40 | 26,40 | 112,0 | 580,0 | 88,65 |
| IV | 1 | 11,20 | 376,00 | 13,90 | 25,80 | 100,0 | 665,0 | 92,48 |
| | 2 | 5,80 | 374,00 | 13,20 | 27,10 | 120,0 | 633,0 | 87,89 |
| | 3 | 10,60 | 392,00 | 14,00 | 28,40 | 132,0 | 640,0 | 96,80 |
| Правобережный район | | | | | | | | |
| I | 1 | 19,75 | 150,00 | 10,20 | 9,10 | 80,0 | 218,0 | 108,64 |
| | 2 | 5,45 | 404,00 | 12,90 | 24,30 | 120,0 | 595,0 | 86,30 |
| | 3 | 14,70 | 333,00 | 13,50 | 26,10 | 112,0 | 592,0 | 92,10 |
| | 4 | 11,60 | 313,00 | 16,40 | 25,90 | 120,0 | 570,0 | 89,84 |
| II | 1 | 22,10 | 410,00 | 14,30 | 26,50 | 137,6 | 700,0 | 107,75 |
| | 2 | 7,00 | 440,00 | 16,90 | 31,40 | 120,0 | 643,0 | 104,32 |
| | 3 | 5,90 | 321,00 | 14,80 | 23,50 | 161,3 | 550,0 | 80,14 |

Таблица 2

Параметры распределения радионуклидов в почвах в зоне наблюдения Балаковской АЭС

| Тип почвы | Показатели распределения | | |
|-----------|-----------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| | $\Sigma\beta/^{40}\text{K}$ | $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ | $\Sigma\alpha / \Sigma\beta$ |
| I | 0,98 | 3,38 | 0,17 |
| II | 0,97 | 3,30 | 0,19 |
| III | 0,97 | 3,50 | 0,16 |
| IV | 1,0 | 3,50 | 0,19 |
| Среднее | 0,98 | 3,4 | 0,18 |

люю их уточнения были использованы рекомендации работы [3] по учёту эффекта эманирования грунтов и почв при измерениях.

На третьем этапе исследований по данным измерений были рассчитаны радиационные параметры, характеризующие закономерности распределения радионуклидов в почвах: средние значения соотношения $\Sigma\beta$ -активности радионуклидов и удельной активности в пробе изотопа ^{40}K ($\Sigma\beta/^{40}\text{K}$), соотношения массовых концентраций ($^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$), а также величины отношения $\Sigma\alpha$ -активности к измеренной β -активности радионуклидов в пробах ($\Sigma\alpha/\Sigma\beta$). Результаты расчётов приведены в таблице 2. Величина соотношения ($\Sigma\beta/^{40}\text{K}$) для всех типов почв приближается к 1. Это свидетельствует о том, что суммарная β -активность радионуклидов в пробах определяется в основном содержанием в них радионуклида ^{40}K . Средняя величина отношения ($^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$), равная для всех групп почв 3,4, приближается к кларковому соотношению этих радионуклидов в земной коре и характерна для лесостепной зоны с почвами чернозёмного ряда [4]. Показатель ($\Sigma\alpha/\Sigma\beta$) для всех групп почв не превышает 0,2, что характерно для почв равнинной зоны Европейской части РФ [5, 6].

Таким образом, по результатам выполненных исследований можно сделать вывод, что повышенное радиационное воздействие на наземные экосистемы в районе расположения Балаковской АЭС отсутствует. Токсичность проб при их биотестировании можно объяснить влиянием на тест-объекты не радиоактивных, а присутствующих в пробах химических загрязнителей.

Материалы выполненных исследований позволяют также сделать вывод, что, если состояние экосистемы является нормальным, целесообразно наблюдать за происходящими в ней процессами. Это позволит получить исходные данные для решения задачи прогнозирования изменений состояния в виде количественных оценок изменений значения какого-либо интегрального показателя (зависимая переменная y) под действием основ-

ных влияющих на него факторов (в большинстве случаев независимые переменные x_1, x_2, \dots, x_m). Тогда в предположении, что между переменными y и x_1, x_2, \dots, x_m теоретически существует линейная зависимость, её уравнение можно представить в виде выражения, которое называется регрессионным уравнением и имеет вид [7]:

$$y_i = a_1x_{i1} + a_2x_{i2} + \dots + a_mx_{im} + e_i, \quad (1)$$

где a_1, a_2, \dots, a_m – оценки неизвестных параметров $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m, e_i$ – случайная переменная, имеющая нулевое математическое ожидание, постоянную дисперсию s^2 и характеризующая отклонение переменной y_i от теоретической линии.

Прогноз с помощью уравнения множественной регрессии получается подстановкой в него значений независимых переменных. Результат представляет собой оценку среднего значения зависимой переменной при данных уровнях факторов-аргументов и будет лучше поддаваться содержательной интерпретации, чем, например, простая экстраполяция тенденции.

Проиллюстрируем изложенный подход на примере данных о величинах удельной эффективной активности ($A_{эф}$) ЕРН (зависимая переменная y) и показателями их суммарной α - и β -активности во II группе почв (независимые переменные x_1 и x_2), где было зафиксировано наибольшее значение $A_{уд}^{137}\text{Cs}$ и ЕРН. Возможность прогнозирования $A_{эф}$ оценим по результатам проверки гипотезы о линейности её взаимосвязи с переменными x_1 и x_2 [8] с помощью коэффициента множественной корреляции, который вычисляется по уравнению:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum e_i^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (2)$$

где \bar{y} – среднее значение зависимой переменной y . Смысл этого коэффициента заключается в том, что чем больше его величина, тем, следовательно, сильнее данные при-

мыкают к линии регрессии. Если линия регрессии полностью описывает зависимую переменную y , то $|R| = 1$, т. е. между ней и независимыми переменными существует 100%-ая линейная связь; в противном случае $|R| < 1$. Тогда если $|R| = 0 \dots 0,3$, то линейная связь между переменными отсутствует, если $|R| = 0,3 \dots 0,5$ – связь является слабой, если $|R| = 0,5 \dots 0,7$ – связь существует, $|R| > 0,7$ – связь является сильной.

Если гипотеза о линейности связи подтвердится, то это будет означать, что суммарная α - и β -активность почвы связана только с присутствующими в ней ЕРН.

Пусть вектор оценок неизвестных параметров $a = (a_j), j = 1, 2, \dots, m$, вектор зависимой переменной $Y = (y_i), i = 1, 2, \dots, n$, матрица независимых переменных $X = (x_{ij})$, размер которой определяется числом наблюдений (n) и числом переменных (m), включая свободный член α_0 , вектор ошибок $\varepsilon = (\varepsilon_i)$. Ранг матрицы X равен m , а это в свою очередь означает, что $|X'X| \neq 0$, т. е. матрица $X'X$ обратима (матрица X' является транспонированной матрицей X). Тогда

$$Y = aX + \varepsilon. \quad (3)$$

Преобразование (3) позволяет получить систему нормальных уравнений, которая в матричной форме записывается как

$$X'Y = X'Xa, \quad (4)$$

Откуда

$$a = (X'X)^{-1} X'Y, \quad (5)$$

где $(X'X)^{-1}$ – матрица, обратная $X'X$. Оценка a , найденная по (5), называется оценкой метода наименьших квадратов.

Таким образом, для определения вектора параметров a необходимо по экспериментальным данным найти матрицу, обратную к матрице $X'X$, и вектор $X'Y$.

По результатам выполнения перечисленных процедур применительно к данным об $A_{\text{эф}}$, $\Sigma\alpha$ - и $\Sigma\beta$ - для почв II группы из таблицы 1 было получено уравнение:

$$A_{\text{эф}, i} = 2,802 - 0,025 \times \Sigma\alpha_i + 0,152 \times \Sigma\beta_i, \quad (6)$$

и соответствующее ему значение коэффициента множественной корреляции $R = 0,952$. Это означает, что радиационное состояние почвы определяется не антропогенным воздействием Балаковской АС, а естественными природными процессами и позволяет использовать прогнозирование с помощью уравнения (6) для определения области, в которой находится «истинное» среднее значение $A_{\text{эф}}$, создавая тем самым условия для более эффективного использования существующей радиоизмерительной аппаратуры (сцинтилляционных спектрометров) с точки зрения повышения достоверности радиационного мониторинга как в количественном (проведение измерений), так и в качественном (интерпретация их результатов) аспектах.

Литература

1. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). М.: Минздрав России, 2009.
2. Эколого-ресурсный атлас Саратовской области / Сост. Макаров В.З. Пичугина Н.В. Пролёткин И.В. Саратов: Комитет охраны окружающей среды и природных ресурсов Саратовской области. Роскартография, 1996. С. 13–14 с.
3. Микляев П.С. Петрова Т.Б. Учёт эманации грунтов и почв при измерениях радия-226 на сцинтилляционных гамма-спектрометрах // АНРИ. 2006. № 3. С. 45–50.
4. Смыслов А.А. Уран и торий в земной коре. Л.: Недра, 1974. С. 28–35.
5. Болтнева Л.И. Региональные закономерности в распределении естественных радиоактивных элементов на территории Советского Союза. Фоновая радиоактивность почв и горных пород на территории СССР // Труды института прикладной геофизики. Вып. 43. М. 1980. С. 23–36.
6. Руководство по методам контроля за радиоактивностью окружающей среды / Под ред. И.А. Соболева, Е.Н. Беляева. М.: Медицина, 2002. 43 с.
7. Четыркин Е.М. Статистические методы прогнозирования. М.: Статистика, 1975. 184 с.
8. Шатохин А.М., Красоткин В.А. Распределение цезия-137 и ЕРН по типам донных отложений в акватории Московского региона // АНРИ. 2007. № 2. С. 44–48.