

## ИССЛЕДОВАНИЕ МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ В 30-КИЛОМЕТРОВОЙ ЗОНЕ ЧАЭС

М. Д. Бондарьков<sup>1</sup>, С. П. Гошак<sup>1</sup>, М. В. Желтоножская<sup>2</sup>,  
А. И. Липская<sup>2</sup>, Л. В. Садовников<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Международная радиэкологическая лаборатория  
Международного Чернобыльского центра, Славутич*  
<sup>2</sup> *Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

Проведено исследование миграции радионуклидов чернобыльского происхождения в почвенных разрезах оз. Глубокое в 5-километровой зоне ЧАЭС. Пробы отбирались в 2002 г. послойно вдоль четырех траншей. После соответствующей обработки исследовалось их  $\gamma$ - и  $\beta$ -излучение. Хорошо идентифицированы изотопы  $^{134,137}\text{Cs}$ ,  $^{154,155}\text{Eu}$  и  $^{241}\text{Am}$ . По результатам исследований  $\beta$ -спектров тонких слоев измерена активность  $^{90}\text{Sr}$ . Изотопы  $^{238+239}\text{Pu}$  определялись по методике неразрушающего контроля. Прослежена миграция изотопов  $^{134,137}\text{Cs}$ ,  $^{154,155}\text{Eu}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{241}\text{Am}$  и изотопов  $^{238+239}\text{Pu}$  до глубины 30 см. Полученные данные анализируются.

## Введение

В результате аварии на 4-м энергоблоке ЧАЭС произошло диспергирование и выброс в атмосферу части ядерного топлива и продуктов его взаимодействия с материалами активной зоны реактора. Это привело к тому, что на поверхности почвы и в донных отложениях прилегающих водоемов сформировались радиоактивные выпадения с широким диапазоном как химического и радионуклидного состава, так и размеров – от долей до десятков микрометров.

Начиная с 1986 г., проводилось большое количество исследований этих радиоактивных выпадений и были опубликованы данные, свидетельствующие о прочном удержании в составе топливных частиц изотопов плутония. Рядом авторов отмечалось, что степень выщелачивания таких радионуклидов составляет десятые и сотые доли процента и не имеет тенденции к росту во времени [1 - 3].

Однако, как уже отмечалось в предыдущих наших исследованиях [4], в районе ПВЗРО “Рыжий лес” было надежно обнаружено присутствие изотопов плутония на глубине около 15 - 20 см, что может быть однозначно интерпретировано как результат деструкции “горячих” частиц. В связи с частичной деструкцией “горячих” частиц, происходящей как в результате их собственной высокой удельной активности, так и под влиянием факторов внешней среды, что приводит к высвобождению содержащихся в них радионуклидов, возникла необходимость создания количественной схемы миграции и уточнения ее математической модели. Создание такой модели требует наличия экспериментальных данных. Для этого нами были проведены исследования радиэкологической обстановки в районе оз. Глубокое в ближней 5-километровой зоне ЧАЭС.

Ее целью является характеристика радиационной обстановки почвенного, растительного покрова и особенностей мезорельефа с построением картографических схем большого масштаба. Как известно, в районе заплавного оз. Глубокое прошел северный след радиационных выбросов, и сегодня этот водоем является одним из самых «загрязненных» в районе ЧАЭС. Рядом находятся участки соснового леса, погибшего в результате радиационного облучения, т.е. такого же, как и «Рыжий лес» в центральной части зоны отчуждения. Кроме того, вдоль берега расположена полоса самых высоких в регионе уровней радиационного фона, связанного с так называемым береговым радиационным эффектом. Однако детальной информации о радиэкологической обстановке вблизи оз. Глубокое до сих пор не было. Отметим также, что профиль береговой линии оз. Глубокое менялся несколько раз. Вначале он

был естественный и зависел от паводка (в апреле 1986 г. он был высокий), затем построили дамбу вдоль р. Припять и паводки перестали влиять на озеро, но уровень воды в озере был относительно высоким, так как туда просачивались воды из Краснянского старика, уровень которого искусственно поддерживался высоким с помощью насосов. Затем в 2002 г. перестали качать воду, дренажные каналы прочистили и спустили воду со всех водоемов польдерной системы. В результате уровень воды в оз. Глубокое снизился почти на 0,5 м.

### Методика и результаты измерений

В 2002 г. были начаты первые рекогносцировочные работы, направленные на оценку общей радиационной обстановки полигона. Были проложены четыре траншеи. Первая пролегает вдоль берега озера и складывается из трех линий по 38 точек, с расстоянием между ними от 5 до 13 м. Вторая траншея (33 точки), расположена севернее в 25 - 90 м и сориентирована с северо-востока на юго-запад. Третья (26 точек) и четвертая (42 точки) расположены еще севернее, за дамбой польдера, на участке погибшего соснового леса. Всего разметили 215 точек.

В каждой точке были выполнены измерения мощности дозы гамма-излучения на высоте 0,1 и 1,0 м над землей. С целью более детального описания особенностей берегового радиационного эффекта, измерения на первой траншее были проведены таким образом: перпендикулярно береговой линии, начиная от уровня воды, была проведена линия, вдоль которой через каждый метр на протяжении первых 10 м, а дальше через 3 м были заложены дополнительные точки. В каждой точке были заложены измерения по той же схеме. В целом было выполнено 1272 измерения. Результаты измерения мощности доз представлены на рис. 1 и 2.

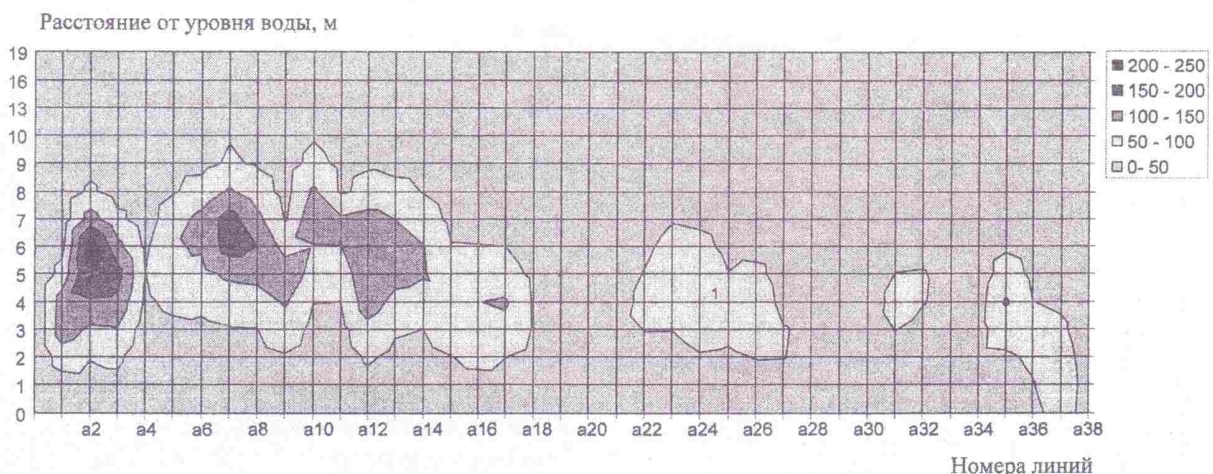


Рис. 1. Мощность дозы гамма-излучения на высоте 1 м над землей вдоль северо-западного берега оз. Глубокое, мкГр/ч.

По результатам исследования самые большие радиационные уровни присутствуют только на первой траншее, причем только в отдельных местах на расстоянии от 4 до 7 м от уровня воды (см. рис. 1 и 2). Тут мощность дозы составляет 150 - 230 мкГр/ч, а на поверхности до 350 - 470 мкГр/ч. На остальной территории мощность дозы, как правило, не превышает 50 мкГр/ч.

После проведения этих анализов было принято решение о схеме проведения отбора образцов почвы таким образом, чтобы изучить, как распределяются радионуклиды вдоль почвенного профиля в местах береговых радиационных эффектов. Всего отобрано 205 кернов: 96 на глубину 0 - 10 см и 109 на глубину 0 - 30 см (последние в лабораторных условиях разделили на слои 0 - 2, 2 - 4, 4 - 7, 7 - 10, 10 - 15, 15 - 20, 20 - 25 и 25 - 30 см). Общее количество проб составляет 969 шт.

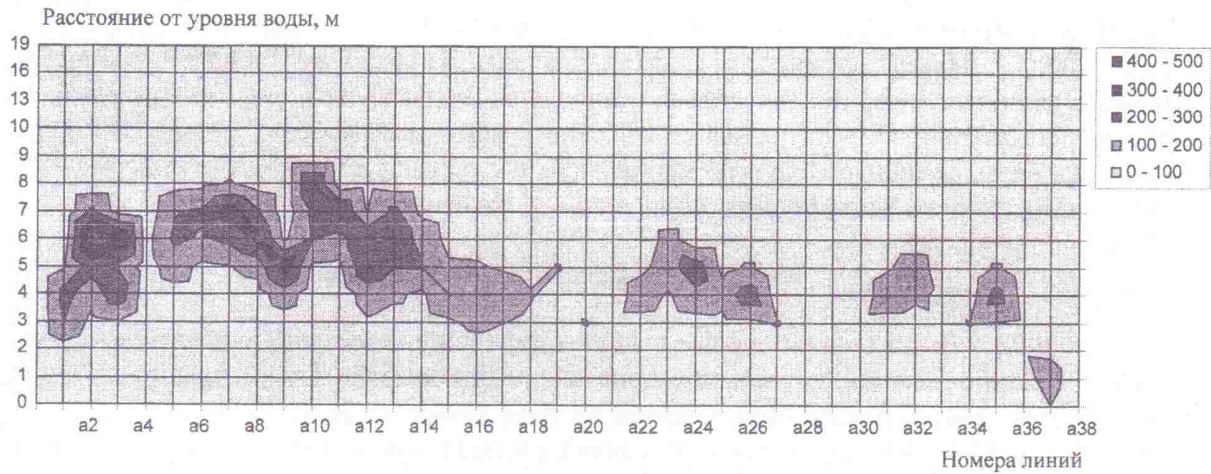


Рис. 2. Мощность дозы гамма-излучения на высоте 0,1 м над землей вдоль северо-западного берега оз. Глубокое, мкР/ч.

В отобранных пробах грунта спектрометрическим методом были определены активности радионуклидов  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{154,155}\text{Eu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  и суммарная активность изотопов  $^{238-240}\text{Pu}$ . В измерениях использовались нерадиохимические методики. Активность  $^{90}\text{Sr}$  определялась на  $\beta$ -спектрометре, на котором в “толстых” мишенях измерялись  $\beta$ -спектры, и затем, используя калибровочный “толстый” источник, определялась активность  $^{90}\text{Sr}$  [5].

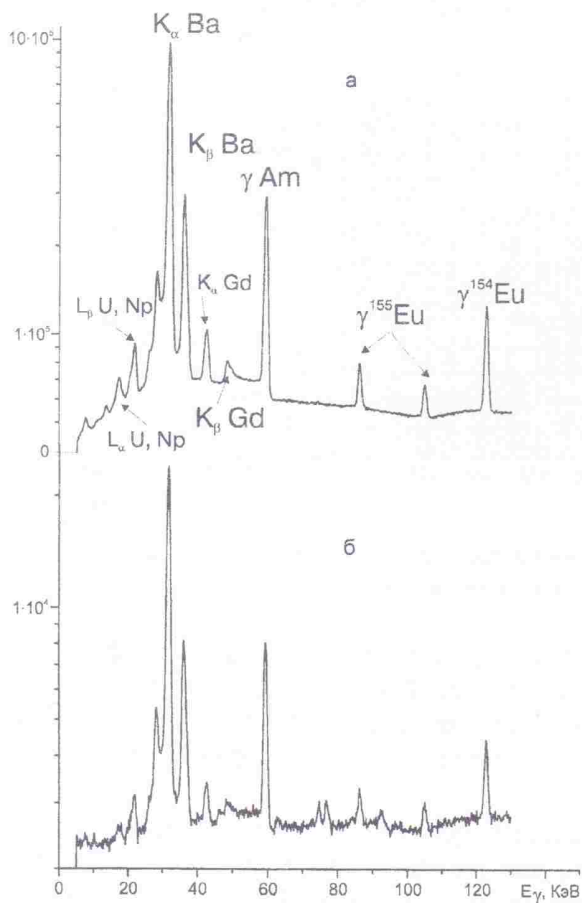


Рис. 3. Фрагменты  $\gamma$ -спектров: а – верхний слой; б – восьмой нижний слой.

Гамма-радионуклиды измерялись на Ge-спектрометре с эффективностью регистрации 40 % по сравнению с NaI(Tl)-детектором размерами 3 × 3” и энергетическим разрешением 1,8 кэВ на  $\gamma$ -линии  $^{60}\text{Co}$ . Измерения проводились также на антикомptonовском спектрометре с Ge-детектором, имеющем тонкое входное бериллиевое окно и энергетическое разрешение 1,9 кэВ на  $\gamma$ -линиях  $^{60}\text{Co}$  и 350 эВ на  $\gamma$  59 кэВ  $^{241}\text{Am}$ . Эффективность спектрометра составляет 30 % по сравнению с NaI(Tl)-детектором размерами 3 × 3”. Подавление комptonовского фона в низкоэнергетической области было не меньше, чем в восемь раз. Это позволило нам надежно выделить активность  $^{241}\text{Am}$  даже в самых глубоких слоях (рис. 3).

Активность изотопов  $^{238-240}\text{Pu}$  определялась по методике, основанной на исследовании характеристического излучения, сопровождающего процесс внутренней конверсии гамма-лучей изотопов урана. Этот процесс, в основном, происходит на L-подоболочках, поэтому исследовалось  $L_x$ -излучения урана и нептуния, обусловленное  $\alpha$ -распадом изотопов плутония и америция [6].

Для исключения возможных систематических ошибок и для сравнения относительного поведения изучаемых радионуклидов с  $^{137}\text{Cs}$  основная часть исследований проводилась в низкоэнергетической области. Нами изучались

выходы  $K_x$ -излучения бария (распад  $^{137}\text{Cs}$ ), гадолиния (распад изотопов европия),  $L_x$  урана и нептуния, а также выходы  $\gamma$ -квантов с энергиями 59 кэВ ( $^{241}\text{Am}$ ), 86 и 105 кэВ (распад  $^{155}\text{Eu}$ ) и  $\gamma$  123 кэВ (распад  $^{154}\text{Eu}$ ). Близость по энергии (см. рис. 3) позволила нам практически исключить методические погрешности. Они составили не более 2 %.

Полученные данные указывают на то, что в настоящее время 90 % активности находится на глубине 5 - 10 см. На рис. 4 приведены данные о распределении Чернобыльских радионуклидов в вертикальных почвенных разрезах оз. Глубокое.

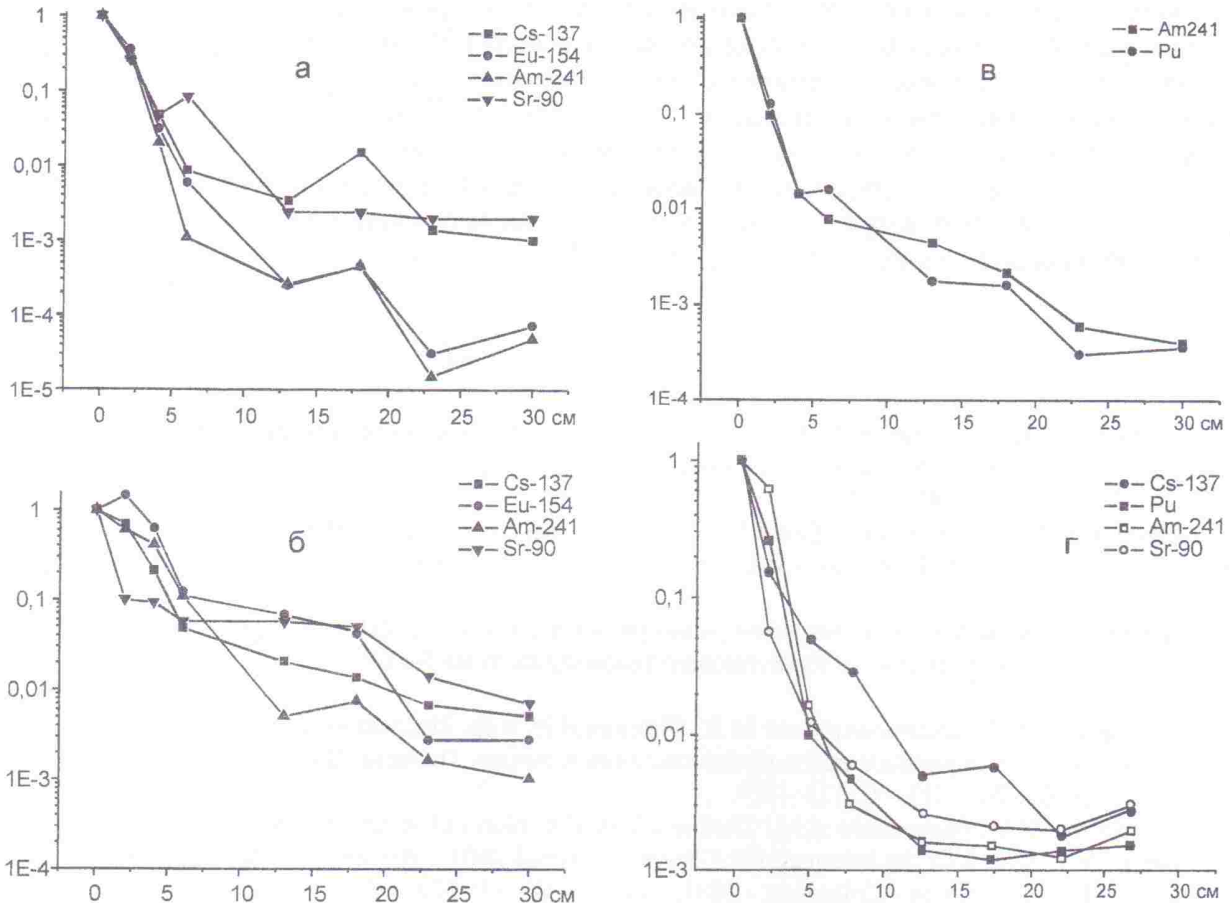


Рис. 4. Относительное распределение концентрации радионуклидов до глубины 30 см:  
а - в - оз. Глубокое; г - "Рыжий лес".

Как и в наших предыдущих исследованиях, отмечаем, что изменение интенсивности распространения  $^{241}\text{Am}$  наблюдается до глубины 30 см. Однако в данных измерениях нами надежно идентифицированы и изотопы плутония до этой глубины. Распределение концентрации изотопов плутония и америция с изменением глубины противоречит утверждению многих авторов о большей подвижности и растворимости америция по сравнению с плутонием [7]. Данные по всем разрезам в пределах погрешности измерений показывают полное подобие поведения плутония и америция (см. рис. 4, в). Кроме того, можно отметить, что вертикальная миграция изотопов европия также слабо отличается от миграции  $^{241}\text{Am}$ , что подтверждает происхождение этих радионуклидов из "горячих" частиц.

Наблюдается некоторое расхождение поведения радионуклидов в районе оз. Глубокое и в "Рыжем лесу" [4]. Нами обнаружены участки, где отмечено значительное увеличение скорости миграции  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  по сравнению с  $^{154}\text{Eu}$  и  $^{241}\text{Am}$  (см. рис. 4, а). В то же время имеются разрезы, где поведение всех изотопов, как и в "Рыжем лесу", подобно. Отметим также, что столь сложное поведение, вероятно, обусловлено техногенными процессами, про-

изошедшими в районе оз. Глубокое в 1986 - 2002 гг. (см. введение). Однако можно отметить и некоторое подобие с данными из (см. рис. 4, з) [4]. В ряде разрезов, по своей структуре и составу близких к почвам "Рыжего леса", отмечается полное подобие в поведении  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{238-240}\text{Pu}$  и, в то же время, наблюдается значительное увеличение скорости миграции  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  (см. рис. 4, а).

В целом можно отметить значительное увеличение скорости миграции всех радионуклидов (в том числе и  $^{241}\text{Am}$ , и  $^{238-240}\text{Pu}$ ) по сравнению с результатами из [4]. Из-за недостатка экспериментальных данных сложно однозначно сделать вывод, связано ли это с временным фактором или со значительными изменениями уровня воды. Однозначно можно с уверенностью утверждать, что в исследованных районах 30-километровой зоны ЧАЭС идет интенсивное растворение «горячих» частиц и перемещение трансурановых нуклидов по глубине. Можно также отметить, что около 50 % активности  $^{241}\text{Am}$  и  $^{238-240}\text{Pu}$  находится на глубине 5 - 10 см, т.е. в области активного биологического взаимодействия.

Это указывает на актуальность таких исследований не только в 30-километровой зоне, но и в регионах, где обнаружены значительные активности трансурановых изотопов или где ранее наблюдались значительные активности  $^{144}\text{Ce}$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Askband S., Melin J., Sandalls J. et al. Mobility of radionuclides in undisturbed and cultivated soils in Ukraine, Belarus and Russia six years after the Chernobyl fallout // J. Environ. Radioactivity. - 1996. - Vol. 31, No. 3. - P. 287 - 312.
2. Kashparov V.A., Lundin S.M., Zvarych S.I. et al. Nuclear fallout and territory contamination of radionuclide consisting of fuel particles // Bulletin of ecological state of ChZO. - Dec. 2002. - No. 2 (20). - P. 22 - 32.
3. Исследование, анализ и расчеты миграции радионуклидов в гидрогеологической среде промплощадки объекта "Укрытие" и прилегающей территории, тема 5-332129: (Отчет о НИР) / НИКИМТ. - Обнинск, 1994.
4. Бондарьков М.Д., Желтоножская М.В., Липская А.И. и др. Исследование вертикальной миграции радионуклидов чернобыльского происхождения в почвах Полесья: Зб. наук праць Ін-ту ядерних досл. - 2003. - № 3(11). - С. 111 - 117.
5. Bondarkov M.D., Maximenko A.M., Zheltonozhsky V.A. Non radiochemical technique for  $^{90}\text{Sr}$  measurement: Proc. Vol. 2 of the International Congress "Ecorad 2001", Aix-en-Provence (France), 3 - 7 Sept. 2001 // Radioprotection - Colloques. - 2001. - Vol. 37, C1. - P. 927 - 931.
6. Bondarkov M.D., Zheltonozhsky V.A., Maximenko A.M. et al. Plutonium isotopes content in Chornobyl samples based on Uranium characteristic  $L_x$ -radiation // Proc. from the International conference on radioactivity in the environment. 1 - 5 Sept 2002 in Monaco // CD collections of the poster reports.
7. Трансурановые элементы в окружающей среде / Под ред. У.С. Хэнсона. - М.: Энергоатомиздат, 1985.

#### ДОСЛІДЖЕННЯ МІГРАЦІЇ РАДІОНУКЛІДІВ У 30-КІЛОМЕТРОВІЙ ЗОНІ ЧАЕС

М. Д. Бондарков, С. П. Гощак, М. В. Желтоножська,  
А. І. Липська, Л. В. Садовников

Проведено дослідження міграції радіонуклідів чорнобильського походження в ґрунтових розрізах оз. Глибоке в 5-кілометровій зоні ЧАЕС. Проби відбиралися в 2002 р. шарами вздовж чотирьох траншей. Після відповідної обробки досліджувалось їх  $\gamma$ - та  $\beta$ -випромінювання. Добре ідентифіковано ізотопи  $^{134,137}\text{Cs}$ ,  $^{154,155}\text{Eu}$  та  $^{241}\text{Am}$ . За результатами дослідження  $\beta$ -спектрів виміряно активність  $^{90}\text{Sr}$ . Ізотопи  $^{238+239}\text{Pu}$  визначалися за методикою неруйнівного контролю. Простежено міграцію ізоотопів  $^{134,137}\text{Cs}$ ,  $^{154,155}\text{Eu}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{241}\text{Am}$  та ізоотопів  $^{238+239}\text{Pu}$  до глибини 30 см. Отримані дані аналізуються.

**RESEARCH OF RADIONUCLIDE MIGRATION INSIDE 30-KILOMETERS  
CHORNOBYL EXCLUSION ZONE****M. D. Bondarkov, S. P. Goshchak, M. V. Zheltonozhskaya,  
A. I. Lipskaya, L. V. Sadovnikov**

The investigation of migration of Chernobyl origin radionuclides was carried out in soil profiles of the Glubukoe lake within 5 km ChNPP zone. The soil samples were taken along four experimental trenches in 2002.  $\gamma$ - and  $\beta$ -emanations of these samples were investigated after the corresponding processing.  $^{134,137}\text{Cs}$ ,  $^{154,155}\text{Eu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  isotopes were identified very well.  $^{90}\text{Sr}$  isotopes were identified as a result of research of the thin layers  $\beta$ -spectra.  $^{238+239}\text{Pu}$  isotopes were determined using nondestructive control methods. The migration of  $^{134,137}\text{Cs}$ ,  $^{154,155}\text{Eu}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{241}\text{Am}$  and the  $^{238+239}\text{Pu}$  isotopes was observed to the depth of 30 cm. The obtained data is analyzing.

Поступила в редакцию 06.05.05,  
после доработки – 07.11.05.