

РАДИОАКТИВНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ  
ВОДОЕМА-ОХЛАДИТЕЛЯ ЧАЭС.  
I. ВОДНО-ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ  
И РАДИОАКТИВНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОРОВЫХ ВОД

© 2011 Л. С. Пирнач

*Украинский гидрометеорологический институт, Киев*

Представлены первые результаты комплексного исследования донного грунта водоема-охладителя ЧАЭС. Рассмотрена общая проблематика вопроса. Получена информация о вертикальном распределении вдоль грунтового профиля водно-физических свойств донных отложений, а также ионного состава и радиоактивного загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  поровых вод. Рассчитан запас активности, находящийся в поровых растворах донного грунта. Обнаружены сильные корреляционные связи в пределах отобранных колонок грунта между содержанием в поровой воде  $^{137}\text{Cs}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ . Результаты исследования предназначены для прогноза изменения радиоэкологической ситуации в водно-грунтовой системе водоема-охладителя при его осушении.

*Ключевые слова:* водоем-охладитель ЧАЭС, донные отложения, радиоактивное загрязнение.

### Введение

Вывод из эксплуатации ЧАЭС в декабре 2000 г. предопределил необходимость решения задач, связанных с осушением станционного водоема-охладителя (далее – ВО ЧАЭС). Одной из таких задач является прогноз развития радиоэкологической ситуации в водной системе, которая останется на месте современной акватории ВО ЧАЭС. Решению этой задачи было посвящено комплексное исследование, выполненное в 2002 - 2003 гг. специалистами Украинского научно-исследовательского гидрометеорологического института (УкрНИГМИ) в рамках проекта INTAS-2001-0556 [1]. Предметом изучения были донные отложения участков ВО ЧАЭС, которые останутся покрытыми водой после прекращения искусственного поддержания нынешнего уровня воды.

Работа состояла из следующих этапов:

1. Анализ водно-физических свойств донных отложений.
2. Исследование распределения по грунтовому профилю содержания некоторых ионов, а также  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в поровых растворах донных отложений.
3. Исследование вертикального распределения  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{241}\text{Am}$  в твердой фазе донных отложений и эффективных коэффициентов межфазного распределения.
4. Экспериментальное исследование форм нахождения радионуклидов и определение эффективных коэффициентов селективности обмена радионуклидов на катионы-аналоги.

В настоящей статье представлена первая часть результатов этого исследования.

### Возможные сценарии развития радиоэкологической ситуации в остаточной водной системе

ВО ЧАЭС – уникальный объект как по своим гидрологическим, так и радиоэкологическим характеристикам. Он является одним из наибольших в Европе искусственных водоемов. Его площадь составляет около 22 км<sup>2</sup>, средняя глубина – около 6 м, а максимальная – 20 м. Общий объем воды (максимально) – 160 млн м<sup>3</sup>. Зеркало (поверхность воды) водоема на 7 м выше питающей его р. Припять. На территории, залитой водой, ранее находились мелкие озера, а также заброшенный песчаный карьер и старое русло р. Припять.

По данным исследователей [2], в настоящее время суммарная биомасса ВО ЧАЭС исчисляется десятками и сотнями тысяч тонн.

ВО – один из наиболее загрязненных радионуклидами замкнутых водоемов в зоне ЧАЭС. В период активной фазы аварии на станции поступление продуктов деления происходило вследствие выпадения их на водную поверхность, а также сброса в водоем высокоактивной воды из системы аварийного охлаждения реактора и воды, использованной при тушении пожара на станции. Предполагается, что дополнительное поступление  $^{137}\text{Cs}$  с реакторными водами явилось причиной сложившейся редкой для водоемов зоны отчуждения ситуации, когда содержание  $^{137}\text{Cs}$  в воде часто превышало содержание  $^{90}\text{Sr}$  [3, 4].

За годы после аварии под воздействием гидродинамических факторов произошло переформирование грунтового комплекса ВО ЧАЭС. Значительная часть загрязненных частиц илистой фракции стянулась со всей площади дна в наиболее глубокие зоны, образовав мощные

толщи высокоактивного ила [5].

По данным исследований [1], общий запас радионуклидов в ВО ЧАЭС – более 300 ТБк (из них приблизительно 85 % –  $^{137}\text{Cs}$  и 10 % –  $^{90}\text{Sr}$ ), причем около половины активности содержится в донных отложениях глубже 10 м. В период после аварии среднегодовая концентрация  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в поверхностных водах ВО ЧАЭС постоянно снижалась [4] и за последние годы приблизилась к допустимому уровню содержания в питьевой воде (по 2 Бк/л для каждого радионуклида), предусмотренному государственными гигиеническими нормативами [6]. По данным авторов [7], среднее за 2009 г. содержание  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в воде ВО ЧАЭС составляло 1,7 и 0,86 Бк/л соответственно. Таким образом, на сегодня чистая вода образует мощный защитный слой, покрывающий высокоактивные донные отложения.

Авторы [8] сделали вывод, что до настоящего времени в донных отложениях водоема основная масса радионуклидов содержится в матрице топливных частиц. Последние не претерпели значительных изменений с момента аварии на ЧАЭС из-за нейтральных условий окружающей среды (рН 7,3 - 8,5 [9]) в отличие от кислых почв, где растворение топливных частиц происходило интенсивно. Топливные частицы оказались «законсервированными» в донных отложениях ВО.

После прекращения подачи воды в ВО ЧАЭС береговой насосной станцией начнется процесс его осушения. Оно будет обусловлено совместным влиянием потерь на фильтрацию в направлении р. Припять и испарением с водной поверхности пруда. В результате снижения уровня воды ВО более 70 % его существующей площади будет освобождено от воды. На месте современной акватории ВО ЧАЭС останется водная система, состоящая из около двух десятков озер разной площади. Большая часть существующих радиоактивнозагрязненных донных отложений останется открытой водой в остаточных водоемах.

В предыдущем исследовательском проекте [8], посвященном проблемам, связанным с выводением из эксплуатации ВО ЧАЭС, оценивались, главным образом, риски вторичного загрязнения путем атмосферного переноса с осушенных участков дна водоема и переноса  $^{90}\text{Sr}$  поверхностными и подземными водами. Согласно результатам упрощенной прогнозной оценки, приведенным в работе [8], концентрация  $^{90}\text{Sr}$  в воде замкнутых водоемов, образующихся на месте ВО ЧАЭС, не должна превысить 60 Бк/л.

Одной из причин необходимости более внимательного изучения развития ситуации в остаточной водной системе является вероятность постепенного усиления роли зоогенной горизон-

тальной миграции радионуклидов. Такое усиление может стать заметным при выполнении ряда условий, среди которых существенное локальное повышение плотности популяции животных и (или) коэффициента накопления [10]. Помимо этого роль зоогенной миграции может возрасти вследствие увеличения плотности радиоактивнозагрязнения, а также повышения уровня мобильности и биодоступности радионуклидов. Приведенные ниже рассуждения свидетельствуют в пользу того, что некоторые из перечисленных условий могут быть соблюдены в случае осушения ВО ЧАЭС.

1. Моделирование гидрогеологического баланса осушаемого ВО ЧАЭС показало, что существенная часть образовавшегося ландшафта будет характеризоваться избыточным увлажнением без постоянного слоя воды на поверхности [8], т. е. создадутся условия для заболачивания. Водно-болотные системы – место интенсивного продуцирования биомассы, значительная часть которой является кормовой базой для гнездящихся и перелетных птиц. Пойма р. Припять является крупнейшим в Европе миграционным путем перелетных птиц, прежде всего водно-болотной группы.

2. Увеличение уровня радиоактивного загрязнения и биодоступности радионуклидов в остаточной водной системе может происходить по ряду причин. Среди них:

прекращение разбавления чистой водой р. Припять;

трансседиментационное стягивание высокоактивного тонкодисперсного материала с образовавшихся мелководий;

смыв дождями и при снеготаянии радионуклидов, перешедших в растворенное состояние из состава топливных частиц, которые окажутся в «агрессивных» условиях среды на осушенной территории;

разложение избыточной биомассы, сопровождающееся бактериальным синтезом аммония и увеличением доли радионуклидов в подвижных формах;

понижение рН при заболачивании с последующим уменьшением интенсивности адсорбции радионуклидов [11];

понижение рН и изменение среды в сторону окислительной при усилении аэрируемости донного грунта, сопровождающееся улучшением условий для растворения урановой матрицы топливных частиц [12];

частичный выход высокоактивных поровых растворов в основную массу вод.

Часть перечисленных условий связана с усилением влияния на водно-грунтовой комплекс

внешних, прежде всего ветро-волновых, воздействий в результате снижения уровня воды. В настоящее время глубоководные впадины рельефа ВО ЧАЭС, аккумуляторы высокоактивного ила, отличаются от остальной площади дна по своим водно-физическим свойствам и характеризуются ярко выраженным застойным режимом. Вода, заполняющая эти участки, практически полностью исключена из водного обмена [13]. Осушение выведет водно-грунтовую систему из существующего состояния равновесия, вызвав существенные изменения целого набора характеристик, влияющих на мобильность, биологическую доступность содержащихся в ней радионуклидов и их перераспределение в компонентах водных и наземных экологических систем. Как один из возможных вариантов развития событий можно рассмотреть ситуацию на оз. Глубокое, расположенном в 10 км от ЧАЭС. Чрезвычайно высокий уровень загрязнения воды озера и очень низкую интенсивность процессов самоочищения [3, 14] в нем считают результатом полного перемешивания водно-грунтового комплекса и заболачивания.

Таким образом, для решения задач, связанных с прогнозом радиэкологической ситуации, требовалось тщательное комплексное исследование стартовых параметров водно-грунтовой системы, которые претерпят изменения в процессе осушения водоема.

### Полевые и лабораторные исследования

Три колонки донных отложений с неразрушенной структурой были отобраны в октябре 2002 г. с помощью специальных пробоотборников АД-3 (НВФ «Экотехника», Россия) и Mackereth mini-corer (Duncan @ Associates Jeeves Bank, Великобритания). Метод отбора описан в работе [5]. Станции отбора расположены в глубоководных впадинах рельефа ВО ЧАЭС (рис. 1). Здесь же были взяты пробы воды.

Поровые растворы извлекали из образцов донных отложений методом сепарирования на высокоскоростной центрифуге. Жидкую фазу освобождали от взвешенных почвенных частиц фильтрованием на вакуум-насосной установке через мембранный фильтр 0,45 мкм. Образцы твердой фазы просушивали в сушильных шкафах и гомогенизировали стандартными методами. Водно-физические свойства определяли по методике [15]. Изучали гранулометрический состав верхних слоев отобранных колонок [16]. Количественный анализ основных катионов в растворах проводили методом пламенной фотометрии. Определение нитрат иона и аммиачного азота проводили фотометрическим методом с использованием салициловой кислоты и реактива Несслера

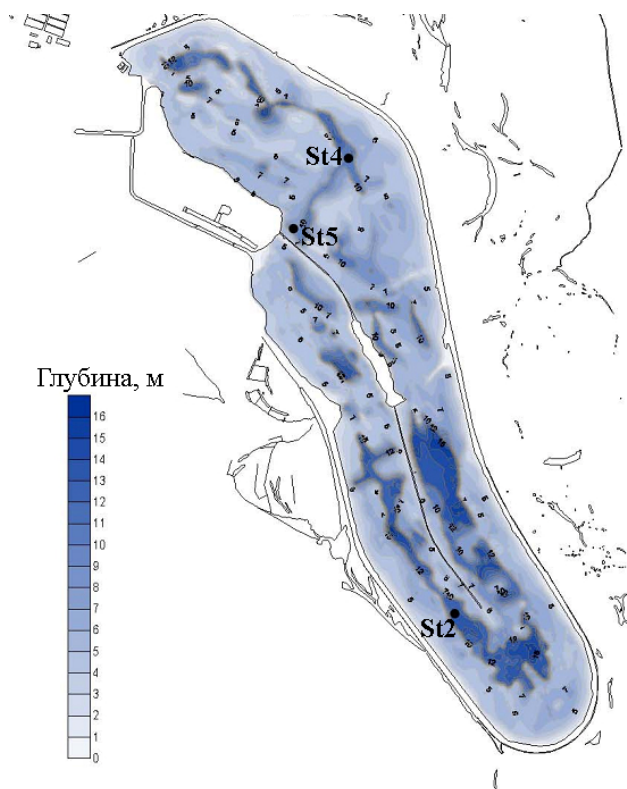


Рис. 1. Отображение рельефа дна ВО ЧАЭС в формате MapInfo. St2, St4, St5 – станции отбора проб.

соответственно. Для определения  $^{137}\text{Cs}$  использовали гамма-спектрометрический комплекс на основе HPGe (High-Purity Germanium) детектора GWL-100210 (Coaxial Well Photon Detector System). Содержание  $^{90}\text{Sr}$  определяли по методике [17] с измерением препарата дочернего  $^{90}\text{Y}$  бета-радиометром РУБ-01П.

### Результаты исследований и их обсуждение

#### Типы донных грунтов, их состав и свойства

Гранулометрический анализ верхнего слоя донных отложений показал, что наибольшим содержанием физической глины (около 18 %), самой активной в физико-химическом отношении составляющей грунта, характеризуется колонка станции St2.

Распределение по вертикальному профилю потерь массы пробы в результате прокаливания, параметра, характеризующего содержание органического вещества, показало существенные вариации между колонками. Потери от прокалывания проб станций St2 и St5 составляют около 20 % и распределены по колонке относительно равномерно. Для станции St4 этот параметр линейно уменьшается с глубиной от 15 до 3 %.

Анализ характеристик донных отложений позволил провести их классификацию (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики донных отложений

| Станция отбора | Глубина залегания грунта, м | Визуальное описание                                    | Классификация по свойствам  |  |
|----------------|-----------------------------|--|---|--|
|                |                             |  | Сумма фракций <0,01 мм и потери от прокаливания, % [18]                 | Плотность [19]                                   |
| St2            | 13,5                        | Ил без примесей и включений                            | Верхний слой: песчанистый ил подгруппы неорганических вторичных грунтов | Ил рыхлой структуры, на St4 глубже 20 см - песок |
| St4            | 12                          | Ил до 11 см, ниже русловой песок, сильно заиленный     |   |  |
| St5            | 12                          | Ил однородный липкий, ниже вязкий с черными пластинами |   |  |

Результаты исследований водно-физических свойств (табл. 2) указывают на то, что верхние слои отобранных колонок близки к суспензиям.

Так, на наличие свежееотложенного неуплотненного ила указывают очень низкие значения объема веса (плотности) влажного грунта ( $\Delta$ ).

Таблица 2. Вертикальное распределение водно-физических свойств донных отложений, а также концентраций ионов и активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в поровых растворах\*

| Станция отбора  | Глубина залегания, см                                   | W, % | $\Delta$ , г/см <sup>3</sup> | Поровый раствор    |                 |      |      |       |      |                        |                       |                                     |                                    |
|---|---|------|------------------------------|--------------------|-----------------|------|------|-------|------|------------------------|-----------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
|   |   |      |                              | Концентрация, мг/л |                 |      |      |       |      | Активность             |                       |                                     |                                    |
|   |   |      |                              | NH <sub>4</sub>    | NO <sub>3</sub> | Na   | K    | Ca    | Mg   | <sup>137</sup> Cs Бк/л | <sup>90</sup> Sr Бк/л | <sup>137</sup> Cs Бк/м <sup>2</sup> | <sup>90</sup> Sr Бк/м <sup>2</sup> |
| St2   | Вода с глубины 6,5 м                                    |      |                              | 0,47               | 0,24            | 12,2 | 4,5  | 30,6  | 4,9  | 2,2                    | 1,2                   |                                     |                                    |
|   | Придонная вода (2,5 см)                                 |      |                              | 2,46               | 0,30            | 18,3 | 6,4  | 46,9  | 8,1  |                        |                       |                                     |                                    |
|   | 0 – 2,5   | 959  | 0,86                         | 4,10               | 0,12            | 18,3 | 7,7  | 41,0  | 6,9  | 16,6                   | 7,8                   | 312                                 | 147                                |
|   | 2,5 – 5,0   | 698  | 1,03                         | 3,63               | 0,30            | 15,2 | 6,4  | 37,7  | 6,8  | 46,6                   |                       | 1023                                |                                    |
|   | 5,0 – 7,5   | 608  | 1,05                         | 5,26               | 0,09            | 17,5 | 6,4  | 45,0  | 7,2  | 45,4                   |                       | 1004                                |                                    |
|   | 7,5 – 10,0  | 553  | 1,05                         | 3,98               | 0,12            | 16,8 | 5,2  | 28,4  | 4,6  | 44,4                   |                       | 968                                 |                                    |
|   | 10,0 – 12,5   | 476  | 1,07                         | 4,38               | 0,12            | 12,2 | 4,5  | 19,2  | 3,8  | 43,7                   | 7,3                   | 950                                 | 159                                |
|   | 12,5 – 15,0   | 489  | 1,10                         | 4,62               | 0,24            | 19,1 | 4,7  | 23,8  | 6,9  | 48,9                   |                       | 1115                                |                                    |
|   | 15,0 – 20,0   | 475  | 1,06                         | 5,55               | 0,24            |      |      |       |      | 20,6                   |                       | 896                                 |                                    |
|   | 20,0 – 25,0   | 399  | 1,08                         |                    |                 |      |      |       |      | 7,6                    | 8,6                   | 324                                 | 367                                |
|   | 25,0 – 27,5   | 291  | 1,13                         |                    |                 |      |      |       |      |                        |                       |                                     |                                    |
| Запас активности в поровой воде при мощности слоя 25 см |   |      |                              |                    |                 |      |      |       |      |                        | <b>6592</b>           | <b>1716</b>                         |                                    |
| St4   | Вода с глубины 5 м                                      |      |                              | 0,44               | 0,24            | 19,0 | 5,2  | 49,6  | 8,5  |                        |                       |                                     |                                    |
|   | Придонная вода (2,5 см)                                 |      |                              | 2,34               | 0,3             | 19,0 | 6,4  | 54,2  | 6,0  |                        |                       |                                     |                                    |
|   | 0 – 2,5   | 519  | 1,04                         | 0,88               | 0,24            | 17,5 | 5,2  | 50,2  | 6,2  | 2,9                    | 2,4                   | 63                                  | 52                                 |
|   | 2,5 – 5,0   | 405  | 1,10                         | 1,23               | 0,24            | 26,6 | 10   | 140,2 | 6,5  | 2,7                    |                       | 59                                  |                                    |
|   | 5,0 – 7,5   | 323  | 1,18                         | 1,34               | 0,12            | 19,8 | 7,7  | 52,2  | 6,3  | 10,4                   |                       | 235                                 |                                    |
|   | 7,5 – 10,0  | 219  | 1,20                         | 2,04               | 0,48            | 18,3 | 6,4  | 56,2  | 9,3  | 8,1                    | 6,6                   | 167                                 | 136                                |
|   | 10,0 – 15,0   | 180  | 1,14                         | 2,81               | 0,42            | 20,6 | 8,4  | 56,8  | 9,0  | 14,2                   |                       | 518                                 |                                    |
|   | 15,0 – 20,0   | 151  | 1,23                         | 4,68               | 0,30            | 20,6 | 7,7  | 50,9  | 8,8  | 27,9                   | 9,9                   | 1036                                | 368                                |
|   | 20,0 – 21,2   | 32   | 2,03                         |                    |                 |      |      |       |      |                        |                       |                                     |                                    |
|   | Запас активности в поровой воде при мощности слоя 20 см |      |                              |                    |                 |      |      |       |      |                        |                       | <b>2079</b>                         | <b>1062</b>                        |
| St5   | 0 – 6,5   | 505  | 1,11                         | 2,28               | 0,36            | 16   | 3,8  | 50,2  | 8,5  | 12,3                   | 1,7                   | 743                                 | 103                                |
|   | 6,5 – 11,5  | 434  | 1,12                         | 3,63               | 0,48            | 18,3 | 6,4  | 58,2  | 9,2  | 14,1                   |                       | 642                                 |                                    |
|   | 11,5 – 16,5   | 416  | 1,15                         | 5,85               | 0,36            | 27,7 | 9,7  | 65,5  | 10,9 | 29,9                   |                       | 1382                                |                                    |
|   | 16,5 – 21,5   | 404  | 1,13                         | 8,77               | 0,36            | 26,7 | 10,0 | 64,8  | 10,7 | 42,7                   |                       | 1942                                |                                    |
|   | 21,5 – 26,5   | 375  | 1,10                         | 12,90              | 0,24            | 27,4 | 12,0 | 63,5  | 10,3 | 53,0                   |                       | 2295                                |                                    |
|   | 26,5 – 31,5   | 349  | 1,16                         | 14,00              | 0,48            | 46,5 | 17,0 | 64,5  | 9,7  | 74,0                   | 9,8                   | 3344                                | 443                                |
|   | 31,5 – 36,5   | 374  | 1,10                         |                    |                 |      |      |       |      |                        |                       |                                     |                                    |
|   | 36,5 – 41,5   | 323  | 1,16                         |                    |                 |      |      |       |      |                        |                       |                                     |                                    |
|   | 41,5 – 46,5   | 327  | 1,13                         |                    |                 | 38,3 | 22,0 | 67,8  | 23,4 | 398,6                  | 58,4                  | 17245                               | 2527                               |
|   | 46,5 – 51,5   | 373  | 1,15                         |                    |                 |      |      |       |      |                        |                       |                                     |                                    |

| Станция отбора  | Глубина залегания, см | W, % | $\Delta$ , г/см <sup>3</sup> | Поровый раствор    |  |      |      |            |      |                   |               |              |      |
|---|-----------------------|------|------------------------------|--------------------|--|------|------|------------|------|-------------------|---------------|--------------|------|
|   |                       |      |                              | Концентрация, мг/л |  |      |      | Активность |      |                   |               |              |      |
|   |                       |      |                              |                    |  |      |      | Бк/л       |      | Бк/м <sup>2</sup> |               |              |      |
| St5   | 51,5 – 56,5           | 370  | 1,14                         |                    |  |      |      |            |      |                   |               |              |      |
|   | 56,5 – 61,5           | 380  | 1,12                         |                    |  | 36,6 | 30,0 | 39,6       | 18,8 | 654,3             |               | 29029        |      |
|   | 61,5 – 66,5           | 442  | 1,15                         |                    |  |      |      |            |      |                   |               |              |      |
|   | 66,5 – 71,5           | 416  | 1,07                         |                    |  |      |      |            |      |                   |               |              |      |
|   | 71,5 – 76,5           | 378  | 1,14                         |                    |  |      |      |            |      |                   |               |              |      |
|   | 76,5 – 81,5           | 323  | 1,10                         |                    |  | 35,0 | 34,0 | 38,6       | 18,6 | 991,0             |               | 41568        |      |
|   | 81,5 – 86,5           | 309  | 1,12                         |                    |  | 43,2 | 36,0 | 57,3       | 21,4 | 1117,0            | 116,0         | 47374        | 4907 |
|   | 86,5 – 91,5           | 308  | 1,16                         |                    |  | 38,3 | 32,0 | 42,7       | 19,6 | 632,0             |               | 27753        |      |
|   | 91,5 – 96,5           | 321  | 1,09                         |                    |  | 28,3 | 26,0 | 37,5       | 18,4 | 206,9             | 12,0          | 8630         | 501  |
|   | 96,5 – 97,5           | 312  | 1,47                         |                    |  |      |      |            |      |                   |               |              |      |
| Запас активности в поровой воде при мощности слоя 96,5 см |                       |      |                              |                    |  |      |      |            |      |                   | <b>350248</b> | <b>40729</b> |      |

\* При расчете значений, выделенных в таблице курсивом, недостающие данные были получены методом интерполяции имеющихся результатов анализа проб.

Значения естественной влажности W (около 200 - 600 %) колонок станций St2, St5 и верхних слоев колонки станции St4 характерны для тонкого глинистого ила с повышенной гигроскопичностью [19]. Аномально низкая плотность и высокая естественная влажность верхних слоев колонки станции St2 может быть результатом сочетания ее местоположения и погодных условий, предшествующих отбору проб (продолжительного штормового периода при сильном северном ветре).

В каждой из колонок наблюдается уменьшение W по мере увеличения глубины залегания слоя, характерный результат гравитационного уплотнения, старения коллоидов и синерезиса. Для станций St2, St4 это уменьшение происходит достаточно резко (в 4 и 16 раз соответственно). Для станции St5 влажность уменьшается не столь интенсивно (в 1,6 раза).

Высокая влажность и низкая плотность донных отложений указывают на большой запас содержащейся в них воды, а также способность частиц грунта легко переходить во взвешенное состояние (взмучиваться). При этом высвобождается часть активной поровой воды и увеличивается насыщение системы кислородом.

С другой стороны, увеличение площади контакта жидкой и твердой фаз при взмучивании должно повлиять на коэффициент распределения радионуклидов  $K_d$ . Так, по данным авторов [20], увеличение соотношения “твердая фаза : раствор” от 1:10 до 1:150 вызывает рост значения  $K_d$  в 8 - 14 раз в зависимости от типа почвы.

#### Химический состав поровых растворов

Гидрохимический состав воды в ВО определяется в основном питающей его р. Припять, от-

личающейся малой минерализацией, умеренной жесткостью, высоким содержанием органического вещества и железа. По соотношению ионов вода водоема относится к гидрокарбонатно-кальциевой 2-го типа [21, 22].

Особенностью илистых отложений водоемов является высокое содержание в их поровых растворах многих химических элементов, которые принимают активное участие во всех физико-химических процессах, происходящих в донном грунте (коагуляция, набухание, химические реакции и пр.). В частности, ионы оказывают большое влияние на адсорбционное поведение радионуклидов. Например, достаточное количество кальция, химического аналога и основного конкурента стронция за сорбционные центры, препятствует адсорбции стронция и увеличивает его миграционную способность. То же можно сказать о паре “калий (или аммоний) и цезий”.

С другой стороны, те же катионы могут влиять на сорбционные свойства глины.  $Ca^{2+}$  способен расширять межслойное пространство глины, а ионы  $K^+$  и  $NH_4^+$  могут “сплющивать” его, что либо облегчает, как в первом случае, либо затрудняет, как во втором, продвижение  $^{137}Cs$  в область высокоселективных центров сорбции [11, 23].

Катионный состав воды оказывает также немаловажное влияние на способность гидробионтов аккумулировать радионуклиды. Так, высокое отношение суммы  $Ca^{2+}$  и  $Mg^{2+}$  к сумме  $Na^+$  и  $K^+$  определяет более интенсивное накопление рыбой  $^{137}Cs$  по сравнению со  $^{90}Sr$  [3]. А рост содержания в воде  $K^+$  приводит к снижению накопления рыбой  $^{137}Cs$  [24].

Результаты исследования (см. табл. 2) показали следующее.

Концентрация ионов в поровых растворах верхних слоев колонок иногда была ниже, чем в придонном слое. Это может быть связано с тем, что верхние слои исследуемых иловых осадков обладают очень низкой плотностью. Уплотнение этой структуры по мере поступления новых порций материала может приводить к “выдавливанию” поровых растворов, т.е. к прямому влиянию на химизм придонной воды [21].

Химический состав поровых вод донных отложений, отобранных на разных станциях, существенно отличался. Например, наименьшее насыщение почвенного обменного комплекса кальцием обнаружено для образцов станции St2. Среднее по колонке значение концентраций иона почти вдвое меньше, чем для станций St4 и St5. Поскольку присутствие кальция способствует коагуляции почвенных частиц [19, 25], это тоже может быть одной из причин аномально низкой плотности донных отложений станции St2.

Максимальное содержание  $\text{Na}^+$  было отмечено на станции St5, оно в 1,5 - 1,9 раза больше, чем в колонках двух других станций. Такое распределение катиона может объяснить наблюдаемое различие между интенсивностью уменьшения с глубиной естественной влажности иловых колонок станций St2 и St5. Насыщенные  $\text{Na}^+$  диспергированные глинистые грунты содержат много связанной воды [19], что может препятствовать гравитационному уплотнению.

Поровые растворы колонок станций St2 и St5, где потери от прокалывания выше, содержат больше аммонийного азота, что связано с деструкцией и минерализацией азотсодержащего органического вещества бактериями аммонификаторами. Во всех колонках наблюдалось относительно плавное увеличение концентрации  $\text{NH}_4^+$  сверху вниз по исследованной части профиля. Это может

быть связано с изменением по глубине реакции среды в сторону восстановительной из-за дефицита кислорода, что препятствует бактериальному окислению аммония до нитритов и нитратов.

Характерное плавное увеличение концентрации  $\text{K}^+$  с пиком на глубине 84 см и затем ее резкое уменьшение наблюдается по вертикальному профилю донных отложений на станции St5. Только в этой колонке до глубины 30 см содержание  $\text{K}^+$  линейно коррелирует ( $R^2 = 0,90$ ) с концентрацией  $\text{NH}_4^+$ .

#### $^{137}\text{Cs}$ и $^{90}\text{Sr}$ в поровых растворах донных отложений

Анализ полученных результатов (см. табл. 2) показал, что радиоактивное загрязнение поровых растворов может на два-три порядка превышать загрязнения основной массы вод. При этом объемная активность  $^{137}\text{Cs}$  всегда больше  $^{90}\text{Sr}$ . Наибольшее отношение концентраций этих радионуклидов (около 10) обнаружено на станции St5, где сумма концентраций  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  и  $\text{NH}_4^+$  в среднем примерно вдвое выше, чем на других станциях.

На станции St5 распределение объемной активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  сверху вниз по вертикальному грунтовому профилю в основном повторяет распределение концентрации  $\text{K}^+$ . В случае пары “калий –  $^{137}\text{Cs}$ ” линейная корреляция ( $R^2 = 0,80$ ) наблюдается до слоя 96,5 см.

Сильные линейные корреляционные связи в пределах исследованной части колонок найдены между концентрациями в поровой воде  $\text{NH}_4^+$  и  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  на станции St5, а также  $\text{NH}_4^+$  и  $^{137}\text{Cs}$  на станции St4 (рис. 2). Полагая, что между содержанием этих элементов существует зависимость, можно сказать, что увеличение содержания  $\text{NH}_4^+$  в 10 раз приведет к росту активности  $^{137}\text{Cs}$  примерно в 48 раз на станции St5 и в 60 раз на станции St4.

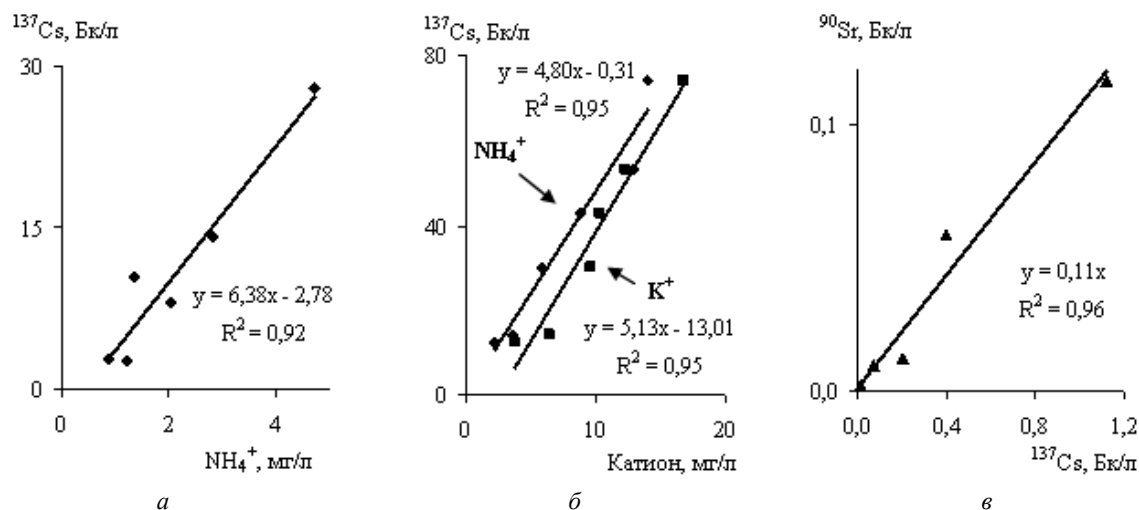


Рис. 2. Корреляция между содержанием катионов и радионуклидов в поровых растворах донных отложений: а – на станции St4 до глубины 20 см; б, в – на станции St5 до глубины 31,5 см.

На станции St2 подобных корреляционных связей не обнаружено. Это может быть следствием неоднородности условий накопления донного грунта, создаваемых характерными для этой точки ВО ЧАЭС особенностями динамики водных масс.

В пиковом по активности слое станции St5 на глубине около 84 см от поверхности дна обнаружены максимальные уровни загрязнения поровой воды:  $^{137}\text{Cs}$  – 1117 Бк/л и  $^{90}\text{Sr}$  – 116 Бк/л. Расчеты показали, что на этой же станции находится максимальный запас радионуклидов в поровых растворах на единице площади дна:  $^{137}\text{Cs}$  – 350 кБк/м<sup>2</sup> (9,5 Ки/км<sup>2</sup>) и  $^{90}\text{Sr}$  – 41 кБк/м<sup>2</sup> (1,1 Ки/км<sup>2</sup>) при мощности слоя отложений – 96,5 см.

### Выводы

Исследования показали, что водно-физические свойства глубоководных донных отложений ВО ЧАЭС способствуют их легкому взмучиванию под влиянием внешних воздействий. Одним из последствий этого процесса будет высвобождение части высокоактивных поровых растворов. Расчеты показали, что запас радиоактивного загрязнения в поровых водах глубоководных донных отложений может быть достаточно высок, чтобы пренебрегать его вкладом в суммарное увеличение активности воды остаточной водной системы.

Перемешивание системы может также увеличить насыщение системы кислородом. Такое изменение среды может, во-первых, ускорить рас-

творение урановых матриц топливных частиц, во-вторых, окислить присутствующий в системе аммоний до нитритов и нитратов, в результате чего снизится рН и уменьшится адсорбция радионуклидов.

Таким образом, вопрос об усилении степени подверженности водно-грунтового комплекса ВО ЧАЭС перемешиванию в процессе его осушения требует серьезного изучения.

Анализ корреляционных связей между содержанием в поровой воде донных осадков катионов и радионуклидов, в частности, дает основания предположить, что увеличение концентрации в системе  $\text{NH}_4^+$ , например вследствие массовой гибели живых организмов, может привести к пяти-шестикратному увеличению содержания растворенного  $^{137}\text{Cs}$ .

Обнаружены существенные отличия между химическим составом, уровнем радиоактивного загрязнения и соотношением радионуклидов в поровых водах донных отложений, отобранных в разных точках ВО ЧАЭС. Таким образом, можно предположить, что развитие ситуации в каждом из замкнутых водоемов, оставшихся после осушения стационарного водоема водной системы, также может происходить с некоторыми отличиями.

Автор статьи выражает искреннюю благодарность О. В. Войцеховичу, Т. И. Дывак, В. В. Канівцу, Г. В. Лаптеву за консультации и помощь в получении экспериментальных результатов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Radio-Ecological Study of the Chernobyl Cooling POND and options for remediation (RESPOND) INTAS-2001-0556 Final Report by Ukrainian Hydrometeorological Institute, Kiev, 2005.* - 36 p.
2. *Зарубін О.Л.* Проблеми поводження з водоємом-охолоджувачем після закриття ЧАЕС // Бюлетень екологічного стану зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення. - 2002. - № 2 (20). - С. 17 - 22.
3. *Гудков Д.И., Каглян А.Е., Назаров А.Б., Кленус В.Г.* Радионуклиды в рыбе Зоны отчуждения Чернобыльской АЭС // Доп. НАН України. - 2007. - № 12. - С. 177 - 183.
4. *Nasvit O.I.*, Radioecological situation in the cooling pond of Chernobyl NPP, Recent Research Activity about Chernobyl NPP Accident in Belarus, Ukraine and Russia, Rep. KURAI-KR-79, 74-85. - Kyoto University, Japan, 2002.
5. *Канівец В.В., Войцехович О.В.* Радиоактивное загрязнение донных отложений водоема-охладителя Чернобыльской АЭС // Тр. УкрНИГМИ. - 2000. - Вып. 248. - С. 154 - 171.
6. *Допустимі рівні вмісту радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  у продуктах харчування та питній воді (ДР-97): Державні гігієнічні нормативи.* - К.: Чорнобиль-інтерінформ, 1997. - 10 с.
7. *Кірсев С.І., Годун Д.О., Вишневський Д.О. та ін.* Радіаційний стан на території зони відчуження у 2009 році // Бюлетень екологічного стану зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення. - 2010. - № 1(35). - С. 3 - 17.
8. *Buckley M.J., Bugai D., Dutton L.M.C.D. et al.* Drawing Up and Evaluating Remediation Strategies for the Chernobyl Cooling Pond. Final Report, Rep. C6476/TR/001/2002, NNC, Knutsford, UK, 2002. - 92 p.
9. *Weiss D., Larue P.-J., Bogorinski P. et al.* Collection and analysis of data related to the contamination of the Chernobyl cooling pond. Final Report / CEC Contract No: B7-5350/99/62/42/MAR/C2. Final report. GRS, 2000.
10. *Автореабілітаційні процеси в екосистемах Чорнобильської Зони відчуження.* МНС України. НАН України: Монографія / Під ред. Ю. О. Іванова, В. В. Доліна. - К., 2001. - 252 с.
11. *Пирнач Л.С., Лаптев Г.В.* Исследование влияния

- свойств компонентов водно-грунтовой системы на процессы адсорбции-десорбции  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в совместном присутствии на иллите // Тр. УкрНИГМИ. - 1998. - Вып. 246. - С. 119 - 132.
12. *Bulgakov A., Konoplev A., Smith J. et al.* Fuel particles in the Chernobyl cooling pond: current state and prediction for remediation options // Journal of Environmental Radioactivity. - 2009. - Vol. 100. - P. 329 - 332.
  13. *Соботович Э.В., Ольштынский С.П.* Геохимия техногенеза. - К.: Наук. думка, 1991. - 228 с.
  14. *Sansone U., Voitsekhoivitch O.* Modelling and study of the mechanisms of the transfer of radioactive material from terrestrial ecosystems to and in water bodies around Chernobyl. Final Report, EC, EUR 16529 EN, ECP-3. - Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1996. - 184 p.
  15. *Чановский Е.Г.* Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов. Практическое руководство. - М.: Госгеолтехиздат, 1958. - 272 с.
  16. *Наставления гидрометеорологическим станциям и постам.* Гидрологические наблюдения на больших и средних реках. - Вып. 6. Ч. 1 / Под ред. К. П. Махонько. - Л.: Гидрометеоиздат, 1978. - 384 с.
  17. *Инструкции* и методические указания по оценке радиационной обстановки на загрязненной территории. - М.: Госкомгидромет СССР, 1989. - 118 с.
  18. *Новиков Б.И.* Донные отложения днепровских водохранилищ. - К.: Наук. думка, 1985. - 172 с.
  19. *Лысенко М.П.* Состав и физико-механические свойства грунтов. - М.: Недра, 1972. - 320 с.
  20. *Павлоцкая Ф.И.* Миграция радиоактивных продуктов глобальных выпадений в почвах. - М.: Атомиздат, 1974. - 216 с.
  21. *Протасов А.А., Сергеева О.А., Кошелева С.И. и др.* Гидробиология водоемов-охладителей тепловых и атомных электростанций Украины. - К.: Наук. думка, 1991. - 192 с.
  22. *Ромась М.І.* Гідрохімія водних об'єктів атомної та теплової енергетики: Монографія. - К.: ВПЦ "Київський університет", 2002. - 532 с.
  23. *Cornell R.* Adsorption of caesium on minerals: a review // J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Articles. - 1993. - Vol. 171 (2). - P. 483 - 500.
  24. *Овсянникова С.В., Смит Дж.Т., Кудельский А.В. и др.* Поведение радиоактивного цезия в донных отложениях непроточного озера // Док. НАН Беларуси. - 2004. - Т. 48, № 4. - С. 95 - 101.
  25. *Денисова А.И., Тимченко В.М., Нахишина Е.П. и др.* Гидрология и гидрохимия Днепра и его водохранилищ. - К.: Наук. думка, 1989. - 216 с.

## РАДИОАКТИВНЕ ЗАБРУДНЕННЯ ДОННИХ ВІДКЛАДЕНЬ ВОДОЙМИ-ОХОЛОДЖУВАЧА ЧАЕС. I. ВОДНО-ФИЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, ХІМІЧНИЙ СКЛАД І РАДИОАКТИВНЕ ЗАБРУДНЕННЯ ПОРОВИХ ВОД

Л. С. Пірнач

Представлено перші результати комплексного дослідження донного ґрунту водойми-охолоджувача ЧАЕС. Розглянуто загальну проблематику питання. Отримано інформацію щодо вертикального розподілу вздовж ґрунтового профілю водно-фізичних властивостей донних відкладень, а також іонного складу та радіоактивного забруднення  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  порових вод. Обчислено запас активності, що знаходиться у порових розчинах донного ґрунту. Виявлено сильні кореляційні зв'язки в межах відібраних колонок ґрунту між вмістом у поровій воді  $^{137}\text{Cs}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ . Результати досліджень призначені для прогнозу змінювання радіоекологічної ситуації у водно-ґрунтовому комплексі водойми-охолоджувача при її осушенні.

*Ключові слова:* водойма-охолоджувач ЧАЕС, донні відкладення, радіоактивне забруднення.

## RADIOACTIVE POLLUTION OF THE CHERNOBYL COOLING POND BOTTOM SEDIMENTS. I. WATER-PHYSICAL PROPERTIES, CHEMICAL COMPOUND AND RADIOACTIVE POLLUTION OF PORE WATER

L. S. Pirnach

First results of complex research of the Chernobyl cooling pond bottom sediments are presented. The general problematic is considered. Information about vertical distribution of bottom sediments water-physical properties, and also ionic compound and radioactive pollution  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  of pore water is received. The inventory of bottom sediments pore water activity is calculated. Strong correlations between concentration in pore water  $^{137}\text{Cs}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  within the selected sediments columns are found out. Results of researches are intended for the forecast of radioecological situation change in the cooling pond water-soil complex during drying-up.

*Keywords:* the Chernobyl Cooling Pond, bottom sediments, radioactive pollution.

Поступила в редакцию 17.01.11,  
после доработки - 12.03.11.