

УДК 574.41.5:539.163

## ПЛУТОНИЙ В ЭКОСИСТЕМАХ ИМПАКТНОЙ ЗОНЫ БЕЛОЯРСКОЙ АЭС

© 2007 г. Л. Н. Михайловская\*, И. В. Молчанова, Е. Н. Караваева

*Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург*

Изучены уровни активности и особенности распределения Pu в основных компонентах экосистем импактной территории Белоярской АЭС. Повышенные количества Pu (до 500 Бк/м<sup>2</sup>) обнаружены в донных отложениях Ольховского болота (место сброса дебалансных вод станции). Плотность загрязнения обследованного почвенного покрова не превышает 140 Бк/м<sup>2</sup>. Оценка вклада станции в загрязнение экосистем импактной зоны БАЭС, проведенная с использованием изотопного отношения <sup>238</sup>Pu/<sup>239,240</sup>Pu, показала, что в донных отложениях и почвах он составляет 64.1–99.3%.

*Плутоний, изотопные отношения, импактная зона, вклад станции, запас радионуклидов.*

Белоярская АЭС (БАЭС) пущена в эксплуатацию в 1964 г. Первая очередь включала два энергоблока с канальными водографитовыми реакторами на тепловых нейтронах, которые работали с 1964 по 1989 гг. Вторая – энергоблок на быстрых нейтронах БН-600 был пущен в 1980 г. и эксплуатируется в настоящее время. Штатная работа реакторов сопровождается нормированными выбросами и сбросами радионуклидов в окружающую среду. Наиболее биологически значимы из них долгоживущие изотопы плутония, <sup>90</sup>Sr, <sup>137</sup>Cs.

В ходе многолетнего радиоэкологического мониторинга почвенно-растительного покрова 30-километровой зоны Белоярской АЭС была описана импактная территория с повышенной активностью преимущественно <sup>137</sup>Cs. Она включала Ольховское болото (место многолетнего сброса слаборадиоактивных дебалансных вод станции), вытекающую из него небольшую речку Ольховку, впадающую в р. Пышму, а также полосу приболотных и пойменных почв. Ранее нами были оценены запасы и характер распределения <sup>90</sup>Sr, <sup>137</sup>Cs и <sup>60</sup>Co в различных компонентах болотно-речной экосистемы [1, 2]. В то же время гораздо меньше внимания было уделено плутонию [3, 4]. Актуальность подобных исследований в настоящее время возрастает в связи с использованием Белоярской АЭС смешанного уран-плутониевого топлива (mixed-oxide fuel или МОКС-топливо), что может привести к увеличению поступления плутония в биологические объекты [5].

Работа посвящена изучению путей поступления, миграции и распределения техногенного плу-

тония в компонентах экосистем импактной зоны БАЭС.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Исследования проводили в 1989–2003 гг. на территории выделенного импактного участка. В ходе работы отбирали пробы донных отложений Ольховского болота и рек Ольховки и Пышмы на удалении 0.2, 1.5, 2.5, 7.0, 17.0 и 35 км от места сброса дебалансных вод станции по направлению вектора стока. В непосредственной близости от места отбора грунтов, в затопливаемой береговой зоне Ольховского болота и прирусловой пойме р. Пышмы, обследовали гидроморфные почвы. В качестве контрольного был выбран участок р. Пышмы, выше места впадения в нее р. Ольховки, где отбирали образцы донных отложений и пойменных почв. Схема района исследований показана на рисунке.

Для изучения особенностей ландшафтной миграции изотопов плутония использовали метод ландшафтного профилирования. На сопряженных по стоку элементах рельефа были заложены почвенные разрезы. Такой профиль (протяженностью 500 м) охватывал суходольные пространства левого берега болота (плакор) и через пологий склон выходил к болоту вблизи формирования истока р. Ольховки. В болоте формируются илистые и торфянистые отложения; в почвенном покрове береговой зоны преобладают торфяно-глееземы иллювиально-железистые; на плакоре они сменяются буроземами типичными [6]. Образцы донных отложений отбирали с помощью торфоразведочного бура типа ТБГ, а почвы – из разрезов слоями 5 см с учетом площади и генетических горизонтов. Содержание изотопов плутония определяли радиохимическим методом [7].

\*Адресат для корреспонденции: 620144 Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202, ИЭРиЖ УрО РАН; тел.: (34377) 3-20-70; e-mail: molchanova\_i\_v@mail.ru.

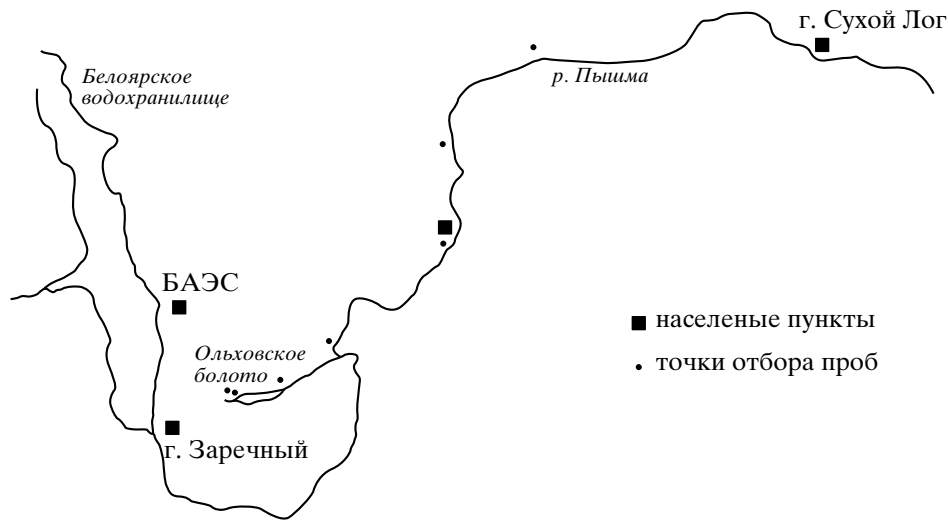


Рис. Схема обследованного района.

Вскрытие образцов проводили смесью азотной и соляной кислот; затем осаждали гидрооксиды тяжелых металлов, растворяли их и разделяли в колонках с ионообменной смолой AG 1-X4. В качестве метки использовали  $^{242}\text{Pu}$ . Активность изотопов плутония определяли на  $\alpha$ -спектрометре Alpha Analyst фирмы "Canberra Packard" (США) с полупроводниковыми детекторами (PIPS), программным обеспечением GENIE-2000, пределом обнаружения 0.001 Бк и статистической ошибкой измерений 5–30%. Ошибка радиохимического метода складывается из статистических ошибок измерения определяемого изотопа и метки.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

*Удельная активность и распределение плутония в компонентах экосистем в зоне влияния жидких сбросов Белоярской АЭС*

Техногенный плутоний поступал на обследованную территорию в течение длительного вре-

мени в составе атмосферных глобальных выпадений и жидких сбросов Белоярской АЭС. В обоих случаях состав плутониевого загрязнения представлен долгоживущими изотопами  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$  и отличался лишь величиной изотопного отношения  $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$ . Поэтому для характеристики уровней активности и особенностей распределения плутония в основных компонентах экосистем мы использовали суммарную активность обнаруженных изотопов.

Результаты проведенных исследований показали, что в донных отложениях водных экосистем в начальный период исследования (1989 г.) максимальное количество Pu (69 Бк/кг) было зарегистрировано в 0–5-см слое донных отложений начала болота, в месте контакта сбросных и болотных вод (табл. 1). Оно резко снижалось в средней части болота и далее по вектору стока не отличалось от такового на контрольном участке. Со временем фронт миграции радионуклида сместился, значимые количества Pu были обнаруже-

**Таблица 1.** Удельная активность Pu в 0–5 см слое донных отложений на разном расстоянии от места сброса дебалансных вод (усредненные данные, в скобках – разброс значений), Бк/кг сухой массы

| Место отбора донных отложений                  | Расстояние от места сброса дебалансных вод, км | Годы наблюдений   |                 |
|--|--|-------------------|-----------------|
|  |  | 1989              | 2005            |
| Ольховское болото                              | 0.2  | 69.0 (39.4–114.6) | 10.5 (1.5–21.6) |
|  | 1.5  | 14.9 (4.0–26.0)   | –               |
|  | 2.5  | <0.1              | 8.2 (1.3–20.9)  |
| Исток р. Ольховки                              | 3.0  | <0.1              | 2.1 (1.3–3.0)   |
| Р. Пышма, вниз по течению от устья р. Ольховки | 7.0  | <0.1              | 2.4 (1.8–3.2)   |
|  | 8.0–35.0                                       |                   | 0.1 (0.1–0.2)   |
| Контрольный участок                            | 7.0  | <0.1              | 0.1 (<0.1–0.2)  |

**Таблица 2.** Удельная активность и плотность загрязнения плутонием гидроморфных почв в 0–40-см слое (усредненные данные, в скобках – разброс значений для разных точек отбора проб)

| Место отбора проб                              | Расстояние от места сброса дебалансных вод, км | Pu, Бк/кг сухой массы | Pu, Бк/м <sup>2</sup> |
|--|--|-----------------------|-----------------------|
| Береговая зона:                                |  |                       |                       |
| Ольховского болота                             | 1.5  | 0.9 (0.4–1.5)         | 97.7 (77.0–98.0)      |
|  | 2.5  | 1.4 (0.4–2.9)         | 98.0 (62.6–166)       |
| Р. Пышмы, вниз по течению от устья р. Ольховки | 8.0–17.0                                       | 0.5 (0.2–0.6)         | 102.0 (23.9–225)      |
| Контрольный участок                            | 7.0  | 0.9 (0.6–1.0)         | 130.0 (79.0–216)      |

**Таблица 3.** Удельная активность и плотность загрязнения донных отложений и почв геохимического сопряжения в 0–40 см слое

| Место отбора проб          | Объект исследования    | Расстояние от берега болота, м | Pu                |                   |
|----------------------------|------------------------|--------------------------------|-------------------|-------------------|
|                            |                        |                                | Бк/кг сухой массы | Бк/м <sup>2</sup> |
| Ольховское болото          | Донные отложения:      |                                |                   |                   |
|                            | торфянистые            | –                              | 2.5               | 140               |
|                            | илистые                | –                              | 9.2               | 489               |
| Затопляемая береговая зона | Торфяно-глеезем,       | 7                              | 1.1               | 99                |
|                            | иллювиально-железистый | 25                             | 1.5               | 132               |
| Плакор                     | Бурозем типичный       | 500                            | 0.9               | 113               |

ны на всех обследованных участках болота, в р. Ольховке и донных отложениях р. Пышмы, в непосредственной близости от места впадения в нее р. Ольховки. Лишь на участке, удаленном на 8–35 км от места сброса дебалансных вод станции, удельная активность плутония в исследуемых образцах не превышала уровня контрольных значений. В почвах, расположенных на окраине болота и в прирусловой пойме р. Пышмы, удельная активность Pu составляла 0.5–1.4 Бк/кг и не отличалась от таковой в почвах, не испытывающих влияния БАЭС (табл. 2). Пересчет данных на единицу площади также не выявил достоверных различий в запасах Pu в почвах обследованного участка по сравнению с контролем. Данные табл. 1 и 2 показывают, что, как правило, удельная активность Pu в почвах выше, чем в речных отложениях, для которых водная толща является экраном, существенно снижающим вклад выпадений из атмосферы.

В пределах геохимического сопряжения наиболее высокая удельная активность (Бк/кг) и плотность загрязнения (Бк/м<sup>2</sup>) Pu обнаружены в илистых и торфянистых отложениях болота (табл. 3). В почве, приуроченной к берегу болота, эти величины снижаются; на удалении 500 м от болота удельная активность Pu в буроземе типичном не отличается от контрольных значений, а его запас в почвенном профиле составляет

113 Бк/м<sup>2</sup>. Известно, что уровень глобального загрязнения Pu почвенно-растительного покрова в северном полушарии, сформированный массивными испытаниями ядерного оружия, варьирует от 30 до 300 Бк/м<sup>2</sup> [8–10]. Сравнение этих величин с данными табл. 3 показывает, что загрязнение обследованных компонентов геохимического сопряжения, как правило, не превышает приведенного максимального значения. Исключение представляют илистые отложения болота, которые в силу высокой сорбционной способности несут наибольшую радионуклидную нагрузку. Последнее находит отражение и в вертикальном распределении плутония (табл. 4). Так, в илистых отложениях его основное количество (90% от общего содержания) удерживается в 0–5 см поверхностном слое. В торфянистых образованиях максимум смещен на глубину 5–10 см, а в переувлажненных, торфянисто-болотных почвах Pu в заметных количествах обнаруживается на глубине 20–25 см, более или менее равномерно распределяясь в почвенном профиле. На плакоре, за пределами влияния болота, где содержание Pu обусловлено глобальными выпадениями из атмосферы, имеет место как заглобление максимального содержания Pu, так и резкий перепад его удельных активностей в выделенных почвенных слоях.

**Таблица 4.** Вертикальное распределение плутония в донных отложениях Ольховского болота и почвах сопредельных участков

| Место отбора проб              | Расстояние от берега болота, м | Объект исследования                               | Глубина, см | Бк/м <sup>2</sup> | %    |
|--------------------------------|--------------------------------|---|-------------|-------------------|------|
| Ольховское болото              | –                              | Донные отложения:<br>илистые                      | 0–5         | 439.2             | 89.8 |
|                                |                                |   | 5–10        | 49.6              | 10.2 |
|                                | –                              | торфянистые                                       | 0–5         | 25.8              | 18.4 |
|                                |                                |   | 5–10        | 70.2              | 50.1 |
|                                |                                |   | 10–15       | 18.6              | 13.3 |
|                                |                                |   | 15–20       | 25.4              | 18.1 |
| Берег болота,<br>затопливаемый | 7                              | Почва: торфяно-глеезем,<br>иллювиально-железистый | 0–5         | 13.6              | 13.8 |
|                                |                                |   | 5–10        | 24.7              | 25.1 |
|                                |                                |   | 10–15       | 21.3              | 21.6 |
|                                |                                |   | 15–20       | 24.4              | 24.7 |
|                                |                                |   | 20–25       | 14.6              | 14.8 |
|                                | 25                             | То же   | 0–5         | 15.0              | 24.0 |
|                                |                                |   | 5–10        | 25.2              | 40.3 |
|                                |                                |   | 10–15       | 15.2              | 24.3 |
|                                |                                |   | 15–20       | 6.2               | 9.9  |
|                                |                                |   | 20–25       | 1.1               | 1.8  |
| Плакор                         | 500                            | Почва: бурозем типичный                           | 0–5         | 6.5               | 8.2  |
|                                |                                |   | 5–10        | 19.7              | 24.9 |
|                                |                                |   | 10–15       | 48.0              | 60.0 |
|                                |                                |   | 15–20       | 60.0              | 6.1  |

**Таблица 5.** Вклад Белоярской АЭС в загрязнение Pu донных отложений (над чертой) и гидроморфных почв (под чертой)

| Место отбора проб         | Расстояние от места сброса дебалансных вод, км | <sup>238</sup> Pu/ <sup>239, 240</sup> Pu | Вклад БАЭС, % |
|---------------------------|--|---|---------------|
| Ольховское болото         | 0.2  | 0.76/0.50                                 | 99.3/73.2     |
|                           | 2.5  | 0.72/0.74                                 | 93.8/95.4     |
| Исток р. Ольховки         | 3.0  | 0.42/-He опр.                             | 64.1/-He опр. |
| Р. Пышма, вниз по течению | 7.0  | 0.42/≤0.04                                | 64.1/-He обн. |
|                           | 8.0–35.0                                       | 0.04/≤0.04                                | He обн.       |

*Вклад жидких сбросов БАЭС  
в загрязнение компонентов  
обследованных экосистем изотопами плутония*

Наряду с количественной оценкой содержания и распределения Pu в основных депонирующих компонентах импактной зоны был изучен изотопный состав плутониевого загрязнения и оценен вклад жидких сбросов БАЭС в его формирование. Известно, что вклад различных источников в загрязнение компонентов природной среды изотопами плутония в первом приближении мож-

но оценить по величине изотопного отношения <sup>238</sup>Pu/<sup>239, 240</sup>Pu. Так, в глобальных выпадениях она составляет 0.02–0.04, а для сбросов станции – в среднем составляла 0.8 [3]. Полагая, что загрязнение обследуемой территории в районе Ольховского болота сформировалось в результате поступления глобальных выпадений и жидких сбросов станции, количественно вклад каждого из источников можно рассчитать, используя следующее уравнение:

$$K_1(A - x) + K_2x = K_3A$$

где  $A - {}^{239,240}\text{Pu}$  в образцах обследованного участка,  $\text{Бк}/\text{м}^2$ ;  $x - {}^{239,240}\text{Pu}$ , поступивший с жидкими сбросами Белоярской АЭС,  $\text{Бк}/\text{м}^2$ ,  $(A - x) - {}^{239,240}\text{Pu}$  глобальных выпадений,  $\text{Бк}/\text{м}^2$ ; в расчетах использовали величины изотопного отношения  ${}^{238}\text{Pu}/{}^{239,240}\text{Pu}$ : для глобальных выпадений  $K_1 = 0.03$ , жидких сбросов станции  $K_2 = 0.8$ , образцов обследованного участка  $K_3$ ,  $K_1(A - x) - {}^{238}\text{Pu}$  глобальных выпадений,  $\text{Бк}/\text{м}^2$ ;  $K_2x - {}^{238}\text{Pu}$  поступивший с жидкими сбросами Белоярской АЭС,  $\text{Бк}/\text{м}^2$ ;  $K_3A - {}^{238}\text{Pu}$ , в исследованных образцах,  $\text{Бк}/\text{м}^2$ .

Решая уравнение для различных объектов исследования, находим вклад Белоярской АЭС в их загрязнение  ${}^{239,240}\text{Pu}$  и  ${}^{238}\text{Pu}$ . В донных отложениях болота, формирующихся на разных его участках, р. Ольховки и акватории р. Пышмы (7 км от сброса дебалансных вод) величина отношения  ${}^{238}\text{Pu}/{}^{239,240}\text{Pu}$  удерживается на уровне 0.42–0.76, а вклад БАЭС составляет соответственно 64.1–99.3% с некоторым падением градиента при переходе от болота к системе рек (табл. 5). Далее, вниз по течению р. Пышмы, вклад БАЭС в загрязнение донных отложений плутонием не обнаружен. Несмотря на то, что удельная активность плутона в гидроморфных почвах достоверно не отличается от такового на контрольном участке, соотношение изотопов  ${}^{238}\text{Pu}/{}^{239,240}\text{Pu}$  в них удерживается на уровне 0.50–0.74; соответственно вклад БАЭС составляет 73.2–95.4%.

Поскольку Ольховское болото является источником радионуклидного загрязнения не только открытой гидрографической системы, но и наземных экосистем сопредельных территорий, оценили вклад станции в загрязнение почвенного покрова в пределах обследованного геохимического сопряжения. Расчеты показали, что на расстоянии 25 м от берега болота вклад станции составляет 3.4%, а на большем удалении он не обнаружен.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам ранее проведенных радиоэкологических исследований в 30-километровой зоне Белоярской АЭС была выделена импактная территория (Ольховская болотно-речная экосистема), сформировавшаяся в результате ассимиляции слаборадиоактивных жидких сбросов станции. Активность Pu в донных отложениях болота и реках, сопряженных с ним общим стоком, уменьшается по мере удаления от места сброса дебалансных вод. Лишь на расстоянии, превышающем 7 км, оно выходит на уровень контрольных

значений. Плотность загрязнения радионуклидом почвенного покрова обследованной территории варьирует в пределах 100–140  $\text{Бк}/\text{м}^2$ . Эти значения не превышают уровня загрязнения почв, сформировавшегося за счет глобальных выпадений из атмосферы. Илистые отложения болота в силу высокой сорбционной способности несут наибольшую радионуклидную нагрузку. Последнее находит отражение и в вертикальном распределении в них плутона. В илистых отложениях основное его количество (90% от общего содержания) удерживается в 0–5-см поверхностном слое.

Оценить вклад станции в загрязнение части обследованных компонентов экосистем Pu оказалось возможным при использовании изотопных отношений  ${}^{238}\text{Pu}/{}^{239,240}\text{Pu}$ . Проведенный анализ показал, что вклад станции в загрязнение техногенным Pu депонирующих компонентов Ольховской болотно-речной экосистемы удерживается на уровне 64.1–99.3%.

Работа выполнена при поддержке РФФИ: грант № 04-05-64172, грант № 04-05-96086.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куликов Н.В., Молчанова И.В., Караваева Е.Н. Радиоэкология почвенно-растительного покрова. Свердловск: УрО АН СССР, 1990. 172 с.
2. Молчанова И.В., Караваева Е.Н. Эколого-геохимические аспекты миграции радионуклидов в почвенно-растительном покрове. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 161 с.
3. Михайловская Л.Н., Молчанова И.В., Караваева Е.Н. и др. // Дефектоскопия. 2002. № 4. С. 59–66.
4. Михайловская Л.Н., Молчанова И.В., Караваева Е.Н. // Проблемы радиоэкологии и пограничных дисциплин. Екатеринбург. 2005. Вып. 7. С. 150–165.
5. Сараев О.М., Ошканов Н.Н., Мальцев В.В. // Материалы Российско-Американских слушаний. Утилизация плутона: проблемы и решения. Екатеринбург, 2000. С. 57–59.
6. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И. Классификация почв России. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева РАСХН, 1997. 236 с.
7. Chen Q., Aarkrog A., Nielsen S.P., et al. // J. Radioanalyt. and Nuclear Chem. articles. 1993. V. 172. № 2. P. 281–288.
8. Aarkrog A., Dahlgaard H., Nielsen S.P. et al. // Sci. Total Environ. 1997. V. 201. P. 137–154.
9. Павлоцкая Ф.И., Федорова З.М., Емельянов В.В. и др. // Атом. энергия. 1985. Т. 59. Вып. 5. С. 382–383.
10. Атурова В.П., Коваленко В.В. // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. Томск: Тандем-Арт, 2004. С. 59–62.

Поступила в редакцию  
21.04.2006 г.

## Plutonium at the Ecosystems of Impact Zone the Beloyarsk NPP

**L. N. Mikhailovskaya, I. V. Molchanova, E. N. Karavaeva**

*Institute of Plant and Animal Ecology, Russian Academy of Sciences, Ural Division, Ekaterinburg, 620144, Russia;  
e-mail: molchanova\_i\_v@mail.ru*

The studied distribution of the plutonium at the ecosystems of impact zone the Beloyarsk NPP was studied. Higher quantity of Pu (to 500 Bq/m<sup>2</sup>) was revealed in the bottom sediments of the Olkhovsk bog where low-level radioactive water of the Beloyarsk NPP have been discharged. The total amount of the radionuclide in a soil cover did not exceed 140 Bq/m<sup>2</sup>. The contribution of the Beloyarsk NPP to contamination of the investigated ecosystems was accounted with using ratio <sup>238</sup>Pu/<sup>239,240</sup>Pu. It was 64.1–99.3% both in the bottom sediments and soils.