



УДК:504.054(262)

**Н. Н. Терещенко**, канд. биол. наук, ст. н. с., **Г. Г. Поликарпов**, акад. НАН Украины, гл. н. с.,  
**Г. Е. Лазоренко**, канд. биол. наук, ст. н. с.

Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского Национальной академии наук Украины,  
Севастополь, Украина

### РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ СИТУАЦИЯ В ЧЁРНОМ МОРЕ В ОТНОШЕНИИ ПЛУТОНИЯ: УРОВНИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ЭКОСИСТЕМЫ И ДОЗОВЫЕ НАГРУЗКИ НА БИОТУ

Изложены результаты многолетних исследований радиоэкологической ситуации в Чёрном море в отношении плутония в период после Чернобыльской аварии 1986-го года. Приведены уровни содержания радиоизотопов плутония ( $^{238,239,240}\text{Pu}$ ) в воде, донных отложениях, многоклеточных водорослях, двустворчатых моллюсках и рыбах, определены коэффициенты накопления плутония черноморскими донными отложениями и гидробионтами, оценены дозовые нагрузки на гидробионтов от альфа-излучения радиоизотопов плутония.

**Ключевые слова:** радиоактивное загрязнение плутонием ( $^{238,239,240}\text{Pu}$ ), коэффициенты накопления, дозовые нагрузки, Чёрное море

Плутоний относится к трансурановым элементам (ТУЭ), которые представляют собой группу радиоактивных веществ, почти полностью антропогенного происхождения и, таким образом, фактически относятся к искусственным радионуклидам. Но всё же в природе, в земной коре были найдены ТУЭ (плутоний и нептуний) в следовых количествах в урансодержащих минералах. В природных условиях плутоний образуется при спонтанном делении ядер урана под воздействием нейтронов космического излучения [1, 11]. В лабораторных условиях плутоний также получают при воздействии нейтронов на ядра урана. При нейтронной активации уранового топлива в реакторах образуются альфа-излучающие радиоизотопы плутония  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$  и в меньших количествах – нуклиды более тяжелых изотопов и элементов. В настоящее время известно 15 изотопов плутония с массовыми числами

232 – 246, при этом 12 из них – альфа-излучатели и только три изотопа (с массовыми числами 241, 243 и 245) – бета-излучатели. Летучесть плутония низкая, но всё же незначительные его количества поступают в окружающую среду с выбросами при работе ядерных предприятий [1, 11, 8]

Самое важное промышленное и радиоэкологическое значение среди ТУЭ имеет плутоний, особенно  $^{239}\text{Pu}$ . Если его запасы естественного происхождения в биосфере, по максимальным оценкам, составляют несколько десятков килограммов, то запасы антропогенного плутония на конец XX века достигли 950 т, из них 650 т наработано в реакторах АЭС и примерно 300 т произведено для военных целей [1].

Большая часть наработанного плутония в настоящий момент содержится в изолированном от окружающей среды состоянии и представляет собой потенциальный источник

загрязнения окружающей среды, который таит в себе серьёзные, нерешённые проблемы [1]. Вторая часть антропогенного плутония – от 7 до 10 т – распылена по земному шару в результате поступления ТУЭ в окружающую среду из различных антропогенных источников [1].

Таким образом, антропогенные запасы плутония превышают природные в десятки тысяч раз, хотя история искусственного плутония насчитывает всего немногим более полувека (самый важный в практическом отношении изотоп плутония  $^{239}\text{Pu}$  был открыт в 1941 г.).

Значительные темпы увеличения содержания плутония в биосфере, его высокая радиотоксичность (особенно альфа-излучающих изотопов и, в частности,  $^{239}\text{Pu}$ ), а также дальнейшее использование в ядерной промышленности обуславливают необходимость изучения поведения плутония в окружающей среде.

Главным источником радиоактивного загрязнения Чёрного моря до середины 80-х г. XX века были глобальные атмосферные радиоактивные выпадения после ядерных испытаний в открытых средах. После аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) в 1986 г. в Чёрное море поступила новая волна радиоактивного загрязнения, в том числе и ТУЭ. По сравнению с другими акваториями, Чёрное море подверглось более сильному радиоактивному загрязнению вследствие территориальной близости к источнику (ЧАЭС) как самого моря, так и значительной части его водосборного бассейна, включающего две большие реки – Дунай и Днепр, а также в силу попадания в одну из трех зон с повышенными уровнями чернобыльских выпадений – зону так называемого “южного следа” [8, 12, 13].

Цель настоящей работы состояла в исследовании радиоэкологической ситуации в Чёрном море в отношении плутония (его альфа-излучающих радиоизотопов:  $^{238,239,240}\text{Pu}$ ) в постчернобыльский период путём определения содержания плутония в основных компонентах черноморских экосистем - воде, донных

отложениях, гидробионтах: многоклеточных водорослях, двустворчатых моллюсках и рыбах; а также в оценке аккумулирующей способности абиогенных и биогенных компонентов морских экосистем в отношении плутония и дозовых нагрузок, формируемых альфа-излучением изучаемых радиоизотопов плутония в черноморских животных и растениях.

**Материал и методы.** Пробы для определения в них содержания изотопов плутония отбирали во время морских и сухопутных (прибрежных) экспедиций в 1987 – 2004 гг. в Северо-Крымском канале, Днепро-Буг-ском лимане и в Чёрном море, включая прибрежные районы украинского шельфа, приустьевые зоны рек Дунай и Днепр, центральные районы моря.

Для определения плутония ( $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239-240}\text{Pu}$ ) в объектах окружающей среды использовали радиохимический метод [30], который позволяет определять их в морской воде, донных отложениях и гидробионтах. Метод основан на химическом выделении плутония из природных образцов с последующей очисткой и отделением его от других химических элементов на колонках с ионообменной смолой и изготовлением альфа-радиоактивных тонкослойных препаратов путём соосаждения плутония с фторидом лантана на мембранные фильтры [5] и последующим их измерением на альфа-спектрометре EG&G ORTEC OSTETE PC, предоставленного Институту биологии южных морей НАНУ Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) по проекту RER/2/003 “Marine Environmental Assessment in the Black Sea Region”. Количественное определение  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239-240}\text{Pu}$  и  $^{242}\text{Pu}$  в образцах производили по спектрам альфа-излучения препаратов, с использованием радиоактивного индикатора  $^{242}\text{Pu}$ . Химический выход плутония варьировал от 70 до 95 %. Чувствительность метода -  $n \cdot 10^{-13}$  Ки или  $3.7 \cdot 10^{-3}$  Бк на пробу.

Статистическую обработку результатов осуществляли стандартными методами. Допу-

стимая погрешность определения не превышала 20 %.

Оценку поглощённых и эквивалентных доз для гидробионтов от альфа-излучения  $^{239,240}\text{Pu}$  выполняли при помощи известных подходов [15, 16], учитывая только внутреннее облучение от инкорпорированного плутония, используя измеренные уровни содержания плутония в гидробионтах.

**Результаты и обсуждение.** После аварии на ЧАЭС, ТУЭ поступали в Чёрное море как с атмосферными радиоактивными выпа-

дениями, так и с водными массами в растворённой и во взвешенной формах. Основная волна радиоактивных выпадений над данным регионом прошла в конце апреля – мае 1986 г. В результате было обнаружено поступление ТУЭ в поверхностные воды Чёрного моря. В первые месяцы после аварии, когда загрязнение акватории происходило наиболее интенсивно за счёт радиоактивных выпадений, были проведены исследования, которые позволили установить уровни загрязнения ТУЭ в водах Чёрного моря (табл. 1) [6, 17, 26].

Табл. 1 Содержание ТУЭ в поверхностной воде Чёрного моря в 1986 г. после аварии на ЧАЭС [6, 17]  
Table 1 Content of TUE in surface waters of the Black Sea in 1986 after the Chernobyl NPP accident [6, 17]

| Время отбора проб | Содержание ТУЭ, мкБк/л |                       |                   |                   |
|-------------------|------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|
|                   | $^{238}\text{Pu}$      | $^{239,240}\text{Pu}$ | $^{241}\text{Am}$ | $^{242}\text{Cm}$ |
| июнь              | 1.3 – 4.2              | 6.7 – 16.9            | 1                 | 43.8              |
| сентябрь          | 2.4 – 3.1              | 8.9 – 12.5            | 2                 | 34.30             |

Одним из информативных показателей, указывающих на происхождение радиоактивного загрязнения, служит соотношение  $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$ , – оригинальное для каждого источника радиоактивного загрязнения. В июне – сентябре 1986 г. соотношение  $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$  в поверхностной воде Чёрного моря составляло 0.2 – 0.26, что почти на порядок превышало это соотношение в глобальных выпадениях (0.036), но было ниже значений 0.40 – 0.54, определённых для чернобыльских выпадений [14]. По этой причине был сделан вывод, что в 1986 г. содержание ТУЭ определялось смешанным суммарным содержанием плутония как глобального, так и чернобыльского происхождения в соотношении 50:50 [17]. Подтверждением поступления чернобыльского радиоактивного загрязнения в Чёрное море в этот период служили также данные о сравнительно высоком содержании  $^{242}\text{Cm}$ , имеющего короткий период полураспада (163 сут), поскольку для него было характерно относительно высокое содержание в чернобыльских выпадениях в первые годы после аварии (табл. 1) [12, 13, 17].

Поступление в поверхностные воды Чёрного моря в 1986 г. чернобыльского радиоактивного загрязнения с атмосферными выпадениями подтверждает и сравнение содержания и соотношения ТУЭ в воде из поверхностного слоя и с глубины 110 м. В пробах воды с глубины 110 м атомное отношение  $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$  составляло 0.15 – 0.18, что характерно для глобальных выпадений, тогда как в поверхностной воде оно равнялось приблизительно 0.3, что обусловлено смешением ТУЭ глобального и чернобыльского происхождения. Низкое значение отношения  $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$  в начальный период после аварии в водах с глубины 110 м указывало на отсутствие на этих глубинах в тот период радионуклидов ТУЭ чернобыльского происхождения. Концентрация  $^{239,240}\text{Pu}$  на этой глубине составляла около 10 мкБк/л, включая растворённую и взвешенную формы, содержание  $^{238}\text{Pu}$  в воде с глубины 110 м было ниже предела детектирования [17].

Наряду с атмосферными выпадениями, одним из основных источников поступления плутония в Чёрное море в последующие

периоды были водные массы из водосборного бассейна [12, 13, 26].

Изучение в 1986 – 1989 гг. пространственного распределения концентраций  $^{238}\text{Pu}$  и  $^{239,240}\text{Pu}$  в черноморской воде в центральной и южной частях моря показало, что соотношение изотопов  $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$  изменялось от 0.1 до 0.3. Это указывало на то, что суммарная концентрация плутония обусловлена радиоизотопами как чернобыльского, так и глобального происхождения. Соотношение этих компонентов зависело от истории и путей поступления чернобыльского радиоактивного загрязнения, но, в целом, радиоизотопы плутония чернобыльского происхождения составляли не более половины суммарного загрязнения.

Несколько иную картину наблюдали в северо-западной части Чёрного моря, где наряду с атмосферными выпадениями, значимую роль сыграло поступление радионуклидов водными путями (реки Днепр, Дунай, Южный Буг и Северо-Крымский канал). В северо-западных акваториях, в прибрежных районах, непосредственно прилегающих к устьевым зонам рек и канала, концентрации  $^{239,240}\text{Pu}$  равнялись примерно 0.3 мБк/л [26], при этом соотношение  $^{238}\text{Pu}$  и  $^{239,240}\text{Pu}$  изменялось от 0.4 до 0.5, что указывало на преобладающую долю изотопов плутония чернобыльского происхождения в итоговом количестве плутония в поверхностных черноморских водах в этих районах. Но даже эти, сравнительно высокие концентрации плутония в воде, были на несколько порядков величин ниже допустимой концентрации для альфа-излучающих радионуклидов плутония для питьевой воды, и не представляли угрозы здоровью человека [4].

В первые годы после аварии в воде Днепровского лимана концентрация  $^{239,240}\text{Pu}$  достигала 1 – 2 мБк/л, а в Каркинитском заливе в зоне поступления вод Северо-Крымского канала она была почти на порядок меньше [26]. В периоды весенних паводков наблюдали резкое увеличение выноса радионуклидов с паво-

дковыми водами, но интенсивность этих всплесков резко уменьшалась. К концу 80-х годов XX века во время паводков концентрации радионуклидов в воде уменьшились в десятки и сотни раз по сравнению с 1986 г., и в дальнейшем происходило сглаживание внутригодовых колебаний выноса радионуклидов с водными массами и уменьшение их поступления в море [12, 13]. Уже в начале 90-х годов двадцатого века поступление плутония в Чёрное море водным путём резко снизилось и, по приблизительным оценкам, в сумме не превысило 0.1 % от его количества, осевшего в ближней зоне [3, 12, 13], что составляло для суммы изотопов  $^{239,240}\text{Pu}$  менее 10 ГБк.

Поступление ТУЭ в Чёрное море в последующие годы и их миграция сформировали итоговые концентрации ТУЭ в воде. Уровни содержания плутония и америция спустя более, чем 10 лет после аварии на ЧАЭС в северо-западной и западной частях моря на шельфе и в глубоководной зоне составляли 3.1 – 4.0 мБк/л  $^{239, 240}\text{Pu}$  и 1.7 мБк/л  $^{241}\text{Am}$ . В воде, отобранной у крымского побережья, концентрации плутония были равны: 3.0 – 4.0 мБк/л, а в воде из глубоководной зоны центральной и южной частей моря – 4.1 – 6.4 мБк/л. У северо-восточного побережья в черноморских водах концентрация  $^{239,240}\text{Pu}$  в среднем достигала 8.2 мБк/л [23, 27]. Обобщенные и усреднённые данные по акватории всего моря показали, что средняя концентрация  $^{239,240}\text{Pu}$  в поверхностных водах на 2000 г. равнялась  $5.3 \pm 2.3$  мБк/л [33]. В целом, размах значений концентрации  $^{239,240}\text{Pu}$  в черноморских поверхностных водах в разных районах в этот период составлял 2 – 20 мБк/л [23, 27, 33].

Характер загрязнения глубинных вод Чёрного моря связан как с условиями, путями и интенсивностью радиоактивного загрязнения, так и с физико-химическими свойствами радионуклидов и свойствами среды. Большинство океанических и морских вод характеризуются окислительными свойствами, как на

поверхности, так и в глубине вод. В Чёрном море, как известно, в водной толще глубже 150 - 200 м находится сероводородная зона, характеризующаяся восстановительными свойствами. Ей предшествует редокс-зона, и только выше этих слоёв расположены воды с окислительными свойствами. Так как плутоний является химическим элементом, который может находиться в разных состояниях валентности

(III, IV, V, VI) в зависимости от редокс-условий среды, то специфические условия черноморских вод влияли на состояние, в котором находился плутоний, что сказывалось на его глубинном распределении. В постчернобыльский период были проведены исследования в Чёрном море по определению соотношения плутония в разных степенях окисления на разных глубинах (табл. 2) [27].

Табл. 2 Распределение по глубине содержания  $^{239,240}\text{Pu}$  в разной степени окисления в Чёрном море [27]  
Table 2 Depth distribution of  $^{239,240}\text{Pu}$  content in a different oxidization degree in the Black Sea [27]

| № станции,<br>координаты | Глубина, м | Содержание плутония, мкБк/л |           |          |
|--------------------------|------------|-----------------------------|-----------|----------|
|                          |            | Pu (III+IV)                 | Pu (V+VI) | ΣPu      |
| 1                        | 5          | 4.7±1.3                     | 2.1±1.2   | 6.7±1.7  |
| 41° 51' с.ш.             | 50         | 1.4±1.2                     | 9.0±1.3   | 10.4±1.7 |
| 30° 21' в.д.             | 70         | 1.4±1.1                     | 5.7±1.7   | 7.1±2.1  |
|                          | 90         | 2.1±1.1                     | 4.4±1.6   | 6.5±1.9  |
|                          | 110        | 5.4±1.3                     | 1.8±1.3   | 7.1±1.8  |
|                          | 150        | 8.2±1.9                     | 0.6±1.1   | 8.8±2.2  |
|                          | 800        | 4.5±1.6                     | 0.4±1.3   | 4.9±2.1  |
|                          | 1800       | 1.6±1.5                     | 0.6±1.1   | 2.2±1.9  |

Как видно из представленных данных, в поверхностной воде (5 м) около 70 % плутония находилось в восстановленной форме, на глубинах 50 – 90 м преобладала окисленная форма, но на 95 – 120 м и ниже практически весь плутоний переходил в восстановленную форму. Было показано, что плутоний в растворе находился преимущественно как Pu (VI), а на частицах – как Pu (III) и Pu (IV) [27]. Таким образом, окислительно-восстановительный потенциал среды может изменять соотношение Pu в растворе и на взвеси и влиять на его миграцию в водных слоях. Основываясь на натурных данных по глубинному распределению плутония, была сделана интегральная оценка поступления Pu, его запас в водном столбе до 1900 м в Чёрном море, который составил около 9 Бк/м<sup>2</sup> [27], т.е. меньше 10 % от запасов плутония, поступившего с глобальными выпадениями в широтном поясе 40 – 50° с.ш. [11]. Вероятно, низкое содержание плутония в столбе

воды в Чёрном море было обусловлено доминированием восстановленных форм плутония, что определяло его переход во взвешенную форму и, следовательно, более высокие скорости его переноса в глубинные слои воды со взвесью и, в конечном итоге, в донные отложения. Это привело к формированию более низких значений содержания плутония в водном столбе и более высоких значений седиментированного плутония в Чёрном море, в отличие от Средиземного моря или Атлантического океана, где 90 % и более общего содержания плутония находилось в водном столбе. При этом плутоний пребывал преимущественно (> 85 %) в окисленной форме и его запасы в столбе воды были оценены в 48 – 63 Бк/м<sup>2</sup> [17, 27, 33].

Если сравнивать экологическую ситуацию в Чёрном море в отношении радиоизотопов плутония с другими морскими и океаническими акваториями, то по содержанию  $^{239,240}\text{Pu}$

в поверхностных водах Чёрное море занимает промежуточное место, согласно оценкам МА-

ГАТЭ по состоянию на 01.01.2000 (табл. 3) [33].

Табл. 3 Содержание  $^{239,240}\text{Pu}$  в поверхностной морской воде в разных акваториях [33]  
Table 3  $^{239,240}\text{Pu}$  content in surface seawater in different areas [33]

| Название акватории                             | $^{239,240}\text{Pu}$ , мкБк/л<br>(среднее значение $\pm 1\sigma$ ) |
|--|---|
| Южный океан                                    | 1.0 $\pm$ 0.5   |
| Южная часть Атлантического океана              | 1.8 $\pm$ 0.6   |
| Аравийское море                                | 1.9 $\pm$ 1.2   |
| Центральная часть Атлантического океана        | 2.8 $\pm$ 1.3   |
| Южная часть Тихого океана                      | 2.8 $\pm$ 2.1   |
| Индийский океан                                | 3.0 $\pm$ 1.2   |
| Экваториальная часть Тихого океана             | 3.1 $\pm$ 0.7   |
| Северная часть Тихого океана                   | 3.3 $\pm$ 2.8   |
| Балтийское море                                | 3.4 $\pm$ 2.5   |
| Северная часть Атлантического океана           | 5 $\pm$ 3   |
| <b>Чёрное море</b>                             | <b>5.3 <math>\pm</math> 2.3</b>                                     |
| Арктика  | 6.4 $\pm$ 1.5   |
| Японское море                                  | 6.6 $\pm$ 2.5   |
| Английский канал                               | 13 $\pm$ 8  |
| Средиземное море                               | 14 $\pm$ 4  |
| Северное море                                  | 15 $\pm$ 10   |
| Баренцево море                                 | 20 $\pm$ 12   |
| Северная часть Северного Атлантического океана | 36 $\pm$ 16   |
| Ирландское море                                | 500 $\pm$ 400   |

Концентрация  $^{239,240}\text{Pu}$  в поверхностных водах Чёрного моря примерно в 2 – 5 раз выше, чем в таких относительно чистых районах, как акватории южного полушария: Южный океан, южная и центральная часть Атлантического океана, северная, экваториальная и южная части Тихого океана, а также выше, чем в отдельных морских бассейнах северного полушария: в Аравийском и Балтийском морях. В то же время содержание плутония в Чёрном море в поверхностных водах значительно ниже, чем в таких европейских морях, как Ирландское, Северное, Баренцево и Средиземное, которые подвержены интенсивному антропогенному воздействию.

Такая радиоэкологическая ситуация в разных океанических и морских акваториях определяется природными условиями, историей формирования и функционирования источников радиоактивного загрязнения среды, сос-

тавом радиоактивных выпадений и резидентным временем пребывания радиоизотопов в поверхностных водах, которое для  $^{239,240}\text{Pu}$  оценено для океанических вод в среднем в  $13 \pm 1$  год, что составляет практически половину от резидентного времени таких важных искусственных дозообразующих нуклидов, как  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  [33].

После поступления плутония в водную толщу в растворённой и во взвешенной формах происходит перераспределение радиоизотопов в абиогенных и биогенных компонентах морских экосистем. Одно из важнейших мест в этих процессах занимают донные отложения.

Основным депо ТУЭ как в пресноводных, так и морских экосистемах служат донные отложения. В Чёрном море их роль усиливается особыми редокс-условиями в море, которые способствуют более быстрому перераспределению ТУЭ в донные отложения [17, 27].

Восстановительные свойства и наличие сероводорода в глубинных черноморских водах обуславливают специфические условия в самих глубинных донных отложениях Чёрного моря, которые выражаются в практически полном отсутствии биотурбулентных процессов, которые присутствуют в большинстве других морей. Это делает черноморские донные отложения уникальным архивом информации об истории депонирования природных и антропогенных соединений [17], в том числе и ТУЭ. Проведенные исследования послыонного распределения ТУЭ в донных отложениях [2] свидетельствуют о том, что в период максимального поступления чернобыльских радионуклидов концентрация радиоизотопов ТУЭ достигала 523 мБк/кг  $^{239,240}\text{Pu}$ , 42 мБк/кг  $^{238}\text{Pu}$  и 193 мБк/кг  $^{241}\text{Am}$ . При этом максимальное поступление ТУЭ в северо-западную часть моря было приурочено к концу 80-х - началу 90-х годов XX века, что отражает транзитное время пере-

носа терригенных частиц – основного источника поступления ТУЭ с водосборных площадей в устьевые зоны [2, 28]. Затем концентрация ТУЭ в поверхностных слоях донных отложений уменьшилась за счет осаждения новых верхних слоёв донных отложений и заглубления наиболее загрязнённого слоя и со временем стабилизировалась, составив в конце 90-х годов величины порядка 170 мБк/кг  $^{239,240}\text{Pu}$ , 14 мБк/кг  $^{238}\text{Pu}$  и 100 мБк/кг  $^{241}\text{Am}$ . В целом, основываясь на исследованиях в центральной части моря, запас плутония, седиментировавшего в донные отложения, был оценен в 75 Бк/м<sup>2</sup> [27], тогда как в Средиземном – в 3 Бк/м<sup>2</sup> [33].

В самом Чёрном море, в зависимости от интенсивности чернобыльских выпадений и условий миграции плутония, к настоящему времени в донных отложениях, как прибрежных, так и открытых районов моря, сформировалось распределение плутония с определённой долей пятнистости (рис. 1) [9, 23, 30].

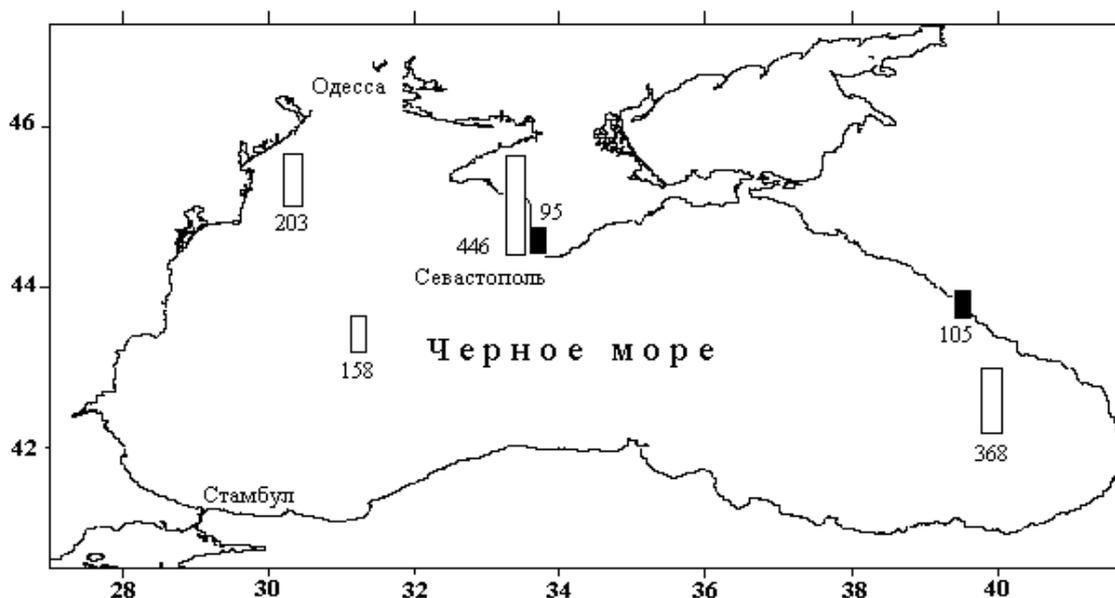


Рис. 1 Содержание  $^{239,240}\text{Pu}$  (мБк/кг сухой массы.) в донных отложениях Чёрного моря в 1998 – 2003 гг.:

□ - илы; ■ - песчаные донные отложения [2, 9, 23, 30]

Fig. 1 Contents of  $^{239,240}\text{Pu}$  (mBq/kg dry weight) in the bottom sediments of the Black Sea in 1998 – 2003:

□ - silt bottom sediments; ■ - sandy bottom sediments [2, 9, 23, 30]

На величину концентрации плутония в донных отложениях, наряду с другими условиями, влияет также состав самих осадков. Так, в осадках, богатых илами, наблюдали более высокие уровни содержания  $^{239,240}\text{Pu}$  и  $^{238}\text{Pu}$ , по сравнению с песчаными донными отложениями (рис. 1, 2). При исследовании донных отложений в севастопольских бухтах наиболее высокое содержание плутония наблюдали в Стрелецкой бухте, где были отобраны илистые осадки ( $^{239,240}\text{Pu}$  – 430 мБк/кг и  $^{238}\text{Pu}$  – 45

мБк/кг), по сравнению с Севастопольской (вход) и Казачьей бухтами, где пробы содержали значительную часть песчаных осадков, концентрации радионуклидов плутония в них составили для  $^{239,240}\text{Pu}$  от 86 до 110 мБк/кг и  $^{238}\text{Pu}$  – от 6 до 81 мБк/кг (рис. 2) [9, 30]. В настоящее время в Чёрном море средние концентрации  $^{239,240}\text{Pu}$  и  $^{238}\text{Pu}$  в верхних слоях донных отложений достигают соответственно нескольких сот и нескольких десятков мБк/кг.

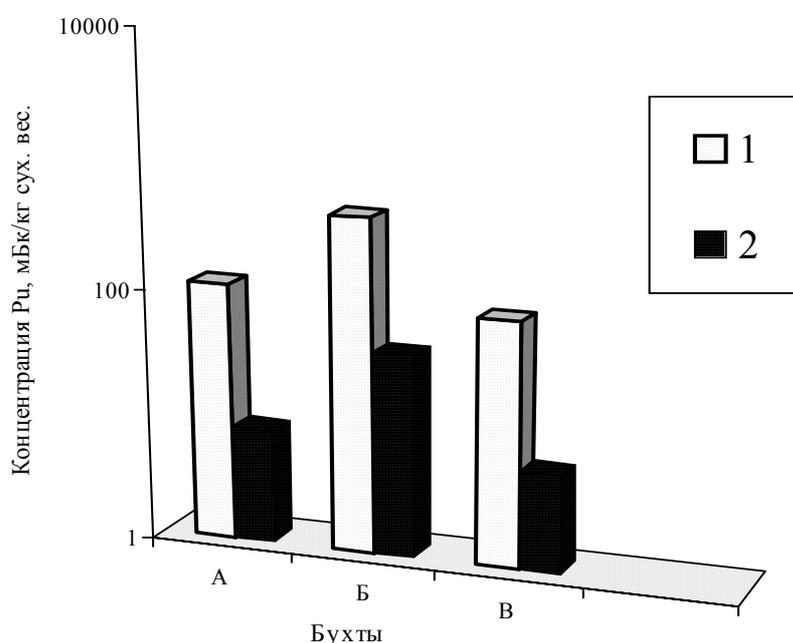


Рис. 2 Содержание  $^{239,240}\text{Pu}$  (мБк/кг сухой массы) в донных отложениях Севастопольских бухт: средние значения, где: 1 –  $^{239,240}\text{Pu}$ ; 2 –  $^{238}\text{Pu}$ ; А – Севастопольская бухта (вход); Б – Стрелецкая бухта; В – Казачья бухта [9, 30]

Fig. 2 Contents of  $^{239,240}\text{Pu}$  (mBq/kg dry weight) in bottom sediments of the Sevastopol Bays (mean values): 1 –  $^{239,240}\text{Pu}$ ; 2 –  $^{238}\text{Pu}$ ; А – Sevastopol Bay (entrance); Б – Streletskaia Bay; В – Kazachya Bay [9, 30]

Радиоактивное загрязнение трансурановыми элементами абиогенных компонентов черноморских экосистем привело к поступлению плутония и америция в биотические компоненты экосистемы Чёрного моря. Как показали результаты исследований, морские гидробионты, равно как и пресноводные, обладают высокой аккумулирующей способностью в отношении ТУЭ [10, 30], что проявляется в накоплении этих радионуклидов в концентрациях, значительно превышающих их концентрации в морской воде.

Так, в 1998 – 2003 гг. в Севастопольской акватории Чёрного моря содержание  $^{239,240}\text{Pu}$  в бурой водоросли цистозире *Cystoseira crinita* (Desf) Borg изменялось от 1.0 до 4.9 мБк/кг сырой массы [10, 30], что соответствовало результатам, полученным в этот же период в прибрежной зоне в северо-восточной части Чёрного моря, где в акваториях городов Сочи, Геленджик и Анапа содержание плутония в бурой водоросли *Cystoseira barbata* (Good. et Wood) достигало 6.4 – 13.6 мБк/кг сырой массы [23]. У зелёной водоросли *Ulva rigida* Ag. (ульва) из прибрежной акватории

Севастополя концентрация  $^{239, 240}\text{Pu}$  была равна 1.2 мБк/кг сырой массы.

Концентрация  $^{239, 240}\text{Pu}$  в двустворчатых моллюсках *Mytilus galloprovincialis* Lam. (мидии) у берегов Севастополя варьировала от 0.8 до 1.9 мБк/кг сырой массы [10, 30] а у берегов Сочи и Анапы – 1.5 – 2.4 мБк/кг сырой массы [23]. В шпроте *Sprattus sprattus phalericus* Risso, мерланге *Merlangius merlangus euxinus* Nordmann и ставриде *Trachurus mediterraneus ponticus* Aleev, отловленных в акватории г. Севастополя, концентрация плутония изменялась от 0.4 до 1.1 мБк/кг сырой массы [30]. Размах концентраций плутония, определённых в тех же видах рыб, отловленных у северо-восточных берегов Чёрного моря, был немного шире – от 0.3 до 1.8 мБк/кг [23].

Для количественной характеристики аккумулирующей способности различных компонентов экосистемы в отношении любого радионуклида используют коэффициент накопления –  $K_n$ . Среди изученных черноморских гидробионтов наиболее интенсивно плутоний накапливали бурые водоросли. У крымского побережья  $K_n$  плутония цистозирой изменялся от 330 до 1630, для ульвы равнялся 400, для двустворчатых моллюсков – 260 – 630 и для рыб – 130 – 270 ед. Для гидробионтов, отобранных у кавказского побережья, размахи  $K_n$  составляли 780 – 1490 ед. для бурых водорослей, 180 – 340 ед. для моллюсков и 40 – 1600 ед. для рыб. Усреднённые  $K_n$  плутония гидробионтами и донными отложениями Чёрного моря представлены на рис. 3 [10, 23, 30].

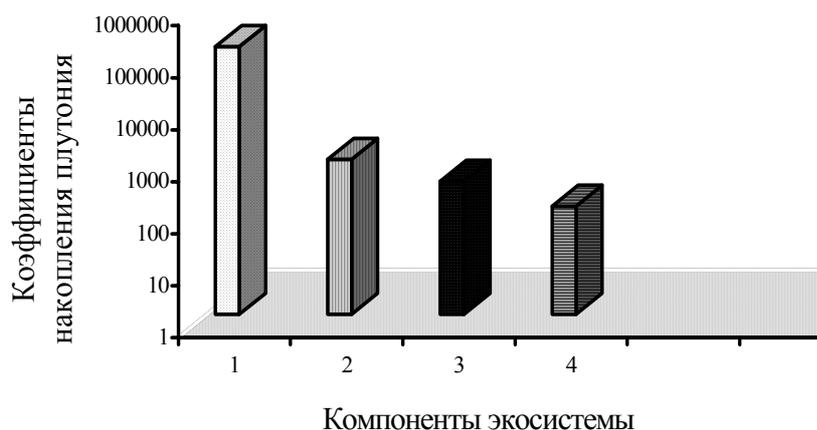


Рис. 3 Коэффициенты накопления  $^{239, 240}\text{Pu}$  абиотической и биотическими компонентами черноморских экосистем: 1 – илистые донные отложения; 2 – бурые многоклеточные водоросли; 3 – двустворчатые моллюски; 4 – рыбы [10, 30]  
Fig. 3  $^{239, 240}\text{Pu}$  concentration factors for abiotic and biogenic components of the Black Sea ecosystem: 1 – silty bottom sediments; 2 – brown multicellular algae; 3 – bivalves; 4 – fishes [10, 30]

Обладая значительной аккумулирующей способностью в отношении плутония, морские макрофиты, а также моллюски и, в меньшей степени, рыбы накапливают плутоний до более высоких уровней, по сравнению с его содержанием в воде, и способствуют увеличению потока плутония к высшим звеньям пищевых цепей, включая человека. Для наземных растений  $K_n$  плутония, при корневом поступлении элемента, - ниже единицы [11], и таким образом они выступают лимитирующим звеном в миграции этого элемента по тем пищевым цепям, в которые они включаются.

В Чёрном море  $K_n$  плутония гидробионтами ниже на порядок величин и более, чем для донных отложений (рис. 3), что указывает на ведущую роль донных отложений в депонировании плутония. Кроме того, незначительная массовая доля гидробионтов, по сравнению с массой абиогенных компонентов (вода и верхние слои донных отложений) экосистемы Чёрного моря, масса которых превышает массу биоты более, чем в миллион раз, обуславливает относительно небольшую роль морских организмов в биогеохимическом распределении плутония в биоген-

ных и абиогенных компонентах экосистемы Чёрного моря.

Сравнение уровней содержания плутония в черноморских гидробионтах с таковыми для водных организмов экосистем других морей показало, что морские организмы близких таксономических групп характеризуются сходными по значению  $K_n$  радиоизотопов плутония при разных уровнях их содержания в биогенных компонентах морских экосистем, что прежде всего обусловлено разным уровнем содержания плутония в водах этих морей. При наличии локальных неоднородностей в распределении плутония в пределах одного водоёма это обстоятельство также отражалось на содержании его изотопов в биоте. Например, если в Ирландском море был отмечен большой разброс значений концентраций плутония в воде ( $500 \pm 400$  мкБк/л) (табл. 3), то и содержание радиоизотопов в двустворчатых моллюсках *Mytilus edulis* (L.) варьировало от  $16 \pm 1$  до  $1050 \pm 40$  мБк/кг сухой массы для  $^{239,240}\text{Pu}$  и от  $0.9 \pm 0.3$  до  $205 \pm 9$  мБк/кг сухой массы для  $^{238}\text{Pu}$  [18, 19]. Превышение на два порядка концентраций изотопов плутония в воде Ирландского моря, с учетом неоднородности, обусловленной антропогенной деятельностью, привело к формированию и в гидробионтах концентраций плутония, на два порядка выше, чем в черноморских моллюсках. В Балтийском море, где средние концентрации плутония в воде незначительно отличаются от черноморских ( $3.4 \pm 2.5$  и  $5.3 \pm 2.3$  мкБк/л, соответственно) (табл. 3),  $K_n$  плутония для *M. edulis* равен  $400 \pm 170$  ед. [20], что соответствовало таковому для черноморских мидий ( $340 \pm 100$  ед.) [9, 23, 30]. У берегов Сирии содержание плутония в гидрофитах разных таксономических групп изменялось от  $41 \pm 17$  до  $83 \pm 12$  мБк/кг сырой массы, а в рыбах было на уровне  $17 \pm 4$  мБк/кг сырой массы, при средней концентрации плутония в поверхностных водах Средиземного моря  $14 \pm 4$  мкБк/л (табл. 3) [24]. У испанских берегов, в районах, подверженных влиянию стоков с АЭС, для ма-

крофитов  $K_n$  достигал  $5 \cdot 10^4$ , для моллюсков –  $3 \cdot 10^3$  [28]. По обобщенным данным для морей северной Европы,  $K_n$  плутония для рыб составлял около 40, для моллюсков – 3000 ед. [18]. Для гидробионтов Японского моря эти величины изменялись от 210 до 5300 ед. для макрофитов, от 100 до 760 ед. для двустворчатых моллюсков и от 5 до 50 ед. для рыб [34]. Несмотря на более широкий диапазон изменения абсолютных величин  $K_n$   $^{239,240}\text{Pu}$  для гидробионтов из разных морских акваторий, самые высокие коэффициенты накопления плутония характерны для макрофитов, самые низкие – для рыб.

Разная величина аккумулирующей способности гидробионтов различных таксономических групп в отношении плутония в итоге определяет соответствующие дозовые нагрузки на них. Величина дозы, формируемая в гидробионте инкорпорированными радиоактивными изотопами, в основном, определяется типом излучения ( $^{239}\text{Pu}$  и  $^{240}\text{Pu}$  – альфа-излучатели), его энергией (для альфа-частиц  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{240}\text{Pu}$  она равна 5.11 – 5.17 Мэв), концентрацией радионуклида в организме и величиной коэффициента качества (для  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{240}\text{Pu}$  равна 20). Длительные периоды полураспада  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{240}\text{Pu}$  обеспечивают постоянную дозовую нагрузку в течение всей жизни для многих поколений организмов и фактически внутреннее облучение от  $^{239,240}\text{Pu}$  можно рассматривать как хроническое. Расчёт мощностей поглощённых доз, формируемых альфа-излучением изотопов плутония в исследованных гидробионтах Чёрного моря, показал, что они варьировали от 0.008 до 0.354 мкГр/год. Мощности эквивалентных доз от изотопов плутония в черноморских гидробионтах изменялись от 0.16 до 7.08 мкЗв/год.

Сравнительный анализ оценок дозовых нагрузок на гидробионты от излучений альфа-частиц  $^{239,240}\text{Pu}$  и природного радионуклида  $^{210}\text{Po}$  [22], с уровнями безопасных для водных организмов доз, рекомендованными МАГАТЭ, показал, что годовые дозы от  $^{239,240}\text{Pu}$  ниже в  $10^3$  –  $10^4$  раз, чем от  $^{210}\text{Po}$ , и в  $10^6$  –  $10^7$  раз

ниже рекомендованных МАГАТЭ [21].

Таким образом, оставаясь на многие сотни лет регистрируемым экологическим антропогенным фактором, радиоизотопы плутония в Чёрном море при их современном содержании не оказывают повреждающего действия на биологические компоненты черноморских экосистем и, согласно радиоэкологической концептуальной модели зон различных мощностей доз хронического ионизирующего облучения [25], дозовые нагрузки от  $^{239,240}\text{Pu}$  в черноморских гидробионтах составляют величины, входящие в диапазон доз, относящихся к «зоне неопределённости».

**Закключение. 1.** Поступление плутония в черноморские воды в ранние сроки после чернобыльской аварии с радиоактивными выпадениями было зафиксировано практически на всей акватории Чёрного моря. Распределение плутония в поверхностной воде характеризовалось пятнистостью, а его концентрации составляли 50 % от суммарного уровня загрязнения, сформировавшегося в результате поступления плутония с глобальными и чернобыльскими радиоактивными выпадениями. Самые высокие концентрации плутония зафиксированы в районах поступления пресных вод с речным стоком и водами Северо-Крымского канала в северо-западной части моря, при этом в них преобладающая часть суммарного загрязнения плутонием была чернобыльского происхождения. **2.** Суммарное действие природных и антропогенных факторов привело к формированию в поверхностных водах Чёрного моря на современном этапе средней концентрации  $^{239,240}\text{Pu}$  порядка  $5.3 \text{ мкБк}\cdot\text{л}^{-1}$ , согласно которой это море по загрязнённости плутонием занимает промежуточное место среди морских и океанических акваторий. **3.** Особенности редокс-условий в толще черноморских вод способствуют переходу плутония во взвешенную форму, что, в свою очередь, определяет более высокую скорость переноса плутония из водной толщи в донные

отложения в Чёрном море, чем в окислительных океанических и морских водах, и обуславливает сравнительно более низкое содержание плутония в водной толще черноморских вод, по сравнению со Средиземным морем и водами Атлантики. Запас плутония в столбе воды Чёрного моря оценен примерно в  $9 \text{ Бк}/\text{м}^2$ , в Средиземном море –  $51\text{--}63 \text{ Бк}/\text{м}^2$ . **4.** В настоящее время в донных отложениях Чёрного моря средние концентрации  $^{239,240}\text{Pu}$  и  $^{238}\text{Pu}$  составляют соответственно  $n\cdot 10^2$  и  $n\cdot 10^1 \text{ мБк}/\text{кг}$ . Запас плутония, седиментировавшего в донные отложения, достигает  $75 \text{ Бк}/\text{м}^2$  (в Средиземном –  $3 \text{ Бк}/\text{м}^2$ ). В Чёрном море основная масса плутония локализуется в донных отложениях, в Средиземном – в водной толще, при этом суммарный запас плутония в Чёрном море оценен примерно в  $84 \text{ Бк}/\text{м}^2$ , в Средиземном –  $54\text{--}67 \text{ Бк}/\text{м}^2$ . **5.** Наибольшая аккумулирующая способность в отношении плутония среди изученных черноморских гидробионтов характерна для бурых водорослей со средним  $K_n = 990$  ед., промежуточные значения средних  $K_n$  у моллюсков (360 ед.), самые низкие  $K_n$  у рыб (120 ед.). Благодаря значительной аккумулирующей способности, черноморские гидробионты способствуют увеличению потока плутония к высшим звеньям пищевых цепей, включая человека. **6.** Сравнение  $K_n$  плутония в биотических и абиотических компонентах черноморских экосистем свидетельствует о лидирующей роли донных отложений в перераспределении плутония в экосистемах. Аккумулирующая способность донных отложений зависит от их состава: для песчаных отложений  $K_n$  на 1 – 2 порядка ниже, чем для илистых осадков. Кроме того, незначительная доля массы гидробионтов, по сравнению с массой абиогенных компонентов (вода и верхние слои донных отложений) экосистемы Чёрного моря, превышающей массу биоты более чем в миллион раз, обуславливает относительно небольшую роль гидробионтов в итоговом биогеохимическом распределении ТУЭ в биоген-

ных и абиогенных компонентах экосистемы Чёрного моря. Основным депо плутония в море служат донные отложения. 7. Мощности поглощённых доз от альфа-излучения плутония для черноморских гидробионтов изменялись от 0.008 до 0.354 мкГр/год, а мощности эквивалентных доз – от 0.16 до 7.08 мкЗв/год. Сформировавшиеся в черноморских гидробионтах уровни годовых доз от  $^{239,240}\text{Pu}$  были в  $10^3$ – $10^4$  раз ниже, чем от  $^{210}\text{Po}$ , и в  $10^6$ – $10^7$  раз

ниже, чем уровень доз, рекомендованный МАГАТЭ в качестве предела доз, не оказывающих отрицательного влияния на популяции водных организмов. Согласно радиэкологической концептуальной модели зон различных мощностей доз хронического ионизирующего облучения, уровни дозовых нагрузок от  $^{239,240}\text{Pu}$  в черноморских гидробионтах относятся к «зоне неопределённости».

1. Воробьев Г. В., Дмитриев А. М., Дьяков А. С. и др. Плутоний в России. Экология, экономика, политика. Независимый анализ. - Москва, 1994. - 141 с.
2. Гулин С. Б., Поликарпов Г. Г., Егоров В. Н. и др. Геохронологическая оценка радиоактивного загрязнения Чёрного моря / Чтения памяти Н. В. Тимофеева-Ресовского: 100-летию со дня рождения Н. В. Тимофеева-Ресовского посвящается. - Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. - С. 88 - 99.
3. Коротков А. А. Депонирование трансуранов в живых и косных компонентах водоемов ближней зоны ЧАЭС, Каховском водохранилище и Северо-Крымском канале // Радиэкология: успехи и перспективы. Матер. Междунар. семинара (Севастополь, 4 - 7 октября 1994 г.). - Севастополь, 1996. - С. 170 - 176.
4. Нормы радиационной безопасности Украины (НРБУ-97) Государственные гигиенические нормативы. - Киев, 1998. - 135 с.
5. Павлоцкая Ф. И., Горяченкова Т. Н., Федорова З. М. и др. Методика определения плутония в почве // Радиохимия. - 1984. - 26, № 4. - С. 260 - 267.
6. Плехов В. С. Содержание америция-241 в природных водах и методы его определения: Обзор. - Москва: ЦНИИАтоминформ, 1993. - Вып. 1(6). - 31 с.
7. Поликарпов Г.Г., Ааркрос А. Источники радиоактивного загрязнения окружающей среды в России, Украине, Казахстане // Радиационная биология. Радиэкология. - 1993. - 33, Вып. 1. - С. 15 - 24.
8. Пути миграции искусственных радионуклидов в окружающей среде. Радиэкология после Чернобыля / Под ред. Ф. Уорнера и Р. Харрисона. - Москва: Мир, 1999. - 511 с.
9. Терещенко Н.Н. Радионуклиды плутония в компонентах прибрежных черноморских экосистем в акватории Севастополя // Наук. зап. – Сер. биология. - 2005. – № 4 (27). – С. 243 – 247.
10. Терещенко Н.Н. Аккумуляция изотопов плутония гидробионтами Чёрного моря // V съезд по радиационным исследованиям (радиобиология, радиэкология, радиационная безопасность) (Москва, 10 - 14 апреля 2006 г.). - Москва, 2006. - II. - (Секции VI - IXA). - С. 48.
11. Трансурановые элементы в окружающей среде / Под ред. Хэнсона У. С. - Москва: Энергоатомиздат, 1985. - 343 с.
12. Чернобыль: радиоактивное загрязнение природных сред / Под ред. Израэля Ю. А. - Л.: Гидрометеиздат, 1990. - 296 с.
13. Чернобыльская катастрофа / Под ред. Барьяхтара В. Г. - Киев: Наукова думка, 1995. - 559 с.
14. Aarkrog A., Dahlgaard H, Foulquier L. et al. On the Variation of Radionuclide Ratios in Chernobyl Debris // Proc. of Seminar on Comparative Assessment of the Environmental Impact of Radionuclides Released during Three Major Nuclear Accidents: Kystym, Windccale, Chernobyl (Luxembourg, Oktober 1 - 5, 1990): Book of Reports. - Luxembourg: IUR, 1991. - 2. - P. 507 - 519.
15. Amiro B. D. Radiobiological dose conversion factors for generic non-human biota used for screening potential ecological impacts // J. Environ. Radioactivity, 1997. - 33, N 1. - P. 37 - 51.
16. Blaylock B. G., Frank M. I., O'Neal B. R. Methodology for estimating radiation dose rates to freshwater biota exposed to radionuclides in the environment // Report ES/ER/TM-78 Oak Ridge Nation. Lab., TN. - 1993. - 10 p.
17. Buesseler K.O., Livingston H.D. Natural and Man-Made Radionuclides in the Black Sea // Radionuclides in the Oceans. Input and Inventories. - France: Editions de Physique, 1996. - P. 201 - 217.
18. Charles D., Jones M., Cooper J. R. Radiological impact on EC Member States of routine discharges into North European water – Report of Working

- Group IV of CEC Project MARINA. NRPB Report, NRPB-M172, Chilton, Didcot, 1990. – 174 p.
19. Crowley M., Mitchell P. I., O'Grady J. et al. Radiocaesium and plutonium concentrations in *Mytilus edulis* (L.) and Potential dose implications for Irish critical groups // Ocean and Shoreline Management. – 1990, **13**. – P. 149 – 161.
  20. Dahlgard H. Effects of season and temperature on long-term *in situ* loss rates of Pu, Am, Np, Eu, Ce, Ag, Tc, Zn, Co and Mn in a Baltic *Mytilus edulis* population // Mar. Ecol. Prog. Ser., 1986. – **33**. – P. 157 – 165.
  21. Effects of ionizing radiation on plants and animals at levels implied by current radiation protection standards / IAEA Technical report. – Series N 332: International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 1992. – 79 p.
  22. Lazorenko G. E., Tereshchenko N. N. Doses to the Black Sea hydrobionts from natural occurring radionuclide  $^{210}\text{Po}$  and anthropogenic radionuclides of plutonium / The 35<sup>th</sup> Annual Meeting of the European Radiation Research Society and the 4<sup>th</sup> Annual Meeting of the Ukrainian Society for Radiation Biology (Kyiv, 22<sup>nd</sup> to 25<sup>th</sup> August, 2006): Programme and Abstr. – Kyiv, 2006. – P. 195 – 196.
  23. Marine Environmental Assessment of the Black Sea: Working Material.- Austria. - Vienna: Produced by IAEA, 2004. – 358 p.
  24. Othman I., Yassine T., Bhat LS. The measurement of some radionuclides in the marine coastal environment of Syria // Radiological Impact Assessment in the Southeastern Mediterranean Area / Ed. Vosniakos F. K., Cigna A. A., Foster P. et al. - Thessaloniki, 2000. – II. – P. 379 – 384.
  25. Polikarpov G. G. Conceptual model of responses of organisms, populations and ecosystems in all possible dose rates of ionizing radiation in the environment // RADOС 96-97, Norwich/L;westoft, 8-11 April, 1997. Radiation Protection Dosimetry. – 1998. – **75**, N 1-4. – P. 181 – 185.
  26. Polikarpov G. G., Kulebakina L. G., Timoshchuk V. I. et al. - Radionuclides migration in the Dnepr River Cascade, the Dnepr-Bug Estuary and the Black Sea shallow-waters // Biogeochemical Pathways of Artificial Radionuclides: SCOPE-RADPATH, 12 - 20 April, 1991. – RE.40.91 - 1991. – P. 16.
  27. Sanchez A., Sanchez A. Z., Gastaud J. et al. Plutonium oxidation states in the southwestern Black Sea: evidence regarding the origin of the cold intermediate layer // Deep Sea Research, 1991. – **38**. – Suppl. 2. – P. 845 – 853.
  28. Sanchez-Cabeza J. A., Molero J. Plutonium, americium and radiocaesium in the marine environment close to the Vandellos I nuclear power plant before decommissioning // J. Environ. Radioactivity. – 2000. – **51**. – P. 211 – 228.
  29. Talvitie N. A. Radiochemical Determination of Plutonium in Environmental and Biological Samples by Ion Exchange // Analytical Chemistry. - 1991. – **43**, N. 13. - P. 1827 - 1830.
  30. Tereshchenko N. N. Plutonium in biogenic and abiogenic components of the Black Sea coastal ecosystems // Modern problems of aquatic toxicology. Intern. Workshop in commemoration of Dr. Prof. Boris A. Flerov (Sept. 20-24, 2005). – Borok, 2005. – P. 135.
  31. Thomas P., Liber K. An estimation of radiation doses to benthic invertebrates from sediments collected near a Canadian uranium mine // J. Environmental International. – 2001. – **27**. – P. 341. – 353.
  32. Whicker F. W., Schultz V. Radioecology: Nuclear Energy and the Environment. CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida, 1982. - I. - 212 p.
  33. Worldwide Marine Radioactivity Studies (WOMARS). Radionuclide Levels in Oceans and Seas. – Austria: IAEA, 2005. – 187 p.
  34. Yamada M., Aono T., Hirano S.  $^{239+240}\text{Pu}$  and  $^{137}\text{Cs}$  concentrations in fish, cephalopods, crustaceans, shellfish and algae collected around the Japanese coast in the early 1990s // The Science of the Total Environment, 1999. – **239**. – P. 131 – 142.

Поступила 02 ноября 2006 г.

**Радіоекологічна ситуація в Чорному морі у відношенні плутонію: рівні забруднення компонентів екосистеми та дозові навантаження на біоту.** Н. М. Терещенко, Г. Г. Полікарпов, Г. С. Лазоренко. Викладено результати багаторічних досліджень радіоекологічної ситуації в Чорному морі у відношенні до плутонію в період після чорнобильської аварії. Приведено рівні вмісту радіоіотопів плутонію ( $^{238,239,240}\text{Pu}$ ) у воді, донних відкладах, багатоклітинних водоростях, двостулкових молюсках і рибах. Визначено коефіцієнти накопичення плутонію чорноморськими донними відкладами та гідробіонтами, оцінено дозові навантаження на чорноморських гідробіонтів від альфа-випромінювання радіоіотопів плутонію.

**Ключові слова:** радіоактивне забруднення плутонієм, коефіцієнти накопичення, дозові навантаження, Чорне море

**Radioecological situation in the Black Sea with respect to plutonium: levels of contamination of the ecosystem's components and dose rates for biota. N. N. Tereshchenko, G. G. Polikarpov, G. E. Lazorenko.** The results of long-term investigation of radioecological situation in the Black Sea with respect to plutonium in the post-Chernobyl accident period are presented. Levels of content of plutonium radioisotopes ( $^{238,239,240}\text{Pu}$ ) were measured in seawater, bottom sediments, multicellular algae, bivalves and fishes. Concentration factors of plutonium for the Black Sea bottom sediments and hydrobionts were determined. Dose commitments from alpha-radiation of plutonium radioisotopes on the Black Sea hydrobionts were estimated.

**Key words:** radioactive contamination with plutonium, concentration factors, dose commitments, Black Sea