

УДК 577.34:581.526.3

*Е. Н. Волкова, В. В. Беляев, С. П. Пришляк,
А. А. Пархоменко*

**ОЦЕНКА МОЩНОСТИ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ
ИЗЛУЧЕНИЯ ^{137}Cs ВОЗДУШНО-ВОДНЫМИ
РАСТЕНИЯМИ В ОЛИГОТРОФНОМ И
ЭВТРОФНОМ ВОДОЕМАХ**

Предложены методические подходы для расчета мощности поглощенной воздушно-водными растениями дозы облучения с учетом неоднородности среды обитания и ослабления γ -излучения водными массами. Показано, что дозовые нагрузки на организм растений, обусловленные излучением ^{137}Cs , в 3—7 раз выше, чем только надземных органов. Мощность поглощенной дозы корней воздушно-водных растений исследованных водоемов была в 1,5—2 раза выше, чем корневищ, и в 6—10 раз выше, чем надземных органов. Вклад внешнего облучения в мощность общей поглощенной дозы составлял 76—90%.

Ключевые слова: ^{137}Cs , мощность поглощенной дозы излучения, воздушно-водные растения

Известно, что ионизирующее излучение провоцирует радиобиологические эффекты, функционально зависящие от поглощенной организмом дозы [2, 6]. Поэтому при исследованиях последствий радионуклидного загрязнения водных экосистем очень важен корректный расчет поглощенной гидробионтами дозы. Существующая в настоящее время система нормирования радиационного фактора ориентирована прежде всего на человека, поэтому и методы расчета поглощенной дозы разрабатывались с учетом особенностей среды обитания и строения организма человека [3]. Намного меньше внимания уделяли определению дозовых нагрузок на биоту, в том числе на организмы, населяющие пресноводные водоемы, в частности на высшие водные растения.

Органы воздушно-водных растений не только существенно отличаются линейными размерами, но и располагаются в средах различной плотности и удельной активности радионуклидов — воде, воздухе и донных отложениях. Соответственно, условия облучения подземных, подводных и расположенных в воздушной среде органов кардинально отличаются. К настоящему времени разработаны методы расчета дозы излучения на погруженные растения, где в качестве референтного вида принята уруть колосистая, описываемая эллипсоидом вращения с малыми осями 1 и 2 мм [9, 10]. Согласно упомянутым руководствам принято, что все органы растений находятся в

© Е. Н. Волкова, В. В. Беляев, С. П. Пришляк, А. А. Пархоменко, 2019

однородно загрязненной среде и не отличаются удельной активностью и линейными размерами, а в объеме растения реализуется примерно третья часть энергии β -излучения ^{137}Cs . Более общий подход к расчету дозовых нагрузок внутреннего облучения воздушно-водных растений приведен в публикации МКРЗ 108 [11]. Предлагается рассчитывать реализующуюся долю энергии β -излучения инкорпорированных радионуклидов в зависимости от линейных размеров организма. Однако в существующих методах расчета дозовых нагрузок на гидробионтов не учитывается неоднородность среды обитания и ослабление γ -излучения водными массами.

Проведенные ранее исследования показали, что закономерности распределения ^{137}Cs по компонентам водоемов разного типа и трофического статуса несколько отличаются [1], что также может повлиять на формирование дозы излучения надземных и подземных органов высших водных растений. Поэтому цель работы — разработать методические подходы к вычислению дозы излучения воздушно-водных растений с учетом неоднородности среды обитания и ослабления γ -излучения водными массами, оценить уровни мощности дозы излучения, формируемой ^{137}Cs , у растений из водоемов разного трофического статуса.

Материал и методика исследований. Для расчетов дозы внешнего и внутреннего облучения растений использованы результаты исследований, выполненных в 2012—2014 гг. на водоемах разного типа и трофического статуса — Киевском водохранилище (эвтрофный водоем) и оз. Белом, расположенном на территории Владимирецкого р-на Ровенской обл. (непроточный олиготрофный водоем). В Киевском водохранилище пробы отбирали на мелководьях в районе с. Страхолесье, в озере — на мелководьях по всему периметру.

Объектами исследований были представители группы воздушно-водных растений, доминирующие по биомассе на мелководных участках исследуемых водоемов: рогоз узколистный — *Typha angustifolia* L. и тростник обыкновенный — *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.

Надземную массу растений определяли общепринятым в гидробиологии методом учетных площадок [4], подземную — методом мелких монолитов [8], модифицированным для работы на неосушаемых мелководьях. С площади рамок трубкой известной площади отбирали не менее пяти кернов донных отложений глубиной 30 см. Выбор глубины отбора кернов обусловлен тем, что в этом слое расположена основная часть корневищ и грунтовых корней исследуемых видов растений [7]. Из кернов выделяли корневища и грунтовые корни и определяли их массу с последующим пересчетом на единицу площади фитоценозов. Результаты представлены на воздушно-сухую массу.

В связи с тем, что в экосистеме оз. Белого воздушно-водные растения развиваются на песчаных донных отложениях, для корректного сравнения особенностей формирования дозы облучения растений исследуемых видов в водоемах разного типа использованы данные о радиоактивном загрязне-

нии донных отложений и растений на мелководьях Киевского водохранилища с таким же типом донных отложений.

Удельную активность ^{137}Cs в донных отложениях (Бк/кг сухой массы) и растениях (Бк/кг воздушно-сухой массы) определяли общепринятыми γ -спектрометрическими методами [4].

Разработка методов расчета поглощенной дозы воздушно-водными растениями. Органы воздушно-водных растений располагаются в трех средах с разной плотностью и удельной (объемной) активностью радионуклидов, соответственно различным будет и уровень радиационного воздействия. Таким образом, для корректного расчета общей дозы облучения растения необходимо рассматривать облучение отдельных его органов, находящихся в одинаковых условиях.

Дозу внутреннего облучения рассчитывали по формуле:

$$D = \sum \sum C_{ij} Kd_i g_{ij} W_j t, \quad i = 1, n; j = 1, l$$

где D_i — доза внутреннего облучения для i -го радионуклида; C_{ij} — концентрация i -го радионуклида в j -м органе при естественной влажности; Kd_i — дозовый коэффициент, энергия выделяемая при распаде i -го радионуклида за единицу времени; g_{ij} — часть энергии распада i -го радионуклида, реализуемая в объеме j -го органа; W_j — относительная масса j -го органа; t — время; n — количество радионуклидов; l — количество органов.

Так же, как в [9—11], мы приняли, что в объеме водных растений не реализуется γ -излучение инкорпорированных радионуклидов. При расчете энергии, передаваемой β -частицей веществу, необходимо учитывать множество факторов: непрерывность и форму β -спектра радионуклида, изменение и потери энергии по длине пробега и др. Также необходимо отметить, что максимальный пробег β -частиц определенной энергии — величина условная (теоретическая). Для расчета энергии β -излучения, реализуемой в объеме организма, мы использовали длину пробега (R_0), на которой поглощается 90% энергии β -излучения радионуклида, составляющую для β -излучения ^{137}Cs 0,087 см [5]. При расчетах мы приняли, что во внешнюю среду может излучаться 0,5 энергии β -распада радионуклида, сосредоточенного только во внешнем слое толщиной R_0 . Расчеты показали, что для цилиндра с высотой во много десятков раз больше радиуса (r), при $r = 1,5R_0$ в организме реализуется примерно 70% энергии β -распада инкорпорированного радионуклида, при $r = 5R_0$ — 99%. У тростника обыкновенного и рогоза узколистного диаметры стебля и корневищ превышают 0,5 см, поэтому можно считать, что β -излучение инкорпорированного ^{137}Cs полностью реализуется в этих органах. Диаметр грунтовых корней, по нашим данным, составляет от долей миллиметра до 3—4 мм, и, как и в [9, 10], мы приняли, что в органах такого диаметра реализуется третья часть энергии β -распада инкорпорированного ^{137}Cs .

Дозу внешнего γ -облучения растений от донных отложений рассчитывали по формуле:

$$D_k = z_k \sum C_{(i)} K_{d(l,k)} t, \quad i = 1, n,$$

где: $C_{(i)}$ — концентрация i -го радионуклида в донных отложениях, Бк/кг естественной влажности; z_k — геометрический коэффициент, учитывающий условия облучения; $z_k = 1$ для подземных органов (тканей), $z_k = 0,5$ для надземных органов; $K_{d(l,k)}$ — дозовый коэффициент i -го радионуклида k -ткани, (Гр/сут)/(Бк/кг); t — время, сут.

Для надземных органов также учитывали поглощение ионизирующего излучения водными массами, для чего надземную часть растения условно разбивали на участки, в пределах которых ослабление гамма-излучения донных отложений принималось одинаковым, относительную массу этих участков рассчитывали в представлении растения в виде цилиндра. Узлы разбиения выбирали по универсальным таблицам ослабления гамма-излучения [3]. При расчетах внешней дозы на растение учитывали относительную массу j -го органа. Считали, что мощность дозы для грунтовых корней от β -излучающих радионуклидов донных отложений соответствует мощности дозы в среде. Объемная активность ^{137}Cs в воздухе в сотни раз меньше, чем в водных массах, а удельная активность ^{137}Cs в водных массах в десятки-сотни раз меньше, чем в донных отложениях, поэтому вклад в дозу внешнего облучения растений воздушными и водными массами не учитывали.

Мощность поглощенной дозы определяли для растений высотой 250 см при условиях произрастания на глубине 50 см. Дозовые величины рассчитывали на массу при естественной влажности.

Выражения «доза» или «мощность дозы» в рамках данной статьи — сокращенное название «поглощенной дозы излучения» или «мощности поглощенной дозы излучения».

Результаты исследований и их обсуждение

Для расчета дозовых нагрузок определили продукционные характеристики надземных и подземных органов растений, а также удельную активность ^{137}Cs в этих органах (табл. 1, 2).

Можно отметить, что надземная масса растений из Киевского водохранилища была примерно в три раза выше, чем величины, полученные нами для соответствующих видов из озера, что объясняется различным трофическим статусом исследуемых водоемов. Так, в монозарослях рогоза узколистного количество стеблей на 1 м^2 на исследуемых участках Киевского водохранилища составляло 116—172, в оз. Белом — 24—36.

Исследования особенностей формирования радиоактивного загрязнения надземных и подземных органов растений показали, что в Киевском водохранилище удельная активность ^{137}Cs в надземных органах и корневищах достоверно не отличалась, а в грунтовых корнях была в 10—17 раз больше. В оз. Белом, где уровень накопления ^{137}Cs растениями значительно выше, отмечена такая же тенденция. Удельная активность ^{137}Cs в песках на террито-

1. Распределение фитомассы воздушно-водных растений, г/м²

Органы	Тростник обыкновенный		Рогоз узколистый	
	Киевское водохранилище	оз. Белое	Киевское водохранилище	оз. Белое
Надземные	1100 ± 220	355 ± 57	1523 ± 258	414 ± 62
Корневища	1444 ± 216	1000 ± 160	603 ± 109	980 ± 176
Корни	481 ± 87	82 ± 12	169 ± 29	494 ± 74

2. Удельная активность ¹³⁷Cs в надземных и подземных органах воздушно-водных растений, Бк/кг

Органы	Тростник обыкновенный		Рогоз узколистый	
	Киевское водохранилище	оз. Белое	Киевское водохранилище	оз. Белое
Надземные	28 ± 6	139 ± 32	8 ± 2	66 ± 13
Корневища	39 ± 7	107 ± 21	15 ± 3	82 ± 16
Корни	308 ± 61	3410 ± 511	139 ± 28	627 ± 93

рии исследуемых фитоценозов Киевского водохранилища в среднем составляла 27 ± 6 Бк/кг, оз. Белого — 130 ± 21 Бк/кг.

На основании приведенных продукционных характеристик и линейных размеров надземных и подземных органов воздушно-водных растений, данных о содержании ¹³⁷Cs в их надземных и подземных органах, а также об удельной активности радионуклида в донных отложениях на территориях фитоценозов рассчитали дозовые нагрузки на надземные и подземные органы (табл. 3) и определили вклад внешнего облучения в общую дозу (табл. 4).

Анализ полученных результатов показал, что мощность дозы облучения растений Киевского водохранилища была в 6—10 раз ниже, чем соответствующих видов из оз. Белого, что обусловлено высокой удельной активностью растений и донных отложений озера.

Установлено, что суммарная мощность дозы облучения корней растений исследованных водоемов была в 1,5—2 раза выше, чем корневищ, и в 6—10 раз выше, чем надземных органов. Общая суммарная мощность дозы на все растение в 3—7 раз выше, чем только на надземные органы, что обусловлено значительным вкладом подземных органов в формирование общей дозы. Вклад внешнего облучения в мощность общей суммарной дозы составлял 76—90%.

Значительная часть общей поглощенной дозы организма воздушно-водного растения формируется корневой системой. При этом необходимо отметить, что в олиготрофном и эвтрофном водоемах высокая дозовая нагрузка на растительные организмы может быть сформирована влиянием разных факторов. У исследованных видов растений из олиготрофного водоема от-

3. Мощность поглощенной дозы излучения ^{137}Cs у растений, нГр/сут

Органы	Рогоз узколистый		Тростник обыкновенный	
	внутреннее	внешнее	внутреннее	внешнее
Киевское водохранилище				
Надземные	8,62	27,8	32,2	27,8
Корневища	17,2	211	44,8	211
Корни	47,8	304	106	304
Общая*	13,8	96,3	49,9	159
Оз. Белое				
Надземные	75,9	134	159	134
Корневища	93,1	1020	124	1020
Корни	216	1680	1170	1460
Общая	121	941	192	826

* Мощность дозы от внутреннего и внешнего облучения растения с учетом биомассы надземных органов, корневищ и корней.

4. Вклад внешней составляющей в облучение растений Киевского водохранилища (а) и оз. Белого (б) от ^{137}Cs , %

Органы	Тростник обыкновенный		Рогоз узколистый	
	Киевское водохранилище	оз. Белое	Киевское водохранилище	оз. Белое
Надземные	54	45	81	64
Корневища	82	89	93	92
Корни	74	56	86	87
Общая доза	76	81	87	90

носительная подземная фитомасса больше, чем из эвтрофного, и, соответственно, значительнее ее вклад в формирование общей дозы. В то же время у тростника обыкновенного из олиготрофного водоема относительная корневая доза в значительной степени сформирована внутренним облучением при небольшой относительной фитомассе корней, а в эвтрофном — относительная корневая доза в основном формируется за счет большей относительной фитомассы корней.

Заключение

Показано, что уровни дозовых нагрузок на воздушно-водные растения зависят не только от удельной активности ^{137}Cs в надземных и подземных органах, но и от их продукционных характеристик, линейных размеров и удельной активности радионуклида в донных отложениях на территориях фитоценозов. Кроме того,

при расчетах необходимо учитывать неоднородность среды обитания воздушно-водных растений и ослабление γ -излучения водными массами.

На примере представителей группы воздушно-водных растений — тростника обыкновенного и рогоза узколистного, отобранных на мелководьях Киевского водохранилища (проточный эвтрофный водоем) и озера Белого (непроточный олиготрофный водоем) рассчитали дозовые нагрузки на надземные и подземные органы растений и определили вклад внешнего облучения в общую дозу.

Вне зависимости от уровня загрязнения компонентов экосистемы ^{137}Cs и ее трофического статуса на песчанистых донных отложениях дозовые нагрузки воздушно-водных растений формируются схожим образом.

Установлено, что дозовые нагрузки на растения исследованных видов, обусловленные излучением ^{137}Cs , в эвтрофном и олиготрофном водоемах на 76—90% сформированы внешним облучением радионуклида, сосредоточенного в донных отложениях. Мощность дозы облучения всего растения в несколько раз выше, чем только надземных органов, поэтому для корректной оценки дозы облучения воздушно-водных растений необходимо учитывать особенности облучения подземных органов.

**

Запропоновано методичні підходи до визначення потужності поглиненої дози випромінювання повітряно-водними рослинами з урахуванням неоднорідності середовища існування і ослаблення γ -випромінювання водними масами. Показано, що дозові навантаження на організм рослин, які обумовлені випромінюванням ^{137}Cs , у 3—7 разів вищі, ніж тільки їхніх надземних органів. Потужність поглиненої коренями повітряно-водних рослин дози у досліджених водоймах була у 1,5—2 рази вища, ніж кореневищами, і у 6—10 разів вища, ніж надземними органами. Внесок зовнішнього опромінення до потужності загальної поглиненої дози становив 76—90%.

**

Methodical approaches to the calculation of the absorbed radiation dose rate of helophytes are proposed taking into account the inhomogeneity of the habitat and the weakening of the γ -radiation by the water masses. It is shown that the dose loads on the plant organism caused by ^{137}Cs radiation are 3—7 times higher than only on the above-ground organs. The absorbed dose rate of the roots of helophytes of the investigated reservoirs was 1,5—2 times higher than the rhizomes, and 6—10 times higher than that of the above-ground organs. The contribution external irradiation to the total absorbed dose was 76—90%.

**

1. Волкова О.М., Беляєв В.В., Пархоменко О.О., Пришляк С.П. Параметри розподілу радіонуклідів у водоймах різного трофічного статусу // Природа Західного Полісся та прилеглих територій: зб. наук. пр. / За заг. ред. Ф. В. Зузук. — Луцьк: Східноєвроп. нац. ун-т, 2014. — № 11. — С. 127—132.
2. Грозинський Д.М. Радіобіологія: Підручник. — 2-ге вид. — К.: Либідь, 2001. — 448 с.

3. Козлов В. Ф. Справочник по радиационной безопасности. — 3-е изд., пераб. и доп. — М.: Энергоатомизда, 1987. — 192 с.
4. *Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод* / За ред. В. Д. Романенка. — К.: ЛОГОС, 2006. — 408 с.
5. Немец О.Ф., Гофман Ю.В. Справочник по ядерной физике. — Киев: Наук. думка, 1975. — С. 36—78.
6. *Основы сельскохозяйственной радиологии*. — 2-е изд. переработ. и доп. — Киев: Урожай, 1991. — 472 с.
7. *Растительность и бактериальное население Днепра и его водохранилищ*. — Киев: Наук. думка, 1989. — 232 с.
8. Сагчигов А. П., Кугряшов М. А. Экология прибрежно-водной растительности (учебное пособие для студентов вузов). — М.: НИА-Природа, РЭФИА, 2004. — 220 с.
9. *Handbook for assessment of the exposure of biota to ionising radiation from radionuclides in the environment* / Ed. By J. Brown, P. Strand, Al. Hosseini. — Project within the EC 5th Framework Programme, Contract № FIGE-CT-2000-00102. — Framework for Assessment of Environmental Impact, 2003.
10. *ERICA Assessment Tool 1.0*. The integrated approach seeks to combine exposure/dose/effect assessment with risk characterization and managerial considerations (Version November 2012) (<http://www.ERICA-tool.com>).
11. *Environmental Protection: the Concept and Use of Reference Animals and Plants*. ICRP Publication 108. — 2008.