

УДК 577.34:581.526.3

Е. Н. Волкова, В. В. Беляев, С. П. Пришляк

**НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ  
ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ВОЗДУШНО-ВОДНЫХ  
РАСТЕНИЙ**

Изучены особенности формирования мощности поглощенной дозы *Typha angustifolia* L. и *Glyceria maxima* (С. Gartm.) от излучения  $^{137}\text{Cs}$ . Установлена зависимость между мощностью поглощенной дозы и глубиной произрастания растений. Интенсивность облучения корней *Glyceria maxima* в 4—7 раз выше, чем надземных органов, *Typha angustifolia* — в 9—32 раза. Вклад надземных органов *Glyceria maxima* в формирование мощности общей поглощенной дозы составляет 25—59%, *Typha angustifolia* — 8—12%, корней исследованных видов — 19—48%. Вклад внутреннего облучения в формирование мощности поглощенной дозы *Typha angustifolia* не превышал 15%.

**Ключевые слова:** воздушно-водные растения, ионизирующее излучение, мощность поглощенной дозы, подземные и надземные органы,  $^{137}\text{Cs}$ .

Внешнее облучение живых организмов формируется радионуклидами, сосредоточенными в объектах среды обитания, поэтому основными источниками облучения гидробионтов являются водные массы и донные отложения [6]. Известно, что ионизирующая радиация провоцирует радиобиологические эффекты, которые функционально зависят от поглощенной в организме дозы. Для правильной интерпретации наблюдаемых в естественных условиях радиационно-индуцированных эффектов ключевое значение имеет корректный расчет поглощенной дозы. Ранее проведенные исследования показали, что в формировании дозы облучения водных растений значительную роль играет излучение радионуклидов, сосредоточенных в донных отложениях [1], при этом в большинстве водных экосистем наблюдается неравномерное загрязнение дна на разных глубинах и различная концентрация радиоактивных изотопов в донных отложениях разного типа. Поэтому целью работы было определение особенностей формирования мощности поглощенной дозы воздушно-водных растений, произрастающих на разных глубинах и субстратах.

**Материал и методика исследований.** Расчеты выполнены на основании проведенных в 2011—2014 гг. исследований содержания  $^{137}\text{Cs}$  в водных массах, донных отложениях, надземных и подземных органах рогоза узколистного *Typha angustifolia* L. и манника большого *Glyceria maxima* (С. Gartm.), отобранных на правобережных мелководьях верхней части Киевского водо-

© Е. Н. Волкова, В. В. Беляев, С. П. Пришляк, 2017

хранилища (с. Страхолесье). Используются литературные данные [3] о соотношении надземной и подземной биомассы растений на разных глубинах и субстратах.

Для перехода от удельной активности к мощности дозы использовали дозовые коэффициенты [5]. Коэффициент, учитывающий, какая часть энергии  $\beta$ -частиц реализуется в  $j$ -том органе растения, устанавливали с учетом максимального пробега этих частиц в биологической ткани. Ослабление гамма-излучения рассчитывали по универсальным таблицам [2]. Мощность дозы, создаваемой гамма-излучением донных отложений в надземных органах растений, определяли послойно, т. е. надземную фитомассу условно разделяли на слои, расположенные на отрезке от глубины  $h_i$  до глубины  $h_{i+1}$ . Приняли, что мощность дозы внешнего облучения каждого из слоев однородна, при этом дозу внешнего облучения для каждого слоя рассчитывали с учетом ослабления излучения водными массами и относительного веса слоя, с последующим суммированием. Узлы разбиения слоев ( $h_i$ ) выбирали по универсальным таблицам [2], кратность ослабления для слоя принимали равной среднему значению на краях слоя (в узлах разбиения). Так, в водных массах гамма-излучение  $^{137}\text{Cs}$ , сосредоточенного в донных отложениях, для слоя растительности на удалении до 21 см от дна уменьшается в 1,2 раза, на расстоянии 70—76 см от дна — в 25 раз. Расчеты мощности дозы проведены для периода пика вегетации.

С учетом линейных размеров органов растений мощность общей дозы ( $P$ ) их внутреннего облучения определяли по формуле

$$P = \sum \sum C_{ij} K(\beta)_i g_j W_j = \sum P_j W_j \quad i = 1, n; j = 1, k,$$

где  $C_{ij}$  — концентрация  $i$ -го радионуклида в  $j$ -том органе, Бк/кг естественной влажности;  $K(\beta)_i$  — дозовый коэффициент  $i$ -го радионуклида ( $\alpha$ - и  $\beta$ -излучение), (Гр/сут)/(Бк/кг);  $g_j$  — коэффициент, учитывающий, какая часть энергии  $\beta$ -частиц реализуется в  $j$ -том органе;  $W_j$  — относительная масса  $j$ -го органа;  $P_j$  — мощность поглощенной дозы в  $j$ -м органе;  $n$  — количество радионуклидов;  $k$  — количество органов растений с разными линейными размерами.

Выражения «доза» или «мощность дозы» в рамках данной статьи — сокращенное название соответственно «поглощенной дозы» или «мощности поглощенной дозы», «суммарная доза» — доза, формируемая за счет внешнего и внутреннего облучения, «общая суммарная доза» — доза облучения надземных и подземных органов растений от всех источников облучения с учетом их относительной массы.

### **Результаты исследований и их обсуждение**

Водные растения располагаются в трех средах — грунте, воде и воздухе, поэтому дозу их внешнего облучения с учетом размеров отдельных органов необходимо рассчитывать для отдельных однородно загрязненных сред — от наиболее глубоко расположенной корневой системы до вершины растения. Учитывая то, что объемная и удельная активность радионуклидов в

**1. Содержание  $^{137}\text{Cs}$  в надземных органах (а), корневищах (б) и корнях (в) растений полигонного участка Киевского водохранилища**

Виды	Содержание $^{137}\text{Cs}$					
	Бк/кг сухой массы			Бк/кг естественной влажности		
	а	б	в	а	б	в
Манник большой	30	36	270	10	12	90
Рогоз узколистный	6	18	204	2	6	68

грунтах, воде и воздухе различается на несколько порядков, можно пренебречь дозой, формирующейся в среде с их меньшей концентрацией.

Внешнее облучение органов и тканей растений формируется  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучением. Если размеры растений во много раз превышают максимальный пробег заряженных частиц, дозой внешнего облучения от этих частиц можно пренебречь.

Радионуклидное загрязнение гидробионтов Киевского водохранилища сформировано преимущественно  $^{137}\text{Cs}$  [4], поэтому излучение именно этого радионуклида учитывали при вычислении дозовых нагрузок на органы и ткани растений.

Установлено, что в водных массах Киевского водохранилища объемная активность растворенного и сорбированного на взвесьях  $^{137}\text{Cs}$  не превышала 0,1 Бк/л, в слое песчаных донных отложений полигонного участка, где расположены корни растений, его концентрация составляла 27 Бк/кг естественной влажности, илистых — 311 Бк/кг. Содержание  $^{137}\text{Cs}$  в органах и тканях растений приведено в таблице 1. Его удельная активность в органах растений, развивающихся на разных глубинах и субстратах, в пределах полигонных фитоценозов достоверно не различалась.

Высота стеблей рогоза на полигонном участке составляла 2 м над уровнем воды, манника — 0,7 м. При расчетах использовали данные [3] (табл. 2—4), характеризующие массовые соотношения надземных и подземных органов растений на разных глубинах и субстратах.

Дозой, формирующейся за счет излучения радионуклидов водных масс и воздуха, можно пренебречь, поскольку объемная активность  $^{137}\text{Cs}$  в воде меньше, чем в донных отложениях, более чем в 500 раз, в воздухе — в десятки и сотни тысяч раз.

Мощность дозы на подземные органы рассчитывали в приближении бесконечного облака, на надземные — полубесконечного облака. Дозовые нагрузки рассчитывали с допущением равновесного состояния корней растений с донными отложениями по  $\beta$ -излучению.

С учетом приведенных выше условий определена мощность поглощенной суммарной (внутренней и внешней) дозы в зависимости от глубины

## 2. Масса надземных и подземных органов манника большого на разных глубинах [3]

Глубина, см	Масса, г			Корневая система, % подземной массы	
	общая	надземная	подземная	корневища	корни
20	869	439	430	45,8	54,2
30	2295	1355	941	45,6	14,4
40	1648	1105	543	49,7	50,3
50	986	776	210	40,4	59,6
65	919	749	70	28,9	25,1
75	630	526	104	23,4	76,5

## 3. Надземная и подземная масса рогоза узколистного на разных глубинах [3]

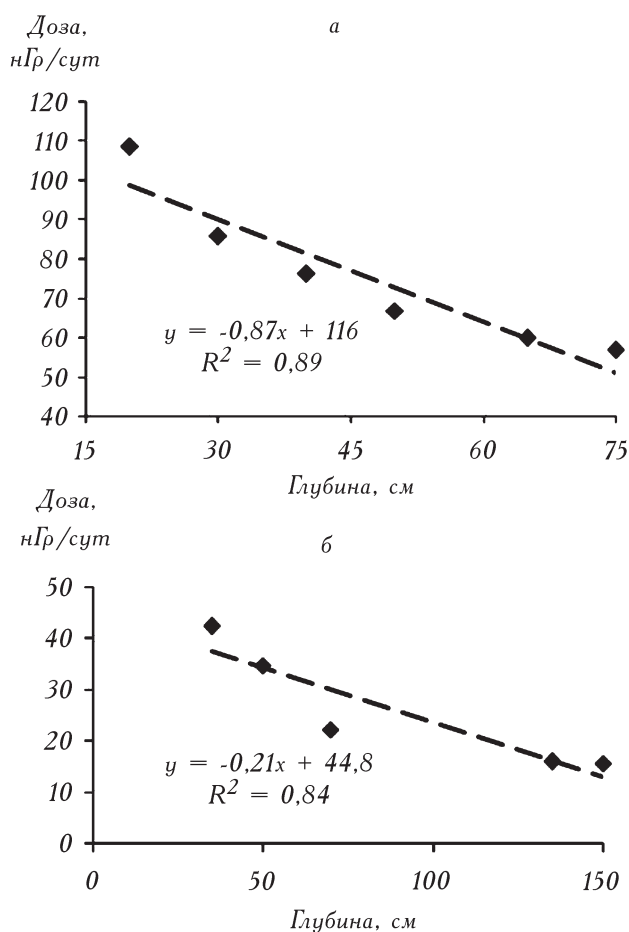
Глубина, см	Масса, г			Корневая система, % подземной массы	
	общая	надземная	подземная	корневища	корни
35	3153	1081	2073	73,7	26,1
50	4508	1650	2861	71,7	28,1
70	1994	859	1135	64,7	35,2
135	1246	789	457	57,6	38,4
150	948	680	268	55,2	44,6

## 4. Масса надземных и подземных органов рогоза узколистного на разных субстратах [3]

Глубина см	Тип донных отложений	Масса, г			Корневая система, % подземной массы	
		общая	надземная	подземная	корневища	корни
70	Песок	1994	859	1135	64,7	35,2
135	Ил глинистый	1246	789	457	57,6	38,4

произрастания растений для случая расположения фитоценозов на равномерно загрязненных  $^{137}\text{Cs}$  песках (открытые мелководья Киевского водохранилища). Установлено, что мощность облучения надземных органов манника и рогоза зависит от глубины произрастания (рис. 1). Так, мощность дозы для надземных органов манника на глубине 0,2 м составляла 108, на глубине 0,75 м — 57 нГр/сут, рогоза узколистного — на глубине 0,35 м — 42, на глубине 1,5 м — 16 нГр/сут.

Очевидно, что в условиях равномерного радионуклидного загрязнения песков мощность дозы в подземных органах растений не зависит от глубины их произрастания. На исследованных участках мощность облучения кор-

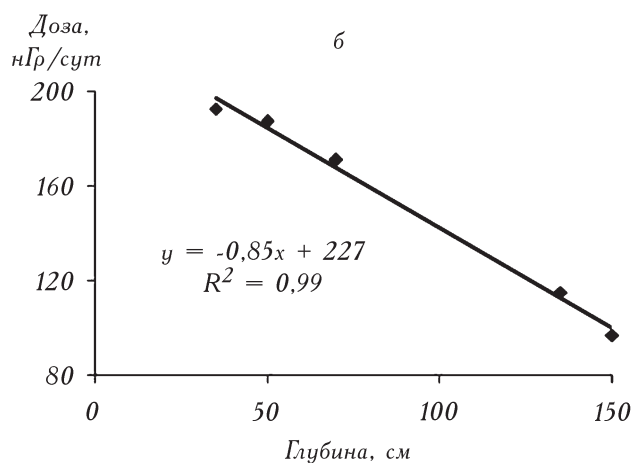
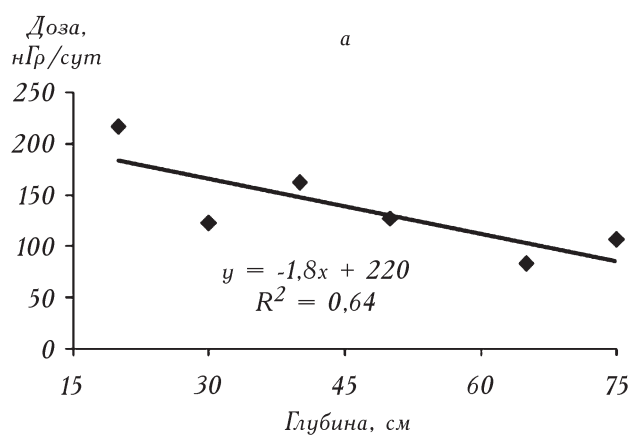


1. Мощность суммарной дозы в надземных органах манника большого (а) и рогоза узколистного (б) на разных глубинах открытых мелководий Киевского водохранилища.

ней манника составляла 397, корневищ — 252 нГр/сут, рогоза — соответственно 304 и 232 нГр/сут. Таким образом, с учетом дозы в подземных органах и их относительной массы (см. табл. 2—3), можно определить мощность общей суммарной дозы (рис. 2).

Мощность общей суммарной дозы облучения манника большого приблизительно в два раза выше, чем его надземных органов, рогоза узколистного — в четыре — шесть раз. При этом с глубиной мощность общей суммарной дозы уменьшается в два — четыре раза интенсивнее, чем мощность дозы в надземных органах. Последнее объясняется различиями относительной массы надземных органов этих видов на разных глубинах (см. табл. 2, 3, формулу).

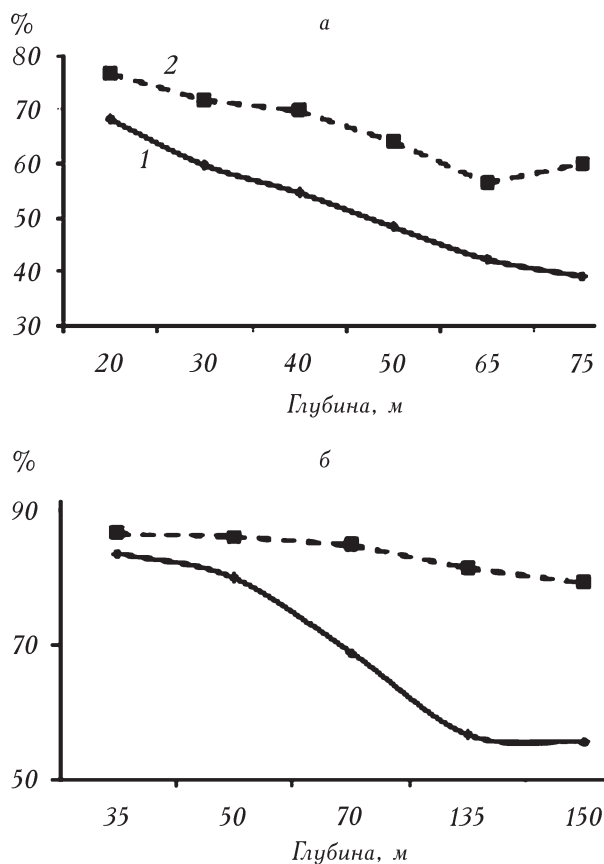
Ослабление  $\gamma$ -излучения донных отложений водными массами приводит к уменьшению вклада внешней составляющей в суммарную дозу надземных



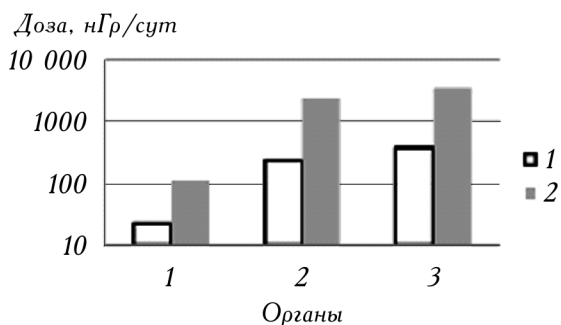
2. Мощность общей суммарной дозы для манника большого (а) и рогоза узколистного (б) на разных глубинах открытых мелководий Киевского водохранилища.

органов и общую суммарную дозу. Вклад внешнего облучения надземных органов манника с глубиной уменьшался на 43%, целого растения — на 26%, рогоза — соответственно на 34 и 8,5% (рис. 3). Более значимый вклад внешней составляющей в общую суммарную дозу обусловлен интенсивным облучением корневой системы.

С целью определения влияния типа донных отложений на формирование дозы в растениях рассмотрим два случая: первый — растения развиваются на глубине 70 см, субстрат — песок, второй — глубина 135 см, субстрат — ил. При таких условиях суммарная мощность дозы в надземных органах рогоза составляет на песках 22, на илах — 110 нГр/сут. Значительно выше мощность дозы в подземных органах на песках и илах: в корневищах — соответственно 232 и 2400, корнях — 374 и 3570 нГр/сут (рис. 4). Очевидно, что это происходит за счет увеличения удельной активности донных отложений от песков к илам, однако в том же направлении уменьшается относительная масса подземных органов (см. табл. 4) и, соответственно, ее вклад в общую



3. Вклад излучения депонированного в донных отложениях  $^{137}\text{Cs}$  в суммарную мощность дозы манника большого (а) и рогоза узколистного (б) на открытых мелководьях Киевского водохранилища: 1 — надземные органы; 2 — целое растение.



4. Мощность суммарной дозы в надземных органах (1), корневищах (2) и корнях (3) рогоза узколистного на разных субстратах.

суммарную дозу. На полигонном участке также зарегистрировано уменьшение подземной биомассы при переходе от песков к илам. Так, на песчаном субстрате (глубина до 1 м) подземная биомасса составляла  $0,63 \pm 0,25$ , на илистом (глубина 1—1,3 м) —  $0,14 \pm 0,06$  кг/м<sup>2</sup> воздушно-сухой массы.

С учетом относительной массы наземных и подземных органов определили мощность общей суммарной дозы, которая для растущих на песках растений составила 171 нГр/сут, на илах — 1100 нГр/сут, т. е. была в шесть раз выше, в то время как удельная

активность илов была в 11,5 раза выше, чем песков. Таким образом, при расчетах поглощенной дозы в укорененных водных растениях, произрастающих на разных глубинах или субстратах, необходимо учитывать не только изменение удельной активности донных отложений, но и соотношение массы надземных и подземных органов.

Расчеты показали, что вклад внутреннего облучения в формирование мощности общей суммарной дозы рогоза узколистного не превышал 15% на песках и 2% — на илах.

### Заключение

На примере манника большого и рогоза узколистного, растущих на разных глубинах и субстратах мелководий Киевского водохранилища, рассмотрены особенности формирования мощности общей поглощенной дозы, создаваемой излучением  $^{137}\text{Cs}$  в воздушно-водных растениях. На песчаных участках с безградиентной плотностью загрязнения донных отложений  $\gamma$ -излучающими радионуклидами мощность дозы в надземных органах и мощность общей поглощенной дозы линейно уменьшаются с увеличением глубины. На таких участках у манника большого общая суммарная мощность дозы в два раза выше мощности дозы, формирующейся в надземных органах, у рогоза узколистного — в четыре — шесть раз. Уменьшение дозовых нагрузок на растения с глубиной обусловлено, с одной стороны, ослаблением  $\gamma$ -излучения донных отложений водными массами, с другой — уменьшением относительной массы подземных органов, т. е. разная общая суммарная доза в растениях, произрастающих на различных глубинах или субстратах, зависит не только от удельной активности донных отложений, но и от массовых соотношений надземных и подземных органов. Так, на полигонном участке удельная активность  $^{137}\text{Cs}$ , рассчитанная на естественную влажность песков и илов, различается в 11 раз, а мощность общей суммарной дозы в рогозе узколистом — в 6 раз.

Установлено, что мощность облучения корней манника большого в 4—7 раз выше, чем его надземных органов, рогоза узколистного — в 9—32 раза. Последнее обусловлено тем, что надземные органы в меньшей степени подвержены  $\gamma$ -излучению радионуклидов донных отложений, а в формирование дозы облучения корней значительный вклад вносит  $\beta$ -излучение. Вклад надземных органов манника большого в формирование общей суммарной дозы составляет 25—59%, рогоза узколистного — 7,5—11,5%, корней исследованных видов — 19—48%, тогда как относительная биомасса корней — лишь 6—27%. Вклад внутреннего облучения в формирование мощности общей суммарной дозы рогоза узколистного не превышал 15% на песках и 2% — на илах. Общая поглощенная доза укорененных водных растений, рассчитанная без учета облучения радионуклидами донных отложений, может быть занижена в 50 раз.

\*\*

*Вивчено особливості формування потужності поглинутої дози *Typha angustifolia* L. та *Glyceria maxima* (C. Gartm.) від випромінювання  $^{137}\text{Cs}$ . Встановлено залежність між потужністю поглинутої дози та глибиною росту рослин. Потужність опромінення коренів *Glyceria maxima* у 4—7 разів вища, ніж надземних органів, *Typha angustifolia* — у 9—32 рази. Внесок надземних органів *Glyceria maxima* у*



формування потужності загальної дози становить 25—59%, *Typha angustifolia* — 8—12%, коренів досліджених видів — 19—48%. Внесок внутрішнього опромінення у формування потужності загальної поглинутої дози *Typha angustifolia* не перевищував 15%.

\*\*

*The formation of absorbed dose rate in *Typha angustifolia* L. and *Glyceria maxima* (C. Gartm.) from radiation <sup>137</sup>Cs was studied. The dependence between absorbed dose rate and the depth of plant growth was found. Dose rate in roots of *Glyceria maxima* 4—7 times higher than that in above-ground organs, in roots of *Typha angustifolia* — 9—32 times higher. The share of the above-ground organs of *Glyceria maxima* in forming of dose rate is 25—59%, *Typha angustifolia* — 8—12%, the roots of the considered species — 19—48%. The contribution of the external exposure in the forming of total dose rate in *Typha angustifolia* does not exceed 15%.*

\*\*

1. Беляєв В. В. Формування дози опромінення очерету звичайного за умов водойми-охолоджувача ЧАЕС // Наук. зап. Терноп. пед. ун-ту. Сер. Біологія. Спец. випуск: Гідробіологія. — 2010 — № 2. — С. 20—23.
2. Козлов В.Ф. Справочник по радиационной безопасности. — М.: Атомиздат, 1977. — 384 с.
3. Лукина Л. Ф., Смирнова Н. Н. Физиология высших водных растений — Киев: Наук. думка, 1988. — 188 с.
4. *Радіонукліди у водних екосистемах України.* — К.: Чорнобильінтерінформ, 2001. — 318 с.
5. Савинский А. К., Попов В. И., Кулямин В. А. Спектры ЛПЭ и коэффициент качества инкорпорированных радионуклидов: Справочник. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 144 с.
6. *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.