

ВИДОВЫЕ ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ПРИРОДНОГО УРАНА РАСТЕНИЯМИ ПОДРОСТА И ЖИВОГО НАПОЧВЕННОГО ПОКРОВА СОСНОВЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ МИНСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ¹

В работе приведены экспериментальные данные по содержанию природного урана в вегетативных органах подростка и растений-доминантов живого напочвенного покрова основных типов сосновых лесов центральной части Беларуси. Наибольшее содержание урана в растениях *Betula pendula* Roth отмечается в древесине и коре, наименьшее – в листьях. У кустарничков *Calluna vulgaris* (L.) Hill, *Vaccinium myrtillus* L., *Vaccinium vitis-idaea* L. уран накапливается преимущественно в подземных частях растений, содержание его в корнях в среднем в 2,5 раза превышает концентрацию в надземных органах. Мхи (*Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. и *Dicranum polysetum* Sw.) и лишайник *Cladonia sylvatica* (L.) Hoffm. по сравнению с надземными частями сосудистых растений накапливают уран в больших количествах. Выявлены особенности аккумуляции урана различными видами растений, произрастающими в сопоставимых и разных экологических условиях.

Введение. До настоящего времени аккумуляция и распределение тяжелых естественных радионуклидов (ТЕРН) – изотопов урана, тория и радия и др. – в растениях и почвах природных экосистем, несмотря на значительный интерес к этой проблеме, изучены недостаточно. В научной литературе имеются ограниченные данные о количественных характеристиках содержания природного урана в почвах и его накоплении в органах и структурных частях растений – представителей разных систематических групп, произрастающих в различных эдафо-фитоценологических условиях при фоновом содержании урана в почвах [1-3]. Между тем изучение закономерностей аккумуляции растениями ТЕРН позволяет полнее раскрыть важную проблему их поступления в растения, способствует выяснению их участия в биологическом круговороте веществ, а также разработке принципов экологического нормирования содержания естественных радионуклидов в компонентах природных экосистем.

¹ Работа выполнена в Институте экспериментальной ботаники им. В.Ф. Купревича НАНБ под руководством член-корр. НАНБ Б.И. Якушева.

Значительный интерес для решения ряда задач биологии, фитоценологии, экологии и других наук представляет исследование специфичности аккумуляции природных изотопов урана различными видами растений. Природный уран является одним из важнейших долгоживущих ТЕРН Земли и представлен тремя естественными изотопами – ^{238}U , ^{235}U и ^{234}U . Все они имеют большой (до 4,5 млрд лет) период полураспада. Их относительное содержание в природном U составляет, соответственно, 99,28; 0,71 и 0,006 % [3]. Поэтому, определяя уран в биологических объектах, допустимо говорить только об изотопе ^{238}U . В то же время, исследований аккумуляции U различными видами растений, прежде всего, доминантами природных фитоценозов в связи с условиями их произрастания и содержания данного элемента в почвах в Беларуси не проводилось.

Цель данной работы состоит в изучении биологической подвижности природного урана в условиях различных типов сосновых биогеоценозов и видовых особенностей его аккумуляции в надземных и подземных органах древесных, кустарничковых растений, мхов и лишайников, произрастающих в различных эдафо-фитоценологических условиях.

Объекты и методы исследования. Объектами исследования являлись почвы и растения основных типов сосновых лесов центральной части Беларуси – лишайникового, мшистого и черничного. В каждом типе леса были заложены постоянные пробные площади (по три в каждом типе). Отбор образцов почвенно-растительного покрова (в 3-х повторностях) проводился во второй половине августа 2003 г. Почвенный покров района исследования представлен дерново-подзолистыми слабоподзоленными связнопесчаными почвами, развивающимися преимущественно на флювиогляциальных песках. В пониженных элементах рельефа, в слабодренированных условиях, развиты перегнойно-подзолисто-глеевые легкосуглинистые почвы. Растительный материал представлен доминирующими видами из подроста и живого напочвенного покрова. У древесных пород на анализ брали листья, ветви, кору, древесину и корни; кустарнички разделяли на надземную часть и корни, отбирали также образцы мхов и лишайников. Объекты исследования отличаются не только по почвенно-гидрологическим условиям произрастания, но и видовому составу живого напочвенного покрова, подлеска и подроста, а также составом и продуктивностью древесного яруса. Возраст сосняков – III и IV классы, полнота – 0,7, бонитет древостоев – I–II классов.

Образцы почв и растений тщательно очищали от механических примесей, а затем высушивали до абсолютно сухого состояния, измельчали и озоляли (прокаливали) при t 450–500 °С. Содержание урана в пробах определяли по методике А.Н. Несмеянова [4], адаптированной для анализа биологических объектов, с использованием ионообменной смолы – анионита АВ-17 с последующим спектрофотометрированием в присутствии реактива 1 – (пиридил-2-азо) – резорцина (ПАР). Оптическую плотность измеряли на фотометре КФК–3 при $\lambda=510$ нм. Чувствительность определения урана в растворах составляет 0,02 мкг/мл.

Характеристика почв района исследования. Автоморфные дерново-подзолистые слабоподзоленные связнопесчаные почвы, развивающиеся на песке связном, подстилаемом песком рыхлым, сосняков вересково-лишайникового и мшистого кислые ($\text{pH}_{\text{ккл}}$ 3,0–5,1), гидролитическая кислотность высокая в лесной подстилке, а затем убывает вниз по профилю (от 51,8 до 0,53 мг-экв/100 г почвы и от 67,4 до 0,74 мг-экв/100 г почвы соответственно). В среднем содержание гумуса по почвенному профилю варьирует в пределах 0,4–2,1% – в сосняке вересково-лишайниковом и 0,3–2,4% – в сосняке мшистом. Количество обменных оснований снижается вниз по профилю от 19,1 до 0,4 мг-экв/100 г почвы и

от 10,5 до 0,3 мг-экв/100 г. почвы соответственно. Показатели трофности данного типа почвы, согласно Б.И. Якушеву [5], в единицах ГАП по генетическим горизонтам низкие (<10 единиц), за исключением лесной подстилки, что свидетельствует о бедности этих почв элементами минерального питания.

Полугидроморфные перегнойно-подзолисто-глеевые легкосуглинистые почвы, развивающиеся на легком суглинке, супеси и песке связном, черничного типа леса кислые ($\text{pH}_{\text{KCl}} 2,9-4,4$), степень насыщенности основаниями составляет 4,7–17,7%. Гидролитическая кислотность высокая в лесной подстилке – 112,3 мг-экв/100 г почвы и снижается вниз по профилю от 97,4 до 14,7 мг-экв/100 г почвы. Значения подвижных форм P_2O_5 и K_2O колеблются в пределах 11,3–1,67/37,0–2,47 мг/100 г почвы соответственно. Полугидроморфные почвы характеризуются достаточно высоким содержанием органического вещества в верхней части профиля (86–94% – величина потери при прокаливании), а также значительными показателями трофности почвы (величина ГАП в аккумулятивном горизонте равна 61 единице). В лесных подстилках почв (A_0) для всех трех типов леса отмечены наибольшие значения ГАП, что указывает на высокую концентрацию элементов питания в опаде.

Результаты и их обсуждение. Данные, характеризующие распределение урана в почвах различных типов сосновых насаждений, приведены в табл. 1. Из таблицы следует, что наибольшее содержание урана на всех пробных площадях (в сосняке вересково-лишайниковом, мшистом и черничном) отмечено в подстилке, как в пересчете на сухую, так и прокаленную почву: 1,66 и 8,04; 1,47 и 6,88; 1,91 и 32,3 · 10⁻⁴ %. Кроме того, прослеживается повышенная концентрация урана в верхних частях профиля исследуемых почв, что свидетельствует о биогенной аккумуляции урана в изученных почвах.

В наибольшей концентрации уран обнаружен в перегнойно-подзолисто-глеевых почвах, развивающихся на легком суглинке, супеси и песке связном, сосняка черничного (см. табл. 1). Среднее содержание в них урана составляет 1,22 · 10⁻⁴ % при колебании от 1,91 · 10⁻⁴ до 0,82 · 10⁻⁴ % (на сухую почву) и от 32,27 · 10⁻⁴ до 0,83 · 10⁻⁴ % (на прокаленную почву). По профилю этих почв наблюдаются относительно повышенные концентрации урана в верхних горизонтах, что объясняется обогащением этих горизонтов органическим веществом, которое накапливается в почве при перегнивании растительных остатков.

Дерново-подзолистые слабоподзоленные связнопесчаные почвы района исследования имеют более низкие концентрации урана. В дерново-подзолистых почвах содержание урана изменяется в интервале от 1,66 · 10⁻⁴ до 0,68 · 10⁻⁴ % (сосняк вересково-лишайниковый) и от 1,47 · 10⁻⁴ до 0,56 · 10⁻⁴ % (сосняк мшистый) при среднем 1,03 · 10⁻⁴ и 1,09 · 10⁻⁴ % соответственно. В автоморфных почвах распределение урана по профилям неравномерное и относится к элювиально-иллювиальному типу с выносом из горизонта A_1 и аккумуляцией в горизонте В. Такое распределение элемента по профилю рассматриваемых почв является отражением элювиально-иллювиальных процессов.

При сопоставлении данных по содержанию урана в дерново-подзолистых слабоподзоленных связнопесчаных и перегнойно-подзолисто-глеевых легкосуглинистых почвах можно отметить, что первые сравнительно обеднены ураном, что объясняется их более легким гранулометрическим составом. Тем не менее, распределение урана по почвенному профилю исследуемых почв однотипно-повышенное в верхних его горизонтах.

В результате проведенных исследований были получены данные по содержанию урана в вегетативных органах и структурах подроста – *Betula pendula* Roth и растений-доминантов живого напочвенного покрова сосновых фитоцено-

Таблица 1

Содержание урана в почвах различных типов сосновых насаждений

Генетические горизонты	Глубина образца, см	Содержание урана в % ($\cdot 10^{-4}$)*			
		на абсолютно сухую почву		на прокаленную почву	
		$M \pm m$	σ	$M \pm m$	σ
Сосняк вересково-лишайниковый (ППП 1, 2, 3)					
Почва – дерново-подзолистая слабоподзоленная связнопесчаная, развивающаяся на песке связном, подстилаемом песком рыхлым					
A ₀	0–3	1,66±0,12	0,29	8,04±1,09	2,67
A ₁ A ₂	3–14	0,81±0,14	0,35	0,83±0,14	0,35
B ₁	14–33	1,44±0,16	0,40	1,45±0,17	0,41
B ₂	33–53	1,04±0,15	0,38	1,04±0,16	0,38
B ₂	53–73	0,77±0,06	0,16	0,77±0,06	0,16
B ₂	73–93	0,81±0,11	0,26	0,81±0,11	0,26
C	93–113	0,68±0,07	0,17	0,68±0,07	0,17
Сосняк мшистый (ППП 4, 5, 6)					
Почва – дерново-подзолистая слабоподзоленная связнопесчаная, развивающаяся на песке связном, подстилаемом песком рыхлым с прослойками ортзанд					
A ₀	0–3	1,47±0,16	0,40	6,88±1,59	3,89
A ₁	3–14	1,07±0,11	0,28	1,10±0,12	0,29
A ₂ B ₁	14–33	1,40±0,24	0,59	1,42±0,24	0,59
B ₂	33–53	1,25±0,11	0,26	1,25±0,11	0,26
B ₂	53–73	1,10±0,13	0,32	1,11±0,13	0,32
B ₂	73–93	0,80±0,05	0,12	0,81±0,05	0,12
C	93–113	0,56±0,06	0,15	0,56±0,06	0,15
Сосняк черничный (ППП 7, 8, 9)					
Почва – перегнойно-подзолисто-глеевая легкосуглинистая, развивающаяся на легком суглинке, супеси и песке связном					
A ₀	0–7	1,91±0,06	0,15	32,3±1,40	3,42
A ₁ A ₂	7–27	1,62±0,20	0,49	11,7±1,02	2,51
B _{1g}	27–47	1,17±0,12	0,29	13,3±0,70	1,73
B _{1g}	47–67	1,00±0,26	0,64	2,05±0,74	1,81
B _{2g}	67–87	0,82±0,08	0,19	0,83±0,08	0,19
Cg	87–113	0,83±0,08	0,20	0,84±0,08	0,20

* Повторность определений 6 - кратная ($n = 6$).

зов: кустарничков *Calluna vulgaris* (L.) Hill, *Vaccinium myrtillus* L., *Vaccinium vitis-idaea* L.; мхов *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt., *Dicranum polysetum* Sw., *Sphagnum angustifolium* C. Jens., *Sph. capillifolium* Hedw., *Sph. magellanicum* Brid.; лишайника *Cladonia sylvatica* (L.) Hoffm., произрастающих в сопоставимых и различных эдафо-фитоценологических условиях (табл. 2).

Таблица 2

Содержание природного урана в растениях подроста и живого напочвенного покрова сосновых фитоценозов

Вид растения		Содержание в золе ($\cdot 10^{-4}$ %)*	Содержание в абс. сух. в-ве ($\cdot 10^{-5}$ %)*
		$M \pm m$	$M \pm m$
Сосняк вересково-лишайниковый (ППП 1, 2, 3)			
<i>Calluna vulgaris</i> (L.) Hill	надземная часть	12,9±1,71	3,0±0,43
	корни	57,7±2,29	5,46±0,21
<i>Pleurozium schreberi</i> (Brid.) Mitt.		23,7±2,54	9,0±1,48
<i>Dicranum polysetum</i> Sw.		22,2±2,15	7,35±1,0
<i>Cladonia sylvatica</i> (L.) Hoffm.		46,8±1,86	4,98±0,27

Окончание табл. 2

Вид растения		Содержание в золе ($n \cdot 10^{-4} \%$)* M±m	Содержание в абс. сух. в-ве ($n \cdot 10^{-5} \%$)* M±m
Сосняк мшистый (ППП 4, 5, 6)			
<i>Betula pendula</i> Roth.	листья	5,72±0,52	2,68±0,31
	ветви	54,5±3,68	6,46±0,55
	корни	33,0±6,61	5,51±1,14
	кора	20,5±3,68	3,96±0,78
	древесина	132,8±18,0	7,14±1,02
<i>Vaccinium myrtillus</i> L.	надземная часть	9,26±2,20	3,19±0,80
	корни	21,7±4,11	2,28±0,40
<i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.	надземная часть	9,75±3,54	2,90±1,06
	корни	51,5±3,58	7,65±0,55
<i>Pleurozium schreberi</i> (Brid.) Mitt.		13,4±2,31	3,18±0,87
<i>Dicranum polysetum</i> Sw.		12,1±2,15	3,60±0,68
Сосняк черничный (ППП 7, 8, 9)			
<i>Betula pendula</i> Roth.	листья	9,09±1,80	4,07±0,82
	ветви	33,1±4,16	3,13±0,47
	корни	24,7±7,93	2,81±0,93
	кора	42,9±5,10	7,15±0,78
	древесина	218,3±5,50	10,9±0,49
<i>Vaccinium myrtillus</i> L.	надземная часть	24,2±1,13	6,64±0,32
	корни	67,9±10,3	5,67±0,94
<i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.	надземная часть	26,4±2,26	6,98±0,63
	корни	52,9±5,68	6,27±0,67
<i>Pleurozium schreberi</i> (Brid.) Mitt.		12,5±2,96	2,48±0,40
<i>Sphagnum angustifolium</i> C. Jens.		13,8±2,58	3,82±0,79
<i>Sphagnum capillifolium</i> Hedw.		12,8±2,74	4,23±1,04
<i>Sphagnum magellanicum</i> Brid.		10,7±0,33	3,54±0,13

* Повторность определений 6-кратная (n = 6).

Установлено, что уран в вегетативных органах и структурах *Betula pendula* Roth распределяется крайне неравномерно. Согласно литературным данным [6, 7] по распределению в различных органах растений уран относится к радионуклидам акропетального типа, т. е. наиболее высокое его содержание характерно для старых, преимущественно вегетативных структур и органов – коры, древесины, корней. Наименьшее содержание этого тяжелого естественного радионуклида характерно для однолетних органов – листьев березы. Концентрация урана в них варьирует в среднем в пределах от $5,7 \cdot 10^{-4} \%$ (сосняк мшистый) до $9,1 \cdot 10^{-4} \%$ (сосняк черничный) – на золу и от $2,7 \cdot 10^{-5} \%$ до $4,1 \cdot 10^{-5} \%$ на сухое вещество растений соответствующих типов леса. Следует отметить, что в листьях березы в сосняке черничном, развивающемся при повышенном увлажнении – на полугидроморфных почвах (см. табл. 1), характеризующихся более высоким содержанием урана в аккумулятивном горизонте, накапливается наибольшее количество урана – $12,2 \cdot 10^{-4} \%$.

Максимальное содержание урана у березы отмечается в древесине, составляя в сосняках черничном и мшистом соответственно $22,7 \cdot 10^{-3} \%$ и $18,5 \cdot 10^{-3} \%$. Диапазон варьирования значений концентраций урана в коре березы высок и колеблется в пределах от $14,6 \cdot 10^{-4} \%$ (сосняк мшистый) до $51,0 \cdot 10^{-4} \%$ (сосняк черничный). Содержание урана в корнях березы из разных типов сосняков находится приблизительно на одном уровне и в среднем составляет $33,0 \cdot 10^{-4} \%$ (сосняк мшистый) и $24,7 \cdot 10^{-4} \%$ (сосняк черничный). Отмечено более высокое содержание урана в ветвях *Betula pendula* Roth из сосняка мшистого по сравнению с черничным типом – $54,5 \cdot 10^{-4} \%$ и $33,1 \cdot 10^{-4} \%$, что коррелирует с толщиной ветвей. Приведенные здесь показатели содержания урана в древесине, коре и ветвях *Betula pendula* Roth в исследуемых типах леса статистически достоверны.

Нами также выявлены особенности накопления природного урана в надземных и подземных органах растений-доминантов живого напочвенного покрова разных типов сосняков (см. табл. 2). Как видно из таблицы, в вегетативных органах различных видов растений содержание урана варьирует в значительных пределах, достигая максимума в корнях кустарничков, – *Vaccinium myrtillus* L. ($67,9 \cdot 10^{-4} \%$ – сосняк черничный), *V. vitis-idaea* L. ($52,9 \cdot 10^{-4} \%$ – сосняк черничный) и *Calluna vulgaris* (L.) Hill. ($57,7 \cdot 10^{-4} \%$ – сосняк вересково-лишайниковый). На значительное накопление урана корнями растений указывает ряд авторов [1, 2, 6, 7]. Установлено, что в естественных фитоценозах в корнях растений урана содержится в 2–10 раз больше, чем в надземных органах. Наши данные по накоплению урана в надземной части и корнях кустарничков дополняют существующие литературные (рис. 1).

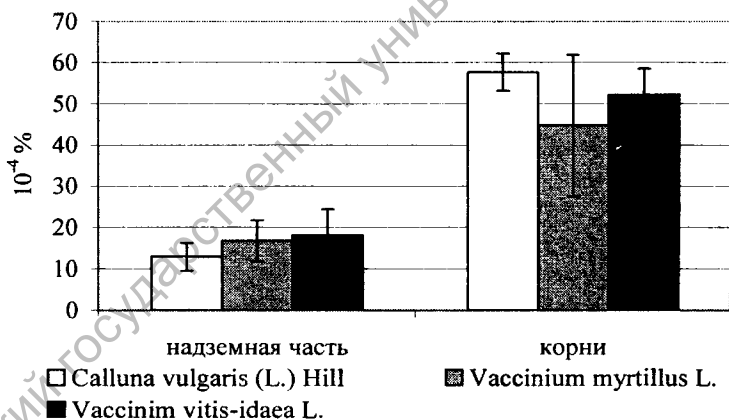


Рис. 1. Содержание природного урана в структурных частях кустарничков (% на золу)

При сопоставлении установленного уровня содержания урана в корнях кустарничков (*Calluna vulgaris* (L.) Hill., *Vaccinium myrtillus* L. и *V. vitis-idaea* L.) и в корнях *Betula pendula* Roth, можно отметить, что у первых – урана накапливается почти в 2,5 раза больше, что объясняется более поверхностным залеганием их корней – на глубине 10–30 см – в аккумулятивном горизонте, где содержание урана выше (см. табл. 1).

Обращает на себя внимание тот факт, что в условиях большего увлажнения (сосняк черничный) в надземных частях *Vaccinium myrtillus* L. и *V. vitis-idaea* L. содержание урана почти в 2,5 раза выше, чем в соответствующих растениях, произрастающих в сосняке мшистом (рис. 2).

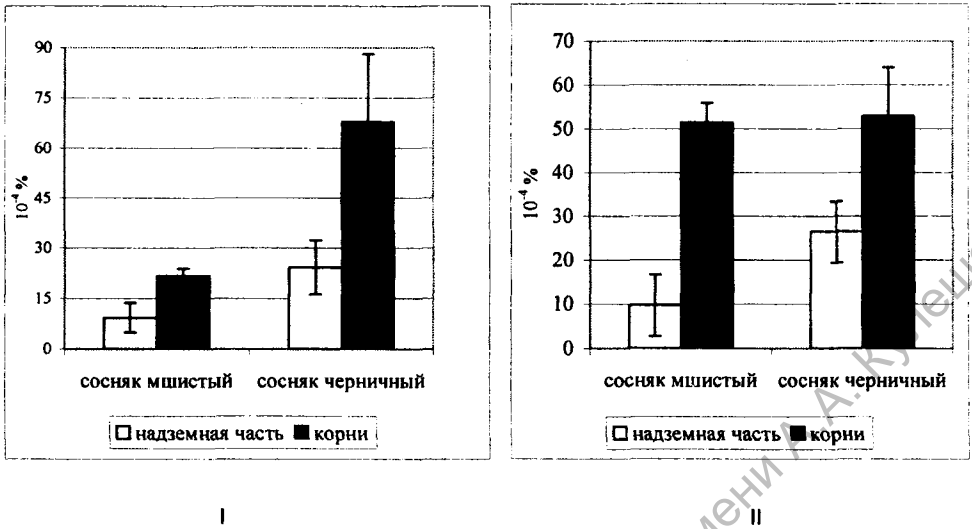


Рис. 2. Содержание природного урана в структурных частях растений в разных типах леса: I – *Vaccinium myrtillus L.*; II – *Vaccinium vitis-idaea L.* (% на золу)

Сопоставление содержания урана в вегетативных органах у растений, отобранных в разных типах сосновых лесов, показало, что одни и те же виды не в одинаковой степени концентрируют уран при произрастании на разных почвах, несмотря на примерно одинаковые уровни содержания в них данного радионуклида. Это означает, что почвенные условия, и, прежде всего, формы нахождения урана в почвах оказывают существенное влияние на степень усвоения его растениями. Так, на автоморфных почвах наблюдается повышенная аккумуляция природного урана всеми исследуемыми видами мхов – *Pleurozium schreberi* (Brid.), *Dicranum polysetum* Sw., а на полугидроморфных – кустарничками – *Vaccinium myrtillus L.*, *V. vitis-idaea L.* и *Calluna vulgaris (L.) Hill.*

Обращает на себя внимание то, что по сравнению с надземными частями сосудистых растений представители мхов и лишайников накапливают уран в больших количествах (см. табл. 2). В результате наших исследований особенно высокое содержание урана выявлено в лишайнике *Cladonia sylvatica (L.) Hoffm.* – $46,8 \cdot 10^{-4}$ % (на золу), который по его накоплению выделяется среди всех изученных представителей групп растений, что позволяет отнести его к видам-концентраторам данного элемента. Кинетика и термодинамика поглощения катионов лишайниками хорошо изучены [8, 9]. Установлено, что поглощение урана из раствора зависит от pH среды. Так, за 24 часа слоевища *Peltigera membranacea* аккумулировали наибольшее количество соединений урана при pH=4,5 [8]. Усвоение урана лишайником *Cladonia sylvatica (L.) Hoffm.* обусловлено высокой степенью его доступности на автоморфных почвах сосняка вересково-лишайникового с $pH_{KCl} = 4,7$.

При сопоставлении данных по содержанию урана в гаметофорах разных видов мхов из одного полифилетического рода [10] – *Sphagnum spp.* (*Sphagnum angustifolium C. Jens.*, *Sph. capillifolium Hedw.*, *Sph. magellanicum Brid.*), относящихся к трем различным секциям, соответственно *Cuspidata*, *Acutifolia* и *Sphagnum*, можно отметить, что достоверной разницы в накоплении урана здесь не наблюдается, хотя в незначительной степени содержание радионуклида воз-

растает в ряду: *Sphagnum magellanicum* Brid. > *Sph. capillifolium* Hedw. > *Sphagnum angustifolium* C. Jens., что отвечает экологическим особенностям данных видов по способности к удержанию влаги.

Заключение. В результате проведенных исследований впервые для республики получены экспериментальные данные по содержанию природного урана в вегетативных органах и структурах подроста и растений-доминантов живого напочвенного покрова, включая сосудистые растения, мхи и лишайники, основных типов сосновых лесов центральной части Беларуси. Установлено крайне неравномерное распределение урана в вегетативных органах *Betula pendula* Roth: наибольшее его содержание отмечается в древесине и коре, наименьшее – в листьях. По убыванию содержания урана структуры березы располагаются в следующий суммарный ряд: древесина > ветви > кора > корни > листья (на золу). Отмечено, что у кустарничков *Calluna vulgaris* (L.) Hill, *Vaccinium myrtillus* L. и *Vaccinium vitis-idaea* L. уран накапливается преимущественно в подземных частях растений, содержание его в корнях в среднем в 2,5 раза превышает концентрацию в надземных органах. Мхи *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt., *Dicranum polysetum* Sw. и лишайник *Cladonia sylvatica* (L.) Hoffm. по сравнению с надземными частями сосудистых растений накапливают уран в больших количествах. Выявлены особенности аккумуляции урана растениями различной систематической принадлежности, произрастающими в сопоставимых и разных эдафо-фитоценологических условиях. Сравнительный анализ уровней содержания урана в органах и структурах у растений в разных типах сосновых лесов показал, что одни и те же виды различаются по степени концентрации урана при произрастании на почвах с одинаковыми уровнями содержания в них данного радионуклида. Это свидетельствует о том, что эдафо-фитоценологические условия оказывают существенное влияние на степень усвоения урана растениями.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Искра, А.А.** Естественные радионуклиды в биосфере / А.А. Искра, В.Г. Бахуров. – М.: Энергоиздат, 1981. – 124 с.
2. Тяжелые естественные радионуклиды в биосфере: Миграция и биологическое действие на популяции и биогеоценозы / Р.М. Алексахин [и др.]. – М.: Наука, 1990. – 368 с.
3. Природный радиоактивный фон и его значение для биосферы Земли / А.М. Кузин. – М.: Наука, 1991. – 117 с.
4. Руководство к практическим занятиям по радиохимии. – Изд-е 2-е, перераб. / Под ред. А.Н. Несмеянова. – М.: Химия, 1980. – 584 с.
5. **Якушев, Б.И.** Исследование растений и почв: Эколого-физиологические методы / Б.И. Якушев. – Мн.: Наука и техника, 1988 – 68 с.
6. **Гродзинский, Д.М.** Естественная радиоактивность растений и почв / Д.М. Гродзинский. – К.: Наук. думка, 1965. – 216 с.
7. **Ковалевский, А.Л.** Естественные радиоактивные элементы в растениях Сибири / А.Л. Ковалевский. – Улан-Удэ.: Бурятское книжное издательство, 1966. – 96 с.
8. **Бязров, Л.Г.** Лишайники – индикаторы радиоактивного загрязнения / Л.Г. Бязров. – М.: Изд-во КМК, 2005. – 476 с.
9. Uranium biosorption by the lichen *Trapelia involuta* at a uranium mine / Purvis, O. [et al] // *Geomicrobiol. J.* – 2004. – 21. – N 3. – С. 159-167.
10. **Рыковский, Г.Ф.** Проблема эволюции мохообразных как особой группы высших растений / Г.Ф. Рыковский // Купревичские чтения III. Проблемы экспериментальной ботаники. – Мн.: Тэхналогія, 2001. – С. 50-102.