

Биология

УДК 631.438.1:630.174.754

Влияние эдафо-фитоценологических условий произрастания сосняков на биологическую доступность природного урана

Ж. М. АНИСОВА

Введение. Биологическая доступность элемента для растений из почвы является важной характеристикой условий их произрастания, определяющей уровень накопления этого элемента в растительных структурах. Широкий диапазон уровней накопления природных изотопов урана в почвах и растениях в условиях различных биогеоценозов не позволяет считать информационными показатели биологической подвижности элементов, представленные абсолютными величинами содержания в растениях или в виде рядов относительного распределения. Наиболее объективным количественным показателем влияния комплекса условий среды на уровни содержания природного урана в растениях из разных систематических групп является коэффициент биологического поглощения (КБП), который определяется отношением содержания элемента в единице массы растения (мг/кг золы) к содержанию этого элемента в единице массы почвы (мг/кг прокаленной почвы), на которой произрастает растение [1]. При таком расчете коэффициента поглощения отношение содержания элементов в растениях к их содержанию в почве можно использовать как показатель интенсивности их биологического поглощения, который позволяет точнее учесть переход радионуклида в растительность. В нашей работе этот показатель дает возможность оценить подвижность урана в системе почва-растение в определенных экологических условиях. В результате проведенных расчетов нами установлены КБП урана из почвы растениями-доминантами сосновых биогеоценозов, их органами и отдельными структурами; в частности, выявлены виды, наиболее интенсивно накапливающие природный уран.

Обширные исследования по биогенной миграции урана начаты с середины 60-х годов XX века. В последующее время получены данные о накоплении урана различными органами и структурами наземных растений и гидробионтов, о его перераспределении в органах растений, о видовых особенностях растений аккумулировать U, а также о накоплении этого элемента их сообществами [1-5].

КБП урана не является постоянной величиной, а в зависимости от уровня содержания U в почве, форм его нахождения, почвенно-климатических условий и видовых особенностей растений может изменяться в широких пределах [1-5]. По имеющимся данным, для урана характерны значения КБП, варьирующие от 0,0001 до > 1 . При этом можно обнаружить зависимость КБП от содержания урана в почве. При увеличении концентраций урана в почве до 10^{-2} - 10^{-1} % (близких к рудным месторождениям) его КБП уменьшается до 0,03 – 0,0001, при содержании урана на уровне 10^{-4} % (среднее для земной коры) он составляет 0,02-0,2, достигая 1 [3]. Уменьшение коэффициента биологического поглощения урана при увеличении концентраций урана в почве связано с тем, что растения поглощают этот элемент до некоторого предельного уровня и зависимость между содержанием урана в почве и в растениях нарушается при большом содержании урана в почве. Этот факт позволяет говорить о том, что для урана существует биологический барьер, препятствующий его переходу из питающей среды в растения. Значительно большее содержание урана в корнях растений по сравнению с надземными их частями

свидетельствует о том, что функцию биологического барьера осуществляют, в первую очередь, корни растений. Кроме того, установленный характер зависимости между содержаниями урана в ветвях и в листьях деревьев лиственницы и березы А.Л. Ковалевским [3] свидетельствует о том, что эту функцию в растениях могут выполнять и листья.

Объекты и методика исследований. Объектами исследования являлись почвы и растения-доминанты биогеоценозов основных типов сосновых лесов центральной части Беларуси – Минской возвышенности (Логойский лесхоз, Козырское лесничество) – сосняков лишайникового, мшистого и черничного. Лесотипологическая и таксационная характеристика сосновых насаждений на постоянных пробных площадях (ППП) приводится в табл. 1.

Таблица 1.

Лесотипологическая и таксационная характеристика сосновых насаждений на ППП в различных типах леса

| Номер ППП | Тип и ассоциация сосновых лесов | Состав насаждения | Возраст, лет | Средняя высота, м | Средний диаметр, см | Полнота | Бонитет |
|-----------|---------------------------------|-------------------|--------------|-------------------|---------------------|---------|---------|
| 1 | Сосняк вересково-лишайниковый | 10С | 55 | 18,5 | 20,0 | 0,7 | II |
| 2 | Сосняк вересково-лишайниковый | 10С | 57 | 19,5 | 21,5 | 0,7 | II |
| 3 | Сосняк вересково-лишайниковый | 10С | 62 | 20,5 | 22,0 | 0,7 | II |
| 4 | Сосняк мшистый | 10С | 55 | 19,5 | 23,0 | 0,7 | I |
| 5 | Сосняк мшистый | 10С | 65 | 21,5 | 23,0 | 0,7 | II |
| 6 | Сосняк мшистый | 10С | 59 | 20,5 | 20,5 | 0,7 | II |
| 7 | Сосняк черничный | 7С2Е1Б | 75 | 23,5 | 28,0 | 0,7 | I |
| 8 | Сосняк черничный | 7С2Е1Б | 76 | 24,0 | 30,0 | 0,7 | I |
| 9 | Сосняк черничный | 7С2Е1Б | 83 | 26,5 | 32,0 | 0,7 | I |

Содержание урана в пробах почв и растений определяли по методике А.Н. Несмеянова [6], 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. Ошибка определения урана не превышала 25%.

КБП урана рассчитывали как отношение содержания радионуклида в единице массы растений (мг/кг золы) к его содержанию в единице массы почвы (мг/кг прокаленной почвы). Для расчета КБП урана использовали средние значения содержания урана в почвенном слое 0-50 см, где сосредоточена основная масса поглощающих корней растений.

Результаты исследований и их обсуждение. КБП урана для представителей древесного яруса. Сравнительный анализ биологической подвижности природного урана для растений сосны обыкновенной выявил возрастание уровней значений КБП в ряду хвоя – ветви – корни – кора – древесина, причем это характерно для данных древесных пород всех изученных типов сосновых лесов. Значения КБП < 1 отмечены для хвои всех возрастов, при этом min значение составляет 0,04, max – 0,96. Для других исследованных вегетативных органов и структур *Pinus sylvestris* L. характерны значения КБП > 1 : диапазон варьирования этих показателей достаточно велик – от 1,93 (для ветвей) до 184,4 (для древесины ствола). Характерной особенностью у растений сосны являются значительные уровни КБП для древесины (до 184,4) и коры (до 73,8). Концентрация урана в древесине самая высокая и превышает таковую в хвое сосны сосняка вересково-лишайникового в 1823 раза; мшистого – в 181 и черничного – в 308 раз (табл. 2).

КБП урана для структурных частей древесных пород сосновых фитоценозов

| Порода орган | min | max | диапазон варьирования | среднее |
|-----------------------------------------------------------------|------|-------|--------------------------|---------|
| (ППП 1, 2, 3) Сосняк вересково-лишайниковый. Автоморфные почвы. | | | | |
| <i>Pinus sylvestris L.</i> | | | | |
| Хвоя 1 года | 0,04 | 0,06 | 0,02 | 0,05 |
| Хвоя 2 года | 0,05 | 0,12 | 0,07 | 0,08 |
| Хвоя 3 года | 0,06 | 0,07 | 0,01 | 0,07 |
| Ветви | 3,40 | 5,27 | 1,87 | 4,58 |
| Кора | 16,5 | 57,5 | 41,0 | 34,8 |
| Древесина | 74,2 | 184,4 | 110,2 | 127,6 |
| Корни | 7,74 | 19,3 | 11,6 | 12,8 |
| (ППП 4, 5, 6) Сосняк мшистый. Автоморфные почвы. | | | | |
| <i>Pinus sylvestris L.</i> | | | | |
| Хвоя 1 года | 0,33 | 0,64 | 0,31 | 0,49 |
| Хвоя 2 года | 0,28 | 0,90 | 0,62 | 0,54 |
| Хвоя 3 года | 0,35 | 0,96 | 0,61 | 0,66 |
| Ветви | 9,92 | 18,7 | 8,78 | 14,3 |
| Кора | 14,8 | 73,8 | 59,0 | 39,3 |
| Древесина | 36,0 | 145,3 | 109,3 | 101,1 |
| Корни | 6,79 | 39,1 | 32,3 | 18,4 |
| <i>Betula pendula Roth</i> | | | | |
| Листья | 1,84 | 3,31 | 1,47 | 2,33 |
| Ветви | 13,0 | 30,6 | 17,6 | 22,8 |
| Кора | 5,61 | 15,6 | 9,99 | 8,97 |
| Древесина | 38,8 | 68,2 | 29,4 | 52,1 |
| Корни | 5,42 | 24,8 | 19,4 | 14,0 |
| (ППП 7, 8, 9) Сосняк черничный. Полугидроморфные почвы. | | | | |
| <i>Pinus sylvestris L.</i> | | | | |
| Хвоя 1 года | 0,08 | 0,10 | 0,02 | 0,09 |
| Хвоя 2 года | 0,10 | 0,13 | 0,03 | 0,11 |
| Хвоя 3 года | 0,11 | 0,13 | 0,03 | 0,12 |
| Ветви | 1,93 | 3,19 | 1,26 | 2,49 |
| Кора | 3,17 | 8,60 | 5,43 | 6,79 |
| Древесина | 23,3 | 46,1 | 22,8 | 33,9 |
| Корни | 2,21 | 6,40 | 4,19 | 3,91 |
| <i>Betula pendula Roth</i> | | | | |
| Листья | 0,28 | 0,83 | 0,55 | 0,60 |
| Ветви | 1,59 | 2,89 | 1,30 | 2,28 |
| Кора | 1,90 | 3,79 | 1,89 | 2,91 |
| Древесина | 12,7 | 16,3 | 3,60 | 14,8 |
| Корни | 0,70 | 3,50 | 2,80 | 1,75 |

Проанализируем значения КБП U для различных органов и структур сосны обыкновенной в различных эдафо-фитоценологических условиях ее произрастания. Наибольшие значения КБП отмечены для сосны, произрастающей на автоморфных почвах, – в сосняках вересково-лишайниковом и мшистом, наименьшие – для сосны в сосняке черничном, развивающемся на полугидроморфных почвах. Если у сосны в сосняках вересково-лишайниковом и мшистом КБП характеризуются близкими значениями для всех ее органов и структур, то по сравнению с таковыми для органов и структур *Pinus sylvestris L.* в сосняке черничном (по-

дугидроморфные почвы) КБП ниже в 2 – 5 раз. Сравнение значений КБП у сосны обыкновенной, произрастающей на автоморфных и полугидроморфных почвах, показывает, что у последних по отношению к первым происходит уменьшение интенсивности перехода урана в хвое – в 2,9; ветвях – в 3,8; в корнях – в 4,0; в коре – в 5,5; в древесине – в 3,4 раза. В хвое *Pinus sylvestris* L. сосняков вересково-лишайникового на автоморфных и черничного на полугидроморфных почвах КБП имеют сходные значения – 0,07 и 0,11 соответственно. Для органов и структур сосны, за исключением ее хвои, отмечаются КБП > 1 во всех изученных типах леса. Средние значения КБП урана для сосны в целом составляют в сосняке вересково-лишайниковом 25,7; в сосняке мшистом – 25,0; в сосняке черничном – 6,77) (рис. 1).

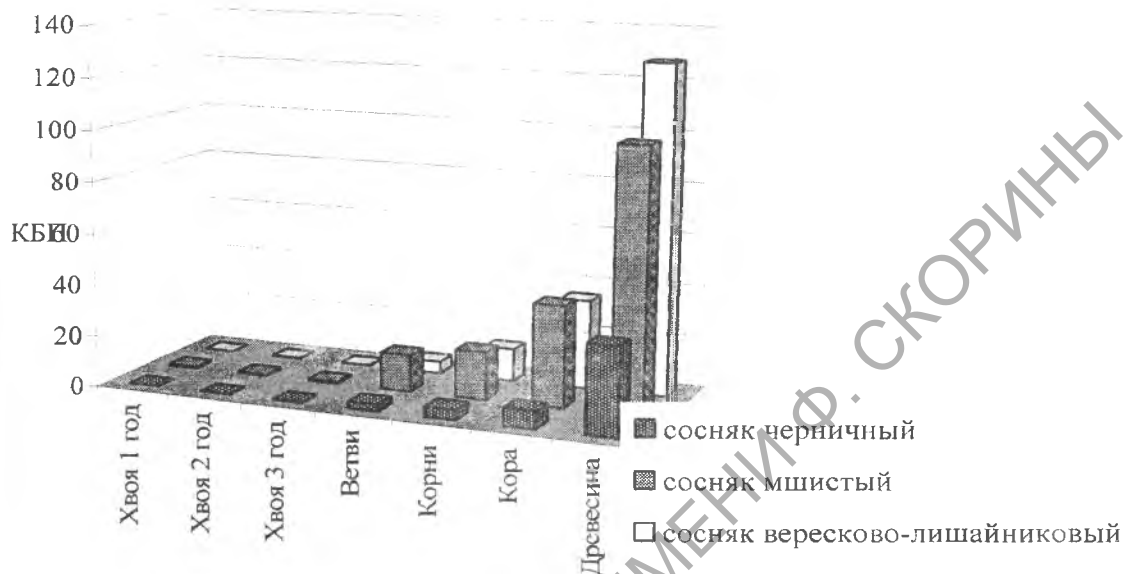


Рисунок 1 – КБП природного урана для органов и структур *Pinus sylvestris* L.

КБП урана для растений подроста. Для подроста *Betula pendula* Roth в сосновых фитоценозах уровни значений КБП урана для ее вегетативных органов и структур в разных типах леса неодинаковы. Так, для березы в сосняке мшистом КБП увеличиваются в ряду листья – кора – корни – ветви – древесина, а для условий сосняка черничного характерен несколько иной ряд возрастающих значений КБП: листья – корни – ветви – кора – древесина. Повидимому, эти различия у березы связаны с разными эдафо-фитоценологическими условиями ее произрастания и рядом других факторов, которые могут оказывать влияние на уровни накопления радионуклида как отдельными органами и тканями, так и растением в целом. Значения КБП < 1 отмечены только для листьев березы на полугидроморфных почвах, при этом min значение равно 0,28, max – 0,83, амплитуда варьирования составляет 0,55. Для листьев *Betula pendula* Roth в сосняке мшистом КБП > 1. Значения КБП для ветвей, корней, коры и древесины на всех пробных площадях выше единицы, причем диапазон варьирования КБП для этих органов составляет от 1,59 до 30,6 (для ветвей), от 0,70 до 24,8 (для корней), от 1,90 до 15,6 (для коры) и от 12,7 до 68,2 (для древесины). Следует отметить, что КБП для вегетативных органов и структур березы в сосняке черничном ниже по сравнению с соответствующими данными для ее органов в сосняке мшистом; кратность различий величин коэффициентов поглощения приблизительно составляет для листьев – 3,9; ветвей – 10,0; корней – 8,0; коры – 3,1; древесины – 3,5 раз. Для березы в целом средние значения КБП урана составляют в сосняке мшистом 22,0, в сосняке черничном – 4,47 (см. табл. 2).

Наиболее интенсивно процесс накопления урана происходит в древесине. В сосняке мшистом среднее значение КБП для древесины составляет 52,1, а в черничном типе леса – 14,8. В коре накопление урана менее интенсивно: в сосняке мшистом средний КБП=8,97; а в условиях черничного типа леса КБП=2,91. Относительно высокие значения КБП урана отмечаются для корней и ветвей *Betula pendula* Roth в сосняке мшистом – 14,0 и 22,8 соответственно. Меньшими величинами характеризуются значения КБП для корней и ветвей березы в

сосняке черничном – 1,75 и 2,28 соответственно (рис. 2).

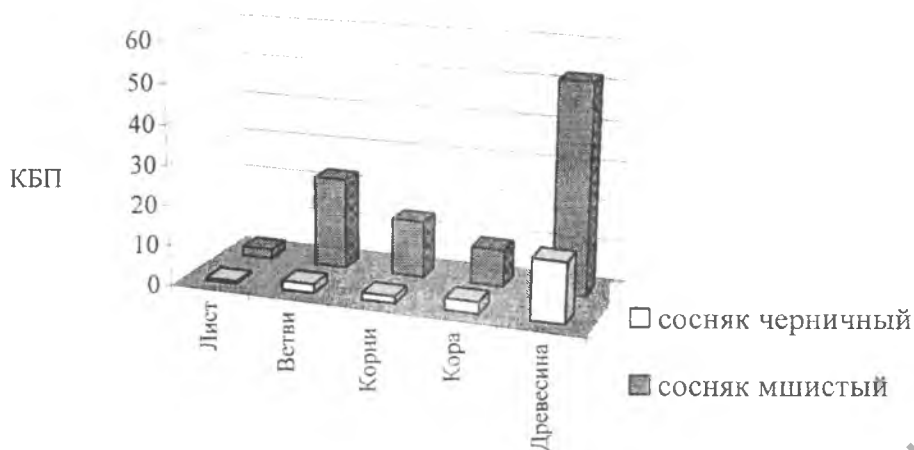


Рис. 2. КБП природного урана для структурных частей *Betula pendula* Roth

В сравнительном аспекте значения КБП для вегетативных органов и структур *Pinus sylvestris* L. и *Betula pendula* Roth различаются значительно. Максимальные значения этого коэффициента отмечены у *Pinus sylvestris* L. и *Betula pendula* Roth в условиях вересково-лишайникового и мшистого сосняков. Необходимо отметить, что увеличение биологической подвижности урана в зависимости от эдафо-фитоценологических условий у сосны проявляется сильнее, чем у березы. Так, у сосны в сосняке мшистом КБП урана для древесины в среднем составил 101,1; в древесину березы в этих условиях уран переходит с меньшей интенсивностью – 52,1, что в 1,94 раза ниже; для коры березы КБП равен 8,97, что ниже значений для коры сосны на 22,8 %; переход урана в корни сосны в 1,3 раза интенсивнее, чем в корни березы; значения КБП для листьев и ветвей березы превышают таковые для хвой и ветвей сосны в 4,2 и 1,6 раз соответственно. Значительно меньшие различия в величинах КБП для одних и тех же органов отмечается у сосны и березы в сосняке черничном.

КБП урана для растений-доминантов живого напочвенного покрова. У растений живого напочвенного покрова значения КБП урана варьируют в широком диапазоне – от 22,3 (для корней *Vaccinium vitis-idaea* L. в сосняке мшистом) до 0,32 (для *Sphagnum magellanicum* Brid. в сосняке черничном) (табл. 3).

Таблица 3.

КБП урана для структурных частей растений живого напочвенного покрова сосновых фитоценозов

| Вид растения | | min | max | диапазон варьирования | среднее |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------|------|------|--------------------------|---------|
| (ППП 1, 2, 3) Сосняк вересково-лишайниковый. Автоморфные почвы. | | | | | |
| <i>Calluna vulgaris</i> (L.) Hill | надземная часть | 3,09 | 5,35 | 2,26 | 4,50 |
| | корни | 17,3 | 24,3 | 7,0 | 20,7 |
| <i>Pleurozium schreberi</i> (Brid.) Mitt. | | 2,51 | 3,85 | 1,34 | 2,59 |
| <i>Dicranum polysetum</i> Sw. | | 2,52 | 3,07 | 0,55 | 2,62 |
| <i>Cladonia sylvatica</i> (L.) Hoffm. | | 4,95 | 6,58 | 1,63 | 5,77 |
| (ППП 4, 5, 6) Сосняк мшистый. Автоморфные почвы. | | | | | |
| <i>Vaccinium myrtillus</i> L. | надземная часть | 1,70 | 9,04 | 7,34 | 4,32 |
| | корни | 4,25 | 17,0 | 12,8 | 9,77 |
| <i>Vaccinium vitis-idaea</i> L. | надземная часть | 2,23 | 5,24 | 3,01 | 3,26 |
| | корни | 13,2 | 36,3 | 23,1 | 22,3 |

| | | | | | |
|--------------------------------------------------------|-----------------|------|------|------|------|
| <i>Pleurozium schreberi</i> (Brid.) Mitt. | | 1,34 | 3,35 | 2,01 | 2,19 |
| <i>Dicranum polysetum</i> Sw. | | 1,48 | 2,35 | 0,87 | 1,89 |
| (ШШ 7, 8, 9) Сосняк черничный. Полугидроморфные почвы. | | | | | |
| <i>Vaccinium myrtillus</i> L. | надземная часть | 1,52 | 1,88 | 0,36 | 1,69 |
| | корни | 2,65 | 7,0 | 4,35 | 4,65 |
| <i>Vaccinium vitis-idaea</i> L. | надземная часть | 1,55 | 1,99 | 0,44 | 1,77 |
| | корни | 2,49 | 4,82 | 2,33 | 3,60 |
| <i>Pleurozium schreberi</i> (Brid.) Mitt. | | 0,27 | 0,49 | 0,22 | 0,38 |
| <i>Sphagnum angustifolium</i> C. Jens. | | – | – | – | 0,40 |
| <i>Sphagnum capillifolium</i> Hedw. | | – | – | – | 0,44 |
| <i>Sphagnum magellanicum</i> Brid. | | – | – | – | 0,32 |

Наибольшим накоплением природного урана в разных эдафо-фитоценологических условиях характеризуются корни кустарничков – *Calluna vulgaris* (L.) Hill (сосняк вересково-лишайниковый), *Vaccinium myrtillus* L. и *Vaccinium vitis-idaea* L. (сосняки мшистый и черничный), а наименьшим – мхи в сосняке черничном – *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. (КБП=0,38), *Sphagnum angustifolium* C. Jens. (КБП=0,40), *Sph. capillifolium* Hedw. (КБП=0,44) и *Sph. magellanicum* Brid. (КБП=0,32) (см. табл. 3).

По сравнению с надземными частями сосудистых растений самый высокий коэффициент перехода урана отмечен у лишайника *Cladonia sylvatica* (L.) Hoffm. в сосняке вересково-лишайниковом. Средний КБП для него составил 5,8 единиц. Несмотря на то, что мицелий *Cladonia sylvatica* (L.) Hoffm. расположен в самом поверхностном слое почвы, данный лишайник поглощает большое количество природного урана. Высокая степень биологической доступности урана для *Cladonia sylvatica* (L.) Hoffm. может быть обусловлена относительным повышением содержания усвояемых форм урана в почве с оптимальными значениями pH среды в сосняке вересково-лишайниковом [7].

Анализ интенсивности накопления урана различными частями и органами растений в разных экологических условиях выявил значительное варьирование КБП даже у одного и того же вида. Так, для надземной части черники, произрастающей в сосняке мшистом, коэффициент поглощения в среднем составил 4,32, а для корней – 9,77; у черники из сосняка черничного – 1,69 / 4,65 соответственно. У брусники в сосняке мшистом КБП урана для надземной части составляет 3,26, для корней – 22,3; в сосняке черничном – 1,77 / 3,60 соответственно.

Расчет значений КБП для видов растений из разных систематических групп в сходных и различных эдафо-фитоценологических условиях произрастания показал, что степень накопления природного урана растениями-доминантами живого напочвенного покрова, как и древесными растениями, зависит от условий их произрастания. У всех растений-доминантов живого напочвенного покрова сосняка черничного значения КБП в несколько раз ниже по сравнению с таковыми для соответствующих видов растений сосняков вересково-лишайникового и мшистого. Несмотря на более высокое содержание урана в почвах и растениях в сосняке черничном по сравнению с другими исследуемыми типами соснового леса, КБП урана характеризуются здесь меньшими величинами. Биологическая доступность урана в черничном типе леса более низкая относительно условий сосняков вересково-лишайникового и мшистого.

Для объяснения различных уровней КБП для одних и тех же видов растений из разных типов сосновых биогеоценозов был проведен корреляционный анализ связи величин коэффициентов поглощения с физико-химическими свойствами почвы. Из данных корреляционного анализа, проведенного для всех исследуемых видов установлено, что на переход урана из почвы в растения существенное влияние оказывают следующие физико-химические

Таблица 4.

Агрохимические показатели почв различных типов сосновых насаждений Минской возвышенности

| Генетичес- кие горизонты | Гумус. % | Потеря от прокали- вания. % | рН _{H2O} | рН _{KCl} | мг/100 г почвы | | мг-экв 100 г почвы | | | Степень насыщенности основаниями, $\frac{S-100}{S+Hr}$ % | ГАП, мкА |
|---------------------------------------------|-----------|-----------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------------------|------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------|
| | | | | | P ₂ O ₅ | K ₂ O | сумма поглотен- ных оснований, S | гидролитичес- кая кислотность, Hr | емкость поглощения, S+Hr | | |
| Сосняк вересково-лишайниковый (ППП 1, 2, 3) | | | | | | | | | | | |
| A ₀ | — | 76,0±5,76 | 5,12±0,08 | 3,83±0,10 | — | — | 19,1±1,24 | 51,8±9,19 | 70,9 | 26,9 | 121,7±5,45 |
| A ₁ A ₂ | 2,08±0,44 | 2,57±0,46 | 4,84±0,27 | 3,79±0,09 | 3,20±0,33 | 3,57±0,38 | отр. * | 4,27±0,47 | — | — | 7,08±0 |
| B ₁ | 0,92±0,18 | 1,14±0,17 | 4,92±0,14 | 4,79±0,05 | 6,07±0,91 | 1,73±0,18 | отр. | 1,79±0,15 | — | — | 2,71±0,52 |
| B ₂ | 0,90±0,34 | 0,37±0,11 | 5,01±0,07 | 5,07±0,11 | 2,80±0,47 | 2,40±0,13 | 0,55±0,78 | 0,90±0,14 | 1,45 | 37,9 | 1,54±0,52 |
| B ₂ | 0,49±0,12 | 0,30±0,07 | 5,21±0,03 | 5,13±0,07 | 1,90±0,13 | 3,18±0,28 | 0,53±0,36 | 0,60±0,09 | 1,13 | 46,9 | 1,16±0 |
| B ₂ | 0,38±0,12 | 0,23±0,05 | 5,33±0,10 | 5,09±0,06 | 1,73±0,18 | 3,27±0,31 | 0,25±0,12 | 0,53±0,05 | 0,78 | 32,1 | 1,08±0,10 |
| C | 0,43±0,12 | 0,20±0,03 | 5,33±0,11 | 5,02±0,08 | 1,80±0,13 | 3,62±0,46 | 0,40±0,17 | 0,57±0,06 | 0,97 | 41,2 | 1,16±0 |
| Сосняк мшистый (ППП 4, 5, 6) | | | | | | | | | | | |
| A ₀ | — | 74,0±9,17 | 4,33±0,02 | 3,00±0,08 | — | — | 10,5±4,4 | 67,4±17,2 | 77,9 | 13,5 | 59,2±3,08 |
| A ₁ | 2,43±0,37 | 3,29±0,28 | 5,05±0,17 | 3,73±0,21 | 3,57±0,38 | 3,97±0,69 | отр. | 5,69±0,76 | — | — | 8,01±2,02 |
| A ₂ B ₁ | 1,04±0,11 | 1,39±0,06 | 4,99±0,05 | 4,77±0,05 | 3,13±1,78 | 2,58±0,78 | отр. | 2,10±0,17 | — | — | 3,50±0,79 |
| B ₂ | 0,56±0,03 | 0,70±0,13 | 5,02±0,06 | 4,76±0,04 | 2,80±1,07 | 2,23±0,36 | отр. | 1,42±0,26 | — | — | 3,11±0,85 |
| B ₂ | 0,41±0,06 | 0,55±0,07 | 5,28±0,10 | 4,82±0,12 | 1,57±0,04 | 2,92±0,21 | отр. | 0,96±0,18 | — | — | 3,11±1,30 |
| B ₂ | 0,27±0,05 | 0,40±0,13 | 5,44±0,21 | 4,88±0,07 | 1,47±0,11 | 3,0±0,27 | 0,24±0,18 | 0,76±0,12 | 1,00 | 24,0 | 2,99±1,26 |
| C | 0,36±0,03 | 0,37±0,10 | 5,45±0,17 | 4,91±0,14 | 3,10±1,20 | 3,30±0,67 | 0,29±0,15 | 0,74±0,17 | 1,03 | 28,2 | 3,11±1,30 |
| Сосняк черничный (ППП 7, 8, 9) | | | | | | | | | | | |
| A ₀ | — | 94,0±0,53 | 4,21±0,04 | 2,90±0,02 | — | — | 24,1±3,08 | 112,3±1,61 | 136,4 | 17,7 | 60,9±2,95 |
| A ₁ A ₂ | — | 86,3±2,34 | 4,83±0,25 | 3,03±0,07 | 11,3±1,11 | 37,0±2,0 | 14,5±1,73 | 75,8±6,19 | 90,3 | 16,0 | 60,9±1,56 |
| B _{1g} | — | 85,5±6,42 | 4,65±0,15 | 3,16±0,05 | 1,70±0,87 | 13,0±1,33 | 9,93±1,82 | 97,4±7,05 | 107,3 | 9,3 | 23,8±5,92 |
| B _{1g} | — | 52,9±5,70 | 4,71±0,07 | 3,62±0,08 | 1,67±0,38 | 5,57±2,29 | 2,75±2,06 | 55,6±25,9 | 58,4 | 4,7 | 21,8±4,40 |
| B _{2g} | 0,93±0,30 | 1,04±0,07 | 4,85±0,06 | 4,40±0,05 | 3,13±0,76 | 2,47±0,11 | отр. | 15,2±2,10 | — | — | 10,9±0,90 |
| Cg | 1,02±0,15 | 1,26±0,24 | 4,88±0,09 | 4,36±0,17 | 2,65±1,35 | 3,0±0 | отр. | 14,7±0,75 | — | — | 8,30±1,22 |

* отр. — отрицательное значение суммы поглощенных оснований.

свойства почвы: рН почвенной среды, концентрация подвижных форм фосфора и калия, степень насыщенности основаниями и, особенно, – содержание гумуса и физической глины в почве. Так, на полугидроморфных почвах (сосняк черничный), характеризующихся более кислой реакцией среды (pH_{KCl} 3,6) биологическая подвижность урана минимальна (табл. 4). Изменение реакции почвенного раствора в сторону подщелачивания (pH_{KCl} 4,4-4,6) способствует возрастанию подвижности урана, которая достигает максимума на автоморфных почвах сосняков вересково-лишайникового и мшистого. Отмечено, что фосфор и калий способствуют закреплению (фиксации) урана в почве: чем больше в почве подвижных форм P_2O_5 и K_2O , тем биологическая подвижность урана меньше (на автоморфных почвах сосняка вересково-лишайникового среднее содержание подвижных P_2O_5 составляет 2,92 мг/100г почвы и K_2O – 2,96 мг/100г почвы, сосняка мшистого – подвижных P_2O_5 и K_2O – 2,61 и 3,0 мг/100г почвы соответственно, на полугидроморфных почвах сосняка черничного их содержание выше – в среднем 4,1 и 12,2 мг/100г почвы соответственно). На уровень биологической подвижности урана также влияет степень насыщенности основаниями и уровень значений индекса трофности почвы. Чем выше насыщенность почв основаниями, тем биологическая подвижность урана снижается (максимальные значения количества обменных оснований отмечаются для полугидроморфных почв – 24,1–2,75 мг-экв/100г почвы). Иная корреляционная зависимость установлена между значениями ГАП – концентрацией водорастворимых соединений в почвенном растворе по Б.И. Якушеву [8] и уровнем поступления урана из почвы в растения: чем выше показатели индекса трофности почвы, тем больше биологическая подвижность урана. По степени влияния на биологическую доступность урана особое место занимают уровень содержания гумуса и физической глины в почве. Для всех исследуемых видов растений характерно увеличение доступности урана с уменьшением процента содержания гумуса и глинистой фракции. Это объясняется образованием комплексных соединений природного урана с органическими и минеральными лигандами, присутствующими в почве [9, 10]. Так, автоморфные дерново-подзолистые слабоподзоленные связнопесчаные почвы сосняка вересково-лишайникового с содержанием гумуса и физической глины – 0,87% и 3,33% соответственно и почвы сосняка мшистого – 0,85% и 4,27% соответственно, характеризуются более высокой подвижностью урана по сравнению с перегнойно-подзолисто-глеевыми легкосуглинистыми почвами сосняка черничного, которые отличаются более тяжелым механическим составом и более высоким содержанием органического вещества (14,3% – физической глины и 53,5% – потеря в весе от прокаливания) (см. табл. 4). Биологическая доступность урана снижается с возрастанием мощности органогенного горизонта и увеличением фракции физической глины.

В связи с вышеизложенным очевидно, что для урана закрепление в почве и разная степень его доступности для растений обусловлены сочетанным действием определенных физико-химических свойств почвы [11, 12]. Достаточно высокими показателями доступности урана для растений характеризуются дерново-подзолистые слабоподзоленные связнопесчаные почвы, распространенные в сосняках вересково-лишайниковом и мшистом. Минимальным переходом урана в растения отличаются перегнойно-подзолисто-глеевые легкосуглинистые почвы сосняка черничного. Эти почвы характеризуются более кислой реакцией среды, высоким содержанием подвижных форм фосфора и калия, большей емкостью поглощения, более высоким содержанием органического вещества и тяжелым гранулометрическим составом, что в совокупности способствует закреплению природных изотопов урана.

Заключение. Таким образом, установлено существенное влияние эдафо-фитоценологических условий произрастания на интенсивность перехода природного урана в органы и структуры исследованных растений. Выявлены значительные различия в значениях КБП для одних и тех же видов растений и их структур в разных условиях произрастания. В сорбции урана почвой и снижении его биологической подвижности большую роль играют рН среды, концентрация подвижных форм фосфора и калия, сумма поглощенных оснований, содержание в почве органического вещества и физической глины. Наибольшей доступностью природного урана характеризуются дерново-подзолистые слабоподзоленные связно-

песчаные почвы, им заметно уступают перегнойно-подзолисто-глеевые легкосуглинистые почвы, для которых отмечена минимальная биологическая подвижность урана.

Abstract. The coefficients of biological absorption for dominant plants and the influence of edaphic and phytocenological conditions of pine woods vegetation on biological accessibility of natural uranium have been revealed. The coefficients of biological absorption of uranium in system soil – organs of dominant species of pine phytocenoses have been detected. The difference of species of accumulation of natural isotopes of uranium of dominant plants in main types of pine woods has been defined. Most plants have coefficients of biological absorption > 1 and that proves high degree of its biological mobility. Soddy-podsolic mildly podsolitic, connected sandy soils are characterised by the biggest accessibility of natural uranium, humous-podsolic-gley, light loamy soils are remarkable for a minimal biological accessibility of uranium. The main edaphic factors which reduce biological mobility of uranium are its pH, concentration of mobile forms of phosphorous and potassium, the contents of organic matter and physical clay in soil.

Литература

1. В. В. Ковальский, Геохимическая экология, Минск, Наука, 1974.
2. А. А. Искра, В.Г. Бахуров, Естественные радионуклиды в биосфере, Москва, Энергоиздат, 1981.
3. А. Л. Ковалевский, Естественные радиоактивные элементы в растениях Сибири. Улан-Удэ, Бурятское книжное издательство, 1966.
4. Н. А. Титаева, А.И. Таскаев, Миграция тяжелых естественных радионуклидов в условиях гумидной зоны, Ленинград, Наука, 1983.
5. Тяжелые естественные радионуклиды в биосфере: Миграция и биологическое действие на популяции и биогеоценозы / Р.М. Алексахин, Н.П. Архипов, Р.М. Бархударов и др. Москва, Наука, 1990.
6. Руководство к практическим занятиям по радиохимии. Изд-е 2-е, перераб. / Под ред. А.Н. Несмеянова, Москва, Химия, 1980.
7. Л. Г. Бязров, Лишайники – индикаторы радиоактивного загрязнения, Минск, Изд-во КМК, 2005.
8. Б. И. Якушев, Исследование растений и почв: Эколого-физиологические методы. Минск, Наука и техника, 1988.
9. F. Claude, D. Laurent, G. L. Jacqueline, Uranium complexation and uptake by a green alga in relation to chemical speciation: The importance of the free uranyl ion, *Environ. Toxicol. and Chem.*, **23**, N 4 (2004), 974-981.
10. Н. Г. Рачкова, И. И. Шуктомова, А. П. Карманов, Л. С. Кочева, Способность анальцимсодержащей породы тиманской цеолитоносной провинции и сорбентов на основе растительной ткани к поглощению урана, радия и тория из водных растворов. Тр. Коми науч. центра УрО РАН, N 172 (2003), 67-80.
11. G. Echevarria, M.I. Sheppard, J.L. Morel, Effect of pH on the sorption of uranium in soils, *J. of Environ. Radioact.*, **53**, N 3 (2001), 257—264.
12. M. Stojanovic, D. Potpara, Z. Janjusevic, L. Tesmanovic, The effect of agrochemical characteristics and contents of phosphorous in soil on absorption of antropogenic uranium. *Zdravstveno bezbedna hrana*, Novi Sad, 2002, 263-268.