

УДК 54:631.47

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ  $^{137}\text{Cs}$  В РАСТЕНИЯХ И ПОЧВАХ ФОНОВЫХ ЗАПАДНО-СИБИРСКИХ ЛАНДШАФТОВ ТУНДРЫ И ТАЙГИ****Усачева А.А., Семенов И.Н., Мирошников А.Ю.***ФГБУН «Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии»  
Российской академии наук, Москва, e-mail: usacheva@list.ru*

В работе рассмотрено распределение  $^{137}\text{Cs}$  в моховой (*Sphagnum*, *Politrichum*, *Pleurosum*, *Dicranum*), лишайниковой (*Cladonia*, *Cetraria*) травянистой (осоки, разнотравье) и кустарничковой (ерник) растительности четырех ключевых участков, расположенных в фоновых тундровых и таежных ландшафтах центра Западной Сибири. На мохово-травянисто-кустарничковый ярус приходится около 30% запасов цезия-137 от его суммарного количества в изученных ландшафтах. Средняя удельная активность и запасы в мохово-травянисто-кустарничковом покрове уменьшаются от северной тайги к южной из-за увеличения ежегодного прироста биомассы и от более сухих к увлажненным местообитаниям. Средние запасы и удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  уменьшаются в ряду сообществ: долгомошные, зеленомошные > беломошные, сфагновые, кустарничковые > осоковые. В растениях наибольшие запасы  $^{137}\text{Cs}$  обнаружены в нижних частях мхов. В мохово-травянисто-кустарничковом ярусе лесных биогеоценозов (сосняки) удельная активность и запасы  $^{137}\text{Cs}$  в 2–3 раза меньше, чем в ландшафтах открытых заболоченных пространств. В торфяных почвах он проникает на большую глубину, чем в минеральных постлитогенных (глееземах, криоземах, подбурях, подзолах и светлоземах).

**Ключевые слова:** цезий-137, Западная Сибирь, сфагнум, политрихум, осоки, тундра, тайга**DISTRIBUTION OF  $^{137}\text{Cs}$  IN VEGETATION AND SOILS OF BACKGROUND TUNDRA AND TAIGA LANDSCAPES IN WESTERN SIBERIA****Usacheva A.A., Semenov I.N., Miroshnikov A.Yu.***Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS,  
Moscow, e-mail: usacheva@list.ru*

This article are focused on distribution of  $^{137}\text{Cs}$  in moss, herb and shrub layers in four key areas located in background landscapes of tundra and taiga in the central part of Western Siberia. In tundra and taiga landscapes 30% of  $^{137}\text{Cs}$  total storage occurs in the moss-herb-shrub layer. Average activity of cesium-137 and its pollution density decrease from northern taiga to southern taiga in the moss-herb-shrub layer due to increasing annual growth of biomass and from dry to wet biotope. Average  $^{137}\text{Cs}$  activity and pollution density decrease in a range of communities: *Politrichum*, green mosses (*Pleurosum* and *Dicranum*) > *Cladonia*, *Cetraria*, *Sphagnum*, shrubs > sedges. The most part  $^{137}\text{Cs}$  activity is found in a lower part of mosses. Average activity of cesium-137 and its pollution density of moss-herb-shrub layer are 2–3 times higher in open areas of wetlands and woodsides than in pine forests.  $^{137}\text{Cs}$  enters deeper into the peat soils than in mineral soils.

**Keywords:** cesium-137, Western Siberia, *Sphagnum*, *Politrichum*, sedge, tundra, taiga

Испытания ядерного оружия в атмосфере обусловили глобальное загрязнение Земли продуктами радиоактивного распада, в том числе  $^{137}\text{Cs}$  – искусственным радионуклидом с периодом полураспада 30,2 лет, который в фоновых ландшафтах является одним из главных дозообразующих техногенных радионуклидов. Обширная литература по его поведению в экосистемах основана на работах, выполненных на территориях, загрязненных в результате аварий на ПО «Маяк» и атомных электростанциях (прежде всего Чернобыльской и Фукусима-1). Из-за различий во фракционном составе  $^{137}\text{Cs}$ , поступающего в ландшафты с глобальными, региональными или локальными выпадениями, особенности его миграции и аккумуляции в фоновых ландшафтах могут отличаться от закономерностей, выявленных на при-

мере загрязненных территорий [4]. Кроме того, его радиальное и латеральное распределение в фоновых ландшафтах сформировалось за более длительный период, чем тот, который характерен для территорий, загрязненных в результате аварии на Чернобыльской АЭС.

Миграция и аккумуляция цезия-137 в фоновых тундровых и таежных ландшафтах, охватывающих более 2/3 площади России, изучены слабо [2, 5, 6, 8]. Актуальность изучения его поведения в ландшафтах, не подвергшихся загрязнению вследствие аварий, определяется расширением географии расположения ядерно-радиационно-опасных объектов и повышенным вниманием общественности к вопросам радиационной безопасности.

**Целью** проведенных исследований был анализ распределения цезия-137 в моховой,

травянистой и кустарничковой растительности фоновых тундровых и таежных ландшафтов Западной Сибири.

### Материалы и методы исследования

Объектами исследования стали почвенно-геохимические катены четырех участков в Западной Сибири, в которые цезий-137 поступал исключительно в виде глобальных выпадений (рисунок). Ландшафты трещинно-полигональной типичной тундры изучены в западной части Гыданского полуострова на слабо расчлененном междуречье рек Яраяха и Седеяха (участок Тазовский). Болотно-лесные ландшафты исследованы в северной тайге (средняя часть бассейна р. Пур, 2 км к северу от г. Губкинский – участок Пурпе), на границе северной и средней тайги (Сибирские увалы, 4 км к северо-востоку от г. Ноябрьск) и в средней тайге (юго-запад Среднеобской низменности,

3 км к югу от пос. Салым). Более подробное описание участков, а также условий миграции радионуклидов в почвах представлено в работе [8]. На 50 точках заложен 51 разрез, отобрано 373 почвенных и 27 растительных образцов.

Пробы почв отбирали послойно из фиксированной площади с шагом 3–10 см до глубины 15–30 см в зависимости от мощности органогенной или органоминеральной толщи для последующего определения плотности загрязнения. Из нижележащей толщи отпробование выполнено погоризонтно для уточнения классификационного положения почв. Укос общей надземной фитомассы проводили на фиксированной площади.

Удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  измерена в 281 пробе прямым  $\gamma$ -спектрометрическим методом с использованием полупроводникового Ge(Li)-детектора GEM-4519 (GLP-25300/13), оснащенного NaI(Tl)-детекторами 160×160 мм с колодцами 55×110 мм (аналитик Р.В. Соломенников, ИГЕМ РАН).



Расположение участков:  
1 – Тазовский; 2 – Пурпе; 3 – Ноябрьск; 4 – Салым

**Результаты исследования  
и их обсуждение**

В лесной подстилке и неразложившемся опаде удельная активность <sup>137</sup>Cs варьирует от 0 до 94 Бк/кг при среднем 58 Бк/кг, запасы – от 0 до 425 Бк/м<sup>2</sup> при среднем 173 Бк/м<sup>2</sup>, что составляет 6–40% от запасов в ландшафте при среднем 23% (число проб, *n* = 5). Максимум запасов обнаружен в опаде хвои сосны северотаежных ландшафтов, минимум – в подстилке из неразложившейся листвы и хвои среднетаежных ландшафтов. В среднем на растительность приходится 27% от суммарных запасов <sup>137</sup>Cs в ландшафтах при очень высокой вариабельности (коэффициент вариации, *Cv* = 107%). В более гидроморфных условиях доля запасов <sup>137</sup>Cs, приходящихся на кустарничково-травянисто-моховой ярус, повышена (табл. 1).

В постлитогенных почвах традиционно отмечается поверхностно-аккумулятивное распределение цезия-137 как очень слабоподвижного радионуклида, основное загрязнение которым произошло в середине XX века. В изученных почвах тундровых и таежных ландшафтов Западной Сибири (глееземах, криоземах, светлоземах, подбурках и подзолах) с частотой 85% встречается

поверхностно-аккумулятивное распределение удельной активности и запасов <sup>137</sup>Cs. В органогенных почвах из-за активного прироста нового материала чаще наблюдается его распределение, отличное от экспоненциального.

В изученных почвах его удельная активность более 100 Бк/кг, как правило, встречается только в приповерхностных органогенных горизонтах до глубины 12 см с зольностью более 30%. Ранее на примере почв верховых болот междуречья рек Обь и Томь отмечена прямая корреляция между активностью <sup>137</sup>Cs и зольностью торфов [3]. В постлитогенных полугидроморфных почвах, которые чаще всего представлены торфяными типами в отделах глеевых, криотурбированных и альфегумусовых почв, <sup>137</sup>Cs, как правило, проникает глубже, чем в автоморфных, на 5 см (табл. 2). В среднем в постлитогенных почвах глубина его проникновения составляет 12,7 ± 9,9 см (*n* = 23), в торфяных – 16,6 ± 13,2 см (*n* = 23).

В торфяных почвах из-за большой мощности органогенной толщи и сильнокислой реакции среды цезий-137 может проникать до глубины 40 и даже 50 см. При сходных кислотно-щелочных условиях и геоботаническом составе глубина проникновения

**Таблица 1**

Запасы цезия-137 в растениях и почвах фоновых тундровых и таежных ландшафтов центра Западной Сибири

| Ландшафты                        |                  |        | Запасы в ландшафте, % |       |
|----------------------------------|------------------|--------|-----------------------|-------|
|                                  |                  |        | Растения              | Почвы |
| Тундровые                        | автоморфные      | ТЭ     | 37,7                  | 62,3  |
|                                  | гидроморфные     | СА     | 39,9                  | 61,1  |
| Северотаежные                    | автоморфные      | А      | 13,0                  | 87,0  |
|                                  | полугидроморфные | ТЭ-ТСА | 97,7                  | 0,3   |
|                                  | гидроморфные     | ТСА    | 23,1                  | 76,9  |
|                                  | 52,1             |        | 47,9                  |       |
| Граница северной и средней тайги | автоморфные      | А      | 21,5                  | 78,5  |
|                                  |                  | ТЭ     | 16,0                  | 84,0  |
|                                  | полугидроморфные | ТЭ-ТСА | 15,6                  | 84,4  |
|                                  | гидроморфные     | ТСА    | 100                   | 0     |
|                                  |                  |        | 22,6                  | 77,4  |
|                                  | ТЭ-ТСА           | 26,2   | 73,8                  |       |
| Среднетаежные                    | автоморфные      | ТЭ     | 1,2                   | 98,8  |
|                                  |                  |        | 0,9                   | 99,1  |
|                                  |                  |        | 6,3                   | 93,7  |
|                                  | полугидроморфные | ТЭ     | 0,1                   | 99,9  |
|                                  | гидроморфные     | ТСА    | 7,7                   | 92,3  |
| 6,5                              | 93,5             |        |                       |       |

Примечание. Элементарные ландшафты: А – автономные, ТЭ – трансэлювиальные, ТСА – трансупераквальные, СА – супераквальные.



$^{137}\text{Cs}$  в торфяных почвах увеличивается от тундровых к таежным ландшафтам, что, по-видимому, связано с глубиной сезонного промерзания и протаивания, с одной стороны, и с количеством годовых осадков, с другой.

**Таблица 2**  
Глубина проникновения цезия-137  
в основных типах почв

| Почвы      |              | Среднее и стандартное отклонение | Число разрезов |
|------------|--------------|----------------------------------|----------------|
| Торфяные   | олиготрофные | $13,3 \pm 8,4$                   | 16             |
|            | эутрофные    | $23,6 \pm 17,1$                  | 8              |
| Криоземы   | типичные     | $1,5 \pm 1,5$                    | 2              |
|            | торфяные     | 15                               | 1              |
| Глееземы   | типичные     | $13,5 \pm 8,5$                   | 2              |
|            | торфяные     | $9,7 \pm 2,0$                    | 3              |
| Подзолы    | типичные     | $5,5 \pm 0,5$                    | 2              |
|            | торфяные     | $25,5 \pm 12,8$                  | 4              |
| Подбуры    | типичные     | $5 \pm 0$                        | 2              |
|            | торфяные     | $12,0 \pm 2,0$                   | 2              |
| Светлоземы | типичные     | $16,2 \pm 6,4$                   | 4              |

Глубже 20 см в торфяных почвах частота обнаружения значимых активностей цезия-137 больше, чем в постлигитогенных: 22 и 16% соответственно. То есть в очень кислых торфяных почвах (значения pH составляют 3,3–4,0) цезий-137 активнее мигрирует, чем в кислых (4,0–5,0) подзолах, подбурах, светлоземах и криоземах.

От средней тайги к северной увеличивается доля запасов  $^{137}\text{Cs}$  в растительном яру-

се и частота обнаружения высокоактивных проб растительности (табл. 3), что связано с меньшими величинами годового прироста фитомассы, которые определяют «разбавление» пиковых глобальных радиоактивных выпадений 60-х гг. XX века. В распределении абсолютных величин запасов явной закономерности не выявлено.

**Таблица 3**  
Цезий-137  
в мохово-травянисто-кустарничковом ярусе  
таежных ландшафтов центра  
Западной Сибири

| Ландшафты                            | Удельная активность, Бк/кг | Запасы, Бк/м <sup>2</sup> |
|--------------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| Северотаежные (9)                    | $117 \pm 41$<br>52–170     | $208 \pm 142$<br>30–410   |
| Граница северной и средней тайги (7) | $86 \pm 31$<br>52–150      | $308 \pm 192$<br>116–736  |
| Среднетаежные (8)                    | $36 \pm 37$<br>2,3–110     | $26 \pm 27$<br>1–83       |

**Примечание.** Здесь и далее числитель – среднее значение и стандартное отклонение, знаменатель – минимум и максимум, в скобках – число проб.

Запасы  $^{137}\text{Cs}$  уменьшаются от моховых сообществ (представители родов *Dicranum*, *Politrichum* и *Sphagnum*) к лишайниковым (*Cladonia* и *Cetraria*), кустарничковым (*Bétula nána*, *Lédum*, *Vaccínium*, *Rubus chamaemorus*, *Salix polaris*, *Filipéndula*) и осоковым (табл. 4), что связано с филогенетическими особенностями и ранее отмечалось в накоплении металлов растениями тайги и тундры Восточно-Европейской равнины [1, 9].

**Таблица 4**  
Цезий-137 в мохово-травянисто-кустарничковом ярусе  
тундровых и таежных ландшафтов Западной Сибири

| Растительность  | Доминант                                    | Удельная активность, Бк/кг | Запасы, Бк/м <sup>2</sup> |
|---|---|----------------------------|---------------------------|
| Зеленомошная и кустарничково-зеленомошная (3)                   | <i>Dicranum</i> sp.                         | $120 \pm 23$<br>94–150     | $293 \pm 33,5$<br>256–337 |
| Долгомoшная и кустарничково-долгомошная (5)                     | <i>Politrichum</i> sp.                      | $116 \pm 35$<br>82–165     | $302 \pm 99$<br>96–410    |
| Беломoшная (5)  | <i>Cladonia</i> sp.,<br><i>Cetraria</i> sp. | $87 \pm 44$<br>52–170      | $173 \pm 50$<br>116–237   |
| Кустарничковая (8)  | Отсутствует                                 | $71 \pm 36$<br>6–110       | $120 \pm 128$<br>4–410    |
| Осоковая, в т.ч. кустарничково-осоковая и осоково-сфагновая (4) | Отсутствует                                 | $68 \pm 58$<br>6–150       | $30 \pm 25$<br>4–70       |
| Сфагновая и разнотравно-кустарничково-сфагновая (12)            | <i>Sphagnum</i> sp.                         | $66 \pm 47$<br>6–165       | $162 \pm 219$<br>1–736    |

Ряд изученных растительных сообществ тундр и тайги Западной Сибири по уменьшению средних величин удельной активности <sup>137</sup>Cs аналогичен ряду по плотности загрязнения: зеленомошные и долгомошные > лишайниковые, кустарничковые, сфагновые > осоковые [7]. Во мхах по сравнению с кустарничками и осоками даже при близкой удельной активности запасы <sup>137</sup>Cs больше из-за повышенной в 10 раз фитомассы.

В сфагновых сообществах с наименьшими средними величинами удельной активности и запасов <sup>137</sup>Cs (66 Бк/кг и 162 Бк/м<sup>2</sup>) варибельность показателей максимальна среди моховых сообществ (Cv составляет 81 и 148% соответственно), по-видимому, из-за высокой варибельности фитомассы. Во всех родах мхов максимальные значения, как правило, приурочены к их нижним бурым частям, что согласуется с литературными данными [10]. Наименьшая варибельность удельной активности и запасов обнаружена в зеленомошных растительных ассоциациях (Cv равен 19 и 11% соответственно).

Удельная активность и запасы <sup>137</sup>Cs максимальны в мохово-травянисто-кустарничковом ярусе открытых пространств (табл. 5) и превышают аналогичные показатели в лесных биогеоценозах в 2 и 3 раза соответственно.

**Таблица 5**

**Цезий-137**  
в мохово-травянисто-кустарничковом ярусе  
открытых сообществ и лесов

| Сообщества                         | Удельная активность, Бк/кг | Запасы, Бк/м <sup>2</sup>  |
|------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Леса из сосны, березы (8)          | $\frac{53}{98}$<br>2,3–150 | $\frac{78}{138}$<br>1–337  |
| Болота (13)                        | $\frac{94}{50}$<br>25–170  | $\frac{227}{93}$<br>13–736 |
| Разреженный лес или его опушка (5) | $\frac{89}{42}$<br>52–160  | $\frac{203}{52}$<br>55–351 |

**Примечание.** Числитель – среднее значение и коэффициент вариации Cv (%), знаменатель – минимум и максимум, в скобках – число проб.

Непропорционально повышенные запасы цезия-137 на открытых пространствах объясняются повышенными значениями фитомассы наземной растительности, которая несколько угнетается в затененных местообитаниях основных и смешанных (мелколиственно-хвойных) лесов. Кроме того, в лесных биогеоценозах при выпадении осадков существенная часть цезия-137 задерживается кронами деревьев.

**Выводы**

1. На мохово-травянисто-кустарничковый ярус приходится около 30% запасов цезия-137

от суммарного его количества в тундровых и таежных ландшафтах Западной Сибири. Средняя удельная активность и запасы в мохово-травянисто-кустарничковом ярусе уменьшаются от северной тайги к южной из-за увеличения ежегодного прироста биомассы и от более сухих к более влажным местообитаниям.

2. Средние запасы и удельная активность <sup>137</sup>Cs уменьшаются в ряду сообществ: долгомошные, зеленомошные > беломошные, сфагновые, кустарничковые > осоковые. В растениях наибольшие запасы цезия-137 характерны для нижних частей мхов.

3. В мохово-травянисто-кустарничковом ярусе лесных биогеоценозов удельная активность и запасы <sup>137</sup>Cs в 2–3 раза меньше по сравнению с ландшафтами открытых пространств.

4. В почвах поверхностно-аккумулятивное распределение удельной активности и запасов <sup>137</sup>Cs отмечается с частотой 85%; глубина его проникновения больше в торфяных почвах, чем в минеральных постлитогенных почвах.

*Исследование выполнено в рамках базовой темы «Закономерности миграции и распределения радиоактивных и стабильных загрязнителей в ландшафтно-геохимических системах Арктики».*

**Список литературы**

1. Авессаломова И.А. Биогеохимия среднетаежных ландшафтов юга Архангельской области // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2006. – № 1. – С. 50–56.
2. Балыкин Д.Н., Пузанов А.В., Балыкин С.Н. Эколого-геохимическая оценка долины реки Васюган (Томская область) // География и природные ресурсы. – 2013. – № 2. – С. 96–102.
3. Ефремова Т.Т., Сухоруков Ф.В., Ефремов С.П., Будашкина В.В. Аккумуляция <sup>137</sup>Cs в болотах междуручья Оби и Томи // Почвоведение. – 2002. – № 1. – С. 100–107.
4. Кузнецов В.А., Кольянов В.П., Генералова В.А. Распределение стронция-90 и цезия-137 по формам нахождения и оценка их селективных свойств // Геохимические пути миграции искусственных радионуклидов в биосфере. Тезисы докладов V конференции. – Пушкино, 1991. – С. 65.
5. Парамонова Т.А. Аккумуляция техногенного Cs-137 в почвах фоновых ландшафтов южной тайги европейской территории России // Радиоэкология: итоги, современное состояние и перспективы. – Обнинск: ВНИИРАЭ, 2008. – С. 229–239.
6. Пузанов А.В., Балыкин С.Н., Балыкин Д.Н. Радиоактивные элементы в почвах бассейна р. Нижняя Тунгуска // Мир науки, культуры, образования. – 2008. – № 5. – С. 26–29.
7. Семенков И.Н., Усачева А.А. Цезий-137 как маркер современных почвенных турбаций // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10–7. – С. 1478–1481.
8. Семенков И.Н., Усачева А.А., Мирошников А.Ю. Распределение цезия-137 глобальных атмосферных выпадений в таежных и тундровых катенах реки Обь // Геология рудных месторождений. – 2015. – Т. 57. – № 2. С. 154–173.
9. Тентюков М.П. Геохимия ландшафтов равнинных тундр (на примере Ямала и Большеземельской тундры). – Сыктывкар, 2010. – 260 с.
10. Щербов Б.Л., Страховенко В.Д., Маликова И.Н., Осипова Л.П., Сухоруков Ф.В., и др. Сравнительная характеристика современного радиоактивного загрязнения территорий Западной Сибири, прилегающих к Семипалатинскому и Новоземельскому полигонам (на примере Алтая и Пур-Тазовского междуручья) // Сибирский экологический журнал. – 2000. – № 1. – С. 51–60.