

УДК 550.424:551.464

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И МИГРАЦИЯ ^{137}Cs В ТОРФЯНЫХ ГОРИЗОНТАХ
ВЕРХОВОГО БОЛОТА В ОКРЕСТНОСТЯХ СЕВЕРОДВИНСКОГО
ПРОМЫШЛЕННОГО РАЙОНА****Зыков С.Б., Яковлев Е.Ю., Зыкова Е.Н., Дружинин С.В.***Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики
им. академика Н.П. Лаврова РАН, Архангельск, e-mail: abs2417@yandex.ru*

Целью исследования являлся анализ содержания радиоактивного ^{137}Cs в почвенных профилях на открытом и возвышенном участках верхового болота в окрестностях Северодвинского промышленного района. Предпосылкой для данного исследования стала неизученность распределения ^{137}Cs по торфяному профилю послойно на данной территории. Задачами исследования являлись отбор торфяных профилей и послойное определение активности цезия в каждом из горизонтов. Кроме того, было проведено исследование активности ^{137}Cs в растениях, произрастающих на пробных площадях. В результате проведенных исследований были определены значения активности радиоактивного цезия в торфяных горизонтах с шагом 2 см, которые показали некоторые различия в миграции и распределении активности вниз по профилю на разных пробных участках. Было выявлено смещение вниз по профилю общей активности изотопа и найдены пики активности его по профилю, связанные с глобальными радиоактивными выпадениями. В результате обработки данных найдены различия в активности ^{137}Cs растений, произрастающих на участке открытого болота и на участке с древесной растительностью. В целом можно сказать, что были получены интересные результаты, свидетельствующие о том, что, несмотря на все условия для быстрой вертикальной миграции цезия, этот радиоактивный элемент накапливается в значительных количествах в растительности и сохраняется в верхних горизонтах торфяных профилей. Данные исследования подтверждают выводы других научных работ, проведенных на сходных территориях, о сорбции, накоплении и вертикальной миграции цезия в условиях болотных экосистем. Распределение активности данного изотопа по торфяному профилю также коррелирует с глобальными выпадениями изотопа.

Ключевые слова: радиоактивные изотопы, геоэкология, почвы, экологический мониторинг, спектрометрия, радиохимия

**DISTRIBUTION AND MIGRATION OF ^{137}Cs IN THE PEATH HORIZONS
OF THE TOP BOG IN THE SEVERODVINSK INDUSTRIAL REGION****Zykov S.B., Yakovlev E.Yu., Zykova E.N., Druzhinin S.V.***Federal Centre for Integrated Arctic Research named after N.P. Laverov RAS, Archangelsk,
e-mail: abs2417@yandex.ru*

The aim of the study was to analyze the radioactive ^{137}Cs content in soil profiles in the open and elevated parts of the upper bog in the region of the Severodvinsk industrial region. The prerequisite for this study was the unawareness of ^{137}Cs distribution over the peat profile in layers in this area. The objectives of the study were the selection of peat profiles and the layer-by-layer determination of cesium activity in each of the horizons. In addition, a study was conducted of ^{137}Cs activity in plants growing on test plots. As a result of the conducted research, the values of the activity of radioactive cesium in the peat horizons with a step of 2 cm were determined, which showed some differences in the migration and distribution of the activity down the profile in different test plots. An offset downward was revealed along the profile of the overall activity of the isotope and peaks of its activity along the profile associated with global radioactive fallout were found. As a result of data processing, differences were found in the activity of ^{137}Cs plants growing in the area of the open bog and in the area with woody vegetation. In general, it can be said that interesting results were obtained indicating that despite all the conditions for rapid vertical migration of cesium, this radioactive element accumulates in significant quantities in vegetation and remains in the upper horizons of peat profiles. These studies confirm the findings of other scientific studies carried out in similar areas on the sorption, accumulation and vertical migration of cesium in wetland ecosystems. The distribution of activity of this isotope over the peat profile also correlates with global isotope depositions.

Keywords: radioactive isotopes, geo-ecology, soils, environmental monitoring, spectrometry, radiochemistry

Сфагновые болота характеризуются приподнятой поверхностью посередине и, как правило, приурочены к равнинной территории. Согласно современным представлениям верховое болото характеризуется как омбротрофная структура, поскольку питательные вещества поступают в него из жидких и твердых осадков. В России площадь покрытая верховыми болотами занимает более 1,4 млн км², что составляет 8%

всей площади страны [1]. Поверхность верхового болота представляет собой комбинацию водных бассейнов и кочек, на которых преобладают мхи, лишайники, растения, способные приспособиться к низким значениям рН и малому количеству питательных веществ. Так как осадки являются единственным источником воды, заболачивание снижает уровень кислорода и окислительно-восстановительный потенциал. Это об-

стоятельство снижает скорость разложения органического вещества. В результате этих процессов образование торфа в верховом болоте происходит со скоростью от 0,5 до 1,14 мм в год [2].

Верховое болото является достаточно бедной питательной средой. Только немногие сосудистые виды растений растут на поверхности болота. Наибольшее распространение на верховых болотах получили сфагновые мхи, составляющие одну из главных групп несосудистых растений, встречающихся на болотах. Что касается деревьев, то их на верховых болотах совсем немного. В основном это карликовая береза и сосна обыкновенная, высота которых зачастую не превышает 0,5–1,5 м. В последнее время все больше интереса проявляется к болотным экосистемам с точки зрения радиологических исследований. Во многих ранних исследованиях основное внимание было уделено распределению ^{137}Cs по поверхности верховых болот [2]. Лишь немногие работы описывали распределение ^{137}Cs по узким торфяным горизонтам и пытались связать накопление этого изотопа в определенных слоях с точки зрения сорбции живыми клетками с последующим восходящим переносом его из неживой органической массы. Большое значение послужило определению радиоактивного цезия имеет и для датировки торфов по глубине в сочетании с изотопами плутония и америция [3].

Цель исследования: определить и сравнить, как мигрирует ^{137}Cs по торфяному профилю в разных частях верхового болота в окрестностях Северодвинского промышленного района. Кроме этого, хотелось выяснить, на какой глубине находятся максимальные очаги активности и как эта активность распределена вниз по горизонтам с шагом 2 см. Определенную задачу представляла и оценка активности ^{137}Cs в основных растениях, живущих в болотной экосистеме. Пробные участки были представлены открытой площадкой типичного верхового болота и низким участком с древесной растительностью. Исследования были проведены в 2007 и 2017 гг. В этой связи было особенно интересно выявить распределение активности ^{137}Cs в болотной растительности и по почвенному горизонту и определить сорбционную способность мхов рода сфагнум удерживать радиоактивный цезий.

Пробная территория представляла собой небольшое верховое болото округлой формы, расположенное в хвойном лесу

в 10 км от г. Северодвинска (N: 64° 30' 02"; E: 39° 52' 10"). Болото представляет собой совокупность нескольких видов микро-рельефа. В основном это открытые участки покрытые ковром из сфагновых мхов (*Sphagnum fuscum* и *Sphagnum rubellum*), и кочки с мхами и травянистой растительностью представленной в основном пушицей, розмарином, росянкой и клюквой. Другая разновидность рельефа представляет собой пониженные участки. Это относительно сухие площадки болота, где помимо вышеупомянутой растительности встречаются: сосна обыкновенная высотой до 1,5 м у подножия которой господствует морошка (*Rubus chamaemorus*), вереск (*Calluna vulgaris*), брусника (*Vaccinium vitis-idaea*) и карликовая береза (*Betula nana*). Из каждой из этих двух разновидностей рельефа и, соответственно, разных экосистем были отобраны пробы в 2007 г. и, повторно, в 2017 г.

Материалы и методы исследования

В 2007 г. был отобран торфяной профиль на открытом участке верхового болота пробной площади и один профиль на низком участке болота, где росли сосны. Оба профиля отбирались традиционным способом в виде почвенного разреза с описанием горизонтов. Образец для дальнейшей обработки в лаборатории вырезался в виде массивного блока размером 50 на 50 см и глубиной 60 см с последующим разделением на 3 части по глубине. В таком виде эти части транспортировались в лабораторию, высушивались при 105 °С до постоянного веса и разрезались на слои по 2 см с помощью ножа. Высушенные образцы измельчались до однородной массы и передавались на измерение. В 2017 г. был проведен отбор проб на тех же участках. Образцы 2017 г. отбирались путем окапывания вокруг отбираемого блока размером 50 на 50 см и глубиной 70 см. Торфяной блок помещался в контейнер соответствующего размера и в неизменном виде транспортировался в лабораторию. В дальнейшем сушка и разделение на слои происходили по вышеупомянутой методике. Всего было приготовлено 60 проб из торфяных профилей, которые были отправлены на измерение.

В 2007 г. также были отобраны мхи, с тех же участков на которых отбирались торфяные профили. Это были мхи рода сфагнум. В 2017 г. помимо проб мхов на тех же участках проводился также отбор образцов морошки, вереска брусники и карликовой березы. Растения не разделялись на

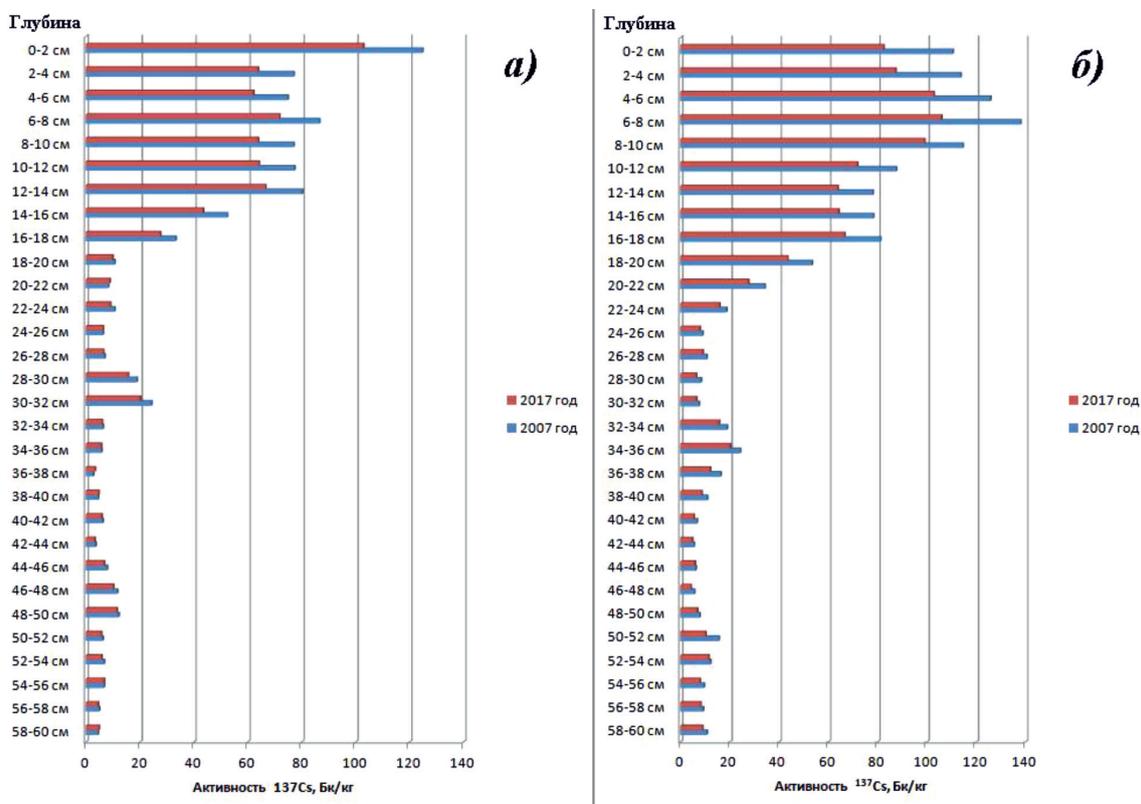
морфологические части, а извлекались из почвы полностью. Растения упаковывались в полиэтиленовые пакеты, а в лаборатории тщательно очищались от посторонних фрагментов. Далее они высушивались при 105 °С до постоянного веса и измельчались на мельнице до частиц менее 1 мм. В целом было отобрано и подготовлено к измерению 12 проб растительности.

Измерение активности ¹³⁷Cs проводилось на полупроводниковом гамма-спектрометре с погрешностью до 15%. Кроме того, для уменьшения погрешности активность нуклида соотносилась и с общей гамма-активностью профиля. Перед измерением спектрометр тщательно калибровался несколько раз. Измерение проводилось по геометрии Маринелли с экспозицией 7200 секунд.

Результаты исследования и их обсуждение

На рисунке показаны сравнительные графики распределения активности ¹³⁷Cs по торфяным горизонтам на открытом участке

верхового болота и на низком участке с древесной растительностью в 2007 и 2017 гг. Сорбция цезия на обоих участках показала сходные значения активности. Средняя суммарная активность по горизонтам составляла в 2007 г. на открытом участке 28,7 Бк/кг, а на низком участке 40,9 Бк/кг. В 2017 г. картина была очень похожей и составляла соответственно на открытом участке болота 24,3 Бк/кг и 33,1 Бк/кг на участке с соснами. Если сравнивать два участка по распределению цезия по горизонтам, то будут видны некоторые отличия. На участке с древесной растительностью можно наблюдать смещение пиков активности цезия на 5–8 см вниз по профилю. В 2017 г. в том и другом профиле наблюдается также значительное уменьшение активности цезия в верхнем 0–2 см слое. Суммарная активность цезия на участке с древесной растительностью также мигрировала вниз по профилю и 50% активности здесь сосредоточено на глубине 8–18 см, в отличие от открытого участка, где основная концентрация ¹³⁷Cs наблюдается в интервале 4–14 см.



Вертикальное распределение ¹³⁷Cs в торфяном профиле: а) на открытом участке верхового болота в 2007 и 2017 г.; б) на низком участке верхового болота с соснами в 2007 и 2017 гг.

Активность ^{137}Cs в растениях, отобранных на пробных площадках

Вид растения	Активность ^{137}Cs в 2007 г., Бк/кг		Активность ^{137}Cs в 2017 г., Бк/кг	
	Открытый участок	Низкий участок	Открытый участок	Низкий участок
Мох сфагнум (<i>Sphagnum fuscum</i> и <i>Sphagnum rubellum</i>)	449,6	415,7	308,3	142,5
Вереск (<i>Calluna vulgaris</i>)	605,4	594,3	479,1	332,3
Морошка (<i>Rubus chamaemorus</i>)	396,1	348,3	294,7	375,3
Брусника (<i>Vaccinium vitis-idaea</i>)	387,1	365,7	279,1	194,3

На рисунке, *a*, показано вертикальное распределение осадения ^{137}Cs на открытом участке верхового болота в 2007 и 2017 гг. Была отмечена хорошая сорбция ^{137}Cs в слоях торфяного профиля 0–2 и 6–8 см, с соответствующими значениями активности 124,8 и 86,6 Бк в 2007 г. на кг сухой массы. Вниз по профилю наблюдалось снижение активности цезия с небольшими повышениями в слоях 30–32 (24,3 Бк/кг) и 48–50 см (12,2 Бк/кг). В 2017 г. активность несколько снизилась во всех слоях с той же тенденцией к понижению активности вниз по профилю. Максимальная активность наблюдалась в слое 0–2 см (104,3 Бк/кг). Также были отмечены относительно повышенные значения на глубине 32 см (19,8 Бк/кг) и 50 см (11,6 Бк/кг).

Аналогичная тенденция наблюдалась на низком участке с соснами, но распределение ^{137}Cs в этих профилях немного отличалось (рисунок, *b*). Наблюдался небольшой сдвиг пиков активности вниз по профилю на 5–6 см ввиду миграции цезия как химического элемента, что подтверждается также определениями нерадиогенного ^{133}Cs в этих слоях с помощью масс-спектрометрических определений. Пиковые значения активности ^{137}Cs приходятся на слои глубиной от 4 до 10 см. Здесь активность достигает значений 115,2 и 135,4 Бк/кг в 2007 и 2017 гг. соответственно. С глубины 18–20 см активность медленно снижается и выравнивается до значений 6–20 Бк/кг до глубины 60 см. В горизонтах 34 и 52 см наблюдаются также небольшие повышенные значения активности, приуроченные к испытаниям ядерного оружия в атмосфере и чернобыльским следом, с такой же тенденцией к смещению в глубже лежащие слои.

Кроме того, было проведено измерение активности в различных видах болотной растительности на открытом и низком участках. Были отобраны пробы мха, вереска, брусники и морошки. Из таблицы видно, что активность ^{137}Cs в растениях суще-

ственно различается как по годам отбора, так и по участкам. Активность ^{137}Cs в мхе сфагнум на открытом участке за 10-летний период снизилась незначительно по сравнению с пониженным участком. В морошке на открытом участке наблюдается падение активности, а на пониженном участке обратная тенденция. В бруснике и в вереске в том и другом случае наблюдается снижение активности при довольно больших относительных значениях.

Динамика содержания ^{137}Cs в почве зависит от физико-химических свойств, взаимодействия с неорганическими и органическими составляющими почвы, но также от биологических взаимодействий в почвенно-растительной системе, в том числе микробной активности. В минеральных почвах глина связывает ^{137}Cs довольно эффективно, что приводит к очень медленной вертикальной миграции и низкому поглощению в большинстве изученных растений [4]. В лесной подзолистой почве Архангельской области вертикальная миграция радиоактивного цезия также довольно медленна. Это обстоятельство указывает на некоторое связывание ^{137}Cs , но усвоение этого радионуклида у лесных растений может быть и довольно высоким. Это сочетание может быть объяснено поглощением и накоплением ^{137}Cs в мицелии грибов с последующей вертикальной миграцией. Верховые болота очень бедны питательными веществами по сравнению с вышеупомянутыми почвами. Содержание глины в этой экосистеме крайне низкое или отсутствует. Грибковый мицелий присутствует в очень незначительном количестве. Тем не менее оказалось, что довольно медленная вертикальная миграция ^{137}Cs связана с сорбцией его живыми организмами, использующими цезий как суррогат калия. В верховом болоте можно выделить два основных слоя торфа: верхний слой, содержащий живые растения (0–5 см), и нижележащий слой, содержащий мертвый органический мате-

риал. Наибольшая активность ^{137}Cs в торфяных профилях была обнаружена у живых растений. Считается, что поглощение ионов ^{137}Cs мхами происходит в результате ионного обмена, образования металлоорганических комплексов и макромолекул, и цезий постоянно перемещается к растущей вершине сфагнума, где и накапливается [5]. Это обстоятельство следует учитывать для определения датировки выпадения радиоактивных следов, как и то, что сфагнум имеет продолжительность жизни до нескольких сотен лет. Поглощение цезия на открытом участке болота было весьма велико, особенно у вереска, что, видимо, связано с тем, что его корни располагаются в верхнем 10 см слое торфа и сорбируют высокую концентрацию ^{137}Cs из верхних горизонтов почвы, обнаруженную в исследованиях 2018 г. на этой территории [6]. Морошка также показала большие значения концентрации ^{137}Cs , с тенденцией увеличения во времени. В карликовой березе, наоборот, были обнаружены очень низкие содержания радиоактивного изотопа цезия. Они варьировали в пределах от 12,6 до 8,9 Бк/кг на открытом участке верхового болота и низком участке соответственно. Это связано в первую очередь с более глубоким расположением ее корневой системы, поглощающей растворенные вещества из горизонтов с минимальной активностью ^{137}Cs .

Заключение

В целом можно сказать, что суммарная активность ^{137}Cs по обеим пробным площадкам была довольно сходной, но на низком участке с сосновой растительностью наблюдался дрейф активности вниз по профилю на 6–8 см. Центр сосредоточения максимальной общей активности ^{137}Cs также получил смещение и находился ниже по сравнению с открытым участком болота. Концентрация радиоактивного цезия в растениях, отобранных на открытом участке верхового болота, была в целом выше чем у тех, которые росли на низком участке с древесной растительностью. В период с 2007 по 2017 г. активность ^{137}Cs в основном снижалась как по

торфяным горизонтам на обоих участках, так и в растениях. Лишь у морошки на низком участке активность не только не снизилась, но и возросла. Вереск, несмотря на снижение активности данного изотопа во времени, показывал весьма высокие значения на той и другой площадке. В торфяных профилях были явно отмечены пики с повышенными значениями ^{137}Cs , соответствующие испытаниям ядерного оружия в атмосфере в 1960-е гг. и следы от Чернобыльской аварии 1986 г.

Работы выполнены при финансовой поддержке субсидии на выполнение темы государственного задания «Комплексные изотопно-геохимические исследования качества природной среды и идентификация процессов её трансформации на приморских территориях Европейского Севера в современности и в прошлом» № АААА-А19-119011890018-3, а также проектов РФФИ №№ 18-05-60151_Арктика и 18-05-01041_А.

Список литературы / References

1. Болото // Большая российская энциклопедия. Том 3. М., 2005. С. 733–736.
- Swamp // Bol'shaya rossiyskaya entsiklopediya. Tom 3. M., 2005. P. 733–736 (in Russian).
2. Rose K., Vinichuk M., Johanson K.J. ^{137}Cs in a raised bog in central Sweden. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2009. Vol. 100. Is. 7. P. 534–539.
3. Mihalik J., Bartuskova M., Holgve Z., Jezkova T., Henych O. Fractionation of ^{137}Cs and Pu in natural peatland. Journal of Environmental Radioactivity. 2014. Vol. 134. P. 14–20.
4. Vinichuk M., Johanson K.J., Rydin H., Rosén K. The distribution of Cs-137, K, Rb and Cs in plants in a Sphagnum-dominated peatland in eastern central Sweden // Journal of Environmental Radioactivity. 2010. Vol. 101. № 2. P. 170–176.
5. Parry L., Charman D., Blake W. Comparative dating of recent peat deposits using natural and anthropogenic fallout radionuclides and Spheroidal Carbonaceous Particles (SCPs) at a local and landscape scale // Quaternary Geochronology. 2013. Vol. 15. P. 11–19.
6. Зыков С.Б., Дружинин С.В., Зыкова Е.Н., Яковлев Е.Ю., Покровский О.С. Новые данные о долгоживущих техногенных и естественных радиоактивных изотопах в верхних горизонтах почвы в окрестностях Северодвинского промышленного района // Успехи современного естествознания. 2018. № 11–2. С. 328–333.
- Zykov S.B., Druzhinin S.V., Zykova Ye.N., Yakovlev Ye.Yu., Pokrovskiy O.S. New data on long-living technogenic and natural radioactive isotopes in upper layers of soil in the neighborhood of the Severodvinsk industrial area // Advances in current natural sciences. 2018. № 11–2. P. 328–333 (in Russian).