



## Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 51-7:550.4

DOI:10.19110/geov.2023.7.5

### Моделирование нисходящего переноса $^{210}\text{Pb}$ на примере естественного торфяника Иласского болотного массива Европейской Субарктики России: модель IP-CRS

Е. Ю. Яковлев, А. А. Кудрявцева, А. С. Орлов

ФИЦ комплексного изучения Арктики им. Н. П. Лавёрова УрО РАН, Архангельск  
evgeny.yakovlev@fciarctic.ru, pieep1@yandex.ru, [alseror@yandex.ru](mailto:alseror@yandex.ru)

В статье представлены результаты моделирования переноса  $^{210}\text{Pb}$  вниз по торфяному керну для естественного болотного массива Иласский. В керне послойно исследованы активности радионуклидов  $^{210}\text{Pb}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . Из-за неэкспоненциального снижения активности  $^{210}\text{Pb}$  возможны значительные ошибки в определении возраста и скоростей накопления торфа при применении классических моделей датирования. В статье приведены данные  $^{210}\text{Pb}$ -датирования, полученные по модели IP-CRS. Анализ данных показал, что вертикальное распределение  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{210}\text{Pb}$  связано с параметрами торфа: зольностью и насыпной плотностью. Датирование керна по  $^{210}\text{Pb}$  показало для глубины 17–19 см возраст 1963-й год, что согласуется с данными  $^{137}\text{Cs}$ . Датировку данного горизонта косвенно подтверждают данные зольности и насыпной плотности торфа. Перечисленное подтверждает правильность и адекватность выбранной модели датирования естественного торфяника. Пик содержания антропогенных радионуклидов в торфяных отложениях соответствует 1963-му году – дате подписания Договора о частичном запрещении ядерных испытаний, который является ориентиром для геохронологических исследований. Приведённые в исследовании результаты линейной скорости накопления, скорости накопления массы торфяной залежи и величина атмосферного потока  $^{210}\text{Pb}$  хорошо согласуются с данными по торфяникам Северной Европы и Европейской Субарктики России.

**Ключевые слова:** торфяной керн, скорость торфонакопления,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , миграция радионуклидов, моделирование IP-CRS, Иласский болотный массив.

### Modelling $^{210}\text{Pb}$ downward transport in a natural peatland of Ilassky swamp massif in the European Subarctic of Russia: IP-CRS model

E. U. Yakovlev, A. A. Kudryavtseva, A. S. Orlov

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, UB RAS, Arkhangelsk

The paper presents the results of the modelling of the transport of  $^{210}\text{Pb}$  down the peat core for the Ilassky natural bog massif. The activities of radionuclides  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  were investigated in the core layer by layer. Due to the nonexponential decrease of  $^{210}\text{Pb}$  activity, significant errors are possible in determining the age and accumulation rates of peat when applying classical dating models. The article presents  $^{210}\text{Pb}$  dating data obtained using the IP-CRS model. Data analysis showed that the vertical distribution of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$  is related to peat parameters: ash content and bulk density. The  $^{210}\text{Pb}$  dating of the core showed an age of 1963 for a depth of 17–19 cm, which is consistent with the  $^{137}\text{Cs}$  data. The dating of this horizon is indirectly confirmed by the data of the ash content and bulk density of peat. The above mentioned confirms the correctness and adequacy of the chosen model of dating of the natural peat bog. The peak of anthropogenic radionuclide content in peat deposits corresponds to 1963, the date of signing the Partial Nuclear Test Ban Treaty, being a reference point for geochronological studies. The results of linear accumulation rate, peat deposit mass accumulation rate and the magnitude of the atmospheric flux of  $^{210}\text{Pb}$  presented in the study are in good agreement with the data on peatlands of Northern Europe and the European Subarctic of Russia.

**Keywords:** peat core, accumulation rate,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , radionuclides migration, IP-CRS model, Ilassky swamp massif.

Омбротрофные торфяники являются уникальными экологическими архивами, изучение которых дает ценную информацию для понимания прошлых экологических и климатических событий, что особенно важно в связи с растущим интересом к глобальному изменению климата (Ndiaya et al., 2022; Sun et al., 2020). Дополнительно торфяники содержат данные о нако-

плении широкого спектра атмосферных загрязнителей, таких как тяжелые металлы и органические соединения (Magiera et al., 2021). Отметим, что с началом атомной эры на планете торфяники также стали концентрировать в себе техногенные радионуклиды и изотопы, выброшенные в атмосферу в результате испытаний ядерного оружия и радиационных аварий

**Для цитирования:** Яковлев Е. Ю., Кудрявцева А. А., Орлов А. С. Моделирование нисходящего переноса  $^{210}\text{Pb}$  на примере естественного торфяника Иласского болотного массива Европейской Субарктики России: модель IP-CRS // Вестник геонаук. 2023. 7(343). С. 43–51. DOI: 10.19110/geov.2023.7.5

**For citation:** Yakovlev E. U., Kudryavtseva A. A., Orlov A. S. Modelling  $^{210}\text{Pb}$  downward transport in a natural peatland of Ilassky swamp massif in the European Subarctic of Russia: IP-CRS model. Vestnik of Geosciences, 2023, 7(343), pp. 43–51, doi: 10.19110/geov.2023.7.5

(Fialkiewicz-Koziel et al., 2014). Изучение последних в торфяниках является важнейшим инструментом для понимания хронологии торфа, развития и продуктивности торфяного месторождения во времени, изучения изменений климата и т. д. (Zhao et al., 2021). Основным радионуклидом атмосферных осадков, используемым в качестве изотопного маркера при изучении торфяников, является  $^{137}\text{Cs}$ . Однако из-за относительно высокой биодоступности  $^{137}\text{Cs}$  постоянно перемещается к растущим побегам сфагнового мха, где и накапливается (Mroz et al., 2017). В связи с этим восстановление точной хронологии торфа с использованием только  $^{137}\text{Cs}$  может быть затруднено. В качестве независимого параллельного геохронометра используется естественный радионуклид  $^{210}\text{Pb}$  (Fialkiewicz-Koziel et al., 2020). Предполагается, что скорость его поступления на поверхность торфяника относительно постоянна, а миграционная способность ограничена в силу химических свойств. В связи с этим в торфяной залежи, как правило, наблюдается экспоненциальное снижение активности  $^{210}\text{Pb}$  вниз по профилю, что даёт достаточно точную и непрерывную хронологическую последовательность торфа. В последние годы в некоторых исследованиях отмечается отклонение от типичного экспоненциального снижения, что приводит к ошибкам в оценке возраста и скорости накопления торфа (Swanek et al., 2021). Возможной причиной увеличения миграции  $^{210}\text{Pb}$  является изменение комплекса физико-химических параметров торфяной залежи, которые зависят от конкретных природно-климатических условий местности и, в свою очередь, подлежат оценке. Несмотря на то, что торфяно-болотные экосистемы занимают огромные площади субарктического региона европейской части России, исследования радионуклидов в торфяниках этих территорий ограничены, поэтому, чтобы устранить недостаток знаний в области радиоэкологии торфяных болот для данного региона, нами проведено моделирование нисходящего переноса  $^{210}\text{Pb}$  на примере естественного торфяника — болотного массива Иласский.

## Методы исследования

Торфяной керн ИСНО-1 ( $64^{\circ}18'55.3''\text{N}$   $40^{\circ}41'15.6''\text{E}$ ) был отобран 12 августа 2020 года в пределах Иласского болотного массива, который является типичным представителем верховых болот северной тайги. Массив расположен в ~20 км к югу от Архангельска. Мощность торфяной залежи в месте отбора проб составляет 2.2 м. Залежь состоит из сфагновых мхов с примесью пушицы с увеличением её доли в нижнем слое керна. Степень деградации торфа увеличивается с глубиной и составляет 5—20 %. Колонка до глубины 49 см была извлечена с помощью ПВХ-трубы и далее разделена в лаборатории на слои по 2 см (исключение — слой 0—3 см) и подготовлена для дальнейших аналитических процедур. Определение физико-химических параметров торфа проводили в лаборатории болотных экосистем, радиохимическую подготовку и измерение проб — в лаборатории экологической радиологии ФИЦ комплексного изучения Арктики им. Н. П. Лавёрова УрО РАН.

## Определение зольности торфа

Навеску торфа массой 2—3 г взвешивали на аналитических весах ( $m_{\text{sample}}$ ) DA-224C (BEL ENGINEERING SRL, Италия) с пределом допускаемой погрешности  $\pm 0.5$  мг. Навеску помещали в кварцевый тигель, предварительно доведенный до постоянной массы прокаливанием в муфельной печи при  $900^{\circ}\text{C}$ . Далее последовательно прокаливали тигель с пробой торфа при  $525$  и  $900^{\circ}\text{C}$  до постоянной массы, которую фиксировали на аналитических весах. Расчет потерь при прокаливании (%) проводили по формуле согласно ГОСТ-1988.

## Определение насыпной плотности торфа

Насыпную плотность торфа оценивали гравиметрическим методом для воздушно-сухих образцов с фракционным составом 0.5—2 мм. Определение проводили путем измерения объёма образцов с помощью мерного цилиндра с последующей фиксацией их массы на аналитических весах DA-224C в 5 параллельных повторностях для каждой пробы (ГОСТ-1988).

## Радиохимическое определение радионуклидов

Определение радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  проводили с применением низкофонового гамма-спектрометра производства CANBERRA Packard (США) с коаксиальным полупроводниковым детектором GX2018 на основе кристалла Ge(Li) и программным обеспечением Genie-2000. Удельную активность  $^{137}\text{Cs}$  определили по линии гамма-излучения 661.66 с квантовым выходом 89.90 %, принадлежащей его дочернему радионуклиду —  $^{137\text{m}}\text{Ba}$ . Минимально измеряемые активности  $^{137}\text{Cs}$  при экспозиции  $t = 18\,000$  с для геометрии «плоский сосуд» объёмом 0.1 литр составили 0.1 Бк (Рекомендация МВИ, 2010).

Для определения  $^{210}\text{Pb}$  образец торфа обрабатывали согласно методике (Бахур и др., 2013). Полученный счётный образец с радионуклидами  $^{210}\text{Po}$  и  $^{210}\text{Pb}$  измеряют через 10 часов после его приготовления для распада дочерних альфа- и бета-излучателей ( $^{212,214,216,218}\text{Po}$ ;  $^{210}\text{Bi}$  и  $^{210}\text{Bi}$ ) на альфа-бета-радиометре «Абелия».

## Результаты и обсуждения

### Процедура датирования

При  $^{210}\text{Pb}$ -датировании нами использовалась модель IP-CRS (Initial Penetration — Constant Rate of Supply), для расчёта которой мы следовали процедуре, подробно изложенной у авторов (Olid, 2016). Эта двухэтапная модель описывает распределение атмосферного  $^{210}\text{Pb}$  ( $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ ) в торфе, учитывая как поступление  $^{210}\text{Pb}$  в накапливающуюся торфяную матрицу, так и первоначальную миграцию  $^{210}\text{Pb}$  через самые верхние слои торфа вниз. Чтобы описать распределение атмосферного  $^{210}\text{Pb}$  ( $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ ) в профиле торфа ИСНО, мы разделили торфяную колонку на  $n$  слоев, представленных расстоянием  $z$  (см) сверху вниз. Каждый слой простирается от глубины  $z_{i-1}$  до глубины  $z_i$  (табл. 1).

В модели IP-CRS, которая является модификацией модели CRS, распределение объёмной активности  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  (Бк/см<sup>3</sup>) описывается терминном смешивания, который включает опадание подстилки, биотурбацию и криотурбацию внутри акротельма. Предполагается

**Таблица 1.** Результаты моделирования и датирования по методу IP-CRS для керна ИСНО

**Table 1.** IP-CRS modelling and dating results for ISNO core

Слой (см) Layer (cm)	Глубина (см) Depth (cm)	Плотность (г·см <sup>-3</sup> ) Bulk Density (g·cm <sup>-3</sup> )	<sup>210</sup> Pb исходный (Бк·кг <sup>-1</sup> ) <sup>210</sup> Pb Original (Bk·kg <sup>-1</sup> )	<sup>210</sup> Pb скорректированный <sup>210</sup> Pb corrected		D (см <sup>-3</sup> ·год <sup>-1</sup> ) (cm <sup>-3</sup> ·year <sup>-1</sup> )	w (см·год <sup>-1</sup> ) (cm·year <sup>-1</sup> )	r <sub>i</sub> (год <sup>-1</sup> ) (year <sup>-1</sup> )	f <sub>i</sub>	Даты из исходных <sup>10</sup> Pb, модель CRS (годы) Dates from original <sup>210</sup> Pb, model CRS (years)	Даты из скорректированных <sup>210</sup> Pb, модель IP-CRS (годы) Dates from corrected <sup>210</sup> Pb, model IP-CRS (years)
				(Бк·м <sup>-2</sup> ) (Bk·m <sup>-2</sup> )	(Бк·кг <sup>-1</sup> ) (Bk·kg <sup>-1</sup> )						
0–3	3	0.0448	310.75 ± 34.18	411.0 ± 45.12	305.6 ± 33.60	0.100	0.288			2021	2021
3–5	2	0.0345	211.16 ± 50.68	228.0 ± 54.72	330.6 ± 79.34			0.100		2014	2012
5–7	2	0.0505	168.39 ± 21.89	190.0 ± 24.70	188.1 ± 24.45					2011	2006
7–9	2	0.0387	155.35 ± 35.73	158.0 ± 36.34	204.3 ± 46.98			0.100		2008	2000
9–11	2	0.0594	168.49 ± 21.90	132.0 ± 15.84	111.1 ± 13.33					2005	1994
11–13	2	0.0400	158.02 ± 20.54	110.0 ± 14.30	137.5 ± 17.87			0.100		2000	1988
13–15	2	0.0475	155.02 ± 26.35	92.0 ± 26.35	96.8 ± 22.26			0.100		1996	1982
15–17	2	0.0519	131.06 ± 20.97	76.0 ± 20.96	73.2 ± 11.71			0.100		1991	1976
17–19	2	0.0473	180.80 ± 20.32	64.0 ± 11.23	67.6 ± 11.49			0.100		1986	1970
19–21	2	0.0458	243.93 ± 73.18	54.0 ± 21.6	58.9 ± 17.67			0.100		1978	1964
21–23	2	0.0430	72.20 ± 28.88	44.0 ± 17.6	51.1 ± 20.44				0.173	1962	1958
23–25	2	0.0374	77.89 ± 38.94	38.0 ± 19.0	50.8 ± 25.40				0.162	1956	1951
25–27	2	0.0327	44.42 ± 26.65	30.0 ± 18.0	45.8 ± 27.48				0.081	1949	1945
27–29	2	0.0344	34.34 ± 13.74	26.0 ± 10.4	37.7 ± 15.08				0.066	1945	1938
29–31	2	0.0460	26.54 ± 15.92	11.0 ± 6.6	23.9 ± 14.34				0.068	1941	1932
31–33	2	0.0409	28.80 ± 11.52	18.0 ± 10.8	21.9 ± 13.14				0.065	1937	1924

постоянный коэффициент диффузии и непрерывное перемешивание в керне. Кроме того, учитываются вариации объёмной активности  $^{210}\text{Pb}_{\text{XS}}$  в зависимости от скорости аккреции и её мигрирование вниз и перераспределение на глубине. Авторы аргументируют рассмотрение только начальной подвижности  $^{210}\text{Pb}_{\text{XS}}$  из-за переноса жидкости тем, что Pb образует прочные комплексы с органическим веществом и переносится таким же образом, как и нерастворимые частицы после сорбции органическим веществом почвы. Наконец, учитываются также потери  $^{210}\text{Pb}_{\text{XS}}$  при радиоактивном распаде ( $\lambda$ ) (Olid et al., 2016).

Ключевым моментом в модели IP-CRS является то, что количество  $^{210}\text{Pb}_{\text{XS}}$ , которое было перемещено в объёме торфа, может быть оценено. Далее уже возможно применить модель CRS к скорректированному распределению  $^{210}\text{Pb}_{\text{XS}}$ . Подробнее метод датирования и его валидность описаны у авторов (Olid et al., 2016).

Для расчёта хронологии IP-CRS мы выполнили следующие этапы:

*Этап А. Ограничение глубины вымываемого отдела ( $z_k$ ) торфяного разреза*

Вертикальную миграцию  $^{210}\text{Pb}_{\text{XS}}$  в профиле ИСНО количественно оценили, разделив его на две зоны. Зона вымывания от поверхности до глубины  $z_k$  составила 20 см, здесь  $^{210}\text{Pb}_{\text{XS}}$  мигрировал вниз, что моделируется предположением разных скоростей проникновения ( $r_i$ ) для каждого слоя. Толщина верхней вымываемой зоны варьируется и состоит из живых мхов и самых верхних слоев акротельма, который характеризуется высокой пористостью и гидравлической проводимостью, что способствует смыву вниз атмосферных отложений. Зона вмывания (накопления) — совокупный отдел от  $z_k$  до  $\infty$  (для керна ИСНО составила от 20 до 33 см), где слои торфа получили дополнительный запас  $^{210}\text{Pb}_{\text{XS}}$  из самых верхних слоёв. Здесь слои акротельма имеют более высокую плотность и меньшую пористость. Уменьшение гидравлической проводимости, вероятно, приводит к образованию слоя, в котором накапливается вынесенный  $^{210}\text{Pb}_{\text{XS}}$ . Нижняя граница зоны соответствует самой большой глубине с обнаруживаемой активностью  $^{210}\text{Pb}$  (Olid et al., 2016).

*Этап В. Решение системы интегродифференциальных уравнений*

Решили систему  $n$  интегродифференциальных уравнений (уравнения (1) и (2)) по разрезу торфа, выполнили соблюдение ограничивающих условий (уравнения (3) и (4)) и ограничений непрерывности между слоями (уравнения (5) и (6)) для получения скоростей проникновения ( $r_i$ ) и дробных коэффициентов усиления ( $f_i$ ). Здесь модель была реализована в программе Matlab. Вывод формул и расчёты подробнее указаны в дополнительных материалах к статье авторов (Olid et al., 2016).

Решения уравнений:

От 0 до  $z_k$ :

$$C_i(z) = A_i e^{\theta+(i)z} + B_i e^{\theta-(i)z}, \quad (1)$$

где  $i = 1, 2, \dots, k$ .

От  $z_k$  до  $\infty$ :

$$C_i(z) = A_i e^{\sigma+z} + B_i e^{\sigma-z} + \frac{f_i}{\lambda}, \quad (2)$$

где  $i = k + 1, k + 2, \dots, n$ .

Константы  $A_i$  и  $B_i$  определяются итеративно путем решения ограничивающих условий:

$$D \frac{dC_i}{dz}(0) - wC_i(t, 0) = -\Phi, \quad \text{и} \quad (3)$$

$$C_n(t, z \rightarrow \infty) = 0, \quad (4)$$

где  $\Phi$  — атмосферное поступление  $^{210}\text{Pb}$  (Бк/м<sup>2</sup>·год) ( $\Phi = \lambda \cdot I$ , где  $I$  — общий запас  $^{210}\text{Pb}_{\text{XS}}$  (Бк/м<sup>2</sup>)), а ограничения непрерывности между слоями следующие:

$$C_i(t, z_i) = C_{i+1}(t, z_i) \quad \text{и} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} D \frac{\partial C_i}{\partial z}(z_i) - wC_i(z_i) = \\ = D \frac{\partial C_{i+1}}{\partial z}(z_i) - wC_{i+1}(z_i) \end{aligned} \quad (6)$$

*Этап С. Определение запаса  $^{210}\text{Pb}_{\text{XS}}$ , удаленного из каждого слоя зоны вымывания*

После решения системы  $n$  оценивали запас  $^{210}\text{Pb}_{\text{XS}}$  (Бк/м<sup>2</sup>), мигрировавшего из каждого слоя верхнего отдела согласно уравнению:

$$\begin{aligned} R_i = \int_0^{T_i} r_i A_i(t) dt = \\ = \frac{r_i \Phi}{\lambda + r_i} \left[ T_i + \frac{1}{\lambda + r_i} (e^{-(\lambda + r_i)T_i} - 1) \right], \end{aligned} \quad (7)$$

где  $T_i$  — время образования этого слоя.

*Этап D. Определение общего запаса  $^{10}\text{Pb}_{\text{XS}}$*

Количественно определили общий запас  $^{210}\text{Pb}_{\text{XS}}$ , перенесенного вниз, суммируя  $^{210}\text{Pb}_{\text{XS}}$ , полученный на предыдущем этапе.

*Этап E. Определение дополнительного  $^{210}\text{Pb}_{\text{XS}}$  для каждого слоя*

Количественно оценили запас  $^{210}\text{Pb}_{\text{XS}}$ , включенного в качестве дополнительного источника в каждый слой, умножив общее удаленное количество  $^{210}\text{Pb}_{\text{XS}}$  на соответствующее дробное усиление  $f_i$ .

*Этап F. Определение исправленных объёмных активностей  $^{210}\text{Pb}_{\text{XS}}$*

1. Добавили объёмные активности  $^{210}\text{Pb}_{\text{XS}}$ , полученные на этапе С, в соответствующие слои промываемой зоны; 2. Вычли объёмные активности  $^{210}\text{Pb}_{\text{XS}}$ , полученные на этапе Е, из соответствующих слоёв более глубокой зоны.

*Этап G. Применение модели к исправленному профилю*

Применили CRS-модель к скорректированному профилю объёмной активности  $^{210}\text{Pb}_{\text{XS}}$  и дополнительно использовали метод Монте-Карло, подробно описанный в работах коллектива авторов (Sanchez-Cabeza et al., 2014; Яковлев и др., 2020).



### Физико-химические параметры торфа

Величина показателя зольности для профиля ИСНО находится в интервале 1.10–5.77 %, что позволяет отнести его к малозольному типу (рис. 1). В вертикальном распределении в горизонте 20 см отмечается максимум содержания зольных компонентов, который может быть обусловлен как вымыванием минеральной части из вышележащих горизонтов, так и антропогенной запыленностью атмосферы в период формирования торфяной залежи. Ниже глубины 21 см наблюдается тенденция немонотонного снижения показателей с глубиной, связанная с атмосферным типом питания болота.

Согласно полученным результатам, насыпная плотность постепенно увеличивается с глубиной залегания и находится в интервале  $0.075 \div 0.109$  г/см<sup>3</sup>, что характерно для верховых торфяников в ненарушенном состоянии. Естественное влагосодержание находится в интервале  $15 \div 24$  г/г и снижается с глубиной, что отчасти является следствием постепенного уплотнения пористой структуры торфа.

### Вертикальное распределение радионуклидов в торфяном профиле

Активность <sup>137</sup>Cs в торфяном профиле ИСНО-1 варьирует в пределах от 3.2 до 45.6 Бк/кг. Согласно графику вертикального распределения (рис. 2), отмечается два выраженных пика активности <sup>137</sup>Cs: первый пик с активностью 45.5 Бк/кг находится на глубине 19–21 см, второй пик с активностью 45.6 Бк/кг — на глубине 3–5 см. Отметим также высокие показатели <sup>137</sup>Cs, которые составили 43.4 Бк/кг на глубине 17–19 см. Можно предположить миграцию радионуклида вниз по керну. В целом наибольшее распределение <sup>137</sup>Cs в верхней части керна является типичным для верховых болот (Mroz et al., 2017).

Максимум активности <sup>137</sup>Cs здесь связан отчасти с химическим сродством между Cs и K, которые совместно активно транспортируются по торфяному разрезу корнями растений. Другой причиной высокой подвижности <sup>137</sup>Cs в верховых торфяниках указывается отсутствие подходящих минеральных частиц для адсорбции <sup>137</sup>Cs (Fialkiewicz-Koziel et al., 2014). Однако мы наблюдаем помимо пика активности <sup>137</sup>Cs в верхней части профиля сопоставимую активность на глубине от 17 до 21 см (45.6 Бк/кг в верхней части профиля, 43.4 Бк/кг на глубине 17–19 см и 45.5 Бк/кг на глубине 19–21 см соответственно). Схожая картина изменения активности цезия и содержания золы по глубине (рис. 1, 2), вероятно, связана с механизмом их поступления в торф с атмосферными осадками. Как можно видеть на рис. 2, максимальная глубина усваивания цезия растительностью составляет 11 см для исследуемого профиля, поскольку ниже, на глубине 19–21 см, мы наблюдаем пик активности, превышающий по значению максимальные верхние показания и обусловленный, вероятно, глобальными выпадениями.

Активность <sup>210</sup>Pb в изученном торфяном профиле варьирует от 21.9 до 330.6 Бк/кг. Максимум активности <sup>210</sup>Pb приходится на горизонт 3–5 см (рис. 2). Ниже горизонта 35–37 см активность <sup>210</sup>Pb перестает изменяться и составляет во всех нижележащих горизонтах ~ 26 Бк/кг, т.к. здесь отсутствует избыточный атмосферный свинец. Наблюдаемая активность <sup>210</sup>Pb

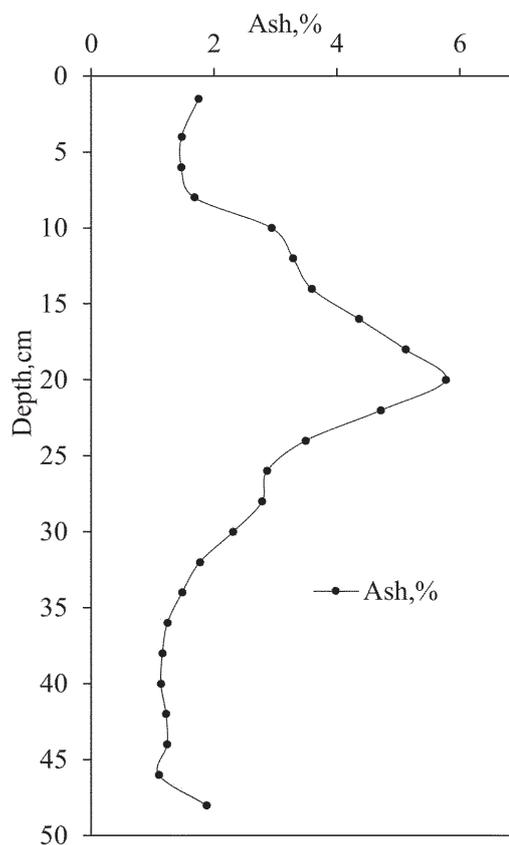


Рис. 1. Изменение показателя зольности для керна ИСНО с глубиной

Fig. 1. Change in the ash index for ISNO core with depth

в этих горизонтах является поддерживаемой за счет распада <sup>226</sup>Ra. Вымывание <sup>210</sup>Pb из верхних слоёв (0–3 см), вероятно, связано с атмосферными осадками (Olid et al., 2016).

Миграция <sup>210</sup>Pb вниз по торфяному профилю происходит в коллоидной форме в виде комплексов с гумусовыми кислотами (фульво- и гуминовыми кислотами) и в ионной форме. Миграция <sup>137</sup>Cs вниз по разрезу происходит только в ионной форме, а связывание <sup>137</sup>Cs практически полностью обеспечивается ионно-обменным механизмом (Schleich et al., 2000).

### Хронология и скорость накопления торфа

Результаты моделирования и датирования торфяного профиля ИСНО-1 представлены на рис. 3. и в табл. 1. Данные показали, что горизонт 17–19 см соответствует возрасту 1963-го года. Выделяемый пик активности <sup>137</sup>Cs попадает на горизонт 19–21 см, это также совпадает с пиком показателя зольности. Как правило, пики антропогенных радионуклидов в торфяных отложениях указывают на конкретные масштабные события в истории радиоактивных выпадений, такие как Договор о частичном запрещении ядерных испытаний 1963 года и авария на Чернобыльской АЭС, обеспечивая ориентир для геохронологических исследований (Mroz et al., 2017; Putyrskaya et al., 2019). Однако <sup>137</sup>Cs в связи с его высокой биодоступностью и, как следствие, миграцией в торфяных отложениях не всегда указывает на радиационные события в профиле торфа (Fialkiewicz-Koziel et al., 2014).

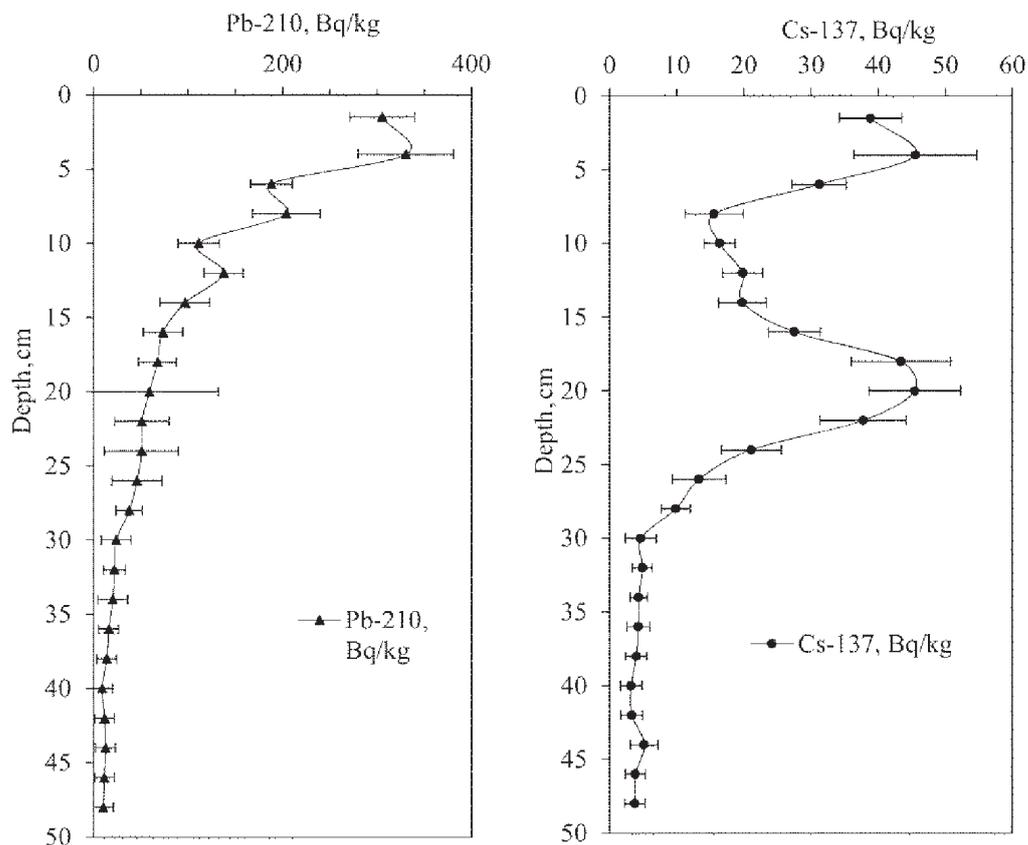


Рис. 2. Изменение вертикального распределения радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{210}\text{Pb}$  в торфяном профиле ИСНО  
Fig. 2. Changes in the vertical distribution of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$  radionuclides in ISNO peat profile

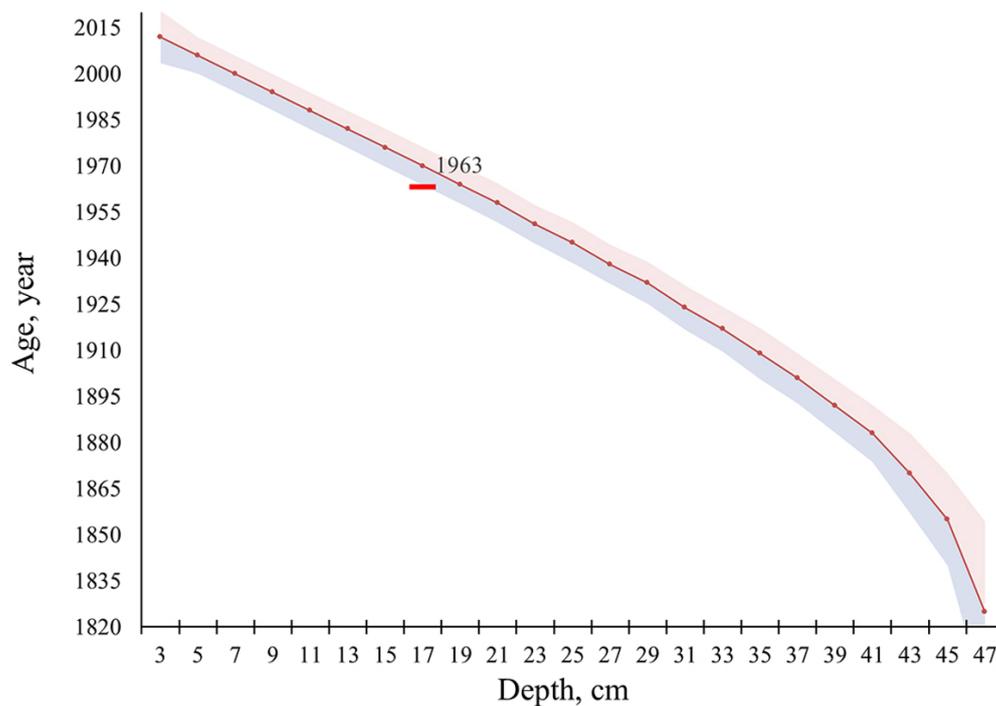
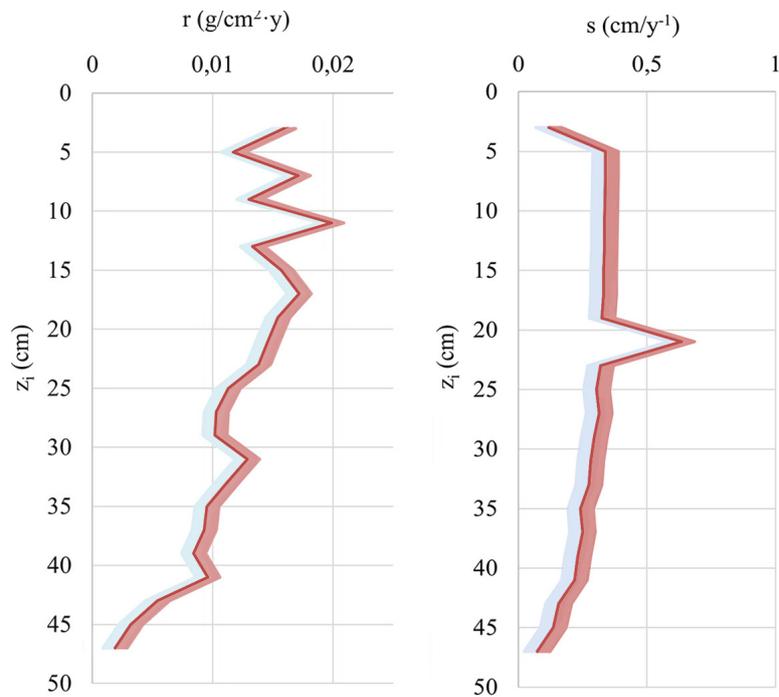


Рис. 3. Результаты хронологии  $^{210}\text{Pb}$  для торфяного керна ИСНО согласно модели IP-CRS с дополнительным использованием метода Монте-Карло  
Fig. 3.  $^{210}\text{Pb}$  chronology results for the ISNO peat core according to IP-CRS model with additional use of the Monte Carlo method



**Рис. 4.** Линейная скорость накопления  $s$  и скорость накопления массы  $r$  по глубине торфяного профиля  
**Fig. 4.** Linear accumulation rate  $s$  and mass accumulation rate  $r$  along the depth of the peat profile

В нашем случае физико-химические условия торфяного профиля способствовали вымыванию до глубины 19–21 см части  $^{137}\text{Cs}$ , поступившего на поверхность торфяника в результате глобальных выпадений 1963 года. Полученные данные подтверждают правильность и адекватность выбранной нами модели датирования торфяного керна.

Результаты расчёта линейной скорости накопления  $s$  и скорости накопления массы  $r$  в изученной торфяной залежи представлены на рис. 4. Значения  $s$  варьировались от  $(0.073 \pm 0.05)$  до  $(0.635 \pm 0.05)$  см/год и составляли в среднем  $(0.28 \pm 0.08)$  см/год, что несколько ниже ранее полученных данных для Европейской Субарктики России (Yakovlev et al., 2021) и ниже значений, указанных в работе Swanek et al. (2021), где последние составили  $(0.38 \pm 0.07)$  см/год. Скорость накопления массы торфа  $r$  находилась в диапазоне от  $(0.0019 \pm 0.001)$  до  $(0.0199 \pm 0.001)$  г/см<sup>2</sup>-год. Среднее значение  $r$  составило  $(0.0117 \pm 0.001)$  г/см<sup>2</sup>-год.

В вертикальном распределении линейной скорости накопления  $s$  отмечается равномерное уменьшение с глубиной с выраженным пиком на глубине 19–21 см, что датируется 1964 годом и, возможно, объясняется изменением климатических условий произрастания торфа.

Картина распределения скорости накопления массы  $r$  имеет сложный характер с несколькими пиками в верхней части профиля и закономерным уменьшением с глубиной, поскольку там происходит уплотнение торфяной залежи.

Основываясь на датировании  $^{210}\text{Pb}$ , нами был оценен атмосферный поток  $^{210}\text{Pb}$  ( $58.98 \pm 2.94$ ) Бк/м<sup>2</sup>-год, который хорошо согласуется с данными по торфяникам Северной Европы. Атмосферный поток  $^{210}\text{Pb}$  для юга Финляндии составил 50–80 Бк/м<sup>2</sup>-год (Paatero et al., 1998), в то же время значение  $^{210}\text{Pb}$  для центральной Швеции составило 78 Бк/м<sup>2</sup>-год (Vassma et al., 2017). Дополнительно отметим, что полученные нами ранее

данные находились в пределах 80–91 Бк/м<sup>2</sup>-год для Европейской Субарктики России (Yakovlev et al., 2021).

### Заключение

Исследуемая часть профиля торфяной залежи сложена преимущественно сфагновым видом торфа. Физико-химические параметры изученной торфяной залежи находятся в интервалах, типичных для ненарушенных верховых торфяников Европейской Субарктики России. Установлено, что в разрезе выделяется горизонт на глубине 20 см, характеризующийся существенными колебаниями параметров зольности и насыпной плотности. Формирование этого горизонта может быть обусловлено как вымыванием минеральной части из вышележащих горизонтов, так и антропогенной запыленностью атмосферы в период формирования торфяной залежи.

Распределение  $^{137}\text{Cs}$  по глубине обнаруживает два выделяющихся максимума активности — в верхней части профиля и на глубине 19–21 см, обусловленных особенностями вертикальной миграции и динамикой поступления цезия с атмосферными выпадениями.

Для распределения  $^{210}\text{Pb}$  выявлено неэкспоненциальное снижение активности с глубиной. Наблюдаемое отклонение от типичного снижения  $^{210}\text{Pb}$  может приводить к серьёзным ошибкам в оценке возраста и скорости накопления торфа при датировании торфа классическими моделями, поэтому была использована разновидность моделирования CRS — IP-CRS, которая учитывает нисходящий перенос  $^{210}\text{Pb}$  в кернах. Моделирование проведено на примере керна из естественного торфяника Иласского болотного массива Европейской Субарктики России.

Результаты датирования торфяного профиля моделью IP-CRS показали, что горизонт 17–19 см соответствует возрасту 1963-го года. Ориентиром для гео-

хронологических исследований выступило подписание Договора о частичном запрещении ядерных испытаний в 1963 году. В то же время отметим, что пик активности  $^{137}\text{Cs}$  и максимум показателя зольности попадает на горизонт 19—21 см. В данном случае имеет место миграция  $^{137}\text{Cs}$  вниз по керну, т. к. его особенность — это высокая биодоступность в торфяных отложениях, поэтому он не всегда может указывать на радиационные события. Тем не менее результаты подтверждают правильность и адекватность выбранной нами модели датирования торфяного керна.

Результаты исследования позволяют расширить представления о миграционных процессах радионуклидов атмосферных выпадений в торфяниках Европейской Субарктики, что может послужить базисом для поддержания устойчивой экологической обстановки при освоении и использовании ресурсного потенциала торфяно-болотных экосистем.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых МК-4298.2022.1.5 и научного проекта молодых ученых ФИЦ КИА им. Н. П. Лавёрова УрО РАН, посвященного десятилетию науки и техники в Российской Федерации №123050500019-0.

## Литература / References

- Бахур А. Е., Мануилова Л. И., Зуев Д. М., Овсянникова Т. М., Трухина Т. П. Методика измерений удельной активности полония-210 ( $^{210}\text{Po}$ ) и свинца-210 ( $^{210}\text{Pb}$ ) в пробах почв, грунтов, донных отложений, горных пород и строительных материалов на их основе альфа-бета-радиометрическим методом с радиохимической подготовкой: Методика: ФР.1.40.2013.15381. М.: ВИМС, 2013. 17 с.
- Bahur, A. E.; Manuilova, L. I.; Zueva, D. M.; Ovsyannikova, T. M.; Trukhina, T. *Metodika izmerenij udel'noj aktivnosti poloniya-210 ( $^{210}\text{Po}$ ) i svinca-210 ( $^{210}\text{Pb}$ ) v probah pochv, gruntov, donnyh otlozhenij, gornyh porod i stroitel'nyh materialov na ih osnove al'fa-beta-radiometricheskim metodom s radiohimicheskoj podgotovkoj* (The method for measuring the specific activity of Polonium-210 ( $^{210}\text{Po}$ ) and Lead-210 ( $^{210}\text{Pb}$ ) in samples of soils, soils, bottom sediments, rocks and building materials based on them by radiometric method with radiochemical preparation). Moscow: VIMS, 2013, 17 p.
- ГОСТ 27784-88. Почвы. Методы определения зольности торфяных и оторфованных горизонтов почв. М.: Изд-во стандартов, 1988. 7 с.
- GOST 27784-88. *Soils. Pochvy. Metody opredeleniya zol'nosti torfyanyh i otorfovannyh gorizontov pochv* (Methods for determination of ash content in peat and peat-containing soil horizons). 1988. Moscow: Standards publishing house, 1988, p. 7.
- ГОСТ 28268-89. Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений. М.: Стандартинформ, 1989. 8 с.
- GOST 28268-89. *Pochvy. Metody opredeleniya vlazhnosti, maksimal'noj gigroskopicheskoj vlazhnosti i vlazhnosti ustojchivogo zavядaniya rastenij* (Soils. Methods of determination of moisture, maximum hygroscopic moisture and moisture of steady plant fading). Moscow: Standartinform: 1989, p. 8.
- Рекомендация МВИ. МН 3421-2010. Методика выполнения измерений объемной и удельной активности гамма-излучающих радионуклидов на гамма-спектрометрах с полупроводниковыми детекторами. Минск: Изд-во Белорусского гос. ин-та метрологии, БелГИМ, 2010.
- Recommendation MVI. MN 3421-2010. *Metodika vypolneniya izmerenij ob'emnoj i udel'noj aktivnosti gamma-izluchayushchih radionuklidov na gamma-spektrometrah s poluprovodnikovymi detektorami* (MVI Recommendation Method for performing measurements on a gamma spectrometer). Minsk: BelGIM, 2010.
- Яковлев Е. Ю., Очеретенко А. А., Спиоров Р. К., Мищенко Е. В., Жуковская Е. В. Применение метода моделирования по типу Монте-Карло для оценки погрешностей  $^{210}\text{Pb}$ -датирования торфяных отложений Европейской Субарктики России (на примере Архангельской области) // Вестник геонаук. 2020. № 7. С. 18—27. DOI:10.19110/geov.2020.7.3
- Yakovlev, E. U.; Ocheretenko, A. A.; Spirov, R. K.; Mishchenko, E. V.; Zhukovskaya, E. V. *Primenenie metoda modelirovaniya po tipu Monte-Karlo dlya ocenki pogreshnostej  $^{210}\text{Pb}$ -datirovaniya torfyanyh otlozhenij evropejskoj subarktiki Rossii (na primere Arhangel'skoj oblasti)* (Application of Monte Carlo modelling to estimate  $^{210}\text{Pb}$  dating errors in peat deposits of the European subarctic of Russia (case study of the Arkhangelsk region)). Vestnik of Geosciences, 2020, No. 7, pp. 18—27, DOI:10.19110/geov.2020.7.3
- Cwanek A., Łokas E., Mitchell E. A. D., Mazei Y., Gaca P., Milton J. A. Temporal variability of Pu signatures in a  $^{210}\text{Pb}$ -dated Sphagnum peat profile from the Northern Ural, Russian Federation // *Chemosphere*, 2021. No. 281. P. 130962. DOI:10.1016/j.chemosphere.2021.130962
- Fialkiewicz-Koziel B., Kolaczek P., Piotrowska N., Michczyński A., Lokas E., Wachniew P., Woszczyk M., Sensula B. High-resolution age-depth model of a peat bog in Poland as an important basis for paleoenvironmental studies // *Radio-carbon*, 2014. No. 56, P. 109—125. DOI:10.2458/56.16467
- Fialkiewicz-Koziel B., Lokas E., Galka M., Kolaczek P., De Vleeschouwer F., Le Roux G., Smieja-Krol B. Influence of transboundary transport of trace elements on mountain peat geochemistry (Sudetes, Central Europe) // *Quaternary Science Reviews*, 2020. No. 230, P. 106162. DOI: 10.1016/j.quascirev.2020.106162
- Magiera T., Szuszkiewicz M. M., Michczyński A., Chróst L., Szuszkiewicz M. Peat bogs as archives of local ore mining and smelting activities over the centuries: A case study of Miasteczko Śląskie (Upper Silesia, Poland) // *CATENA*, 2021. No. 198, P. 105063. DOI: 10.1016/j.catena.2020.105063
- Mroz T., Lokas E., Kocurek J., Gasiorek M. Atmospheric fallout radionuclides in peatland from Southern Poland // *Journal of Environmental Radioactivity*, 2017. No. 175—176, P. 25—33. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2017.04.012
- Ndiaye A., Bentaleb I., Favier C., Fourel F., Sebag D., Fall M., Giresse P., Diouf B. Reconstruction of the holocene climate and environmental changes of Niayes peat bog in northern coast of Senegal (NW Africa) based on stable isotopes and charcoals analysis. *Quaternary Science Reviews*, 2022. No. 289, P. 107609. DOI: 10.1016/j.quascirev.2022.107609
- Olid C., Diego D., Garcia-Orellana J., Cortizas A. M., Klaminder J. Modeling the downward transport of  $^{210}\text{Pb}$  in Peatlands:



- Initial Penetration-Constant Rate of Supply (IP-CRS) model // *Science of The Total Environment*, 2016. No. 541. P. 1222–1231. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.09.131
- Paatero J., Jaakkola T., Kulmala S.* Lichen (sp. *Cladonia*) as a deposition indicator for transuranium elements investigated with the Chernobyl fallout // *Journal of Environmental Radioactivity*, 1998. No. 38. P. 223–247. DOI: 10.1016/S0265-931X(97)00024-6
- Putyrskaya V., Klemt E., Röllin S., Corcho-Alvarado J., Sahli H.* Dating of recent sediments from Lago Maggiore and Lago di Lugano (Switzerland/Italy) using  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$  // *Journal of Environmental Radioactivity*, 2020. No. 212. P. 106135. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2019.106135
- Sanchez-Cabeza J. A., Ruiz-Fernandez A. N., Ontiveros-Cuadras J. F., Perez Bernal L. H., Olid C.* Monte Carlo uncertainty calculation of  $^{210}\text{Pb}$  chronologies and accumulation rates of sediments and peat bogs // *Quaternary Geochronology*, 2014. No. 23. P. 80–93. DOI: 10.1016/j.quageo.2014.06.002
- Schleich B. N., Degering D., Unterricker S.* Natural and artificial radionuclides in forest and bog soils: Tracers for migration processes and soil development // *Radiochimica Acta*, 2000. No. 88. P. 803–808. DOI: 10.1524/ract.2000.88.9-11.803
- Sun A., Yang Y., Wu H., Ran M.* Climate change on the north-eastern Tibetan Plateau during the past ~600 years inferred from peat pollen records // *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2020. No. 276, P. 104194. DOI: 10.1016/j.revpalbo.2020.104194
- Vaasma T., Karu H., Kiisk M., Pensa M., Isakar K., Realo E., Alliksaar T., Traczyk H. A.* Pb-210 and fly ash particles in ombrotrophic peat bogs as indicators of industrial emissions // *Journal of Environmental Radioactivity*, 2017. No. 174. P. 78–86. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2016.07.027
- Yakovlev E., Spirov R., Druzhinin S., Ocheretenko A., Druzhinina A., Mishchenko E., Zhukovskaya E.* Atmospheric fallout of radionuclides in peat bogs in the Western Segment of the Russian Arctic // *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, without a number. P. 1–11. DOI: 10.1007/s11356-020-12224-7
- Zhao X., Hou X., Zhang D., Yang Y., Huang Z., Liu Q.* Records of iodine isotopes ( $^{129}\text{I}$ ,  $^{127}\text{I}$ ) in the Barkol peat bog from northwest China and their sources, transport and preservation // *Chemosphere*, 2021. No. 279, P. 130531. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.130531

Поступила в редакцию / Received 19.05.2023