УДК 551.343.72, 551.311.234.2, 504.054

ЦЕЗИЙ-137 КАК МАРКЕР СОВРЕМЕННЫХ ПОЧВЕННЫХ ТУРБАЦИЙ

1,2Семенков И.Н., 1Усачева А.А.

¹ФГБУН «Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук», Москва, e-mail:semenkov@igem.ru;

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва

В статье рассмотрено радиальное распределение цезия-137 в средне- и северотаежных ландшафтах Западной Сибири. В мохово-травянисто-кустарничковом ярусе сосредоточено $22 \pm 20 \%$, в почве $-78 \pm 20 \%$ от суммарных запасов радиоцезия в ландшафте, из которых на верхний десятисантиметровый слой приходится около 70%. Активность ¹³⁷Сѕ снижается в растительном ярусе в ряду: кустарничковый и долгомошный > осоково-сфагновый и кустарничково-долгомошный > беломошный. В большинстве изученных почвенных разрезов выявлено поверхностно-аккумулятивное распределение цезия-137, которое нарушается за счет перемещения органического материала в минеральные слои при криогенном пучении и ветровалах. Наличие значимых уровней ¹³⁷Сѕ в погребенном материале возможно лишь в случае его перемещения во второй половине XX — начале XXI века, что позволяет идентифицировать молодые почвенные криотурбации и фитогенные педотурбации.

Ключевые слова: криотурбации, фитогенные педотурбации, глобальные радиоактивные выпадения, Западная Сибирь, подзол

CAESIUM-137 AS A TRACER OF CURRENT SOIL TURBATION

^{1,2}Semenkov I.N., ¹Usacheva A.A.

¹The Organization of Russian Academy of Sciences Institute of geology of ore deposits, petrography, mineralogy and geochemistry Russian Academy of Sciences, Moscow, e-mail:semenkov@igem.ru;

²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education Lomonosov Moscow State University, Moscow

The article is concern of cesium-137 distribution in the north and middle taiga landscapes of Western Siberia. Moss-grass-underwood layers contain $22 \pm 20\,\%$ of ^{137}Cs total storage in the landscapes of oligotrophic bogs with cryohistosols and pine forests on cryopodzols. The main reservoir of cesium-137 is soils that accumulate $78 \pm 20\,\%$ of its total landscape storage. The upper 10-cm soil layer contains $90\,\%$ of ^{137}Cs soil storage. Cesium-137 activity declines from shrubs and polytric layers ($130-150~\text{Bq\cdot kg^{-1}}$) to sedge-sphagnum and shrub-polytric ($75-95~\text{Bq\cdot kg^{-1}}$) and lichens – Cladonia sp. and Cetraria sp. ($50~\text{Bq\cdot kg^{-1}}$). Accumulation ^{137}Cs in topsoil is typical for the studied soil cross-over. But this feature is broken due to organic matter movement to subsoil by cryoturbations and windfalls. Cesium-137 detection is possible in turbation formed after the middle of the XX century. It allows identification of current soil turbation.

Keywords: cryoturbation, fitoturbation, radioactive stratospheric fallouts, Western Siberia, podzol

В почвах Севера нередко присутствуют признаки нарушения естественного залегания горизонтов, связанные с перемешиванием материала в результате вывала деревьев (фитогенные педотурбации) и криогенных процессов (криотурбации).

Фитогенные педотурбации появляются в результате корневого перемешивания или при вывалах деревьев. В первом случае происходит сдавливание и перемещение почвенного материала при росте корней, при отмирании которых образуются пустоты, заполняющиеся почвенной массой. Во втором случае выкорчеванные корни создают ветровальный комплекс западин, лишенных верхних горизонтов, и бугров, сложенных смесью осыпавшегося с корней почвенного материала.

Криотурбации — это почвенные морфоны в виде различных по окраске или сложению завихрений. Они формируются в период смыкания сезонной осенней мерзлоты с многолетней, когда в надмерзлотном слое возникает сильное давление, обуславлива-

ющее прорыв грунта на дневную поверхность и погребение верхних органических горизонтов почвы [1, 3].

Датировка почвенных турбаций возрастом менее 100 лет существующими методами возможна только по данным многолетних стационарных наблюдений. Для более быстрого определения возраста турбаций возможно использование малоподвижных в почве искусственных радионуклидов со средним или большим периодом полураспада. Перечисленным критериям удовлетворяет цезий-137 с периодом полураспада 30,17 лет, на долю подвижных форм которого приходится не более 24% от валового содержания в почвах Севера [4], в которые он поступает преимущественно с глобальными атмосферными выпадениями [7].

Выпадающий из атмосферы ¹³⁷Cs накапливается в верхней части профиля тундровых и таежных почв за счет необменной сорбции. Ввиду слабой подвижности радиоцезия в почвах Севера [4], его обнаруживают только в органических горизонтах, поэтому в случае нахождения значимых количеств ¹³⁷Сs в турбированных органических или органо-минеральных слоях, можно утверждать, что их погребение произошло после 1945 года — начала поступления его значимых количеств в окружающую среду.

Цель работы — оценить возможность использования цезия-137 для идентификации молодых почвенных турбаций.

Материалы и методы исследований

Объекты исследований – почвы естественных ландшафтов двух ключевых участков (рис. 1). Первый – *участюк «Пурпе»* расположен в северотаежной подзоне, в 2 км к северу от г. Губкинский, где развита островная мерзлота [2].

Пространство междуречья изученной территории слабо расчленено: перепад высот в пределах 1 м. Повышенные элементы рельефа, сложенные супесчаными аллювиальными отложениями, покрыты разреженным сосновым (высота деревьев 3–8 м, сомкнутость крон 0,2–0,3) бруснично-голубичнобеломошным лесом с подзолами грубогумусовыми иллювиально-железистыми песчаными. В пределах верхней метровой толщи многолетнемерзлые породы вскрыты не были.

В понижениях рельефа развита болотная растительность: багульниково-сфагновые сообщества с различным участием осок и лишайников Cladonia и Сеtraria на торфяных олиготрофных мерзлотных почвах. На микроповышениях высотой 50 см мерзлые породы вскрыты на глубине 28–33 см, а на их склонах – с 50 см. В микропонижениях с 30–40 см сочится вода, а слой мерзлых пород в пределах верхних 60 см не вскрыт.



Рис. 1. Расположение ключевых участков

Растительность на границе между болотными и лесными ландшафтами представлена морошковоерниково-багульниково-осоково-зеленомошным сообществом на торфяно-подзолах иллювиально-гумусовых языковатых криотурбированных песчаных.

В пределах ключевого участка «Пурпе» заложено 17 разрезов, а почвенные турбации диагностированы только в 1.

Участок «Ноябрьск» расположен на границе средней и северной тайги Обь-Пуровского междуречья, в 4 км к северо-востоку от одноименного города (рис. 1). На этой территории отдельные острова мерзлоты распространены на крутых склонах северной экспозиции и торфяных буграх [2].

Вытянутые песчаные гряды территории ключевого участка «Ноябрьск» высотой до 2 м покрыты бором кустарничково-беломошно-зеленомошным (высота деревьев 10–15 м, сомкнутость крон 0,5–0,6) на подзолах грубогумусовых иллювиально-железистых криотурбированных песчаных. Склоны гряд с мелкобугорковатым микрорельефом заняты бором голубично-беломошно-зеленомошным на торфяноподзолах иллювиально-железисто-гумусовых криои фитогеннотурбированных глееватых песчаных. На пониженных элементах рельефа произрастает морошково-осоково-сфагновое сообщество на торфяных эутрофных почвах.

Многолетнемерзлые породы вскрыты не были. Однако единично встречались ядра замерзшего торфа. Уровень грунтовых вод на водораздельных позициях находится на глубине около 120 см, в нижней части склона грив и прилегающих болотных территориях — 80 см, на приречных выровненных поверхностях болот — 40 см.

В 3 из 13 почвенных разрезов, изученных на ключевом участке «Ноябрьск», выявлены турбации. Однако только в 1 разрезе органический материал перемещён на глубину при ветровале.

Суммарно на двух ключевых участках из 30 разрезов отобрано 106 почвенных и 25 растительных проб, в которых удельная активность ¹³⁷Сѕ определена в лаборатории радиогеологии и радиогеоэкологии ИГЕМ РАН методом прямого γ-спектрометрического анализа 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).

Для различных выборок рассчитаны величина среднего и его ошибки, коэффициенты вариации (Cv) и сделана попытка моделирования изменения запасов ¹³⁷Сs глобальных атмосферных выпадений в почвах.

Результаты исследований и их обсуждение

Поступление цезия-137 в ландшафты. По данным о плотности загрязнения широтного пояса 60–70° с.ш. [7], с учетом радиоактивного распада, по формуле (1) рассчитаны предполагаемые запасы ¹³⁷Cs на каждый год (рис. 2) без учета его выноса за пределы конкретного ландшафта [6]:

$$C_k = \sum_{i=0}^{90} A_k \cdot 2^{\frac{-i}{30,17}},\tag{1}$$

где C_k — кумулятивный запас цезия-137 глобальных атмосферных выпадений, оставшийся в почве в k-й год (k=1950+i; i — число, которое необходимо прибавить к году начала выпадения значимых количеств цезия-137 из атмосферы), A_i — их

интенсивность в k-й год в широтном поясе $60-70^{\circ}$ с.ш., постоянная величина 30,17-100 период полураспада цезия-137 Экстраполяция интенсивности глобальных атмосферных выпадений на период 2000-2040 гг.

выполнена в соответствии с характером глобальных радиоактивных выпадений в период с 1972 по 2000 [7] по уравнению (2).

$$A_i = -0.028 \cdot i + 2.045.$$
 (2)

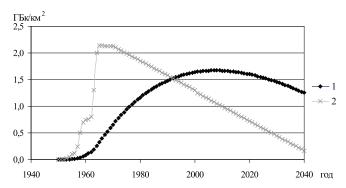


Рис. 2. Интенсивность глобальных атмосферных выпадений цезия-137 в широтном поясе $60-70^{\circ}$ с.ш. (1) и его кумулятивный запас в почве (2)

Для рассматриваемого интервала времени суммарные запасы цезия-137 в почвах широтного пояса 60–70° с.ш. максимальны с 2002 по 2012 год и сейчас постепенно снижаются. Для периода с 1965 по 2040 год они описываются уравнением

$$C_i = -0.0006 \cdot i^2 + 0.076 \cdot i - 0.636.$$
 (3)

Цезий-137 в растительном ярусе. Разнообразие мохово-травянисто-кустарничковых ярусов изученных ландшафтов объединено в пять групп: беломошная с преобладанием лишайников Cladonia sp., кустарничково-долгомошная с доминированием Politrihum sp., зеленомошно-кустарничковая с преобладанием Pleurosium sp., осоково-сфагновая, кустарничковая (с различным участием багульника болотного Lédum palústre, мирта болотно-Chamaedaphne calyculata, брусники Vaccínium vítis-idaéa и голубики Vaccínium uliginósum).

Во всех группах коэффициент вариации величины удельной активности радиоцезия колеблется от 20 до 50%. Активность цезия-137 снижается в ряду: кустарничковая и долгомошная (130–150 Бк/кг) > осоковосфагновая (94) > кустарничково-долгомошная (74) > беломошная (52). В отличие от удельной активности, вариабельность фитомассы существенно выше: Су меняется от 50 до 200%, что сказывается на высокой изменчивости запасов цезия-137, которые варьируются в пределах 100-700 Бк/м² при среднем 287 ± 185 (n = 19).

Цезий-137 в почве. Растительность не является главным депозитарием цезия-137 атмосферных выпадений. В изученных болотных ландшафтах ключевого участ-ка «Ноябрьск» и «Пурпе» $78 \pm 20\%$ от его

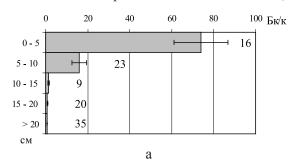
суммарных запасов сосредоточено в почве, а на мохово-травянисто-кустарничковый ярус приходится $22 \pm 20\%$ (n = 13).

В силу поверхностно-аккумулятивного распределения 137Сѕ по почвенному профилю (рис. 3) его основные запасы ($73 \pm 24\%$ от содержания в ландшафте, n = 24) приурочены к верхней 10-сантиметровой толще органических и органоминеральных горизонтов с плотностью $0.11 \pm 0.10 \, \text{г/см}^3$ (n = 106), величина которой при погребении минеральным субстратом может возрастать в 10-15 раз за счет внедрения неорганической составляющей и разложения растительных остатков. Таким образом, в новом турбированном материале, состоящем из высокорадиоактивного органического материала и низкорадиоактивного минерального, удельная активность цезия-137 снижается обратно пропорционально увеличению плотности.

В двух образцах погребенных органических слоев подзола грубогумусового иллювиально-железистого криогенно-ожелезненного криотурбированного глееватого выявлена значимая активность $^{137}\mathrm{Cs}\colon 1,5\pm0,7$ (глубина отбора 20–40 см) и $3,4\pm1,5$ Бк/кг (12–20 см). При этом в элювиальном потёчно-гумусовом горизонте, расположенном на глубине 5–20 см, значимая активность $^{137}\mathrm{Cs}$ не обнаружена.

Выявленные уровни активности соответствуют теоретическим значениям, которые могут быть обнаружены в погребенном органическом материале. При современной плотности загрязнения цезием—137 поверхностных органических горизонтов, находящейся в пределах 60–90 Бк/кг, активность погребенных прослоев не будет превышать 10 Бк/кг. В соответствии с величиной

периода полураспада ¹³⁷Cs в ближайшие 100 лет активность органического материала почв из широтного пояса 60–70° с.ш., погребенного в конце XX – начале XXI века будет находиться на инструментально измеряемом уровне.



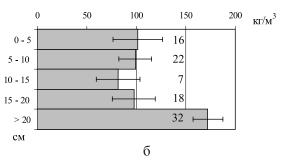


Рис. 3. Изменение активности цезия-137 в органических образцах (а) и их плотности (б). Рядом со столбцами указано число образцов п и ошибка среднего

Так как цезий-137 является малоподвижным в почвах элементом, то по его запасам в погребенном материале можно определить дату погребения в интервале 1960–1990 гг. Диагностировать наиболее молодые образования невозможно, так как запас ¹³⁷Cs в почве с 1990 г. установился на постоянном уровне (см. рис. 3). В более старых почвенных турбациях активность радиоцезия ниже инструментально определяемого уровня.

Полученные результаты показывают, что криогенное и фитогенное перемещение органического материала имеет место и в последние десятилетия. Для оценки интенсивности и распространения этих процессов необходимы более детальные исследования.

Использование радиоцезиевой метки поможет изучению скорости минерализации погребенного органического материала и условий, благоприятных для сохранения турбированных слоев.

Выводы

- 1. В большинстве изученных почв активность цезия-137 уменьшается с глубиной, а основные его запасы сосредоточены в слое 0–10 см. Активность цезия-137 в почвенных криотурбациях не превышает 3,5 Бк/кг.
- 2. Цезий-137 обнаружен только в криотурбациях, в состав которых входит существенное количество органического вещества.

Авторы выражают благодарность профессору М.А. Герасимовой и к.б.н. А.В. Лупачеву за обсуждение генезиса почвенных турбаций, а также к.г.-м.н. Э.Э. Асадулину за помощь в моделировании изменения запасов цезия в почвах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (соглашение № 8673), гранта РФФИ№ 13-05-41431 и Программы № 4 Президиума Российской Академии наук «Природная среда России: адаптационные процессы в условиях изменяющегося климата и развития атомной энергетики».

Список литературы

- 1. Алифанов В.М., Керженцев А.С., Макеев О.В. Морфология криогенных почв // Криогенные почвы и их рациональное использование. М.: Наука. 1977. С. 31–41. 2. Атлас Тюменской области. М.-Тюмень: ГУГК,
- 1971. Вып. І. 198 с
- 3. Дюкарев А.Г. Пологова Н.Н. Современные криоморфозы в ландшафтах южной тайги Западной Сибири // Гео-
- графия и природные ресурсы. 2007. № 1. С. 96–100. 4. Кузьменкова Н.В., Власова И.Э. Калмыков С.Н. Формы нахождения 137Сs в почвах северо-западной части Кольского полуострова // Вопросы радиационной безопасности. 2011. № 4. С. 3–10.
- 5. Михайлов В.Н. Ядерные испытания в Арктике. М.: ОАО «Московские учебники», 2006. Т.1. 463 с. Т.2. 455 с.
- 6. Семенков И.Н., Мирошников А.Ю. Количественная оценка выноса радиоцезия глобальных выпадений из ландшафтов водосборного бассейна Оби // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2014. – В печати.
- Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. -Vol. I. – New York: United Nations, 2010. – 463 p.

References

- 1. Alifanov V.M., Kerzhentsev A.S., Makeev O.V. Cryosoils morphology // Environmental management of cryosoils. M.: Nauka, 1977. pp. 31 41
- 2. Atlas of Tyumen' oblast'. Vol. 1. M., Tyumen': GUGK,
- 1971. 198 p.
 3. Dyukarev A.G., Pologova N.N. Contemporaneous cryomorphoses in landscapes of the southern taiga in West Siberia// Geography and Natural Resources. 2007, no 1. pp. 96–100 4. Kuzmenkova N., Miroshnikov A., Vorobyova T. Ac-
- cumulation and migration of 137Cs in the tundra landscapes (North-West of Kola Peninsula) // Radioprotection. 2009. Vol. 44. no 5. pp. 103–106.

 5. Mikhailov V.N. Weapons in the Arctica. M.: Moscow
- books, Vol. I. no 2. 455 p.
 6. Semenkov I.N., Miroshnikov A.Yu. Quantitative evalua-
- tion of global fallout radiocesium runoff from landscapes of the Ob' river basin// Environmental Geoscience. 2014, in press
- 7. Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume I. New York: United Nations, 2010. 463 p.

Рецензенты:

Кочкин Б.Т., д.г.-м.н., заведующий сектором, ФГБУН «Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук», г. Москва:

Кошелева Н.Е., д.г.н., ведущий научный сотрудник, ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», г. Москва.

Работа поступила в редакцию 09.10.2013.