

СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ

Popova E.P.

PhD student, Department of Radioecology and Ecotoxicology,
Lomonosov Moscow State University

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF THE INFLOW OF ROOT EXUDATES AND ROOT LITTER OF SCOTS PINE (*PÍNUS SYLVÉSTRIS*) ON THE Cs^{137} MIGRATION IN THE SOIL

Попова Евгения Павловна

Аспирант кафедры радиоэкологии
и экотоксикологии,

Московского государственного университета
им. М.В. Ломоносова

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОСТУПЛЕНИЯ КОРНЕВЫХ ВЫДЕЛЕНИЙ И КОРНЕВОГО ОПАДА СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (*PÍNUS SYLVÉSTRIS*) НА МИГРАЦИЮ Cs^{137} В ПОЧВЕННОМ ПРОФИЛЕ

Summary. This study aims to determine the role of root exudates and root litter on the migration of Cs^{137} in soil. It was established that the influence of root systems on the migration of the studied radionuclide can exceed the influence of mechanical factors, such as ion diffusion in the soil. Root exudates are of the greatest importance for the migration of radionuclides, with them up to 5.52% of the radionuclide stock in the layer can be released. Root decay is able to exert less influence, providing release up to 1.1% of the reserve in the layer. In general, these indicators will vary significantly depending on the biomass of root systems and its distribution in the soil profile.

Аннотация. Данное исследование направлено на определение роли корневых выделений и корневого опада на миграцию Cs^{137} в почве. Установлено, что влияние корневых систем на миграцию исследуемого радионуклида может превышать влияние механических факторов, таких как диффузия ионов в почве. Наибольшее значение для миграции радионуклидов имеют корневые выделения, с ними может высвобождаться до 5,52% от запаса радионуклида в слое. Меньшее влияние способен оказывать корневой опад, обеспечивающий высвобождение до 1,1% от запаса в слое. В целом данные показатели будут значительно варьировать в зависимости от запаса биомассы корневых систем и ее распределении в почвенном профиле.

Key words: Root exudates, root litter, Scots pine, Cs^{137} , radionuclide migration

Ключевые слова: Корневые выделения, корневой опад, сосна обыкновенная, Cs^{137} , миграция радионуклидов

Постановка проблемы: Радиоцезий (^{137}Cs) представляет собой техногенный радионуклид, появление которого в биосфере, определилось развитием атомной энергетики и ядерного вооружения во 2-й половине 20 века. Около 0,5% площади территории Российской Федерации в разные периоды было подвергнуто загрязнению радиоцезием, последствия чего создают неблагоприятную экологическую обстановку и в настоящее время. Вместе с тем, периодически происходящие аварии на объектах ядерно-топливного цикла обеспечивают пополнение пула ^{137}Cs в окружающей среде, делая непригодными для жизни человека все новые территории, и, в конечном счете, могут привести к тому, что именно радиоцезий будет являться основным дозообразующим радионуклидом.

Значимый интерес к указанной проблематике долгое время определялся необходимостью минимизации последствий поступление радионуклида в наземные экосистемы, вместе с тем новые происшествия на объектах ЯТЦ обуславливают необходимость формирования базы фактических данных об аккумуляции и потоках ^{137}Cs в различных биогеоценозах, для дальнейшего

построения на их основе достоверных прогнозных моделей миграции радиоцезия.

Анализ последних исследований и публикаций. Анализ данных, представленных в разнообразных научных трудах показал существующие противоречия в оценках потоков и аккумуляции радиоцезия, а значимая вариация показателей накопления его, отмечалась даже в случае исследований одной и той же пары культура-почва [1], что и подтверждает необходимость дальнейших научных изысканий в данной области.

В свою очередь, причины указанных различий, вероятно, связаны с тем фактом, что миграция радиоцезия представляет собой сложный комплексный процесс, определяющийся совокупностью разнообразных факторов, включающих, как химические свойства и физико-химическое состояние радионуклида, так и характеристики экосистемы, как например, свойства почвы и условия ее увлажнения, рельеф, геологическими условиями и рядом других [2, 3, 4, 5]. Соответственно данный процесс может иметь свои особенности в каждой отдельной экосистеме и ведущими факторами миграции радионуклида

могут выступать самые разные факторы. Кроме того, миграционные процессы невозможно полноценно отразить одномоментно, поскольку они являются динамичными и значения потоков миграции могут существенно варьировать от года к году.

До последнего времени большинство авторов отмечали преобладающую роль диффузии [6] и конвективного переноса в миграции радиоцезия, возможно это связано с детальным изучением данных процессов, однако в природе расчетных уровней миграции, за счет действия данных факторов, не наблюдается.

Активное изучение вышеописанных механических и химических процессов, а также построение моделей миграции, значительно нивелировали в литературе роль биоты в миграции радионуклидов. В тоже время, ряд ученых изначально отмечали важность данного фактора, например, В.М. Прохоров отмечает, что роль биологических агентов в миграции может не только быть с сравнима с ролью остальных потоков, но и превосходить их, однако сложность и вариабельность биологических систем, усложняет возможность параметризовать данное влияние [7].

В настоящее время, по прошествии более 30 лет после аварии на ЧАЭС, когда в почве достигнуто химическое равновесие между формами радиоцезия, именно биота может оказывать максимальное воздействие на переопределение радионуклида.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. Особенно недооценена и интересна роль в миграции радионуклидов корней растений. Ежегодное отмирание корней растений достигает 30-40% прироста, а, следовательно, содержащиеся в них радионуклиды способны попадать в почву. В своей работе Konoplev и др. [8] производя оценку заглубления радиоцезия в результате аварийного выброса АС Факусима отмечают, что детектируемый уровень удельной активности радиоцезия в почве в лесных территориях находится на больших глубинах, нежели в травянистых экосистемах. Кроме того, имеется возможность миграции элементов, в том числе и радионуклидов по поверхности корней растений и с корневыми выделениями.

Формулирование целей статьи. Данное исследование ставило своей целью исследование влияния корневых выделений и корневого опада сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) на перераспределение Cs^{137} в почвенном профиле на примере соснового фитоценоза Красногорского района Брянской области.

Изложение основного материала.

Неоднократно отмечалось, что величина влияния корневых систем растений на миграцию радиоцезия в почвенном профиле зависит от конкретных свойств исследуемого фитоценоза: вида растений, возраста, условий произрастания. При этом для растений первого яруса видовая принадлежность может оказывать даже меньшее

влияние нежели остальные факторы. Для разных периодов жизни растений характерно преобладание прироста различных корней (стержневых, горизонтальных и так далее). К примеру первые годы жизни саженца сосны обыкновенной предполагают развитие горизонтальных корней без значительного заглубления [9]. С другой стороны, отнесение корневой системы отдельного вида растений первого яруса к конкретному типу – стержневая или мочковатая (поверхностная), также является условным, поскольку для той же сосны обыкновенной, в зависимости от различных условий может быть характерна любая из названных корневых систем. Таким образом, провести оценку влияния корневых систем на перемещение радиоцезия в почвенном профиле в целом для всех видов и фитоценозов не представляется возможным, однако полученные данные позволяют сравнить данные значения для двух исследуемых фитоценозов, с использованием результатов модельных экспериментов, ранее проводимых исследований [10, 11, 12].

В последующих расчетах необходимо учитывать несколько допущений:

1) Используются обобщенные литературные данные о количестве биомассы корней, их приросте и отпаде [13];

2) Отпад в первую очередь представлен самой тонкой фракцией корней до 1 мм;

3) Оценка влияния самых тонких сосущих корней и корневых волосков, сроком жизни менее суток не производится, в силу невозможности;

4) При оценке влияния корневых выделений не учитывается варьирование данного фактора между растениями разного вида и возраста;

5) Масса отпада для каждого слоя определяется пропорционально на основании фактических данных полевых исследований по распространению корней в почвенном профиле.

Дополнительно необходимо отметить, что данная оценка не ставит своей целью получение абсолютного значения, в связи со сложностью объекта изучения, и служит в первую очередь для получения представления о возможной величине влияния и сравнения с другими способами миграции, используемыми в различных моделях миграции радиоцезия.

Имеющиеся литературные данные указывают, что ежегодный прирост соснового фитоценоза южной тайги составляет около 1,81 т/га [13], соответственно корневой отпад составляет 0,54 т/га или 54 г/м². Для проведения расчетов необходимо учитывать распределение массы корневых систем по профилю. Полученные натурные данные указывают, на тот факт, что в случае исследуемого сосняка была сформирована поверхностная корневая система с незначительным заглублением корней, и сосредоточением всей основной биомассы корней в верхнем 30 см слое почвы, аналогичные примеры распространены в научной литературе [14].

Следует отметить, что данная работа определяет своей целью всесторонне оценить влияние корней растений, поэтому необходимо отметить, способы перемещения радиоцезия, основной - это его ежегодное высвобождение из корневой биомассы в составе отпада и корневых выделений. При этом возможность миграции

высвободившегося радиоцезия дальше крайне лимитирована, за счет удерживающей способности почвы, что было отмечено в эксперименте с почвогрунтом. В данной ситуации правомерным будет считать моментом поступления радиоцезия в почвенный слой, поступление его в составе корневой биомассы ежегодного прироста.

Таблица 1.

ЕЖЕГОДНОЕ ПОСТУПЛЕНИЕ РАДИОЦЕЗИЯ С ОПАДОМ КОРНЕЙ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В РАЗЛИЧНЫХ СЛОЯХ ПОЧВЕННОГО ПРОФИЛЯ ИССЛЕДУЕМОГО ФИТОЦЕНОЗА

Глубина слоя почвы	Запасы ^{137}Cs в слое почвы, кБк/м^2	Запас биомассы в слое почвы, г/м^2	Корневой опад, г/м^2	Удельная активность ^{137}Cs в корнях кБк/кг	Запас ^{137}Cs в опаде кБк/м^2	Количество радиоцезия поступающего в почвенный слой за счет опада, % *
0-10 см	3663,9	2413	39,79	45,37	1,81	0,05
10-20см	710,6	535	8,82	46,84	0,41	0,06
20-30см	76,1	327	5,39	46,45	0,25	0,36

*Процент от запаса радионуклида в слое

Данные Таблицы 1 показывают, что ежегодно за счет отмирания корней сосны обыкновенной в различные слои почвенного профиля поступает от 0,05% радиоцезия и данное значение с глубиной возрастает до 0,36% от общего запаса в слое. При этом корневые системы обладают высокой скоростью роста, а эксперимент с саженцами ели обыкновенной в грунте показал, что уже в течении первой недели радионуклид распространяется между всеми структурными компонентами, а значит, что моментом поступления ^{137}Cs в слой можно считать его поступление в составе

ежегодного прироста. Количество радионуклида, поступающего в почвенный слой в составе ежегодно прироста больше чем в 3 раза превышает высвобождение с опадом (Таблица 2).

Как и в случае с опадом, величина ежегодного вклада прироста корней в суммарную активность радиоцезия в почвенном слое возрастает с глубиной и для слоя 20-30 см достигает значения 1,1%. Очевидно, что данные значения нельзя считать постоянными и возможна некоторая вариация от года к году.

Таблица 2.

ЕЖЕГОДНОЕ ПОСТУПЛЕНИЕ РАДИОЦЕЗИЯ В СОСТАВЕ ПРИРОСТА КОРНЕЙ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В РАЗЛИЧНЫЕ СЛОИ ПОЧВЕННОГО ПРОФИЛЯ ИССЛЕДУЕМОГО ФИТОЦЕНОЗА

Глубина слоя почвы	Запасы ^{137}Cs в слое почвы, кБк/м^2	Запас биомассы в слое почвы, г/м^2	Прирост, г/м^2	Удельная активность ^{137}Cs в корнях кБк/кг	Запас ^{137}Cs в приросте кБк/м^2	Количество радиоцезия поступающего в почвенный слой с приростом, %*
0-10 см	3663,9	2413	133,4	45,37	6,05	0,17
10-20см	710,6	535	29,56	46,84	1,39	0,20
20-30см	76,1	327	18,1	46,45	0,84	1,11

*Процент от запаса радионуклида в слое

Возраст фитоценоза наравне с уже указанными факторами будет играть существенную роль, поэтому для расчета в конкретном случае использовались показатели для фитоценоза со значением биомассы корней, сопоставимым с результатами проведенных натурных исследований.

Тем не менее, полученные экспериментально данные, указывают, что более значимым источником поступления радиоцезия являются корневые экссудаты. В результате эксперимента с водной культурой, поступление радиоцезия с экссудатами в чистый раствор за одну неделю составило в среднем 42,9% от содержания в

ассимилирующих органах. Помимо допущений, указанных ранее, для использования данного показателя при пересчете влияния корневых систем на миграцию радиоцезия для существующих фитоценозов необходимо учесть, скорость роста при выращивании в растворе, как минимум в 2 раза выше, чем при выращивании в почве [15], что подтверждается результатами накопления радиоцезия в структурных компонентах в модельном эксперименте и практикой гидропоники, таким образом ежедневно с корневыми выделениями поступает около 3,1% от запаса в ассимилирующих органах. Соответствующие показатели характерны только

для периодов с относительной влажностью почвы не менее 60% от полной влагоемкости, когда осуществляется процесс экссудации [16]. Длительность вегетационного периода для Брянской области составляет около 180 дней, но даже это количество не отражает благоприятный период для экссудации, поскольку общее число дней с осадками, в течении теплого периода редко превышает 35 [17], а водоудерживающая способность опесчаненных почв не высокая, поэтому решено для расчета (Таблица 3) использовать период равный 70 дням.

Количество радиоцезия, ежегодно поступающего с корневыми выделениями (N) определялось по формуле (1):

$$(1) \quad N = B \times n \times T, \text{ где}$$

B – запас ^{137}Cs в ассимилирующих органах;

n – процент ^{137}Cs поступающего с корневыми экссудатами в сутки от запаса в ассимилирующих органах (в данном случае $n=3,1\%$);

T – длительность периода благоприятного для экссудации.

Таблица 3.

РАСЧЕТНОЕ КОЛИЧЕСТВО РАДИОЦЕЗИЯ, ЕЖЕГОДНО ПОСТУПАЮЩЕГО В ПОЧВЕННЫЙ ПРОФИЛЬ С КОРНЕВЫМИ ВЫДЕЛЕНИЯМИ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В ИССЛЕДУЕМОМ ФИТОЦЕНОЗЕ

Биомасса хвои, г/м ²	Удельная активность ^{137}Cs в хвое, кБк/кг	Запас ^{137}Cs в хвое (B), кБк/м ²	Благоприятный период для экссудации (T), дней	Количество радиоцезия, ежегодно поступающего с корневыми выделениями (N), кБк/м ²
650	30,0	19,5	70	42,4

Таким образом оценка количества радиоцезия на основании результатов модельного эксперимента, позволяет предположить, что количество ежегодно поступающего с корневыми выделениями радионуклида составляет около 42,4 кБк/м².

В расчете влияния корневых выделений в миграцию радиоцезия важно учитывать распределение биомассы корней в почвенном профиле, и здесь следует отметить, что предложенная оценка (Таблица 4) не учитывает распределение корней по фракциям.

Таблица 4.

ОЦЕНКА ВКЛАДА КОРНЕВЫХ ВЫДЕЛЕНИЙ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В НАКОПЛЕНИЕ РАДИОЦЕЗИЯ В ПОЧВЕННОМ СЛОЕ В ИССЛЕДУЕМОМ ФИТОЦЕНОЗЕ

Глубина слоя	Запасы ^{137}Cs в слое, кБк/м ²	Запас биомассы корней г/м ²	Поступление ^{137}Cs с корневыми экссудатами, кБк/м ²	Вклад корневых выделений в накопление радиоцезия в слое, %*
0-10 см	3663,9	2413	31,2	0,86
10-20см	710,6	535	7,0	0,98
20-30см	76,1	327	4,2	5,52

*Процент от запаса радионуклида в слое

Таким образом полученные данные показывают, что поступление радиоцезия в слой почвы в составе ежегодных корневых выделений соснового древостоя, даже по самым скромным оценкам, в разы превышает поступление его в этот же слой за счет годового отпада корней и составляют от 0,86% в верхнем слое 0-10 см до 5,52% в нижнем слое 20-30 см.

Выводы из данного исследования и перспективы. Данное исследование было направлено на установление роли корневых систем древесных растений в миграционных потоках радиоактивного изотопа цезия с массовым числом 137 в сосняке Красногорского района Брянской области. В целом было проанализировано несколько основных путей поступления и перераспределения радионуклида в почвенном профиле под влиянием корневых систем – поступление в почвенный слой в составе годового прироста корней, их опада, в составе корневых выделений, а также в процессе перемещения ^{137}Cs в водной пленке на поверхности корневых систем.

Величина запаса искомого радионуклида в почвенном профиле коррелировала с пиками профильного распределения биомассы, а детектируемые уровни ^{137}Cs приурочены к слоям почвы с значимым присутствием корневой биомассы, так на глубине более 30 сантиметров, в сосняке, где обнаруживается минимальное количество корней сосны, радиоцезий практически отсутствует. При этом, обнаруживается значимый вклад корневой системы сосны в суммарный запас радионуклида в почвенных слоях. В целом это делает очевидным факт определяющей роли корневых систем в процессе перераспределения радионуклида в почвенном профиле.

Стоит отметить, что в исследуемом сосняке было обнаружено формирование сосной обыкновенной корневой системы поверхностного типа, что не является характерным для данного вида, однако может встречаться в отдельных случаях. Это необходимо учитывать в дальнейших исследованиях при решении этого вопроса. Наряду с видовыми различиями, еще один фактор,

очевидно, оказывает влияние на интенсивность поступления радиоцезия в почвенный профиль – это возраст фитоценоза, поскольку от данного фактора зависит величина ежегодного прироста и отпада корневых систем, а также соотношение прироста корней различных фракций. Таким образом, вопросы связанные с вариацией количества корневых выделений в зависимости от вида и возраста растений требуют дальнейшего исследования.

В целом, проведенное исследование подтвердило существенную роль корней древесных растений первого яруса, итоговая роль корневых систем в ежегодном высвобождении радиоцезия достигает 5,9% для сосняка, при этом данная оценка не включает в себя другие немаловажные компоненты экосистем, такие как травянистые однолетние и многолетние растения, кустарнички и подлесок, что приводит к выводу об определяющей роли корней растений в процессе миграции радиоцезия и необходимости дальнейшего развития данного направления.

Список литературы:

1. Парамонова Т. А., Мамихин С. В. Корневое поглощение ^{137}Cs и его распределение между надземными и подземными органами растений: анализ литературы // Радиационная биология. Радиоэкология. 2017. Т. 57, № 6. С. 633–650.
2. Алексахин Р.М. Радиоактивное загрязнение почвы и растений. М.: АН СССР. 1963. 132 с.
3. Алексахин Р.М., Пристер Б.С., Санжарова Н.И. и др. Радиоактивное загрязнение агроэкосистем // Радиоэкологические последствия Чернобыльской аварии / Под ред. И.И. Крышева. М.: ИАЭ им. Курчатова, 1991. С. 136–161.
4. Щеглов А.И., Цветнова О.Б. Радиоактивное загрязнение почв// Дegradaция и охрана почв. М. Изд-во МГУ, 2002. с. 373 - 400.
5. Щеглов А. И. Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах: По материалам 10-летних исследований в зоне влияния аварии на ЧАЭС. Москва: Москва, 2000. 268 с.
6. Ефремов И.В., Рахимова Н.Н., Янчук Е.Л. Особенности профильной миграции радионуклидов цезия-137 и стронция-90 в системе почва – растение // Вестник ОГУ., Оренбург: 2005. №12. С. 49 - 54.
7. Прохоров В.М. Миграция радиоактивных загрязнений в почвах. М., Энергоиздат, 1981. 98 с.
8. Konoplev A. V. , Golosov V. N. , Yoschenko V. I. et al. Vertical distribution of radiocesium in soils of the area affected by the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident // Eurasian Soil Science. 2016. V. 49, № 5. P. 570–580.
9. Калинин М.И. Корневоедение / М.И. Калинин. М.: Экология, 1991. 173 с.
10. Щеглов А. И., Цветнова О. Б., Попова Е.П. Влияние корней древесных растений на перераспределение ^{137}Cs в почвах сосняков и березняков зоны радиоактивного загрязнения // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. — 2016. — № 2. — С. 45–50.
11. Щеглов А. И., Цветнова О. Б., Попова Е.П. Показатели поступления ^{137}Cs в почву с опадом корней и корневыми выделениями сосны обыкновенной // Радиационная биология. Радиоэкология. — 2017. — Т. 57, № 6. — С. 651–657.
12. Popova E.P., Shcheglov A.I., Komarov L.A. Some indicators of the ^{137}Cs intake in nutrient solution with root exudates of Norway spruce (Picea Abies) in a model experiment // Moscow University Soil Science Bulletin, 2018, Vol. 73, No. 5, pp. 43–46.
13. Базилевич Н.И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 294 с.
14. Корневая система сосны обыкновенной в условиях северотаежной зоны / Тюкавина, Евдокимов // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал . 2016 . № 1.
15. Чесноков В.А. и др. Выращивание растений без почвы. Л.: Издательство Ленинградского университета. 1960. 170 с.
16. Жолкевич В.Н. Водный обмен растений. М.: Наука, 1989. 256 с.
17. Агроклиматический справочник по Брянской области. Л.: Гидрометиздат, 1960. 111 с.