

## ХИМИЯ

## ПОЧВ

УДК (y.t1.45АН.X21.!

# МИГРАЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ СТАБИЛЬНОГО СТРОНЦИЯ В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВАХ СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИИ (ПО ДАННЫМ МОДЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ)

© 2008 г. Л. В. Литвинович, О. Ю. Павлова, Д. Н. Юзмухаметов, Л. В. Лаврищев

*Агрофизический научно-исследовательский институт, 196620. Стыт-Нешероург-Пушкин, пер. Подбельского, 7*

Поступила в редакцию 21.11.2006 г.

В серии модельных опытов на колонках определены масштабы миграции стабильного стронция в дерново-подзолистых почвах легкого гранулометрического состава. Установлено, что количество выщелачиваемого стронция зависит от его исходного содержания в почвах, уровня их гумусированности и объема просочившейся влаги. Искусственное обогащение почв стронцием приводит к увеличению потерь элемента в результате вымывания, однако полного удаления, даже в результате многократных промачиваний, не происходит.

## ВВЕДЕНИЕ

Стронций относится к элементам третьего класса опасности (ГОСТ 17.4.02-83). Его избыточное накопление в костно-суставной системе и хрящевой ткани животных и человека приводит к хрупкости костей, деформирующему остеопорозу [6, 371]. К настоящему времени в литературе накоплен обширный экспериментальный материал, посвященный содержанию стронция в почвах основных природно-климатических зон бывшего СССР [9, 17, 18, 36, 39], выделены территории с очень высоким содержанием стронция и нарушенным соотношением Ca : Sr [17, 18, 39]. Приводятся сведения о концентрации стронция в тканях растений из различных биологических семейств [2, 4, У. 13, 18, 25, 35, 44, 45].

Установлено, что загрязнение почв и растений стабильным стронцием может быть вызвано длительным применением в сельскохозяйственном производстве фосфорных удобрений [2, 11, 15, 33, 41-45], стронций-содержащих мелиорантов и отходов промышленности [22, 23, 25, 38 и др.].

Значительно меньше работ посвящено миграционной способности стронция в почвах. Все исследователи признают способность данного элемента перемещаться в почвенном профиле. При этом подчеркивается, что высокую подвижность стронций сохраняет в широком диапазоне почвенных условий (окисляющей, кислотной, нейтральной и восстановительной средах) [42]. Однако конкретные данные о масштабах миграции этого элемента встречаются редко и носят противоречивый характер.

Так, исследование 12 профилей сероземно-оазисных почв [19] позволило прийти к выводу,

что в условиях длительного ведения поливного земледелия стронций накапливается в нижней части почвенной толщи пахотных почв, причем содержание металла на глубине 110-120 см было в ряде разрезов в 2 раза больше, чем в пахотном слое. В большинстве залежных почв распределение стронция носило элювиально-иллювиальный характер с максимальным содержанием на глубине 60-70 см. Кислоторастворимые формы стронция составляли 52-100% от валового содержания металла в почвах.

В опытах Лыкова с соавт. [261 длительное применение (70 лет) суперфосфата привело к тому, что содержание стронция в слое 0-20 см дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы по сравнению с контролем возросло в 12 раз, а в слоях 20-40 и 40-60 см в 1,8 и 2,6 раза соответственно. С другой стороны, имеются данные о преимущественном накоплении стронция и пахотном слое почв солонцового комплекса при применении фосфогипса в качестве мелиоранта [38].

Цель настоящих исследований - в модельных опытах определить интенсивность выщелачивания стронция в дерново-подзолистых почвах легкого гранулометрического состава Северо-Запада России. Задачи исследований: установить миграционную способность стронция в нативных и известкованных почвах различной гумусированности; оценить роль водорастворимых органических веществ корневых выделений в миграции стронция в почвах; дать оценку уровня загрязнения почв и растений стабильным стронцием в результате использования конверсионного мела (КМ) в качестве мелиоранта.

Таблица 1. Физико-химическая характеристика дерново-подзолистой супесчаной почвы

Гумус, %	рН солевой	Нг	Обменная кислотность	ЕКО	Валовое содержание		Содержание фракций, %		
					Са	Ст	<0,001 мм	<0,01 мм	
					мг-экв/100 г				мг/кг
Почва опытов 1 и 3									
3,02	4,1	5,4	2,5	22	7358	135	6,86	18,6	
Почва опыта 2									
1,76	4,2	5,6	0,75	14	5396	112	8,98	21,6	

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследований служили дерново-подзолистые почвы легкого гранулометрического состава. Почвы песчаного, супесчаного и легкосуглинистого гранулометрического состава доминируют в составе почвенного покрова Северо-Западного региона России, занимая примерно 57% от площади пашни [29].

Почва 1 отобрана под естественным многолетним лугом, почва 2 – под лесом. Физико-химическая характеристика почв приведена в табл. 1. Выбранные объекты имеют кислую реакцию среды и характеризуются практически одинаковыми показателями рН солевой вытяжки и гидролитической кислотности (Нг). Содержание гумуса в луговой почве почти в 2 раза выше, чем в лесной почве, что связано с активным протеканием дернового процесса под влиянием многолетней травянистой растительности. Валовое содержание стронция в почвах близко к фоновому (156 мг/кг), характерному для дерново-подзолистых почв северо-запада Нечерноземья [28].

В качестве стронций-содержащего материала использовали конверсионный мел – отход производства нитроаммофоски АО "Акрон" (г. Великий Новгород). КМ содержит 36% кальция и 1,5% стронция и более 20 лет используется на полях Новгородской обл. В 1994–1995 гг. он применялся в Ленинградской обл. Удобрительная ценность, мелиоративные свойства мела и экологические аспекты известкования почв мелом рассмотрены ранее [22–24].

Для решения поставленной цели заложено три модельных опыта. Влияние различного уровня гумусированности дерново-подзолистых почв на миграционную способность стронция изучали в опытах 1 и 2. В опытах использовали делительные воронки диаметром 50,4 мм. Перед набивкой в воронки почв известковали мелом по полной дозе Нг (1000 мг на колонку) и компостировали при температуре 28°C в термостате Бруве, регулярно перемешивая. Продолжительность компостирования 30 сут. Влажность в период компостирования

поддерживали на уровне 60% ППВ. После компостирования почвы высушивали и измельчали, пропуская через сито с диаметром ячеек 1 мм.

Промывание вели строго расчетным количеством дистиллированной воды, моделируя объем ежегодно просачивающейся через почвенную толщу влаги. При расчетах исходили из того, что годовое количество осадков на северо-западе Нечерноземья составляет ≈600 мм [31, 36], а на транспирацию растениями и испарение с поверхности почвы расходуется ≈400 мм [31]. Таким образом, 200 мм осадков ежегодно просачивается через почвенно-грунтовую толщу. Количество воды (мл), необходимое для разового промывания одной колонки, рассчитывали следующим образом:

разом:  $V = \frac{\pi r^2 \times 200}{1000}$ . Согласно расчетам, для одного промывания использовали 400 мл дистиллированной воды.

Схема опытов 1 и 2 включала 2 варианта: 1 – контроль (промывание нативной почвы); 2 – промывание известкованной почвы. Высота почвенного слоя в воронке 17 см. Масса почвы 350 г. Плотность набивки почвы 1,0–1,1 г/см<sup>3</sup>. Всего проведено 8 промываний. Общая продолжительность эксперимента, не считая срока компостирования – 3,5 мес. Промывание начинали после насыщения почвы влагой в колонках опыта. Перерыв между отдельными промываниями не более 1–2 сут. Объем просочившейся влаги в опытах 1 и 2 не зависел от срока промывания и колебался от 395 до 398 мл. Повторность в опыте – 5-кратная.

С целью изучения роли корневых выделений в миграции стронция был заложен опыт 3 с луговой дерново-подзолистой почвой (почва 1). При планировании этого эксперимента исходили из следующих предположений: 1) металлы, попавшие в почву, вовлекаются в комплексообразование с органическими соединениями [10, 13]. Включение металлов в органические комплексы меняет миграционные свойства элементов. Это может как усиливать подвижность металлов, так и способствовать их закреплению; 2) согласно [41], от 20 до 40% синтези-

Таблица 2. Количество стронция, вымываемого отдельными порциями фильтратов, мг

Вариант опыта	Номер промывания								Вымыто стронция	% от внесенного с мелом количества
	1	2	3	4	5	6	7	8		
Опыт 1										
1. Контроль	0.12 ± 0.03	0	0.04 ± 0.01	0	0	0	0	0	0.16	-
2. Известкование по 1 Нг	1.2 ± 0.2	0.4 ± 0.1	0.5 ± 0.15	0.04 ± 0.015	0.04 ± 0.01	0.04 ± 0.009	0.03 ± 0.01	0.02 ± 0.004	3.8	25
Опыт 2										
1. Контроль	0	0	0	0.09 ± 0.02	0.04 ± 0.01	0.02 ± 0.004	0.02 ± 0.004	0.03 ± 0.005	0.2	-
2. Известкование по 1 Нг	1.5 ± 0.3	1.0 ± 0.2	0.8 ± 0.2	1.1 ± 0.3	0.8 ± 0.15	0.3 ± 0.07	0.3 ± 0.06	0.3 ± 0.06	6.1	41
Опыт 3										
1. Колонки с 4 растениями	2.83 ± 0.75	0.14 ± 0.03	0	0	0	0	0	0	2.97	-
2. Колонки с 6 растениями	3.55 ± 0.85	0.01 ± 0.002	0	0	0	0	0	0	3.56	-

руемых растениями органических веществ выделяется через корневую систему.

Опыт 3 проводили в полихлорвиниловых колонках диаметром 7 см. Высота почвенного слоя в колонке составляет 25 см, масса почвы 800 г. Плотность набивки почвы – 1.0–1.1 г/см<sup>3</sup>. Подготовку почвы перед экспериментом проводили также как и в опыте 1 и 2, но почву известковали по 0.75 Нг. Схема опыта включала 2 варианта: 1 – почва с 4 растениями пшеницы; 2 – почва с 6 растениями пшеницы. Посев растений проводили наклюнувшимися семенами.

Промывание начинали после появления всходов. Проведено 8 промывок. Количество дистиллированной воды для одного промывания – 400 мл. Продолжительность опыта 2.5 мес. Пшеницу убирали в фазу созревания. Поскольку полноценного зерна получить не удалось, анализ растительного материала проводили не разделяя растения на вегетативные и генеративные органы. Перед анализом растения из колонок всех трех повторностей каждого варианта объединялись. Перед определением растительный материал озоляли смесью концентрированных азотной и соляной кислот 2 : 1 при соотношении 1 г растений : 10 мл смеси кислот [1].

После завершения эксперимента почву из колонок варианта 2 опыта 3 извлекали и анализировали на содержание стронция послойно: 0–5; 5–15 и 15–25 см. Для извлечения использовали ацетатно-аммонийный буфер (рН 4.8).

Физико-химические показатели почв определяли общепринятыми методами [3]. Валовое содержание стронция в почвах исследовали на рентгенфлуоресцентном спектроанализаторе фирмы ORTEC-TEFA. Содержание стронция в почвах, промывных водах и растениях анализировали на атомно-абсорбционном спектрофотометре. Концентрацию органических веществ в промывных водах определяли после выпаривания аликвоты элюата на водяной бане, с окончанием по методу Тюрина. Данные определений обрабатывали статистически.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты изучения миграционной способности стронция сведены в табл. 2. Видно, что количество выщелачиваемого стронция зависит от его исходного содержания в почвах, количества просочившейся влаги, уровня гумусированности и характера использования почв.

Полное удаление подвижных соединений стронция из почвы контрольного варианта опыта 1 достигалось уже к третьему сроку элюирования. Абсолютные потери стронция из луговой почвы за весь период эксперимента составили 0.16 мг (0.12% от его валового содержания).

Начальный период миграции стронция из почвы контрольного варианта опыта 2 совпал с четвертым промыванием. Для промывных вод этого срока наблюдений также характерно максимальное количество вымытого стронция (0.09 мг).

В элюатах 5–6 сроков количество удаляемого стронция стабилизировалось и изменялось от 0.04 до 0.02 мг. Всего за 8 промываний было удалено 0.2 мг стронция (0.18% от его валового содержания).

Полученные данные свидетельствуют о незначительном запасе подвижных соединений стронция в лесной и луговой почвах и прочном его закреплении в составе почвенного поглощающего комплекса. Очевидно, фонд способных к миграции соединений стабильного стронция в нативных дерново-подзолистых почвах с близким к фоновому содержанию пепелик, а масштабы миграции не представляют угрозы для загрязнения грунтовых вод.

При известковании почв мелом потери стронция в результате промачивания усиливаются. Стронций обнаруживали во всех порциях фильтрата. Максимальное количество вымытого стронция из мелиорируемых почв характерно для промывных вод первого срока наблюдений. По мере увеличения объема просочившейся влаги, количество вымываемого стронция отдельными порциями фильтрата уменьшалось и к восьмому сроку наблюдений составило 0.2–0.3 мг. Суммарные потери металла из лесной почвы за весь период эксперимента составили 6.1, а из луговой – 3.8 мг.

Особенно заметно различия в вымывании стронция из низкогумусированной лесной и высокогумусированной луговой почв проявляются если сравнивать не абсолютные величины, а долю выщелачиваемого стронция от внесенного с мелом количества. Если считать, что количество мобильного почвенного стронция не зависит от внесения мелиоранта, то доля удаляемого стронция из лесной почвы составила 41, а из луговой – 25% от внесенного с мелом количества. Следовательно, уровень гумусированности почв оказывает существенное влияние на масштабы миграции изучаемого элемента.

Количество просочившейся влаги в опыте с растениями в отдельные сроки наблюдений были меньше, чем в опыте без растений, что связано с вкладом растений в потери влаги (табл. 3). Общее количество удаляемого стронция из почвы в опыте с растениями за 8 промываний по вариантам составило 2.97 и 3.56 мг, причем стронций присутствовал только в элюатах первых двух сроков наблюдений (табл. 2). Важно также отметить, что доля вымытого стронция от внесенного с мелом количества была значительно меньше, чем в опыте без растений, и составила в первом варианте 11.6, во втором – 13.9%. Следовательно, растения оказали сдерживающее влияние на миграцию стронция. Причины этого явления будут рассмотрены ниже.

О слабой способности стронция к перемещению свидетельствует и послойный анализ почвы из ко-

Таблица 3. Содержание углерода в промывных водах, мкг

Срок наблюдений	Вариант	
	4 растения	6 растений
1	21.47 ± 2.8 (320)*	29.3 ± 4.5 (325)*
2	11.00 ± 2.4 (320)	20.9 ± 7.1 (325)
3	10.10 ± 1.2 (260)	9.2 ± 3.0 (250)
4	12.03 ± 1.2 (260)	9.1 ± 4.6 (230)
5	10.10 ± 1.3 (260)	6.7 ± 1.2 (230)
6	16.5 ± 1.6 (220)	8.9 ± 1.6 (220)
7	5.20 ± 0.4 (220)	8.1 ± 1.7 (210)
8	7.10 ± 0.5 (195)	7.9 ± 0.2 (165)
Σ	93.5	100.1

\* В скобках приведено количество просочившейся влаги (среднее из трех определений).

лонок опыта 3. Концентрация обменно-поглощенного стронция (вытяжка ацетатно-аммонийного буфера с pH 4.8) составила по слоям: 0–5 см – 41.8 ± 3.6; 5–15 см – 37.8 ± 3.2; 15–25 см – 41.5 ± 4.1 мг/кг массы воздушно-сухой почвы. То есть перемещение стронция в нижнюю часть колонок в результате многократных промачиваний не произошло. Согласно шкале нормирования, предложенной в Поповым и Соловьевым [32], по уровню загрязнения обменным стронцием, известкованная мелом почва из колонок опыта 3 относится к категории повышенно опасных.

В целом проведенные эксперименты позволяют сделать вывод о слабой миграционной способности стронция в дерново-подзолистых почвах легкого гранулометрического состава северо-запада России. Расчеты показывают, что за 8 условных лет количество удаляемого стронция из известкованных мелом не занятых растениями почв не превышает 12.5 кг (в среднем по 1.6 кг ежегодно).

При проведении экспериментов мы обратили внимание на следующее обстоятельство. Элюаты, просочившиеся сквозь не находящуюся под растениями почву (за исключением первых двух промачиваний) были бесцветны, в то время как в опыте с растениями имели соломенно-желтую окраску. Это побудило нас провести анализ состава просочившихся вод на наличие органического вещества.

**Таблица 4.** Биомасса (1/колонку) и химический состав растений пшеницы, мг/кг воздушно-сухой массы растений

Вариант	Биомасса	Химический состав		Ca/Sr
		Ca	Sr	
4 растения	1,7	4820	76	63,4
6 растений	2,0	3300	34	97,0

Результаты изучения свидетельствуют, что вытекающая из колонок опыта 3 влага обогащалась водорастворимым органическим веществом (ВОВ). Наиболее обогащенной оказалась первая порция фильтрата. По мере проведения эксперимента количество удаляемых из почвы ВОВ уменьшалось и к восьмому промачиванию составило по вариантам  $7.1 \pm 0.5$  и  $7.9 \pm 0.2$  мкг. Суммарные потери ВОВ за весь период наблюдений составили в первом варианте 93.5, во втором – 100.1 мкг. Суммарное количество органического вещества в фильтратах опыта оказалось на порядок ниже количества выщелачиваемого стронция. Следовательно, органические вещества корневых выделений не могли оказать влияния на перемещение стронция в почве опыта.

Стронций принято относить к элементам очень сильного биологического накопления [4, 43]. Поэтому уместно предположить, что именно активное корневое поглощение стронция из почвы колонок опыта препятствовало его миграции на более поздних стадиях развития растений (период с третьего по восьмой сроки промывания).

Результаты изучения химического состава растений показали, что потребление пшеницей щелочноземельных металлов зависело от густоты посева растений (табл. 4). В варианте с 4 растениями вегетативная масса пшеницы характеризовалась более высоким уровнем накопления кальция и стронция, чем в варианте с 6 растениями. Абсолютный вынос стронция пшеницей из вариантов опыта составил соответственно 0.13 и 0.07 мг.

Решением объединенной комиссии ФАО/ВОЗ стронций включен в число элементов, контролируемых при международной торговле пищевыми продуктами [8]. Однако эффективные отечественные критерии оценки стронциевого загрязнения кормовых и пищевых продуктов отсутствуют. Не разработан максимально допустимый уровень содержания стронция в кормах для сельскохозяйственных животных [7]. Принято считать, что в качественных кормах содержание кальция должно превышать содержание стронция в 160 и более раз.

При сужении этого отношения до 80 и ниже корма становятся гигиенически неполноценными [27].

В растениях из колонок опыта указанное отношение в пшенице не достигало оптимального уровня, оставаясь неблагоприятным (вариант 1) или относительно благоприятным (вариант 2). Следовательно, стронций активно поглощается растениями даже в резко выраженных элювиальных условиях произрастания.

Тем не менее, резкое уменьшение потерь стронция из почвы в результате посева растений едва ли можно объяснить только корневым поглощением данного элемента. Расчеты показывают, что вынос пшеницей стронция составил всего 0.52 и 0.26% от внесенного с мелом количества. Это оказалось даже ниже его количества, удаляемого с фильтрующей влагой.

Вероятнее всего, роль хозяйственного выноса в уменьшении потерь стронция из почв в результате миграции невелика. В этом убеждают исследования, проведенные Карповой и Потатуевой [15]. Установлено, что вынос стронция урожаем вико-овсяной смеси из почвы, длительное время удобрявшейся простым суперфосфатом, варьировал от 67 до 351 г/га, а вынос травами колебался от 26.1 до 90.0 г/га.

В настоящее время в литературе признается существование нескольких механизмов, за счет которых может осуществляться миграция стронция в почвах [30]: а) конвективный перенос с током воды при инфильтрации атмосферных осадков в виде растворимых солей и комплексных соединений с органическими лигандами или твердых частиц, переносимых механическим путем; б) за счет диффузии в почвенном растворе в ионной форме.

Очевидно, что окрашивание фильтратов связано с наличием в них органических веществ растений. Преимущественной формой миграции стронция является миграция в ионной форме. Гуматы и фульваты стронция имеют значительно меньшую подвижность [40].

Исследованиями установлено, что на долю ионных форм стронция, мигрирующих в природных (обычных) водах, цветностью 45° приходится 95% от общего содержания, а доля фульватных и гидроксифульватных соединений составляет всего 2.4%. В высокоцветных водах (цветность 500°) количество последних возрастает до 38%, однако доминирующими остаются ионные формы элемента (~62%) [5].

Общий объем органических веществ, выделяемых корневой системой пшеницы за весь период эксперимента, вероятнее всего значительно больше их количества, удаляемого с просачивающейся влагой. Так, в опытах Пфейффера [46] корни 14 дневных проростков пшеницы массой 0.207 г за 7 дней выделили 0.134 г низкомолекулярных органических кислот. Помимо низкомо-

лекулярных органических кислот, в составе корневых выделений обнаружены витамины, ферменты, аминокислоты - соединения, многие из которых являются сильными комплексообразователями [12]. Уместно предположить, что резкое сокращение количества вымываемого стронция при посеве вызвано тем, что выделяемые корнями пшеницы органические соединения связывают ионы стронция в состав малоподвижных органо-минеральных комплексов.

Судя по данным литературы, роль органического вещества в закреплении стронция почвами очень существенна. Исследованиями Лыкова с соавт. [26] показано, что применение органических удобрений способствует усилению сорбции стронция. В опытах Прохорова и Фрида [34] добавление в чистый кварцевый песок 2% гуминовых кислот уменьшало диффузию стронция в 10 раз.

При изучении состава гумуса дерново-подзолистой супесчаной почвы установлено, что -50% от валового содержания стронция было связано с гуминовыми кислотами фракции I [21]. Для более точного ответа на вопрос о роли органических веществ корневых выделений в закреплении стронция почвами нужны специальные исследования.

Расчеты показывают, что суммарное количество удаляемого стронция из почвы опыта 3 за весь период эксперимента (вынос растениями + вымывание) соответствовало по вариантам опыта 12.1 и 14.2% от внесенного с мелом количества соответственно. Учитывая опережающие темпы вымывания из пахотного слоя кальция по сравнению со стронцием [20], а также конкурентный характер поступления этих элементов в растения [23, 25, 26], не следует ожидать расширения отношения Ca : Sr (улучшения качества продукции растениеводства) в последствии мела. Очевидно, известкованные мелом почвы долго будут генерировать потоки стронция в растения.

Исследования Карповой и Потатуевой [15] показали, что за 20 лет применения простого суперфосфата на дерново-подзолистой почве было внесено 49.5 кг/га стабильного стронция (это в 1.84 раза меньше, чем при разовом использовании КМ в дозе 0.75 кг как в нашем случае). Спустя 30 лет после прекращения использования простого суперфосфата, повышенное содержание обменного стронция продолжало проявляться как в почве, так и в растениях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В нагнвных дерново-подзолистых почвах легкого гранулометрического состава северо-запада Нечерноземья фонд способных к миграции соединений стабильного стронция невелик и не превышает десятых долей процента от его валового содержания.

Искусственное обогащение почв стронцием в результате использования конверсионного мела в качестве мелиоранта приводит к увеличению потерь стронция при промачивании почв. На величину потерь существенное влияние оказывает уровень гумусированности дерново-подзолистых почв. За 8 промываний количество выщелачиваемого стронция составило: из низкогумусированной почвы - 41, а из высокогумусированной - 25% от внесенного с мелом количества.

Растения оказывают сдерживающее влияние на величину потерь стронция в результате миграции. По всей вероятности, выделяемые корневой системой низкомолекулярные органические вещества способствуют связыванию стронция в составе органо-минеральных комплексов, в результате чего его миграционная способность снижается.

Хозяйственный вынос стронция растениями невелик и не оказывает существенного влияния на масштабы потерь стронция из дерново-подзолистых почв при их промачивании.

Использование конверсионного мела в качестве мелиоранта приводит к загрязнению почв и растений стабильным стронцием.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алаверди К.В.* Тяжелые металлы в почвах и растениях. Л., 1987. 142 с.
2. *Анжоган В.М., Сиркичан Г.Я., Арцрутян Л.А.* Влияние удобрений на накопление стабильного стронция растениями горных лугов Армении // *Агрохимия*, 1981, № 2. С. 125.
3. *Арзуманикян Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 487 с.
4. *Быхун В.И., Крайченко П.Е., Кузнецова Е.Т. и др.* Стронций в питании кукурузы // *Микроэлементы в окружающей среде*. Киев: Наукова думка, 1980. С. 35-36.
5. *Воршпа Г.М., Жоцешви И.Я., Сироткина И.С., Велюханова Т.К., Инцкрасли Л.Н., Замокина Н.С.* Изучение органических веществ поверхностных вод и их взаимодействия с ионами металлов // *Геохимия*, 1979, № 4. С. 598-607.
6. *Виноградов А.П.* Геохимические исследования в области распространения урсовской эндемии // *ДАН СССР*, 1939, Т. 23, № 1. С. 2-11.
7. Временный максимально допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных. М., 1987.
8. *Вайзинен Г.Н., Савин В.А., Гуляев В.А.* Ускоренное выведение тяжелых металлов из организма животных. Новгород, 1997. 302 с.
9. *Голод Д.С., Петручук Н.И., Петрович Е.И.* Стронций и его биогеохимический круговорот в основных лесах Белоруссии // *Тяжелые металлы в окружающей среде и охрана природы*. Мат-лы 2-й Всесоюзной конф. М., 1980, Ч. 2. С. 346-348.

10. *Елпатьевский П.В., Луценко Т.Н.* Роль водорастворимых органических веществ в переносе металлов техногенного происхождения по профилю горного бурозема // Почвоведение. 1990. № 6. С. 30–42.
11. *Иванов А.Ф., Ермохин Ю.И.* О содержании стронция в почве и растениях в результате применения различных форм фосфорных удобрений на содержание кадмия, свинца, никеля и стронция в дерново-подзолистых почвах и растениях // Микроэлементы в биологии и их применение в сельском хозяйстве и медицине: Тез. докл. XI Всес. конф. Самарканд, 1990. С. 164.
12. *Иванов В.П.* Растительные выделения и их значение в жизни фитоценозов М.: Наука, 1973. 296 с.
13. *Ильина Г.В., Рыдкий С.Г., Яновская Ф.Г.* Поступление стабильного стронция в растения в зависимости от некоторых элементов питания // Агрохимия. 1966. С. № 2. 83–91.
14. *Кабата-Пендиш А., Пендиш Х.* Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 440 с.
15. *Карпова Е.А., Потатусова Ю.А.* Последствия применения различных форм фосфорных удобрений: стронций в системе дерново-подзолистая почва-растения // Агрохимия. 2004. № 1. С. 91–96.
16. *Ковальский В.В.* Новые направления и задачи биологической химии сельскохозяйственных животных в связи с изучением биогеохимических провинций. М., 1958, 44 с.
17. *Ковальский В.В.* Стронциево-кальциевые субрегионы биосферы и биогеохимические провинции // Тр. биогеохимической лаборатории АН СССР. 1978. Т. 15. С. 122.
18. *Ковальский В.В., Зисорина Е.Ф.* К биогеохимии стронция // Агрохимия. 1965. № 4. С. 78–88.
19. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю.* Содержание и особенности распределения валовых и кислоторастворимых форм соединений тяжелых металлов в профиле сероземно-пазисных почв в зоне химического завода // Агрохимия. 1999. № 8. С. 68–78.
20. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврицев А.В.* О вымывании кальция и стронция из дерново-подзолистой сунесчаной почвы, произвесткованной конверсионным мелом // Агрохимия. 1999. № 9. С. 64–67.
21. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврицев А.В.* Особенности состава гумусового вещества дерново-подзолистой сунесчаной почвы, произвесткованной конверсионным мелом // Агрохимия. 2000. № 10. С. 15–19.
22. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврицев А.В., Бирюков В.А.* Разложение конверсионного мела в дерново-подзолистой почве в связи с угрозой ее загрязнения стабильным стронцием // Агрохимия. 2001. № 11. С. 80–82.
23. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврицев А.В., Витковская С.Е.* Экологические аспекты известкования почв конверсионным мелом // Плодородие. 2005. № 1. С. 23–26.
24. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврицев А.В., Маслова А.И.* Динамика почвенной кислотности и содержание подвижных форм соединений алюминия, марганца и железа в почвах при известковании конверсионным мелом // Агрохимия. 2000. № 6. С. 23–27.
25. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Маслова А.И., Лаврицев А.В.* Накопление стабильного стронция сельскохозяйственными культурами при известковании дерново-подзолистых почв конверсионным мелом // Агрохимия. 2000. № 9. С. 80–88.
26. *Лыков А.М., Сафонов А.Ф., Васильева Д.В., Клименко Н.Н., Золотарев М.А., Сугробов В.М.* Влияние бессменных культур, севооборота и удобрений на плодородие легкосуглинистой дерново-подзолистой почвы // Изв. ТСХА. 1986. № 2. С. 2–13.
27. *Минеев В.Г.* Экологические проблемы агрохимии // Агрохимический комплекс России. 1989. № 4. С. 37–41.
28. *Муравьев А.Г., Кырыев Б.Б., Ляндзберг А.Р.* Оценка экологического состояния почвы. СПб.: Кримос +, 2000. 160 с.
29. *Небольсин А.Н., Небольсина Э.П.* Теоретические основы известкования почв. СПб.: Изд-во ЛНИИСХ. 2005. 252 с.
30. *Павловская Ф.И., Цицепина Л.Н.* Относительная подвижность и формы нахождения  $Sr^{90}$ , стронция и кальция в дерново-подзолистой почве // Информ. бюл. АН СССР. Радиобиология. Вып. 13. 1971. С. 29.
31. *Пестряков В.К.* Окультуривание почв Северо-Запада. Л.: Колос, 1977. 273 с.
32. *Попов В.В., Соловьев Г.А.* Контроль загрязнения почв тяжелыми металлами // Химизация сельского хозяйства. 1991. № 11. С. 80–82.
33. *Потатусова Ю.А., Каслицкий Ю.И., Хлыстовский А.Д., Прищеп Е.Г., Сидоренкова Н.К., Янишевский Ф.В.* Влияние длительного применения фосфорных удобрений на накопление в почвах и растениях тяжелых металлов и токсических элементов // Агрохимия. 1994. № 11. С. 98–112.
34. *Прохоров В.М., Фрид А.С.* Влияние гумуса на скорость диффузии стронция в кварцевом песке // Почвоведение. № 3. 1966. С. 68–70.
35. *Риш П.А., Егоров Е.А., Приев Я.М.* Содержание стронция в почвах и растениях каракулеводческих пастбищ // Тр. ин-та каракулеводства. № 10. 1960.
36. *Роде А.А.* Водный режим и влагообеспечивающая способность почв // Почвоведение. 1965. № 1. С. 49–55.
37. *Самарина И.А.* Уровская биогеохимическая провинция Амурской области // Тр. биогеохимической лаборатории АН СССР. 1960. Т. XI, С. 163–168.
38. *Семендяева Н.В., Добротворская Н.И.* Стронций и фтор в солонцовых комплексах Западной Сибири // Система методов изучения почвенного покрова, деградированного под влиянием химического загрязнения: Науч. тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. М., 1992. С. 74–79.
39. *Тойска М.А., Первозчикова Е.М., Левкина Т.И.* Стронций в почвах и породах Карелии // Микроэлементы в окружающей среде. Киев: Наукова думка, 1981. С. 28–30.

40. Усъяров О.Г., Баранова Э.А., Величко И.А., Зубарева И.Ф. Подвижность гуматов и фульватов  $\text{Sr}^{90}$  и  $\text{Cs}^{137}$  // Почвоведение. № 7. 1986. С. 37–41.
41. Физиология растений. М.: Колос, 1976. 420 с.
42. Химия окружающей среды. / Под ред. О.М. Бокрица М.: Химия, 1982. 672 с.
43. Хрусталева М.А. Биогеохимическое изучение ландшафтов московского региона // Мат-лы 3-й Рос. биогеохимической школы. Геохимическая экология и биогеохимическое изучение токсикон биосферы. Новосибирск, 2000. С. 185–186.
44. Шугаров Ю.А. Содержание обменного стронция в почве при использовании суперфосфата и поступление его в бобовые и злаковые травы // Агрехимия. 1971. № 6. С. 94–98.
45. Шугаров Ю.А. Поглощение почвой стабильного стронция из суперфосфата и его поступление в озимую рожь // Агрехимия. 1970. № 11. С. 112–118.
46. Pfeiffer Th. Stickstoffsammelnde Bacterian Brache und Raabbau 1912-Landwirtsch.Versuchs stat. 1917. 82 p.

## The Migration Capacity of Stable Strontium in Soddy-Podzolic Soils of the Russian Northwest (Data of Simulation Experiments)

A. V. Litvinovich, O. Yu. Pavlova, D. N. Yuzmukhametov, and A. V. Lavrishchev

The scope of stable strontium migration in the light-textured soddy-podzolic soils was determined in columns in a series of simulation experiments. The amount of leached strontium was found to depend on its initial content in the soils, the humus content, and the volume of percolated moisture. The artificial enrichment of soils with strontium increases the losses of this element due to its leaching. However, strontium is not completely removed even upon repeated water percolation.