

МИГРАЦИОННАЯ ПОДВИЖНОСТЬ ФТОРА ПРИ МЕЛИОРАЦИИ КИСЛЫХ ПОЧВ ФТОРСОДЕРЖАЩИМИ ОТХОДАМИ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

О. Ю. Павлова¹, А. В. Литвинович¹, А. В. Лаврищев², В. М. Буре^{1,3}

¹ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»
195220, С.-Петербург, Гражданский пр., 14;

²Санкт-Петербургский государственный аграрный университет
196601, С.-Петербург-Пушкин, Петербургское шоссе, 2;

³Санкт-Петербургский государственный университет
199034, С.-Петербург, Университетская наб., д. 7-9
E-mail: pou1953@rambler.ru

Поступила в редакцию 24 апреля 2019 г. принята к печати 28 августа 2019 г.

В лабораторном опыте с использованием воронок изучена миграционная подвижность фтора в дерново-подзолистой почве в вариантах без известкования и с применением мелиоранта, содержащего фтор. Установлено, что многократное промывание почвы вне зависимости от варианта опыта приводит к удалению из нее части водорастворимого фтора, составляющей 0,6 мг. Обогащение почвы фтором в результате использования фторсодержащего мелиоранта увеличивает миграционные потери (суммарные потери возрастают до 0,8 мг). По мере увеличения объема просочившейся влаги концентрация фтора в отдельных порциях фильтрата повышается. Вне зависимости от варианта опыта установлена статистически значимая тенденция к увеличению изучаемого показателя на протяжении всего исследования. В процессе проведения эксперимента средняя скорость вымывания фтора (динамика изменения содержания фтора в отдельных порциях фильтратов на всем промежутке изучения) из нативной и мелиорируемой почвы повышалась и составила $v = 0,018 \text{ мг л}^{-1}$ в варианте без известкования и $v = 0,023 \text{ мг л}^{-1}$ в варианте с известкованием. Ни в одной из порций фильтрата не выявлено превышения ПДК фтора, установленной для питьевых вод. Перечислены механизмы, способствующие закреплению фтора минеральной частью почвы. На основании проведенного исследования сделан вывод, что использование фторсодержащего мелиоранта в качестве известкового материала не представляет угрозы загрязнения фтором компонентов природной среды. Разработаны эмпирические модели, адекватно описывающие процессы миграции фтора при промывании почвы.

Ключевые слова: фтор, миграционная подвижность фтора, почва, промывание, фторсодержащий мелиорант.

MOBILITY OF FLUORINE UNDER AMELIORATION OF ACID SOILS WITH FLUORINE-CONTAINING WASTE INDUSTRY

O. Yu. Pavlova¹, A. V. Litvinovich¹, A. V. Lavrishchev², V. M. Bure^{1,3}

¹Agrophysical research Institute
195220, St. Petersburg, Grazhdanskiy, 14;

²Saint-Petersburg state agrarian University
196601, St. Petersburg-Pushkin, Petersburg highway 2;

³St. Petersburg state University
199034 St. Petersburg, Universitetskaya nab., 7-9
E-mail: pou1953@rambler.ru

Migration of fluorine in the sod-podzolic soil without liming and with the use of a fluorine-containing ameliorant was studied in the laboratory experiment on funnels. It was found that repeated washing of the soil, regardless of the treatment of the experiment, resulted in the removal of some part of the water-soluble fluorine from the soil, which was 0.6 mg. Soil enrichment with fluorine as a result of fluorine-containing ameliorant application increased migration losses. Total losses increased to 0.8 mg. With the increase of the irrigation water volume, the concentration of fluorine in a separate portion of the filtrate was increasing. Regardless of the treatment of the experiment, a statistically significant increase of the studied indicator for the entire period of study was established. In the treatment without liming the average rate of fluorine concentration change in a single portion of the filtrate was $0,018 \text{ mg l}^{-1}$. In the treatment with the ameliorant it was $0,023 \text{ mg l}^{-1}$. In any portion of the filtrate the permissible concentration set for drinking water was not exceeded. Developed empirical model was adequately describing the processes of fluorine migration with the irrigation water through the soil.

Key words: fluorine, migration mobility, soil, irrigation, fluorine-containing ameliorant.

ВВЕДЕНИЕ

Фтор относится к элементам первого класса опасности (ГОСТ 17.4.1.02.83). По деструктивному действию на живое вещество он занимает второе место после ртути (Kabata-Pendias, 2011). Накопление в почвах фтористых соединений происходит в результате попадания на них летучих выбросов промышленных предприятий (Литвинович, Павлова, 2002), а также длительного применения фосфорных удобрений и мелиорантов (Пашова, 1980; Потатуева и др., 1994; Литвинович, Павлова, 2001; Танделов, 2012).

К настоящему времени предложено несколько механизмов, объясняющих причины исчезновения фторид-ионов из растворов во время их взаимодействия с твёрдой частью почвы (Dickman, Bray, 1941; Samson, 1952; Romo, Roy, 1957; Huang, Jackson, 1965; Bower, Hatcher, 1967; Marion et al., 1976). Кислые почвы сильнее сорбируют фтор, чем щелочные (Дубравина, Корнблум, 1984).

Данные о влиянии известкования на подвижность фтора представлены в работах Fargah, Slavek, Pickering (1985), Omueti, Jones (1980), Литвинович с соавт. (2001). Установлено, что применение CaCO_3 приводит к образованию в почвах слаборастворимого флюорита CaF_2 , в результате чего подвижность фтора снижается.

В литературе встречаются сведения о миграционной подвижности фтора в почвах различных природно-климатических областей (Илькун и др., 1967; Dziubek, Jadeusz, 1976; Литвинович и др., 1999), однако данные материалы не являются исчерпывающими.

Цель настоящего исследования заключалась в том, чтобы в лабораторном опыте с использованием колонок (воронки) изучить миграционную способность фтора в кислой дерново-подзолистой почве, произвесткованной отходами промышленности, содержащими фтор.

В задачи исследования входило: 1) установить масштабы миграции фтора из нативной и мелиорируемой дерново-подзолистой почвы при многократном промачивании; 2) определить среднюю скорость изменения концентрации фтора в отдельных порциях фильтратов на протяжении всего изучения; 3) разработать эмпирические модели, адекватно описывающие процессы вымывания фтора из почвы различного уровня кислотности.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для достижения поставленной цели был заложен лабораторный опыт с использованием воронок. Объектом исследования являлась дерново-подзолистая супесчаная почва, произвесткованная конверсионным мелом (КМ) – отходом производства нитроаммофоски, содержащим 90% CaCO_3 и 0,3% фтора.

В опыте использовалась кислая дерново-подзолистая супесчаная почва со следующими физико-химическими показателями: $\text{pH}_{\text{ккл}} - 4,1$; гумус – 3,02%; $\text{Hг} - 5,4$ ммоль (экв) 100 г^{-1} почвы; валовое содержание $\text{Ca} - 7358 \text{ мг кг}^{-1}$ от массы почвы; содержание частиц менее 0,01 мм – 18,6%; концентрация водорастворимого фтора – 0,71 мг кг^{-1} массы почвы.

Перед набивкой в сосуды почва была произвесткована КМ по полной дозе Hг , затем компостировалась в течение 30 суток при температуре 28°C в термостате Бруве и при этом регулярно перемешивалась. Влажность почвы в период компостирования поддерживалась на уровне 60% полной полевой влагёмкости. После компостирования почва высушивалась и измельчалась путем пропуска через сито с отверстиями 1 мм. Промывание проводилось строгим расчётным количеством дистиллированной воды для моделирования ежегодного объёма просочившейся влаги (Литвинович и др., 1999). Для одного промывания использовалось 400 мл воды. Всего проведено 8 промываний. Общий объём просочившейся влаги за весь период изучения составил 3,2 литра. Опыт проведен в 5-кратной повторности. В лабораторном (модельном) эксперименте использовались делительные воронки. Высота почвенного слоя в воронке составляла 17 см, масса почвы – 300 г, плотность набивки – $1,0-1,1 \text{ г см}^{-3}$. Промывания проводились с перерывами не более 1–2 суток. Общая продолжительность эксперимента составила 6,5 месяцев. Элюаты собирались после каждого промывания, затем в них определялась концентрация фтора. Определение фтора в промывных водах и почве осуществлялось с помощью фторселективного электрода. Данные о динамике содержания фтора в элюатах обрабатывались статистически (Буре, 2007).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты определения концентрации фтора в отдельных порциях фильтратов из нативной и мелиорируемой почвы сведены в табл. 1.

Таблица. Концентрация фтора в промывных водах (мг л^{-1})

ПРОМЫВАНИЕ				
1-е	2-е	3-е	4-е	5-е
Без известкования				
$\frac{0,07 \pm 0,01}{0,003}$	$\frac{0,07 \pm 0,01}{0,003}$	$\frac{0,21 \pm 0,017}{0,084}$	$\frac{0,19 \pm 0,012}{0,076}$	$\frac{0,19 \pm 0,02}{0,076}$
Известкование КМ по 1Hг				
$\frac{0,11 \pm 0,01}{0,045}$ (0,3)	$\frac{0,11 \pm 0,01}{0,045}$ (0,3)	$\frac{0,24 \pm 0,03}{0,096}$ (0,64)	$\frac{0,25 \pm 0,03}{0,1}$ (0,66)	$\frac{0,27 \pm 0,02}{0,108}$ (0,72)

Продолжение таблицы

ПРОМЫВАНИЕ			Σ вымытого F (мг), % от внесённого
6-е	7-е	8-е	
Без известкования			
$\frac{0,21 \pm 0,16}{0,084}$	$\frac{0,26 \pm 0,02}{0,104}$	$\frac{0,21 \pm 0,022}{0,084}$	$\frac{0,6}{-}$
Известкование КМ по 1Нг			
$\frac{0,31 \pm 0,08}{0,122}$ (0,81)	$\frac{0,31 \pm 0,08}{0,122}$ (0,82)	$\frac{0,29 \pm 0,09}{0,115}$ (0,77)	$\frac{0,8}{5,3}$

Примечание: над чертой – концентрация F в отдельных порциях фильтрата; под чертой – количество вымытого фтора в мг; в скобках – % фтора от количества, внесённого с конверсионным мелом

Как видно из таблицы, фтор обнаружен во всех порциях фильтратов из нативной почвы. После первого промачивания его концентрация в промывных водах составила $0,07 \text{ мг л}^{-1}$. Увеличение содержания фтора в элюатах продолжалось до 7-го промывания, когда его концентрация повысилась до $0,26 \text{ мг л}^{-1}$. В водах 8-го промывания концентрация фтора несколько снизилась и составила $0,21 \text{ мг л}^{-1}$. Таким образом, полного удаления водорастворимого фтора за весь период эксперимента не произошло. Суммарный объём вымытого фтора составил всего 0,6 мг. Следовательно, количество способного к миграции фтора в нативной почве является незначительным. Ни в одной из порций фильтрата не установлено превышение уровня ПДК.

Линейная эмпирическая модель (1.1) динамики содержания фтора в отдельных порциях фильтратов описывается уравнением:

$$y_{1,1} = 0,11 + 0,018t, \quad (1.1)$$

где t – сроки (условное время).

Средняя скорость изменения содержания фтора на всем промежутке изучения составила: $v_1 = 0,018 \text{ мг л}^{-1} \text{ год}^{-1}$. Эмпирическая модель (1.1) статистически значима на очень высоком уровне значимости 1,85% (статистика F принимает значение $F = 10,38$ при критическом значении $F(0,9815; 1,6) = 10,27$), коэффициент детерминации $R^2 = 0,63$. График модели (1.1) представлен на рис. 1.

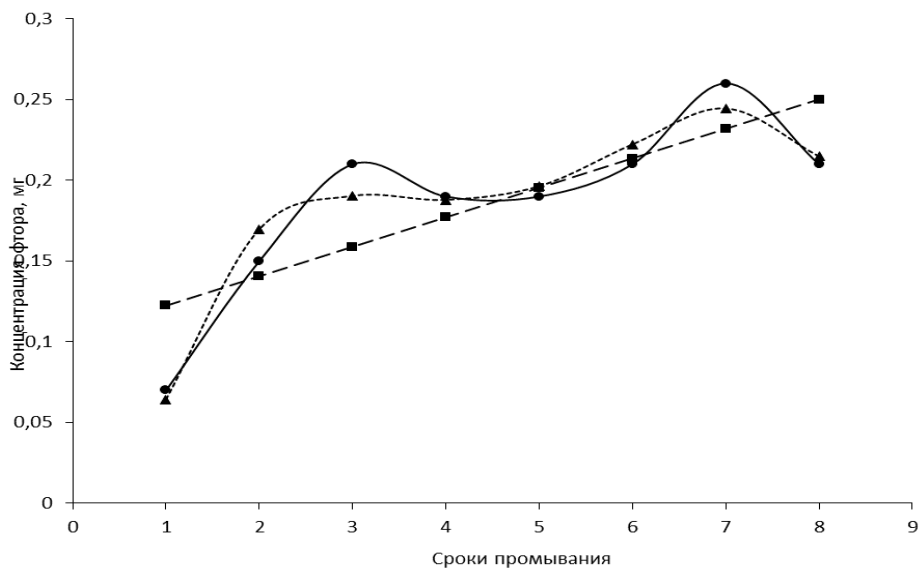


Рис. 1. Эмпирические модели (1.1) и (1.2) динамики содержания фтора в отдельных порциях фильтратов из нативной почвы

Эмпирическая модель (1.2) динамики содержания фтора на основе многочлена четвёртой степени имеет вид:

$$y_{1,2} = -0,2 + 0,4t - 0,1t^2 + 0,02t^3 - 0,001t^4, \quad (1.2)$$

где t – сроки (условное время).

Эмпирическая модель (1.2) статистически значима на очень высоком уровне значимости 3,32% (статистика F принимает значение $F = 12,3219$ при критическом значении $F(0,9668; 4,3) = 12,315$), коэффициент детерминации $R^2 = 0,94$. График модели (1.2) приведен на рис. 1.

Обогащение почвы фторсодержащим мелиорантом привело к увеличению миграционных потерь фтора

при промачивании. Минимальная концентрация фтора установлена в фильтратах 1-го промывания ($0,11 \text{ мг л}^{-1} \text{ год}^{-1}$). После 2-го промывания в фильтратах содержалось в два раза больше фтора, чем в элюатах 1-го промывания. Увеличение миграционных потерь фтора продолжалось до 6-го промывания. На момент завершения эксперимента концентрация фтора в 8-й порции фильтрата составляла $0,29 \text{ мг л}^{-1}$. Полного удаления фтора из мелиорируемой почвы не произошло. Концентрация фтора во всех порциях фильтратов из мелиорируемой почвы несущественно превышала его содержание в аналогичных фильтратах из нативной почвы, однако была значительно ниже ПДК фтора в питьевой воде.

Суммарный объём вымытого фтора в варианте с известкованием увеличился до 0,8 мг. Если принять, что исходное количество подвижного фтора в почве, выбранной для опыта, является постоянной величиной, то доля вымываемого фтора КМ составила ~5% от внесённого. Таким образом, использование для мелиорации кислых почв КМ в научно обоснованной дозе не представляет угрозы загрязнения фтором источников питьевого водоснабжения. Значительно большую опасность представляет присутствующий в составе мела стабильный стронций (Литвинович и др., 2001; Дричко и др., 2002; Лаврищев, 2016).

Линейная эмпирическая модель (2.1) динамики содержания фтора в отдельных порциях фильтрата имеет следующий вид:

$$y_{2,1} = 0,12 + 0,023t, \quad (2.1)$$

где t – сроки (условное время).

Средняя скорость изменения содержания фтора на всем промежутке наблюдений составила:

$$v_2 = 0,023 \text{ мг л}^{-1} \text{ год}^{-1}.$$

Эмпирическая модель (2.1) статистически значима на очень высоком уровне значимости 0,54% (статистика F принимает значение $F = 18,169$ при критическом значении $F(0,9946; 1,6) = 18,034$), коэффициент детерминации $R^2 = 0,75$. График модели (2.1) представлен на рис. 2.

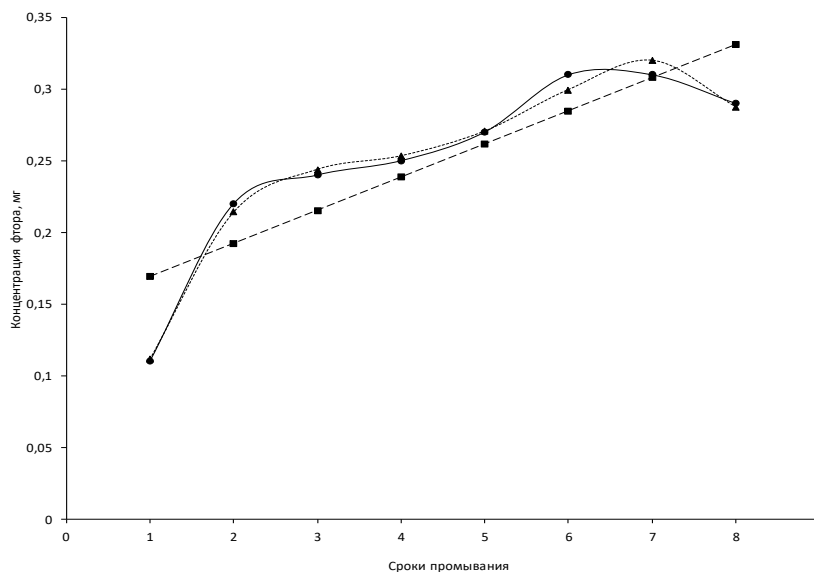


Рис. 2. Эмпирические модели (2.1) и (2.2) динамики содержания фтора в отдельных порциях фильтратов из мелиорируемой почвы

ВЫВОДЫ

1. При многократном промывании нативной дерново-подзолистой почвы фтор обнаружен во всех порциях фильтратов. Суммарные потери в результате 8-ми промываний составляют 0,6 мг. При известковании фторсодержащим мелиорантом элювиальные потери незначительно увеличиваются. Суммарный объём вымываемого фтора равен 0,8 мг. Ни в одной из порций фильтрата не выявлено превышения уровня ПДК фтора, установленной для питьевых вод.

2. Средняя скорость вымывания фтора (динамика изменения содержания фтора в отдельных порциях фильтратов на всём промежутке изучения) из нативной

Эмпирическая модель (2.2) динамики содержания фтора на основе многочлена третьей степени имеет вид:

$$y_{2,2} = -0,1 + 0,4t - 0,1t^2 + 0,02t^3 - 0,001t^4, \quad (2.2)$$

где t – сроки (условное время).

Эмпирическая модель (2.2) статистически значима на очень высоком уровне значимости 0,25% (статистика F принимает значение $F = 79,23$ при критическом значении $F(0,9975; 4,3) = 73,94$), коэффициент детерминации $R^2 = 0,99$. График модели (2.2) приведен на рис. 2.

На основе проведённых исследований и эмпирических моделей можно сделать следующие заключения. В обоих вариантах опыта данные по содержанию фтора в отдельных порциях фильтратов различаются незначительно. Установлена статистически значимая тенденция к увеличению изучаемого показателя на протяжении всего исследования (возрастающий тренд). Средняя скорость изменения содержания фтора положительна (показатель растёт). В варианте без известкования почвы $v = 0,018 \text{ мг л}^{-1} \text{ год}^{-1}$; в варианте с мелиорацией $v = 0,023 \text{ мг л}^{-1} \text{ год}^{-1}$.

и мелиорируемой почвы увеличивалась. В варианте без известкования она составила $v = 0,018 \text{ мг л}^{-1} \text{ год}^{-1}$, в варианте с известкованием – $v = 0,023 \text{ мг л}^{-1} \text{ год}^{-1}$.

3. Разработаны линейные эмпирические модели, адекватно описывающие процессы миграции фтора из почвы в вариантах без известкования и с применением мелиоранта.

Список литературы

- Буре В.М. Методология статистического анализа опытных данных. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007. 141 с.
- Дричко В.Ф., Литвинович А.В., Павлова О.Ю. Накопление стронция и кальция растениями при внесении в почву возрастающих доз конверсионного мела // *Агрохимия*. 2002. № 4. С. 81–87.
- Дубровина И.В., Корнблум Э.А. Природа поглощения почвами фтора удобрений и мелиорантов // *Почвоведение*. 1984. С. 23–29.
- Илькун Г.М., Мотрук В.В. Накопление и передвижение фтористых соединений в почвах // *Растения и промышленная среда*. Киев: Наукова Думка, 1976. С. 87.
- Лаврищев А.В. Изучение поведения стабильного стронция в агроэкосистемах Северо-Запада России. Дисс. доктора с.-х. наук. СПб.: ФГБНУ АФИ, 2016. 272 с.
- Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В. О вымывании кальция и стронция из дерново-подзолистой супесчаной почвы, произвесткованной конверсионным мелом // *Агрохимия*. 1999. № 9. С. 64–67.
- Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В. О накоплении фтора различными сельскохозяйственными культурами при известковании дерново-подзолистой почвы конверсионным мелом // *Агрохимия*. 2001. № 2. С. 74–78.
- Литвинович А.В., Павлова О.Ю. Фтор в системе почва-растения при применении в сельском хозяйстве средств химизации и загрязнении объектов природной среды техногенными выбросами // *Агрохимия*. 2002. № 2. С. 66–76.
- Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Бирюков В.А. Разложение конверсионного мела в дерново-подзолистой почве в связи с угрозой её загрязнения стабильным стронцием // *Агрохимия*. 2001. № 11. С. 64–68.
- Пашова В.Т. Накопление фтора в почве и сельскохозяйственных растениях при длительном применении суперфосфата // *Интенсификация сельскохозяйственного производства и проблемы защиты окружающей среды*. М.: Наука, 1980. С. 84–91.
- Потагуева Ю.А., Косицкий Ю.И., Хлистовский А.Д. и др. Влияние длительного применения фосфорных удобрений на накопление в почве и растениях тяжёлых металлов и токсических веществ // *Агрохимия*. 1994. № 11. С. 98–114.
- Танделов Ю.П. Фтор в системе почва-растение. Красноярск, 2012. 146 с.
- Bower C. A., Hatcher // *T. Adsorption of fluoride by soils and minerals // Soil Sci.*, 1967, v. 103, no. 3, p. 151–154.
- Dickman S. R., Bray R. H. Replacement of adsorbed phosphate from kaolinite by fluoride // *Soil Sci*, 1941, v. 52, no. 4, p. 263–273.
- Dziubek Jadeusz Przemieszczanie z wiazkowfluoru w glebie // *Prace z zakresu nauk rolniczych*, 1976, M. XLI, pp. 81–89.
- Huang P. M., Jackson M. L. Mechanism of Reaction of Neutral Fluoride solution with Layer silicates and oxides of Soils // *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 1965, v. 29, no. 6, p. 661–665.
- Farrah H, Slavek J., Pickering W.F. Fluoride sorption by soil components: Calcium carbonate, humus acid manganese dioxide silica // *Austral. J. Soil Res.*, 1985, v. 23, no. 3, pp. 429–439.
- Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plant. Boca Raton-London-N.Y.: CRC Press Taylor & Francis Group, 2011. 4th ed. 505 p.
- Marion G. M., Henricks D. M., Dutt G. R., Fuller W. H. Aluminium and silica solubility in soils // *Soil Sci.*, 1976, v. 121, no. 2, p. 76–85.
- Omueti J. A. I., Jones K. L. Fluorine distribution with depth in relation to profile development in Illinois // *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 1980, v. 44, no. 2.
- Romo L. A., Roy R. Studies of the substitution of OH⁻ by F⁻ in various hydroxylic minerals // *Amer. Mineral.*, 1957, v. 42, p. 165–177.

References

- Bure V.M. *Metodologiya statisticheskogo analiza opytnykh dannykh* [Methodology of statistical analysis of experimental data]. Saint-Petersburg: Publishing house SPbGU, 2007. 141 p.
- Drichko V.F., Litvinovich A.V., Pavlova O.YU. *Nakoplenie stronciya i kal'ciya rasteniyami pri vnesenii v pochvu vozrastayushchih doz konversionnogo mela* [Accumulation of strontium and calcium by plants in the soil of increasing doses of the conversion of chalk] // *Agrohimiya*, 2002, no. 4, pp. 81–87.
- Dubrovina I.V., Kornblyum E.H.A. *Priroda pogloshcheniya pochvami ftora udobrenij i meliorantov* [Nature of soil absorption of fluorine fertilizers and meliorants] // *Pochvovedenie*, 1984, pp. 23–29.
- Il'kun G.M., Motruk V.V. *Nakoplenie i peredvizhenie ftoristykh soedinenij v pochvah* // *Rasteniya i promyshlennaya sreda* [Accumulation and movement of fluoride compounds in soils. Plants and industrial environment]. Kiev: Naukova Dumka, 1976. 87 p.
- Lavrishchev A.V. *Izuchenie povedeniya stabil'nogo stronciya v agroekosistemah Severo-Zapada Rossii* [Study of stable strontium behavior in agroecosystems of North-West Russia. Diss. Doct. agric. sci.]. Diss.dokt. s.-h. nauk. Saint-Petersburg, FGBNU AFI, 2016. 272 p.

- Litvinovich A.V., Pavlova O.YU., Lavrishchev A.V. O vymyvanii kal'ciya i stronciya iz dernovo-podzolistoi supeschanoi pochvy, proizvestkovannoi konversionnym melom [About the calcium and strontium leaching from sod-podzolic sandi loam soil produced by conversion chalk] // *Agrohimiya*, 1999, no. 9, pp. 64–67.
- Litvinovich A.V., Pavlova O.Yu., Lavrishchev A.V. O nakoplenii ftora razlichnymi sel'skohozyajstvennymi kul'turami pri izvestkovanii dernovo-podzolistoj pochvy konversionnym melom [On the accumulation of fluorine by various crops during liming of sod-podzolic soil with conversion chalk] // *Agrohimiya*, 2001, no. 2, pp. 74–78.
- Litvinovich A.V., Pavlova O.YU. Ftor v sisteme pochva-rasteniya pri primenenii v sel'skom hozyajstve sredstv himizacii i zagryaznenii ob"ektov prirodnoj sredy tekhnogennymi vybrosami [Fluorine in the soil-plant system in the application of agricultural chemicals and pollution of natural environment man-made emissions] // *Agrohimiya*, 2002, no. 2, pp. 66–76.
- Litvinovich A.V., Pavlova O.YU., Lavrishchev A.V., Biryukov V.A. Razlozhenie konversionnogo mela v dernovo-podzolistoj pochve v svyazi s ugrozoy eyo zagryazneniya stabil'nym stronciem [Decomposition of conversion chalk in sod-podzolic soil due to the threat of its contamination by stable strontium] // *Agrohimiya*, 2001, no. 11, pp. 64–68.
- Pashova V.T. Nakoplenie ftora v pochve i sel'skohozyajstvennyh rasteniyah pri dlitel'nom primenenii superfosfata. [Accumulation of fluorine in soil and agricultural plants with long-term use of superphosphate] // *Intensifikaciya sel'skohozyajstvennogo proizvodstva i problemy zashchity okruzhayushchej sredy*. [Intensification of agricultural production and environmental issues]. Moscow: Nauka, 1980, pp. 84–91.
- Potatueva YU.A., Kosickij YU.I., Hlistovskij A.D. Vliyanie dlitel'nogo primeneniya fosfornyh udobrenij na nakoplenie v pochve rasteniyah tyazhyolyh metallov i toksicheskikh veshchestv [The Influence of continuous application of phosphate fertilizer on accumulation in soil, plants heavy metals and toxic substances] // *Agrohimiya*, 1994 no. 11, pp. 98–114.
- Tandelov YU.P. *Ftor v sisteme pochva-rastenie* [Fluorine in the soil-plant system] Krasnoyarsk, 2012. 146 p.
- Bower C. A., Hatcher // T. Adsorption of fluoride by soils and minerals // *Soil Sci.*, 1967, v. 103, no. 3, p. 151–154.
- Dickman S. R., Bray R. H. Replacement of adsorbed phosphate from kaolinite by fluoride // *Soil Sci.*, 1941, v. 52, no. 4, p. 263–273.
- Dziubek Jadeusz Przemieszczanie z wiakowfluoru w glebie // *Prace z zakresu nauk rolniczych*, 1976, M. XLI, pp. 81–89.
- Huang P. M., Jackson M. L. Mechanism of Reaction of Neutral Fluoride solution with Layer silicates and oxides of Soils // *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 1965, v. 29, no. 6, p. 661–665.
- Farrar H, Slavek J., Pickering W.F. Fluoride sorption by soil components: Calcium carbonate, humus acid manganese dioxide silica // *Austral. J. Soil Res.*, 1985, v. 23, no.3, pp. 429–439.
- Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plant. Boca Raton-London-N.Y.: CRC Press Taylor & Francis Group, 2011. 4th ed. 505 p.
- Marion G. M., Henricks D. M., Dutt G. R., Fuller W. H. Aluminium and silica solubility in soils // *Soil Sci.*, 1976, v. 121, no. 2, p. 76–85.
- Omueti J. A. I., Jones K. L. Fluorine distribution with depth in relation to profile development in Illinois // *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 1980, v. 44, no. 2.
- Romo L. A., Roy R. Studies of the substitution of OH⁻ by F⁻ in various hydroxylic minerals // *Amer. Mineral.*, 1957, v. 42, p. 165–177.