

УДК 546.16:631.416.3:631.47(571.1)

## ИЗМЕНЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ФТОРА В ПОЧВАХ ЛЕСОСТЕПИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПРИ ИХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ

© 2020 г. В. Н. Якименко<sup>1,\*</sup>, Г.А. Конарбаева<sup>1</sup>, В.С. Бойко<sup>2</sup>, А.Ю. Тимохин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт почвоведения и агрохимии СО РАН  
630090 Новосибирск, просп. Лаврентьева, 8/2, Россия

<sup>2</sup> Омский аграрный научный центр  
644012 Омск, просп. Королева, 26, Россия

\*E-mail: yakimenko@issa-siberia.ru

Поступила в редакцию 07.10.2019 г.

После доработки 02.12.2019 г.

Принята к публикации 13.01.2020 г.

В стационарных полевых опытах в лесостепи Западной Сибири показано, что многолетнее экстенсивное сельскохозяйственное использование почв слабо отразилось на содержании в них валового фтора. Длительное внесение фторсодержащих фосфорных удобрений в дозах 60–90 кг/га/год привело к достоверному повышению в пахотном слое почв содержания валового (на 15–45% от исходного) и водорастворимого (на 1.0–1.5 мг/кг) фтора. Несмотря на многолетний положительный баланс фтора в агроценозах с систематическим использованием фосфорных удобрений, его концентрация в почвах и растительной продукции не превысила действующие нормативные показатели.

*Ключевые слова:* почва, агроценоз, удобрения, валовой и подвижный фтор, баланс фтора, лесостепь, Западная Сибирь.

DOI: 10.31857/S0002188120040122

### ВВЕДЕНИЕ

Сельскохозяйственное использование почвы может оказывать существенное влияние как на отдельные количественные и качественные почвенные характеристики, так и на экологическое состояние агроландшафта в целом. Особая роль в этом процессе принадлежит средствам химизации, научно обоснованное применение которых оптимизирует циклы биогенных макро- и микроэлементов в агроценозах, способствует сохранению и повышению плодородия почвы, усиливает адаптационный потенциал растений к неконтролируемым факторам внешней среды. Вместе с тем внесение минеральных удобрений оказывает разноплановое влияние на окружающую среду из-за содержащихся, зачастую токсичных примесей, физиологической кислотности и других нежелательных свойств. Характерной особенностью большинства минеральных удобрений является наличие в них сопутствующих балластных элементов, в т.ч. галогенов и тяжелых металлов. Например, достаточно широко применяемые в земледелии фосфорные удобрения в зависимости от исходного сырья и технологии производства мо-

гут содержать до 1–4% фтора [1, 2]. Следует отметить, что фтор является довольно важным микроэлементом для животных и человека, участвующим в различных физиологических процессах. Однако роль фтора в метаболизме растений однозначно не установлена [3], а повышенные его концентрации приводят к торможению роста и развития растений, снижению их продуктивности. В ряде работ показано, что при избыточном поступлении и накоплении фтора в окружающей среде он может оказывать негативное воздействие на свойства почвы, качество растительной продукции и здоровье людей [3–7].

Данные изучения влияния сельскохозяйственного использования почвы, вообще, и вносимых фосфорных удобрений, в частности, на почвенное содержание фтора довольно ограничены, особенно для условий Западной Сибири, и посвящены в основном действию фосфогипса при мелиорации солонцов [8, 9]. В этой связи выявление региональной специфики трансформации фонда фтора в почвах агроценозов имеет важное агрохимическое и экологическое значение.

Цель работы – в длительных стационарных полевых опытах в лесостепи Западной Сибири оценить изменения содержания фтора в почвах при их сельскохозяйственном использовании.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования послужили почвы лесостепной зоны Западной Сибири – лугово-черноземная (южная лесостепь) и серая лесная (северная лесостепь).

Полевой опыт на исходно целинной лугово-черноземной тяжелосуглинистой почве был заложен в 1978 г. на научно-исследовательском стационаре СибНИИСХоза (Омская обл., Омский р-н). На одном участке почвы в севообороте выращивали преимущественно многолетние и однолетние травы и травосмеси (далее – кормовой севооборот), параллельно на другом – зерновые культуры и травосмеси (зернотравяной севооборот). В опытах разрабатывали приемы повышения продуктивности выращиваемых культур при орошении [10]. В данном сообщении рассмотрены 2 наиболее контрастных варианта опытов – без удобрений и с внесением NP; в связи с очень высоким содержанием калия в исследованной почве (обменного – 60 мг/100 г) калийные удобрения не применяли. Побочная продукция зерновых и зернобобовых культур – солома, при уборке ее разбрасывали по полю, данные продуктивности конкретных культур по годам опыта опубликованы ранее [10].

Полевой опыт на исходно целинной серой лесной среднесуглинистой почве был заложен в 1988 г. на научно-исследовательском стационаре ИПА СО РАН (Новосибирская обл., Искитимский р-н). Выращивали овощные культуры в севообороте до 2000 г., затем картофель в бессменной посадке. В опытах изучали влияние интенсивности калийного баланса на эколого-агрохимическое состояние агроценозов [11, 12]. В настоящем сообщении рассмотрены наиболее контрастные варианты данного опыта: без удобрений, NP и NPK. В опытах учитывали и убирали с делянок как основную, так и побочную продукцию выращенных культур. Полученная в опыте в различные годы продуктивность основной и побочной продукции конкретных культур приведена в работах [11, 12]. Для суммирования продуктивности различных выращенных культур, полученной за годы проведения опытов, она выражена в кормовых единицах (к.е.).

Удобрения вносили в форме  $N_{aa}$ ,  $P_{cd}$  и  $K_x$ , ежегодно, с учетом потребности конкретной выращиваемой культуры. Закладку и проведение опы-

тов осуществляли по общепринятой методике, повторность в опытах четырехкратная. Агрохимические анализы почвы проводили общепринятыми, стандартными методами [13, 14]: гумус определяли по Тюрину, рН-потенциометрическим методом, подвижный фосфор – по Чирикову, обменные катионы (Ca, Mg, K) – в вытяжке 1 М раствора  $CH_3COONH_4$ . Валовой фтор в почвенных образцах определяли спектрофотометрическим методом с анализарин-комплексом без предварительной отгонки [15], водорастворимый фтор – методом потенциометрии.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оптимизация минерального питания растений в опытах посредством рационального систематического применения удобрений способствовала значительному росту продуктивности выращиваемых культур (табл. 1), относительно увеличивающемуся по мере возрастания продолжительности сельскохозяйственного использования почв. Например, на лугово-черноземной почве, исходно достаточно высоко плодородной, средняя продуктивность культур за время проведения опытов в контрольных вариантах (без удобрений) кормового и зернотравяного севооборотов составила 34–37 ц к.е./га, тогда как при внесении оптимальных доз NP-удобрений – 53–55 ц.

Эффективное плодородие серой лесной почвы было заметно меньше по сравнению с лугово-черноземной. Однако одностороннее внесение NP-удобрений в серую лесную почву было малоэффективным (среднегодовая продуктивность в контроле и NP-варианте равна соответственно 65 и 76 ц/га), очевидно, в связи с лимитированным калийным питанием растений. Сбалансированное внесение минеральных удобрений в варианте NPK способствовало существенному росту продуктивности овощных культур и картофеля (среднегодовая – 114 ц к.е./га). Результаты проведенных нами длительных полевых опытов подтверждают безальтернативность научно обоснованного применения минеральных удобрений в агроценозах для оптимизации как продуктивности культур, так и агрохимических свойств почвы.

Длительное сельскохозяйственное использование почвы, как интенсивное, так и экстенсивное, неизбежно отражается в той или иной степени на почвенных физико-химических свойствах, что может повлиять на процессы трансформации фонда содержащихся в ней макро- и микроэлементов, в т.ч. и фтора. Различная интенсивность использования минеральных удобрений в вариантах проведенных опытов, специфика отдель-

**Таблица 1.** Общая продуктивность культур и поступление макроэлементов с минеральными удобрениями в длительных полевых опытах в лесостепи Западной Сибири

Вариант	Суммарная продуктивность, ц к.е./га	Внесено с удобрениями, кг д.в./га		
		азот	фосфор	калий
Лугово-черноземная почва				
Кормовой севооборот (1978–2019 гг.)				
Без удобрений	1580	–	–	–
NP	2150	2740	3290	–
Зернотравяной севооборот (1978–2019 гг.)				
Без удобрений	1390	–	–	–
NP	2130	3140	2800	–
Серая лесная почва				
Овощные культуры и картофель (1988–2019 гг.)				
Без удобрений	1990	–	–	–
NP	2320	3820	2180	–
NPК	3470	3820	2180	6060

**Таблица 2.** Изменение некоторых агрохимических свойств исследованных почв в длительных полевых опытах (слой 0–20 см)

Вариант	Гумус, %	рН <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	Подвижный фосфор	Обменные катионы		
				Ca	Mg	K
			мг/100 г почвы			
Лугово-черноземная почва (1978–2019 гг.)						
Целина	6.5	6.8	13	644	58	60
Без удобрений	6.2	7.1	12	598	56	33
NP	6.6	7.0	25	630	53	32
HCP <sub>05</sub>	0.3	0.2	4	68	5	5
Серая лесная почва (1988–2019 гг.)						
Целина	4.9	7.3	18	405	15	12
Без удобрений	3.0	7.1	10	367	13	7
NP	3.1	6.7	55	336	10	7
NPК	3.4	6.8	48	301	8	19
HCP <sub>05</sub>	0.3	0.3	5	28	3	3

ных культур и технологии их выращивания соответствующим образом обуславливали изменения эффективного плодородия исследованных почв (табл. 2).

Содержание гумуса в лугово-черноземной почве в результате многолетнего возделывания изменилось мало, что связано, вероятно, со значительной долей орошаемых трав в структуре посевов и, соответственно, поступлением в почву большого количества корневых и пожнивных остатков. Минерализация в верхнем почвенном

слое растительной биомассы способствовала сохранению содержания катионов кальция и магния на уровне целинной почвы [10]. Величина рН исследованной почвы за время проведения опыта несколько возросла – на 0.2–0.3 ед. В наибольшей степени изменения свойств почвы коснулись фонда зольных элементов – фосфора и калия: содержание подвижного фосфора в вариантах с его внесением увеличилось в 2 раза по сравнению с исходной почвой, а содержание обменного калия при перманентном дефиците его баланса аналогично снизилось.

В вариантах опыта на серой лесной почве содержание гумуса резко снизилось по сравнению с целиной, что, вероятно, обусловлено перманентной минерализацией почвенного органического вещества при небольшом поступлении растительного материала. При этом в варианте NPK содержание гумуса было больше, чем в контроле и в NP-варианте, что связано, очевидно, с более высокой продуктивностью (табл. 1) при оптимизированном питании культур и соответствующем поступлении в почву растительных остатков.

Реакция среды почвы контрольного варианта за время проведения опыта мало изменилась относительно целины, а в вариантах с внесением азотных удобрений заметно снизилась. Дополнительное использование калийных удобрений не отразилось на кислотности почвы по сравнению с внесением NP-удобрений. Содержание подвижного фосфора в почве контрольного варианта значительно снизилось по сравнению с целиной, а в результате систематического длительного применения фосфорных удобрений – существенно возросло. Аналогичная ситуация отмечена с калийным состоянием почвы при внесении или не внесении калия (табл. 2).

Сельскохозяйственное использование почвы и систематическое внесение минеральных удобрений отразилось на почвенном содержании обменных катионов. Оптимизация калийного состояния почвы и сопутствующий ей рост продуктивности растений привели к заметному уменьшению уровня обменного кальция и особенно магния. Следует отметить, что все изменения указанных почвенных агрохимических свойств во всех вариантах опытов произошли, главным образом, в слое 0–20 см почв.

Кроме того, в проведенных ранее исследованиях [16] установлено некоторое утяжеление гранулометрического состава пахотного слоя почв опытов в условиях агроценоза, за счет интенсификации процессов дробления мелкопесчаной фракции.

Выявленные в длительных опытах изменения почвенных свойств способны повлиять на трансформацию соединений фтора, поведение которого во многом определяется содержанием глинистых минералов, величиной рН, концентрацией щелочнотомельных элементов и фосфора [3, 4, 7, 8].

Фтор является наиболее химически активным элементом в ряду галогенов, образующим множество различных соединений. Большинство из них плохо растворимы, что является фактором, лимитирующим миграцию фтора в профиле почвы; интенсивность его водной миграции значительно

меньше, чем других галогенов. Например, коэффициент водной миграции фтора составляет 1.6, тогда как других галогенов, для сравнения: хлора – 644, брома – 203, йода – 99 [17]. Валовое содержание фтора в почвах лесостепи Западной Сибири в среднем составляет 338 мг/кг, при варьировании от 120 до 480 мг/кг [18] и тесно зависит от гранулометрического и минералогического состава почв. Связи между содержанием в почвах фтора и гумуса не установлено [8], что связано со слабой способностью органического вещества почвы сорбировать фтор и малочисленностью возможных реакций между ними в почвенных условиях.

Содержание валового фтора в верхнем слое 0–20 см исследованных целинных почв было прямо пропорционально их гранулометрическому составу, составляя 220–230 мг/кг серой лесной почвы и 340–350 мг/кг лугово-черноземной (табл. 3). Данные величины вполне укладываются в характерный для региона интервал показателей, свидетельствуя о типичности фонда фтора в изученных почвах. Ниже по профилю, в слое 20–40 см содержание фтора в обеих почвах несколько возросло, вероятно, в связи с соответствующим утяжелением гранулометрического состава.

Длительное экстенсивное сельскохозяйственное использование почв слабо отразилось на содержании валового фтора. В лугово-черноземной почве отмечена слабая тенденция к его снижению, что связано, возможно, с выносом урожаем и воздействием орошения. В контрольном варианте опыта в серой лесной почве содержание фтора не изменилось. Резкое уменьшение содержания гумуса в данной почве по сравнению с целиной не повлияло на общий фонд фтора, свидетельствуя о его инертности к почвенному органическому веществу.

Многолетнее систематическое внесение фосфорных удобрений заметно отразилось на уровне содержания фтора в почве агроценозов (табл. 3). В вариантах NP опытов на лугово-черноземной почве содержание валового фтора в пахотном слое возросло на 34–43 мг/кг или на 10–13% по сравнению с контрольными вариантами. В серой лесной почве содержание валового фтора повысилось еще существеннее – в вариантах NP и NPK на 93–110 мг/кг или на 42–49% относительно контроля. Ниже по профилю количество валового фтора в различных вариантах опыта в соответствующих почвах практически не различалось.

В проведенных ранее исследованиях внесение фторсодержащих удобрений и мелиорантов в пахотный слой почвы, как правило, не приводило к увеличению его содержания в нижележащих сло-

ях почвенного профиля по сравнению с контрольным вариантом [9, 19]. В опытах [8] по мелиорации солонцов фосфогипсом валовое содержание фтора в почве при внесении различных доз мелиоранта возросло лишь в слое 0–10 см. Очевидно, что основная фиксация поступающего в почву фтора (илистой фракцией, полуторными оксидами и др.) происходит непосредственно в зоне внесения. Такая ситуация обусловлена высокой химической активностью фтора, который при поступлении в почву быстро и прочно связывается ее компонентами. В этой связи следует отметить слабую растворимость флюорита ( $\text{CaF}_2$ ), селлаита ( $\text{MgF}_2$ ), а также фторидов алюминия и железа [3, 4, 7, 8].

Таким образом, существенное накопление валового фтора в исследованных суглинистых почвах происходило только в результате многолетнего использования фосфорных удобрений; относительно тяжелый гранулометрический состав данных почв способствовал указанному процессу. Длительное выращивание различных культур, в том числе и при орошении, определенные изменения в почвах содержания гумуса, обменных катионов, реакции среды слабо отразились на почвенном содержании валового фтора.

В связи с отсутствием установленной по ГО-СТу предельно допустимой концентрации (ПДК) на фтор, зачастую ориентируются на литературные данные, в соответствии с которыми допустимым уровнем содержания валового фтора в почве принято считать до 500 мг F/кг, критическим – от 500 до 1000, недопустимым – >1000 мг/кг [20]. Согласно этим данным, валовое содержание фтора в почвах наших опытов с длительным внесением фосфорных удобрений следует оценить как соответствующее допустимому уровню.

Содержание валового фтора в почве дает представление о его общих запасах, однако поведение этого элемента в системе почва–растение–животное–человек определяется концентрацией подвижной формы элемента, т.е. количеством фторид-анионов, не связанных прочно с компонентами почвы и способных к миграции.

Наиболее мобильной фракцией подвижного пула фтора является его водорастворимая часть. В почвах земледельческой зоны Сибири, по данным ряда авторов [8, 17, 21, 22], содержание водорастворимого фтора значительно варьирует – от 0.8–1.0 до 6.2–7.2 мг/кг и более, с максимумом в интразональных почвах, возрастая по мере их засоленности.

В исследованных нами целинных почвах содержание водорастворимой фракции фтора было

**Таблица 3.** Изменение содержания валового и водорастворимого фтора в почвах при их длительном сельскохозяйственном использовании

Вариант	Слой почвы, см	Содержание фтора, мг/кг почвы	
		валовой	водорастворимый
Лугово-черноземная почва			
Целина (исходное)	0–20	345	5.6
	20–40	374	5.0
Кормовой севооборот (1978–2019 гг.)			
Без удобрений	0–20	339	5.0
	20–40	353	5.8
NP	0–20	373	5.9
	20–40	371	6.5
Зернотравяной севооборот (1978–2019 гг.)			
Без удобрений	0–20	332	4.9
	20–40	376	5.8
NP	0–20	375	6.0
	20–40	373	6.5
<i>HCP</i> <sub>05</sub>		27	0.5
Серая лесная почва			
Целина (исходное)	0–20	222	3.1
	20–40	238	2.1
Овощные культуры и картофель (1988–2019 гг.)			
Без удобрений	0–20	223	3.2
	20–40	235	2.1
NP	0–20	316	3.8
	20–40	240	2.8
NPK	0–20	333	4.6
	20–40	250	4.0
<i>HCP</i> <sub>05</sub>		33	0.2

максимальным в верхнем слое 0–20 см почв и составляло 3.1–5.6 мг/кг, пропорционально их валовым запасам; вниз по профилю почв концентрация водорастворимого фтора равномерно снижалась.

Известно, что фторид-анионы могут активно фиксироваться глинистыми минералами по механизмам сорбции и обмена, образовывать труднорастворимые соединения со щелочноземельными металлами. Исследованные почвы имеют небольшое утяжеление гранулометрического состава к нижней части профиля и подстилаются лессовидными карбонатными суглинками. Очевидно, что при этом количество трехслойных глинистых минералов вниз по профилю увеличивается, равно как и нарастает активность кальциевого

геохимического барьера. Данное обстоятельство и обуславливает снижение содержания водорастворимого фтора вниз по профилю исследованных целинных почв.

В верхнем слое 0–20 см лугово-черноземной почвы содержание водорастворимого фтора в контрольных вариантах заметно снизилось по сравнению с целиной, а при длительном внесении удобрений оставалось на уровне целины, несмотря на значительное дополнительное поступление элемента в агроценозы. Это могло быть связано как с определенным поглощением фтора выращиваемыми культурами, так и, вероятно, главным образом, с его миграцией в подпахотный слой 20–40 см почвы в результате действия многолетнего орошения. Содержание водорастворимого фтора в этом почвенном горизонте во всех вариантах опыта существенно возросло – на 0.8–1.5 мг/кг относительно исходного состояния. Кроме этого, неизменный относительно целины уровень содержания щелочноземельных катионов в пахотном слое почвы агроценозов, при некотором ее подщелачивании (табл. 2), не способствовал повышению подвижности фтора и увеличению содержания водорастворимой формы.

Длительное экстенсивное использование серой лесной почвы не отразилось на содержании в ней водорастворимого фтора; его количество в слое 0–40 см почвы контрольного варианта осталось на уровне целины (табл. 3). Многолетнее внесение минеральных удобрений, в т.ч. фосфорных, сопровождавшееся снижением в почве концентрации щелочноземельных катионов и некоторым ее подкислением, заметно интенсифицировало процессы повышения подвижности фтора; содержание его водорастворимой формы возросло не только в пахотном, но и в подпахотном горизонте.

На поведении фтора в исследованной почве могло отразиться изменение содержания подвижного фосфора. Анионы фосфатов и фторидов являются конкурентами в почвенных процессах их обменной адсорбции коллоидами с положительным зарядом, а также химического связывания с образованием нерастворимых в воде солей Ca, Mg, Al, Fe. Поэтому с ростом концентрации подвижного фосфора в почвах, вероятно, можно ожидать увеличения степени подвижности ионов фтора.

Особенно существенное повышение содержания водорастворимого фтора произошло в верхней части профиля почвы варианта НРК. Учитывая, что дозы внесенных фосфорных удобрений во всех удобренных вариантах были равны, а

сформировавшиеся уровни содержания подвижного фосфора в почве примерно одинаковыми, причиной заметного увеличения концентрации фторид-анионов в почве варианта НРК служат, на наш взгляд, следующие обстоятельства.

Во-первых, содержание обменного кальция и магния в верхней части профиля почвы варианта НРК было заметно меньше, чем в варианте НР (табл. 2), что связано с интенсивным выносом из почвы этих элементов культурами при оптимизированном питании. Снижение содержания щелочноземельных металлов в почвенном растворе способствовало, вероятно, некоторому относительно повышению подвижности фторид-ионов.

Во-вторых, почва вариантов НР и НРК значительно различались между собой по содержанию обменного калия (табл. 2). Принимая во внимание некоторое снижение содержания щелочноземельных обменных катионов в почве варианта НРК (по сравнению с НР), можно полагать, что доля калия в составе обменных катионов почвы заметно возросла. В то же время известно, что фториды щелочных металлов (K, Na), в отличие от щелочноземельных (Ca, Mg), достаточно хорошо растворимы в воде и в определенной степени способны к миграции. Очевидно, что в почве с повышенным уровнем калия интенсивность образования его соединений с фтором возрастала (по сравнению с почвой с истощенным калийным фондом), соответственно, увеличивалось и содержание подвижных фторид-анионов.

В целом, проведенные исследования показали, что произошедшие относительные изменения фонда подвижного фтора в серой лесной среднесуглинистой почве выглядят значительно рельефнее по сравнению с тяжелосуглинистой лугово-черноземной (табл. 3), несмотря на то, что количество внесенных фторсодержащих фосфорных удобрений в агроценозах на лугово-черноземной почве было больше (табл. 1). Это обстоятельство подтвердило влияние гранулометрического состава почвы на подвижность содержащихся в ней химических элементов – чем тяжелее гранулометрический состав, тем меньше их подвижность. Однако помимо гранулометрического состава почвы, на содержание и распределение водорастворимого фтора, в отличие от валового, заметное влияние оказали не только внесенные фосфорные удобрения, но и изменившиеся агрохимические почвенные свойства, а также используемые агротехнологии.

Концентрация водорастворимого фтора в почвах оценивается согласно следующим критериям: ПДК равна 10 мг/кг, допустимым уровнем счита-

**Таблица 4.** Среднегодовой хозяйственный баланс фтора в опыте на серой лесной почве (2009–2019 гг.)

Вариант опыта	Содержание фтора в картофеле, мг/кг		Вынос фтора картофелем, г/га		Поступление с удобрениями, г/га	Баланс, г/га/год
	клубни	ботва	клубни	ботва		
Без удобрений	2.2	4.2	5.6	3.2	–	– 8.8
NP	3.0	4.9	9.2	5.6	598.5	+583.7
NPК	2.2	4.2	14.3	6.3	598.5	+577.9

ется <10, критическим – 10–30, недопустимым – >30, фон – 1.5 мг/кг [23, 24]. Длительное внесение фосфорных удобрений в наших опытах не привело к повышению концентрации водорастворимого фтора в почвах агроценозов до токсичного уровня. Содержание элемента в почве удобрённых вариантов, хотя и заметно возросло по сравнению с контрольными (табл. 3), тем не менее, было значительно меньше его ПДК.

На содержание в почве агроценоза того или иного элемента, в т.ч. и фтора, определяющее влияние оказывает его складывающийся баланс, т.е. соотношение приходной и расходной статей. Хозяйственный баланс фтора в агроценозах рассмотрим на примере опыта на серой лесной почве при выращивании картофеля в 2009–2019 гг. (табл. 4).

В использованном в опытах двойном суперфосфате содержалось 0.45% валового фтора. При внесении этого удобрения в дозе P60 в почву ежегодно поступало 599 г фтора/га.

Содержание фтора в картофеле при внесении NP-удобрений резко увеличивалось по сравнению с контрольным вариантом; дополнительное применение калийных удобрений на этом фоне приводило к заметному снижению содержания фтора в растительной продукции (табл. 4). Обращает на себя внимание тот факт, что содержание фтора в основной продукции картофеля (клубнях) было примерно в 2 раза ниже, чем в нетоварной части урожая (ботве). Это демонстрирует эффективность защитных реакций растительного организма, препятствующих накоплению поллютантов в репродуктивных и запасующих органах. Анализируя характер поступления фтора в растения при внесении минеральных удобрений можно полагать, что во взаимодействии фтора и калия существует определенный антагонизм, а фтора и фосфора – синергизм; следовательно, поступление этого галогена в растения агроценозов будет снижаться при использовании сбалансированных доз минеральных удобрений.

Максимально допустимый уровень (МДУ) содержания фтора в кормовых корне- и клубнепло-

дах в нашей стране составляет 20 мг/кг, в ряде зарубежных стран эти требования строже – ПДК для фтора установлен на уровне 2,3 мг/кг; по отечественным нормативам ПДК фтора в овощах и фруктах не должны превышать 2,5 мг/кг [9]. Результаты наших опытов показывают, что длительное внесение относительно высоких, но сбалансированных доз минеральных удобрений не привело к загрязнению фтором товарной части урожая картофеля.

Баланс фтора в различных вариантах опыта складывался неодинаково (табл. 4). В контрольном варианте закономерно формировался перманентно дефицитный баланс фтора, однако его небольшой вынос слабо повлиял на почвенные запасы этого элемента (табл. 3). Вынос фтора растительной продукцией в варианте NPК был наибольшим в связи со значительно более высокой продуктивностью картофеля. Небольшие по абсолютным величинам (г/га) статьи баланса фтора – поступление и вынос – различались между собой в 30–40 раз. Соответственно, баланс фтора в агроценозах с внесением фосфорных удобрений складывался с большим профицитом. Защитные механизмы растений препятствовали поступлению избыточного количества фтора в биомассу и, соответственно, повышенному выносу этого элемента, поэтому фтор, поступающий в агроценоз с фосфорными удобрениями, обуславливал увеличение его почвенного фонда (табл. 3). Фтор, внесенный с удобрениями в подвижной форме, по-видимому, достаточно быстро фиксировался компонентами почвы в прочно-связанное состояние, что существенным образом снижало его способность к миграции, а также и ограничивало доступность растениям.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование, проведенное в стационарных полевых опытах в лесостепи Западной Сибири, показало, что длительное экстенсивное сельскохозяйственное использование почв слабо отразилось на почвенном содержании валового фтора; выращивание различных культур – трав, зерно-

вых, пропашных, в т.ч. при орошении, произошедшие определенные изменения агрохимических почвенных свойств – содержания гумуса, обменных катионов, фосфора, не повлияли значительно на общий фонд фтора. Существенному увеличению содержания валового фтора в верхнем слое 0–20 см почв (до 45% от исходного уровня) способствовало многолетнее применение фторсодержащих фосфорных удобрений; ниже по профилю его содержание практически не изменилось.

На уровень содержания водорастворимого фтора в почвах существенное влияние оказало длительное применение фосфорных удобрений и произошедшее изменение некоторых почвенных характеристик (содержания обменных катионов, фосфора), а также отдельные агротехнические приемы (орошение). На орошаемых участках отмечали достоверную миграцию подвижного фтора в подпахотный почвенный слой. Относительные изменения фонда подвижного фтора в почве более легкого гранулометрического состава были рельефнее по сравнению с почвой тяжелого гранулометрического состава.

При внесении NP-удобрений под картофель в почву с низкой обеспеченностью доступным калием содержание фтора в растительной продукции достоверно увеличивалось, тогда как использование сбалансированных доз NPK существенно снижало концентрацию фтора в растениях, до показателей, не превышающих установленные нормативы.

Многолетнее внесение рациональных доз фосфорных удобрений (в среднем P60–90 в год) не привело к накоплению в почвах агроценозов валового и водорастворимого фтора больше уровня нормативных показателей, несмотря на перманентный профицитный баланс этого элемента. Тем не менее, систематический контроль за экологической ситуацией в интенсивных агроценозах является целесообразным.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов Д.С., Садовникова Л.К., Лозановская И.Н. Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении. М.: Высш. шк., 2002. 334 с.
2. Шейджен А.Х. Биогеохимия. Майкоп: Адыгея, 2003. 1028 с.
3. Шелепова О.В., Потатужева Ю.А. Агроэкологическое значение фтора // Агрохимия. 2003. № 9. С. 78–87.
4. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
5. Белякова Т.М. Фтор в почвах и растениях в связи с эндемическим флюорозом // Почвоведение. 1977. № 8. С. 53–63.
6. Кремленкова Н.П. Геохимическая оценка опасности фторидного загрязнения почв Восточной Европы // Почвоведение. 1996. № 8. С. 1135–1141.
7. Фрид А.С., Борисочкина Т.И. Фтор: миграционная подвижность в почвах при техногенном загрязнении // Агрохимия. 2019. № 3. С. 65–71.
8. Конарбаева Г.А. Галогены в почвах юга Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 200 с.
9. Танделов Ю.П. Фтор в системе почва–растение. М.: РАСХН, 2004. 106 с.
10. Бойко В.С. Полевое кормопроизводство на орошаемых черноземах в лесостепи Западной Сибири. Омск: Изд-во ИП Макшеевой Е.А., 2019. 312 с.
11. Якименко В.Н. Калий в агроценозах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. 231 с.
12. Якименко В.Н. Баланс калия, продуктивность культур и калийное состояние почвы в длительном полевом опыте в лесостепи Западной Сибири // Агрохимия. 2019. № 10. С. 16–24.
13. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
14. Практикум по агрохимии / Под ред. Минеева В.Г. М.: Изд-во МГУ, 1989. 304 с.
15. Миллер А.Д., Капитонова Т.А. Метод определения фтора с ализаринкомплексом в горных породах и минералах без предварительной отгонки // Методы анализа редкометалльных минералов, руд и горных пород. М., 1971. Вып. 2. С. 80–89.
16. Якименко В.Н. Изменение форм калия в гранулометрических фракциях некоторых автоморфных почв в агроценозе // Агрохимия. 2001. № 6. С. 11–16.
17. Перельман А.И. Геохимия. М.: Высш. шк., 1989. 528 с.
18. Ермолов Ю.В. Фтор в компонентах природных ландшафтов Обь-Иртышского междуречья: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Новосибирск: ИПА СО РАН, 2002. 17 с.
19. Минеев В.Г., Грачева М.К., Ефремов В.Ф. Фтор в почвах и корнеплодах кормовой свеклы // Химия в сел. хоз-ве. 1987. № 2. С. 45–47.
20. Гапонюк Э.И., Кузнецова М.В. Влияние фтористого натрия на свойства почвы и развитие некоторых сельскохозяйственных культур // Гигиена и санитария. 1984. № 6. С. 77–79.
21. Волошин Е.И. Содержание и распределение водорастворимого фтора в почвах Средней Сибири // Агрохимия. 2003. № 2. С. 65–73.
22. Сараев В.Г. Техногенное рассеяние фтора в почвах КАТЭКа // Географ. и природн. ресурсы. 1986. № 4. С. 142–146.
23. Санитарные нормы допустимых концентраций токсичных веществ. СанПиН 42–126–4433–87 // Методы определения загрязняющих веществ в почве. М., 1988. 72 с.
24. Дмитриев И.Т., Казнина Н.М., Пинигина М.А. Санитарно-химический анализ загрязняющих веществ в окружающей среде. М.: Химия, 1989. 368 с.



## Change of Fluorine Content in Soils of the Forest-Steppe of Western Siberia at Their Agricultural Use

V. N. Yakimenko<sup>a,#</sup>, G. A. Konarbaeva<sup>a</sup>, V. S. Boyko<sup>b</sup>, and A. Yu. Timokhin<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Division, RAS  
prosp. Lavrentyeva 8/2, Novosibirsk 630090, Russia*

<sup>b</sup> *Omsk Agricultural Research Center  
prosp. Koroleva 26, Omsk 644012, Russia*

<sup>#</sup> *E-mail: yakimenko@issa-siberia.ru*

In stationary field experiments in the forest-steppe of Western Siberia, it was shown that long-term extensive agricultural use of soils had little effect on the content of gross fluorine in them. Long-term application of fluorine-containing phosphorus fertilizers in doses of 60–90 kg/ha/year led to a significant increase in the level of gross (15–45% of the initial) and water-soluble (1–1.5 mg/kg) fluoride in the arable layer of soils. Despite the long-term positive balance of fluorine in agrocenoses with the systematic use of phosphorus fertilizers, its concentration in soils and plant products did not exceed the current regulatory indicators.

*Key words:* soil, agrocenosis, fertilizers, gross and mobile fluorine, fluorine balance, forest-steppe, Western Siberia.