

УДК 631.445.25:632.122.1:546.16(571.53)

## ДЕГРАДАЦИЯ АГРОСЕРОЙ ПОЧВЫ БАЙКАЛЬСКОГО РЕГИОНА, ЗАГРЯЗНЕННОЙ ФТОРИДАМИ АЛЮМИНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА<sup>1</sup>

© 2019 г. Л. В. Помазкина<sup>1,\*</sup>, Н. Н. Кириллова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН  
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, 132, Россия

\*E-mail: lvp@sifibr.irk.ru

Поступила в редакцию 03.07.2018 г.

После доработки 18.10.2018 г.

Принята к публикации 12.01.2019 г.

В микрополевым опыте исследовали отдаленные последствия усиления техногенного загрязнения агросерых почв Байкальского региона фторидами, преобладающими в аэровыбросах алюминиевого производства, моделируя в почве разное содержание водорастворимых фторидов (10, 12, 16, 26 и 31 ПДК) внесением фторида натрия. Зависящее от уровня загрязнения негативное действие фторидов проявлялось в изменении физических свойств почв, снижении буферности к фторидам ( $B_{NaF}$ ), изменении состава гумусовых веществ и увеличении содержания углерода во фракции ила ( $C_{<1}$ ). Изменение показателей использовали для формирования оценочной шкалы техногенной деградации почв. Связанные с накоплением фторидов признаки деградации отмечали в загрязненной 16 ПДК почве, которые достигали максимума при загрязнении, равном 26 и 31 ПДК.

*Ключевые слова:* деградация почвы, агросерая почва, Байкальский регион, загрязнение почвы фторидами, алюминиевое производство

DOI: 10.1134/S0002188119040094

### ВВЕДЕНИЕ

Разработка экологических нормативов для рационального использования почв в земледелии необходима для оценки негативных воздействий современных факторов среды, включая техногенное загрязнение. Решение проблемы находится на “стадии становления” [1]. К числу зависящих от природных и антропогенных факторов неблагоприятных изменений относят деградацию почв, негативно влияющую на плодородие и состояние агроэкосистем [2, 3]. В последние десятилетия среди антропогенных факторов особое внимание уделяют аэротехногенному загрязнению пахотных почв. На территории Сибири опасным источником загрязнения среды считается интенсивное развитие алюминиевого производства, которое способствует формированию геосистем с фторидно-алюмо-натриевым классом водной миграции ( $F^- - Al^{3+} - Na^+$ ), относящихся к зоне экологического риска [4, 5]. Длительные (1996–2016 гг.) мониторинговые исследования на постоянных реперных участках в импактной зоне Ир-

кутского алюминиевого завода (ИрКАЗ РУСАЛ) выявили не только повышение содержания фторидов в пахотных почвах, но и увеличение площади загрязнения со временем [6, 7]. Известно, что содержание фторидов негативно влияет на физико-химические свойства почв, снижает плодородие, продуктивность и качество полевых культур [6]. Решение проблем безопасного земледелия в условиях непрекращающегося техногенного загрязнения среды фторидами алюминиевого производства, преобладающими в аэровыбросах (до 50%), обусловлено как их содержанием в почве в настоящее время, так и их накоплением со временем. Оценка уровня загрязнения фторидами пахотных почв и прогноз отдаленных негативных последствий на состояние агроэкосистем в разных природно-климатических условиях практически отсутствует.

Цель работы – в микрополевым опыте путем моделирования разных уровней загрязнения водорастворимыми фторидами (по кратности к ПДК) агросерой почвы лесостепи Байкальского региона исследовать негативное воздействие фтора на ее физико-химические свойства и выявить признаки ее деградации.

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты №№ 12-04-31770-мол\_а и 14-45-04040-р\_сибирь\_а.

**Таблица 1.** Содержание и степень подвижности фторидов в почве

Вариант	Содержание фтора			СП*, %
	валовый	водорастворимый	Число единиц ПДК	
	мг/кг			
Фон	1090	102	10	9.4
Фон + NaF <sub>300</sub>	1290	118	12	9.2
Фон + NaF <sub>600</sub>	1600	160	16	10.0
Фон + NaF <sub>900</sub>	2070	257	26	12.4
Фон + NaF <sub>1200</sub>	2200	311	31	14.1
<i>HCP</i> <sub>05</sub>	33	8		

\*СП – степень подвижности фторидов.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в лесостепи Байкальского региона в микрополевым опыте на агросерой почве, моделируя разные уровни загрязнения водорастворимыми фторидами (ПДК). Опыт был заложен на стационаре СИФИБР СО РАН на вывезенной из зоны аэровыбросов ИркаЗа загрязненной фторидами пахотной почве. Отсутствие загрязнения на стационаре характеризует содержание в почве водорастворимых фторидов (4–5 мг/кг), соответствующее региональному фону [6]. Осенью 2009 г. после удаления почвы на экспериментальном участке в каркасах, ограничивающих площадь делянки (0.25 м<sup>2</sup>), формировали слой (40 см) загрязненной фторидами (10 ПДК) почвы, которая в опыте служила фоном. Варианты с разным уровнем загрязнения фторидами формировали внесением в слой почвы (0–25 см) химически чистой соли NaF, которую тщательно перемешивали перед помещением в каркасы. Схема опыта: 1 – фон, 2 – фон + NaF<sub>300</sub>, 3 – фон + NaF<sub>600</sub>, 4 – фон + NaF<sub>900</sub>, 5 – фон + NaF<sub>1200</sub>. Повторность четырехкратная. Отбор проб для анализа в вариантах опыта проводили из пахотного слоя почвы в конце вегетации 2010 г.

Содержание в почвах валового ( $F_{\text{вал}}$ ) фтора и водорастворимых ( $F_{\text{вод}}$ ) фторидов определяли спектрофотометрическим методом [8]. Уровень загрязнения почв оценивали по содержанию водорастворимых фторидов, в соответствии с предельно допустимой концентрацией (ПДК = 10 мг/кг) [9]. Показатель степени подвижности фторидов рассчитывали как соотношение водорастворимых фторидов к валовому содержанию ( $СП = F_{\text{вод}} : F_{\text{вал}}$ , %) [10]. Физические и химические свойства почв

исследовали общепринятыми методами [11, 12]. Буферность почв (Б) к NaF определяли по формуле [6]:

$$B_{\text{NaF}} = [C \times (C_{\text{ГК}} : C_{\text{ФК}}) \times \text{ЕКО}] : \text{Na}_{\text{обм}} \times \text{СП},$$

где С – общее содержание углерода, %;  $C_{\text{ГК}} : C_{\text{ФК}}$  – глубина гумификации; ЕКО – емкость катионного обмена, смоль(экв)/100 г;  $\text{Na}_{\text{обм}}$  – содержание натрия в обменной форме, смоль(экв)/100 г; СП – степень подвижности фторидов, %.

Групповой и фракционный состав гумуса определяли методом Тюрина в модификации Пономаревой–Плотниковой [11]. Содержание углерода в отдельных гранулометрических фракциях определяли на элементном анализаторе “NCHS” (“vario MICRO cube”). Зависящие от увеличения концентрации фторидов в почве показатели системы гумусовых веществ определяли по содержанию углерода в группах и фракциях гумусовых кислот [13]. Новообразование гумусовых кислот оценивали по величине соотношения  $C_{\text{ГК-1}} : C_{\text{ФК-1}}$ , процесса полимеризации – по показателю  $C_{\text{ГК-2}} : C_{\text{ФК-2}}$  [14, 15]. Зависящие от увеличения количества водорастворимых фторидов (ПДК) признаки деградации почв анализировали с учетом негативных изменений показателей физических свойств, буферности к фторидам ( $B_{\text{NaF}}$ ), состояния гумуса и содержания углерода во фракциях ЭПЧ.

Статистическая обработка результатов эксперимента проведена с использованием пакета программ Excel 2007 for Windows. В таблицах приведены средние арифметические величины показателей и *HCP*<sub>05</sub> (согласно *t*-критерию Стьюдента).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Техногенное загрязнение агросерых почв фторидами, которые относят к первому классу высокоопасных химических соединений [9], представляет проблему для состояния окружающей среды. В фоновом варианте опыта содержание валового фтора составляло 1090 мг/кг, водорастворимых фторидов – 102 мг/кг, что соответствовало 10 ПДК (табл. 1). Внесение в почву разных доз NaF повышало содержание водорастворимых фторидов (12, 16, 26 и 31 ПДК). Показатели степени подвижности фторидов (СП, %) соответствовали уровню загрязнения.

Негативное воздействие фторидов на химические свойства почв проявлялось в изменении почвенного поглощающего комплекса (табл. 2). В составе обменных оснований содержание кальция и магния снижалось, а натрия повышалось, что приводило к осолонцеванию, особенно в загрязненных 26 и 31 ПДК почвах. В отличие от фо-

нового варианта загрязненная 16 ПДК почва соответствовала градации слабосолонцеватая, а загрязненные 26 и 31 ПДК почвы были солонцеватыми (соответственно 14 и 17% от ЕКО). Слабощелочная реакция почвенного раствора в загрязненных 16, 26 и 31 ПДК почвах менялась на среднешелочную. Буферность почв к фториду натрия ( $B_{NaF}$ ) снижалась, особенно в загрязненных 26 и 31 ПДК почвах.

Влияние увеличения содержания фторидов на физические свойства почв показано в табл. 3. Зависящее от величины ПДК изменение макроагрегатного состава почв проявлялось в снижении количества агрономически ценных структур (10–0.25 мм) при повышении содержания глыбистой фракции. В загрязненных 26 и 31 ПДК почвах коэффициент структурности ( $K_{стр}$ ) резко снижался, а агрегатное состояние менялось на неудовлетворительное. Прочность микроструктуры в этих почвах соответствовала уровню неудовлетворительная, степень агрегированности ( $A_r$ ) снижалась, а коэффициент дисперсности ( $K_d$ ) повышался. В загрязненных 16 ПДК и выше почвах водопрочность агрегатов ( $A_{ФИ}$ ) увеличивалась, причем изменения, связанные со слабым проникновением воды за счет плотности упаковки, не влияли на агрономическую ценность почв. Обесструктурирование почв с повышением содержания фторидов способствовало уплотнению и снижению пористости, что негативно влияло на влажность и воздухосодержание. Например, в загрязненной 31 ПДК почве плотность сложения достигала 1.39, против 1.15 г/см<sup>3</sup> в фоновом варианте, а общая пористость была неудовлетворительной (49 против 58%).

Исследованные почвы, независимо от содержания фторидов, были среднесуглинистыми (табл. 4). В загрязненных 26 и 31 ПДК почвах отличия во фракционном составе были связаны с увеличением фракции ила (<1 мкм) до 18.7%, но снижением фракции песка (>50 мкм) до 19.5%. Однако относительное содержание углерода повышалось только во фракции ила – 27% (табл. 5). Изменения в вариантах опыта фракции пыли были менее значительными. Зависящее от загрязнения распределение углерода во фракциях соответствовало их долевым участию в формировании общего баланса углерода.

Известно, что состояние системы гумусовых веществ почв определяет гранулометрический состав. Роль отдельных фракций ЭПЧ в трансформации углерода используют для оценки направленности процессов гумификации и состояния гумуса почв в изменяющихся экологических

**Таблица 2.** Влияние фторидов на химические свойства почв

Загрязнение почв, ед. ПДК	$pH_{H_2O}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	ЕКО	$B_{NaF}^*$
		смоль(экв)/100 г				
10 (фон)	7.6	25.9	4.0	0.2	33	43.9
12	7.9	25.4	4.0	1.0	34	7.8
16	8.1	24.6	3.5	2.3	34	2.7
26	8.2	23.1	3.5	4.8	34	1.0
31	8.3	23.0	3.9	5.8	34	0.7
$HCP_{05}$	0.1	0.6	0.4	0.1	0.4	2.1

\*  $B_{NaF}$  – буферность почв к NaF.

**Таблица 3.** Влияние фторидов на агрегатное состояние почв

Загрязнение почв, ед. ПДК	Содержание агрегатов, %			$K_{стр}$	$A_r$	$K_d$	АФИ
	>10	10–0.25	<0.25				
	мм						
10 (фон)	27.2	68.5	4.3	2.19	37	31	10.2
12	23.2	72.2	4.7	2.60	29	32	9.0
16	38.8	58.5	2.8	1.43	20	38	14.1
26	58.3	40.1	1.7	0.68	7	58	40.1
31	71.1	28.2	0.8	0.40	6	52	84.5
$HCP_{05}$	5.6	5.2	0.7	0.29	1.5	2.2	1.0

Примечание.  $K_{стр}$  – коэффициент структурности,  $A_r$  – степень агрегированности,  $K_d$  – коэффициент дисперсности, АФИ – водопрочность агрегатов.

**Таблица 4.** Влияние фторидов на гранулометрический состав почв

Загрязнение почв, ед. ПДК	Физическая глина, %	Содержание фракций ЭПЧ, %				
		<1	1–5	5–10	10–50	>50
		мкм				
10 (фон)	35.6	17.3	10.9	7.4	43.9	20.5
12	36.2	17.7	11.4	7.1	42.8	21.0
16	36.3	17.3	12.2	6.8	42.9	20.8
26	38.2	18.7	12.1	7.4	42.3	19.5
31	36.9	18.3	11.4	7.2	43.6	19.5
$HCP_{05}$		0.3	0.4	0.3	0.8	0.5

условиях [14–17]. Изменения группового и фракционного состава гумуса почв приведены в табл. 6. Содержание углерода в группах высококонденсированных устойчивых гуминовых кислот (**ГК**) и менее устойчивых фульвокислот (**ФК**) зависели

**Таблица 5.** Влияние фторидов на содержание углерода в ЭПЧ, % от  $C_{\text{общ}}$ 

Загрязнение почв, ед. ПДК	Фракции ЭПЧ, мкм				
	<1	1–5	5–10	10–50	>50
10 (фон)	24	14	9	39	13
12	24	15	8	34	18
16	25	16	8	37	13
26	27	15	9	38	12
31	27	15	9	38	12

от уровня загрязнения фторидами. Несмотря на незначительные отличия в содержании общего углерода, достоверное повышение углерода в группе ГК и негидролизуемом остатке (*НО*) отметили только в загрязненных 26 и 31 ПДК почвах. Однако в 31 ПДК почве во фракциях ГК-1 и ГК-2 изменения были больше, чем в фоновом варианте (соответственно на 63 и 42%), а во фракции ГК-3 содержание углерода снижалось на 17%. Во фракциях ФК-1, ФК-2 и ФК-3 его содержание было меньше (соответственно 42, 35 и 20%).

Зависящая от фторидов активность трансформации гумусовых веществ была наиболее высокой в загрязненных 26 и 31 ПДК почвах. Если в группе ГК относительное содержание углерода повышалось только в стабильных фракциях ГК-1

и ГК-2, то в группе ФК изменения отмечены во всех фракциях, а наибольшее увеличение углерода было только в подвижной фракции ФК-1а (на 77%). Негативное воздействие загрязнения проявлялось и в снижении содержания углерода негидролизуемого остатка, особенно в загрязненной 31 ПДК почве.

Согласно градациям [13], во всех почвах содержание гумуса соответствовало уровню низкое. Показатель степени гумификации ( $C_{\text{ГК}} : C_{\text{общ}}$ , %) с увеличением концентрации фторидов менялся незначительно. Характеризующий тип гумуса показатель  $C_{\text{ГК}} : C_{\text{ФК}}$  в загрязненных 16, 26 и 31 ПДК почвах соответствовал фульватно-гуматному (табл. 7). Влияние повышения содержания фторидов на интенсивность новообразования гумусовых веществ ( $C_{\text{ГК-1}} : C_{\text{ФК-1}}$ ), как 1-й стадии гумификации, было слабо выражено. В то же время значительное снижение показателя  $C_{\text{ГК-2}} : C_{\text{ФК-2}}$  указывало на ингибирование полимеризации гумусовых структур, что способствовало снижению воздействия неблагоприятных факторов. Например, в загрязненной 31 ПДК почве снижение достигало 33% в отличие от фона. Подобные изменения отмечали и для прочно связанных с минеральной основой ГК [14, 15].

Анализ свойств почв по изменению физических и химических показателей (отклонение от-

**Таблица 6.** Влияние фторидов на групповой и фракционный состав гумуса почв

Загрязнение почв, ед. ПДК	$C_{\text{общ}}$ , %	ГК				ФК					<i>НО</i> *
		1	2	3	сумма	1а	1	2	3	сумма	
10 (фон)	1.36	1.9	27.3	8.0	37.2	3.5	1.8	9.2	5.7	20.2	42.6
12	1.34	2.0	27.3	7.8	37.1	5.2	2.4	11.3	4.9	23.8	39.1
16	1.34	2.7	28.0	6.9	37.6	6.2	2.2	12.8	6.2	27.4	35.0
26	1.35	3.1	28.2	6.6	37.9	6.9	2.7	13.7	7.2	30.5	32.6
31	1.30	3.1	28.9	6.6	38.6	6.2	3.1	14.1	7.4	30.8	30.6
НСР <sub>05</sub>	0.07				0.64					1.7	0.71

\**НО* – негидролизуемый остаток.

**Таблица 7.** Влияние фторидов на гумусное состояние почв

Загрязнение почв, ед. ПДК	$C_{\text{общ}}$ , %	$\frac{C_{\text{ГК}}}{C_{\text{общ}}}$ , %	$\frac{C_{\text{ГК}}}{C_{\text{ФК}}}$	$\frac{C_{\text{ГК-1}}}{C_{\text{ФК-1}}}$	$\frac{C_{\text{ГК-2}}}{C_{\text{ФК-2}}}$	$\frac{C_{\text{ГК-3}}}{C_{\text{ФК-3}}}$	$P_{\text{лаб}}$ *
10 (фон)	1.36	37	1.84	1.0	3.0	1.4	0.20
12	1.34	37	1.56	0.8	2.4	1.6	0.25
16	1.34	38	1.37	1.2	2.2	1.1	0.27
26	1.35	38	1.24	1.1	2.1	0.9	0.28
31	1.30	39	1.25	1.0	2.0	0.9	0.29

\* $P_{\text{лаб}}$  – показатель лабильности.

**Таблица 8.** Показатели деградации загрязненных фторидами почв

Показатель	Загрязнение почв, ед. ПДК				
	10 (фон)	12	16	26	31
Содержание агрономически ценной фракции агрегатов, %	100	105	85	59	41
Буферность почв к NaF	100	18	6	2	2
Углерод фракции ила ( $C_{<1}$ ), % от $C_{\text{общ}}$	100	100	104	113	113
Углерод ФК-1а, % от $C_{\text{общ}}$	100	163	177	197	177

носителю фонового варианта, принятого за 100%) позволило выявить признаки деградации, зависящие от уровня загрязнения фторидами. Результаты экспериментальной оценки изменения показателей содержания агрономически ценных структур, буферности почв к NaF, а также углерода во фракциях ФК-1а и ила ( $C_{<1}$ ) приведены в табл. 8. Относительно фонового варианта (10 ПДК) негативные изменения этих показателей характеризовали деградацию почв, информативные признаки которой отмечены в загрязненной 16 ПДК почве, а максимум достигали при загрязнении 26 и 31 ПДК [18].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные экологические нормативы, касающиеся рационального земледелия в условиях изменяющейся среды, включая техногенное загрязнение почв, крайне востребованы. На территории Сибири особый интерес представляет загрязнение пахотных почв фторидами, содержание которых со временем увеличивается, вследствие длительных и непрекращающихся аэровыбросов алюминиевого производства. Однако негативное воздействие усиливающегося загрязнения фторидами на свойства почв недостаточно исследовано, как и устойчивость их к деградации.

Многолетние исследования на агросерой почве, выполненные путем моделирования разных уровней загрязнения водорастворимыми фторидами (10 – фон, 12, 16, 26 и 31 ПДК), позволили оценить их негативные воздействия на физические и химические свойства. Впервые выявлено, что увеличение загрязнения фтором ухудшает агрофизическое состояние почв, которое проявляется как в снижении агрегированности и повышении дисперсности, так и в изменении гранулометрического состава. Негативные изменения

химических свойств почв связаны с осолонцеванием и повышением щелочности, особенно в почвах, загрязненных 26 и 31 ПДК. Экспериментально были выявлены признаки техногенной деградации гумуса – снижение глубины гумификации и ослабление процесса полимеризации. На фоне менее существенных изменений показателей  $C_{\text{общ}}$ , как и углерода в группе ГК, было показано значительное увеличение содержания углерода в группе ФК и в ее отдельных фракциях. Усиление фульватной направленности процессов гумификации в результате изменения свойств почв, особенно увеличение илистой фракции, отличавшейся фульватым составом гумусовых веществ, рассматривали как показатели деградации качественного состава гумуса, которая была наиболее выражена в загрязненных 26 и 31 ПДК почвах.

Изменения зависящих от уровня загрязнения фторидами показателей: содержание агрономически ценной фракции, буферность к NaF, содержание углерода во фракции ила ( $C_{<1}$ ), а также в ФК-1а, как наиболее информативных, были использованы для оценки деградации агросерой почвы. Экспериментально выявленные признаки деградации меньше проявлялись в загрязненной 16 ПДК почве, а в загрязненных 26 и 31 ПДК еще усиливались.

Выполненные исследования впервые показали деградацию почв, связанную с повышением загрязнения фторидами. В то же время результаты позволяют прогнозировать ухудшение возможности использования загрязненных почв в земледелии. Следовательно, длительное техногенное загрязнение агросерых почв аэровыбросами алюминиевого производства чревато неблагоприятными экологическими последствиями.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миркин Б.М., Хазиев Ф.Х., Суюндуков Я.Т., Хазиахметов Р.М. Управление плодородием почв: агроэкологический подход // Почвоведение. 2002. № 2. С. 228–234.
2. Гогмочадзе Г.Д. Деградация почв: причины, следствия, пути снижения и ликвидации. М.: Изд-во МГУ, 2011. 272 с.
3. Проблемы деградации и восстановления продуктивности земель сельскохозяйственного назначения в России / Под ред. Гордеева А.В., Романенко Г.А. М.: Росинформагротех, 2008. 67 с.
4. Нечаева Е.Г., Белозерцева И.А., Напрасникова Е.В., Воробьева И.Б., Давыдова Н.Д., Дубынина С.С., Власова Н.В. Мониторинг и прогнозирование вещество-динамического состояния геосистем сибирских регионов. Новосибирск: Наука, 2010. 315 с.
5. Давыдова Н.Д., Знаменская Т.И. Загрязнение степных геосистем Южно-Минусинской котловины

- фторидами при производстве алюминия // Географ. и природ. ресурсы. 2016. № 1. С. 55–61.
6. *Помазкина Л.В., Котова Л.Г., Лубнина Е.В., Зорина С.Ю., Лаврентьева А.С.* Устойчивость агроэкосистем к техногенному загрязнению фторидами. Иркутск: ИГ СО РАН, 2004. 225 с.
  7. Государственный доклад “О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2013 году”. Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2014. 389 с.
  8. *Дмитриев М.Т., Казнина Н.И., Пинигина И.А.* Санитарно-химический анализ загрязняющих веществ в окружающей среде. Справ. изд-е. М: Химия, 1989. 368 с.
  9. Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2041-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве.
  10. *Кремленкова Н.П.* Накопление и перераспределение техногенного фтора в почвах южной части Черноземной зоны // Почвоведение. 1993. № 9. С. 87–93.
  11. Теория и практика химического анализа почв / Под ред. Воробьевой Л.А. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
  12. Теории и методы физики почв. Коллективная монография / Под ред. Шеина Е.В., Карпачевского Л.О. М.: “Гриф и К”, 2007. 616 с.
  13. *Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Розанова М.С.* Дополнительные показатели гумусного состояния почв и их генетических горизонтов // Почвоведение. 2004. № 8. С. 918–926.
  14. *Овчинникова М.Ф.* Признаки и механизм агрогенной трансформации гумусовых веществ дерново-подзолистой почвы // Агрохимия. 2012. № 1. С. 3–13.
  15. *Овчинникова М.Ф.* Признаки природной устойчивости и агрогенной трансформации гумуса почв // Почвоведение. 2013. № 12. С. 1449–1463.
  16. *Травникова Л.С.* Закономерности гумусонакопления: новые данные и их интерпретация // Почвоведение. 2002. № 7. С. 832–843.
  17. *Семенов В.М., Когут Б.М.* Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
  18. *Кириллова Н.Н., Помазкина Л.В.* Влияние уровня загрязнения фторидами алюминиевого производства на деградацию серых лесных почв Байкальского региона // Изв. ВУЗов. Прикл. химия и биотехнол. 2014. № 5(10). С. 82–87.

## Degradation of Agrogrey Soils, Contaminated with Fluorides from Aluminum Production in the Baikal Region

L. V. Pomazkina<sup>a,\*</sup> and N. N. Kirillova<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, SB RAS  
ul. Lermontova 132, Irkutsk 664033, Russia*

<sup>\*</sup>*E-mail: lvp@sifibr.irk.ru*

In the micro-field experiment, the long-term effects of increased technogenic pollution of agro-grey soils of the Baikal region by fluorides prevailing in the air emissions of aluminum production were studied, modeling in the soil the different content of water-soluble fluorides (10, 12, 16, 26 and 31 maximum permitted concentration – MPC) by the introduction of sodium fluoride. Depending on the level of pollution, the negative effect of fluorides was manifested in changes in the physical properties of soils, a decrease in buffering to fluorides ( $B_{NaF}$ ), a change in the composition of humus substances and an increase in the carbon content in the silt fraction ( $C_{<1}$ ). The change of indicators was used to form an estimated scale of technogenic soil degradation. Associated with the accumulation of fluorides signs of degradation were observed in contaminated soil MPC 16, which peaked when pollution equal to 26 and 31 MPC.

*Key words:* soil degradation, agricultural grey soil, Baikal region, soil contamination by fluorides, aluminum production.