

ДЕГРАДАЦИЯ АГРОСЕРОЙ ПОЧВЫ БАЙКАЛЬСКОГО РЕГИОНА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ФТОРИДАМИ АЛЮМИНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Н. Н. Кириллова, Л. В. Помазкина

ФГБУН Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 132 (а/я 317)

E-mail: kirillova.n.n@yandex.ru; lvp@sifibr.irk.ru

Поступила в редакцию 21 марта 2018 г., принята к печати 26 ноября 2018 г

Представлены результаты микрополевого опыта по изучению отдаленных последствий техногенного загрязнения агросерой почвы Байкальского региона в зависимости от накопления в ней со временем водорастворимых фторидов. Моделирование загрязнения осуществлялось путем внесения в почву разных доз фторида натрия как преобладающего соединения в аэровыбросах алюминиевого производства. Выявлены существенные изменения свойств почв в зависимости от повышения содержания водорастворимых фторидов (10, 12, 16, 26 и 31 ПДК). Экспериментально доказано, что повышение уровня загрязнения фторидами оказывает влияние на агрофизическое состояние почв, которое выражается как в снижении агрегированности и повышении дисперсности, так и в изменении гранулометрического состава. Негативные изменения химических показателей почв связаны с осолонцеванием и повышением щелочности, особенно в почвах, загрязненных на уровне 26 и 31 ПДК. Впервые было выявлено воздействие техногенного загрязнения на деградацию гумуса, признаки которой проявились в снижении глубины гумификации и ослаблении процесса полимеризации. Усиление фульватной направленности процессов гумификации, особенно увеличение илистой фракции с фульватным составом гумусовых веществ, рассматривалось как деградация качественного состава гумуса, которая была наиболее выражена в почвах, загрязненных на уровне 26 и 31 ПДК. Изменения показателей, характеризующих физические и химические свойства почв, включая состояние гумуса, использовались для разработки шкалы, характеризующей признаки деградации при увеличении загрязнения почвы фторидами. Согласно шкале показателей, почва, загрязненная на уровне 16 ПДК, характеризовалась сильной степенью деградации, а почвы, загрязненные на уровне 26 и 31 ПДК, – очень сильной.

Ключевые слова: уровни загрязнения почв фторидами, изменение свойств почв, оценка деградации.

DEGRADATION OF THE BAIKAL REGION AGRICULTURAL GRAY SOILS AS A RESULT OF CONTAMINATION BY FLUORIDES OF ALUMINUM PRODUCTION

N. N. Kirillova, L. V. Pomazkina

Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, SB RAS
132, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia

E-mail: kirillova.n.n@yandex.ru; lvp@sifibr.irk.ru

The paper presents the results of the small field experiment on the long-term effects of technogenic contamination of the Baikal region soils as a result of accumulation of water-soluble fluorides over time. Contamination modeling has been carried out by introducing into the soil different rates of sodium fluoride as the predominant compound in the air emission of aluminum production. Significant changes in soil properties, depending on the increase in the content of water-soluble fluorides (10, 12, 16, 26 and 31 MPC) were revealed. It has been proved experimentally that an increase in fluoride pollution has an effect on the agrophysical state of the soil, which is expressed in a decrease in aggregation, an increase in dispersion, and in a change in the particle-size composition. Negative changes in chemical indicators of the soils are associated with solonetzization and increased alkalinity, especially in soils contaminated at the level 26 and 31 MPC. For the first time, the impact of technogenic contamination on the humus degradation was revealed. The signs of this degradation appeared in a decrease in the depth of humification and a weakening of the polymerization process. Strengthening the fulvate direction of humification processes, especially an increase in the silt fraction with the fulvate composition of humic substances, was considered as a degradation of the qualitative composition of humus, which was most pronounced in soils contaminated at the level 26 and 31 MPC. Changes in the indicators characterizing the physical and chemical properties of the soil, including the state of humus, were used to develop a scale characterizing signs of degradation with increasing soil contamination with fluorides. According to the scale of indicators, the degree of degradation of the soil contaminated at the level 16 MPC corresponded to intense degradation, and the soils contaminated at the level 26 and 31 MPC – to very intense.

Key words: levels of soil contamination with fluorides, change in soil properties, assessment of degradation.

ВВЕДЕНИЕ

Современные изменения свойств пахотных почв и их деградация обусловлены совокупностью природных и антропогенных процессов, оказывающих влияние на их свойства и функционирование агроэкосистем (Гордеев, Романенко, 2008; Гогмачадзе, 2011; Ковалев, 2015). В последние десятилетия существенно возросла усиливающая деградацию почв антропогенная нагрузка, в том числе техногенное загрязнение. Однако в настоящее время ее влияние недостаточно изучено. В частности, негативные последствия изменения состояния агросерых почв лесостепи Байкальского региона связаны с интенсивным развитием алюминиевого производства, в аэровыбросах которого преобладают фториды натрия (до 50%). Результаты длительных (1996-2016 гг.) мониторинговых исследований на постоянных реперных участках, расположенных в импактной зоне Иркутского алюминиевого завода (ИрАЗ РУСАЛ), свидетельствуют не только об интенсивном загрязнении пахотных почв фторидами, но и о постепенном увеличении площади загрязненных почв (Помазкина, Кириллова, 2014; Помазкина, Воронин, 2016). Установлено, что негативное влияние загрязнения фторидами зависит как от их накопления в почве, так и от его воздействия на изменение физико-химических свойств, а также снижение плодородия и качества полевых культур (Кремленкова, 1993; Шелепова, Потатугева, 2003; Помазкина, 2011; Кириллова, Помазкина, 2014; Давыдова, Знаменская, 2016). Однако отдаленные последствия продолжающегося загрязнения почв фторидами и степень их деградации недостаточно изучены, особенно с учетом почвенно-климатических условий конкретного региона.

Цель работы заключалась в том, чтобы в микрополевым опыте посредством моделирования разных уровней загрязнения почв водорастворимыми фторидами исследовать его негативное влияние на физико-химические свойства и деградацию агросерой почвы лесостепи Байкальского региона.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования являлась агросерая почва. Микрополевым опытом по моделированию разных уровней загрязнения агросерой почвы водорастворимыми фторидами был заложен на загрязненной фторидами пахотной почве, образцы которой были вывезены из зоны аэровыбросов (ИрАЗ РУСАЛ) на стационар СИФИБР СО РАН. Агросерая почва стационара не была загрязнена, о чем свидетельствуют показатели содержания водорастворимых фторидов ($4-5 \text{ мг кг}^{-1}$), соответствующие региональному фону (Помазкина и др., 2004). В сентябре 2009 г. после удаления почвы на экспериментальном участке в каркасах, ограничивающих площадь делянок ($0,25 \text{ м}^2$), был сформирован слой ($0-40 \text{ см}$) техногенно загрязненной фторидами почвы, которая в опыте служила фоном (10 ПДК). Варианты с разным уровнем загрязнения фторидами были смоделированы путем внесения в слой почвы $0-25 \text{ см}$ химически чистой соли NaF (из расчета мг F на кг почвы) с тщательным

перемешиванием перед помещением в каркасы. Схема опыта следующая: 1 – Фон; 2 – Фон + NaF_{300} ; 3 – Фон + NaF_{600} ; 4 – Фон + NaF_{900} ; 5 – Фон + NaF_{1200} . Опыт проводился в трехкратной повторности. Отбор почвенных проб из пахотного слоя ($0-20 \text{ см}$) осуществлялся через год (сентябрь 2010 г.) при помощи шагового бура с формированием образцов из пяти точек.

Содержание валового ($F_{\text{вал}}$) и водорастворимых ($F_{\text{вод}}$) фторидов определялось спектрофотометрическим методом (Дмитриев и др., 1989). Уровень загрязнения почв оценивался по содержанию водорастворимых фторидов, предельно допустимая концентрация (ПДК) для которых составляет 10 мг кг^{-1} (ГН 2.1.7.2041-06). Степень подвижности фторидов рассчитывалась по отношению водорастворимых фторидов к их валовому содержанию: $\text{СП} = F_{\text{вод}}/F_{\text{вал}}$, % (Кремленкова, 1993).

Физические и химические свойства почв были исследованы общепринятыми методами (Воробьева, 2006; Шеин, Карпачевский, 2007). Гранулометрический и микроагрегатный составы почвы определялись методом пипетки Качинского-Робинсона-Кехля, макроагрегатный состав – методом сухого просеивания по Н. И. Саввинову, плотность сложения почвы – буровым методом. Общая пористость, запас влаги и воздухосодержание почвы рассчитывались по соответствующим формулам. Содержание обменных Ca^{2+} и Mg^{2+} в почве определялось комплексометрическим методом, емкость катионного обмена – методом Бобко и Аскинази в модификации П. П. Грабарова и З. А. Уваровой (вариант Алешина), pH водной суспензии – потенциометрическим методом, общее содержание углерода – методом Тюрина, групповой и фракционный состав гумуса – по схеме И. В. Тюрина в модификации В. В. Пономаревой и Т. А. Плотниковой. Показатель буферности почв по отношению к NaF (Помазкина и др., 2004) рассчитывался по формуле:

$$B_{\text{NaF}} = [C \times (\text{Сгк:Сфк}) \times \text{ЕКО}] / \text{Na}_{\text{обм}} \times \text{СП},$$

где C – общее содержание углерода, %; Сгк:Сфк – глубина гумификации; ЕКО – емкость катионного обмена, $\text{смоль(экв)} 100 \text{ г}^{-1}$; $\text{Na}_{\text{обм}}$ – содержание натрия в обменной форме, $\text{смоль(экв)} 100 \text{ г}^{-1}$; СП – степень подвижности фторидов, %.

Статистическая обработка данных эксперимента проводилась с использованием пакета программ Excel 2007 for Windows. Достоверность различий между вариантами опыта оценивалась с помощью t -критерия Стьюдента. В таблицах приведены средние арифметические показатели (НСР_{05}).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Техногенное загрязнение почв фторидами, которые относятся к первому классу высокоопасных химических соединений (ГН 2.1.7.2041-06), представляет собой серьезную проблему для окружающей среды. В фоновом варианте опыта содержание валового фтора составляло 1085 мг кг^{-1} , водорастворимых фторидов – 102 мг кг^{-1} , что

соответствовало 10 ПДК (табл. 1). Дополнительное внесение NaF в разных дозах привело к повышению содержания фторидов в почве, уровень загрязнения достиг 12, 16, 26 и 31 ПДК соответственно. Повышение степени подвижности фторидов (СП) соответствовало уровню загрязнения почв.

Высокое содержание водорастворимых фторидов оказало негативное влияние на свойства агросерой почвы. Ее гранулометрический состав не изменялся вне зависимости от уровня загрязнения (средний суглинок) (табл. 2). Вместе с тем, если в почвах, загрязненных на уровне 10, 12 и 16 ПДК, преобладали фракции крупной пыли и мелкого песка, то в почвах, загрязненных на уровне 26 и 31 ПДК, отмечалось повышенное содержание ила. Повышение уровня загрязнения фторидами привело к изменению макроагрегатного состава почвы, что обусловлено снижением агрономически ценных структур (10–0,25 мм) и увеличением глыбистой фракции (>10 мм), особенно в почве, загрязненной на уровне 31 ПДК (28,2 и 71,1% соответственно). Коэффициент структурности ($K_{стр}$) снизился (0,68 и 0,40 в почвах, загрязненных на уровне 26 и 31 ПДК, по сравнению с 2,19 в фоновом варианте). Агрегатное состояние и структурность почв в зависимости от содержания фторидов изменились от отличного до неудовлетворительного (Шеин, Карпачевский, 2007).

Таблица 1. Содержание и степень подвижности фторидов в модельном опыте

Вариант	Содержание фтора			СП, %
	валовый	водорастворимый		
	мг кг ⁻¹	мг кг ⁻¹	ПДК	
Фон (загрязненная ИркаЗом)	1085	102	10	9,4
Фон + NaF ₃₀₀	1289	118	12	9,2
Фон + NaF ₆₀₀	1602	160	16	10,0
Фон + NaF ₉₀₀	2067	257	26	12,4
Фон + NaF ₁₂₀₀	2204	311	31	14,1
НСР ₀₅	33	8	—	—

Таблица 2. Влияние загрязнения фторидами на агрегатное состояние почв

Загрязнение почв, ПДК	Содержание физической глины, %	Содержание фракций, %			K _{стр}	A _г	K _д	АФИ
		>10	10–0,25	<0,25				
		мм						
10 (фон)	35,6	27,2	68,5	4,3	2,19	37	31	10,2
12	36,2	23,2	72,2	4,7	2,60	29	32	9,0
16	36,3	38,8	58,5	2,8	1,43	20	38	14,1
26	38,2	58,3	40,1	1,7	0,68	7	58	40,1
31	36,9	71,1	28,2	0,8	0,40	6	52	84,5
НСР ₀₅	0,8	5,6	5,2	0,7	0,29	1,5	2,2	1,0

Воздействие водорастворимых фторидов на химические свойства почв проявилось в изменении состава почвенного поглощающего комплекса. В составе обменных оснований снизилась доля кальция и магния и повысилась доля натрия, что способствовало осолонцеванию почв, загрязненных на уровне 26 и 31 ПДК (табл. 3). Так, в отличие от фона, почва, загрязненная на уровне 16 ПДК, стала слабосолонцеватой, а почвы, загрязненные на уровне 26 и 31 ПДК, – солонцеватыми (14 и 17% от ЕКО). Почвы, загрязненные на уровне 10 и 12 ПДК, характеризовались слабощелочной реакцией почвенного раствора, а почвы, загрязненные на уровне 16 ПДК и выше, – среднещелочной. Буферность почв по отношению к фториду натрия

В почвах, загрязненных фторидами на уровне 26 и 31 ПДК, прочность микроструктуры стала неудовлетворительной, о чем свидетельствует снижение степени агрегированности (A_r) (однако было отмечено повышение коэффициента дисперсности (K_d)). В почвах, загрязненных на уровне 16 ПДК и выше, водопрочность агрегатов (АФИ) повысилась, однако их агрономическая ценность не изменилась, поскольку высокая водопрочность агрегатов была обусловлена слабым проникновением воды за счет их плотной упаковки. Обесструктурирование почв с повышенным содержанием фторидов сопровождалось уплотнением пахотного слоя и снижением пористости, что оказало влияние на влажность и снижение воздухоудерживания. Если в почве, загрязненной на уровне 10 ПДК, плотность сложения составляла 1,15, а в почвах, загрязненных на уровне 12 и 16 ПДК, – 1,20, то почва, загрязненная на уровне 31 ПДК, характеризовалась показателем 1,39 г см⁻³ (НСР₀₅ = 0,04). Общая пористость почв, загрязненных на уровне 26 и 31 ПДК, стала неудовлетворительной – 53% и 49% соответственно по сравнению с 58% в фоновом варианте; запас влаги достигал 52 и 53 соответственно по сравнению с 44 мм в фоновом варианте.

(B_{NaF}), по показателям которой проводится интегральная оценка изменений химических свойств, с повышением загрязнения резко снижалась, особенно в почвах, загрязненных на уровне 26 и 31 ПДК. Негативные изменения зависели в основном от повышения степени подвижности фторидов и содержания обменного натрия в почвах.

Исследуемые почвы характеризовались низким содержанием гумуса вне зависимости от уровня загрязнения (табл. 4). Однако была отмечена тенденция к повышению степени гумификации, а тип гумуса в почвах, загрязненных фторидами на уровне 16 ПДК и выше, изменился с гуматного на фульватно-гуматный за счет увеличения доли ФК. Доля прочно связанных с минеральной основой ГК снизилась.

Оценка интенсивности процесса гумификации позволила установить, что содержание фторидов в почвах не оказало влияния на стадию новообразования гумусовых структур (С_{гк1}/С_{фк1}). Качественные изменения в составе гумуса, вероятно, были обусловлены снижением степени полимеризации гумусовых структур (С_{гк2}/С_{фк2}). Повышение доступности гумусовых веществ для минерализации также подтверждает показатель относительной лабильности (П_{лаб}) (Бакина и др., 2004), который в почвах, загрязненных на уровне 26 и 31 ПДК, был выше по сравнению с фоном (так же, как и содержание подвижной фракции ФК-1а). Выявленные изменения в составе гумусовых веществ свидетельствуют об их деградации, особенно в почвах, загрязненных на уровне 26 и 31 ПДК.

Для разработки оценочной шкалы, характеризующей степень деградации агросерой почвы (табл. 5) в зависимости от содержания водорастворимых фторидов, использовались динамические изменения показателей физических свойств почвы (Бондарев, Кузнецова, 1999).

Таблица 3. Влияние загрязнения фторидами на химические свойства почв

Загрязнение почв, ПДК	рН _{вод}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	ЕКО	Б _{NaF}
		смоль(экв) 100 г ⁻¹				
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
НСР ₀₅	0,1	0,6	0,4	0,1	0,4	2,1

Таблица 4. Влияние загрязнения фторидами на гумусное состояние почв

Показатель	Загрязнение почв, ПДК				
	10	12	16	26	31
Содержание С _{общ} , %*	1,36	1,34	1,34	1,35	1,30
Степень гумификации (С _{гк} /С _{общ}), %*	37	37	38	38	39
Тип гумуса (С _{гк} /С _{фк})*	1,84	1,56	1,37	1,24	1,25
С _{гк1} /С _{фк1} **	1,0	0,8	1,2	1,1	1,0
С _{гк2} /С _{фк2} **	3,0	2,4	2,2	2,1	2,0
Доля ГК, прочно связанных с минеральной основой, % от суммы*	22	21	18	17	17
П _{лаб} ***	0,20	0,25	0,27	0,28	0,29

Примечание. * Орлов и др., 2004; ** Овчинникова, 2007; *** Бакина и др., 2004.

Таблица 5. Показатели степени деградации почв

Показатель	Степень деградации				
	0	1	2	3	4
Содержание агрономически ценной фракции, %	> 80	70–80	60–70	< 60	–
Содержание глыбистой фракции, %	< 20	20–30	30–40	> 40	–
Увеличение содержания Na _{обм} , % от ЕКО	< 5	5–10	10–15	15–20	> 20
Буферность почв к NaF	> 50	10–50	2,7–10	2,0–2,6	<2,0

Таблица 6. Влияние загрязнения фторидами на деградацию почв

Показатель	Загрязнение почв, ПДК				
	10	12	16	26	31
Агрономически ценные фракции, %	1	1	3	3	3
Глыбистая фракция, %	1	1	2	3	3
Na _{обм} , % от ЕКО	0	1	2	4	4
Буферность почв к NaF	1	2	2	4	4

Примечание. Степень деградации в баллах: 0 – отсутствует; 1 – слабая; 2 – средняя; 3 – сильная; 4 – очень сильная.

Деградация почв, обусловленная изменением химических свойств, включая показатели содержания обменного натрия и буферности почв к NaF, оценивалась на основе данных предыдущих исследований (Ковалев, 2015; Помазкина и др., 2004; Кириллова, Помазкина, 2014). Следует отметить, что пути решения проблемы деградации пахотных почв, особенно в условиях современных чрезвычайных экологических ситуаций, в настоящее время не вполне выработаны.

Показатели степени деградации агросерой почвы (выражены в баллах) в зависимости от содержания водорастворимых фторидов существенно различаются (табл. 6). В модельном микрополевым опыте по изучению изменений физических и химических свойств почвы установлено, что почва, загрязненная фторидами на уровне 12 ПДК, характеризовалась средней степенью деградации, почва, загрязненная на уровне 16 ПДК, – сильной, а почвы, загрязненные на уровне 26 и 31 ПДК, – очень сильной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере агросерой почвы лесостепи Байкальского региона в микрополевым опыте по моделированию уровней загрязнения водорастворимыми фторидами (12, 16, 26 и 31 ПДК) продемонстрированы негативные изменения физических и химических свойств в зависимости от повышения загрязнения. Установлено, что продолжающееся техногенное загрязнение аэровыбросами алюминиевого производства и повышение со временем содержания фторидов в пахотных почвах приведет к негативным изменениям их свойств, свидетельствующим о проявлении признаков деградации. Впервые предложены критерии для оценки степени деградации загрязненных фторидами почв. Почва, загрязненная на уровне 16 ПДК, характеризуется сильной степенью деградации, а почвы, загрязненные на уровне 26 и 31 ПДК, – очень сильной. Следовательно, использование в земледелии агросерой почвы, загрязненной фторидами на уровне 16 ПДК и выше, весьма маловероятно, даже при условии проведения высокочувствительной ремедиации. Продолжающееся техногенное загрязнение почв фторидами алюминиевого производства чревато необратимыми экологическими последствиями, которые обусловлены не только проявлением признаков деградации пахотных почв, но и другими негативными воздействиями на окружающую среду.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты № 12-04-31770-мол_а и № 14-45-04040-р сибирь а. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бакина Л. Г., Орлова Н. Е., Орлова Е. Е. Подходы к оценке качества органических удобрений // Гумус и почвообразование. Сб. научн. трудов СПбГАУ. СПб., 2004. С. 40–45.
- Бондарев А. Г., Кузнецова И. В. Проблема деградации физических свойств почв России и пути ее решения // Почвоведение. 1999. № 9. С. 1126–1131.
- Гогмочадзе Г. Д. Деградация почв: причины, следствия, пути снижения и ликвидации. М.: Изд-во Моск. Ун-та, 2011. 272 с.
- Давыдова Н. Д., Знаменская Т. И. Загрязнение степных геосистем Южно-Минусинской котловины фторидами при производстве алюминия // География и природные ресурсы. 2016. № 1. С. 55–61.
- Дмитриев М. Т., Казнина Н. И., Пинигина И. А. Санитарно-химический анализ загрязняющих веществ в окружающей среде. Справочное издание. М.: Химия. 1989. 368 с.
- Кириллова Н. Н., Помазкина Л. В. Влияние уровня загрязнения фторидами алюминиевого производства на деградацию серых лесных почв Байкальского региона // Известия ВУЗов. Прикладная химия и биотехнология. 2014. № 5 (10). С. 82–87.
- Кремленкова Н. П. Накопление и перераспределение техногенного фтора в почвах южной части Нечерноземной зоны // Почвоведение. 1993. № 9. С. 87–93.
- Методы оценки степени деградации сельскохозяйственных земель / Под ред. Н. К. Ковалева. Коломна: ИП Воробьев О. М., 2015. 32 с.
- Овчинникова М. Ф. Особенности трансформации гумусовых веществ в разных условиях землепользования (на примере дерново-подзолистой почвы): автореф. дисс. ... д-ра биол. наук. М.: МГУ, 2007. 49 с.
- Орлов Д. С., Бирюкова О. Н., Розанова М. С. Дополнительные показатели гумусного состояния почв и их генетических горизонтов // Почвоведение. 2004. № 8. С. 918–926.
- 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.
- Помазкина Л. В. Интегральная оценка влияния техногенного загрязнения и климатических факторов на агроэкосистемы Байкальской природной территории // Успехи современной биологии. 2011. Т. 131. № 2. С. 193–202.
- Помазкина Л. В., Кириллова Н. Н. Деградация агросерых почв лесостепи Байкальского региона в условиях загрязнения фторидами алюминиевого производства // Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2013 году». Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2014. С. 325–328.
- Помазкина Л. В., Воронин В. И. Мониторинг загрязнения пахотных почв фторидами алюминиевого производства // Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2014 году». Иркутск: Сиб. филиал ФГУНПП «Росгеолфонд», 2015. 436 с.
- Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2041-06.
- Проблемы деградации и восстановления продуктивности земель сельскохозяйственного назначения в России / Под ред. А. В. Гордеева, Г. А. Романенко. М.: Росинформагротех, 2008. 67 с.
- Теории и методы физики почв. Коллективная монография / Под ред. Е. В. Шеина, Л. О. Карпачевского. М.: «Гриф и К», 2007. 616 с.
- Теория и практика химического анализа почв / Под ред. Л. А. Воробьевой. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
- Шелепова О. В., Потатуева Ю. А. Агроэкологическое значение фтора // Агрохимия. 2003. № 9. С. 78–87.

REFERENCES

- Bakina L. G., Orlova N. E., Orlova E. E. Podkhody k otsenke kachestva organicheskikh udobrenii [Approaches to assessing the quality of organic fertilizers]. Gumus i pochvoobrazovanie [Humus and soil formation] Sb. nauchn. trudov SPbGAU. Saint-Peterburg, 2004, pp. 40–45.
- Bondarev A. G., Kuznetsova I. V. Problema degradatsii fizicheskikh svoystv pochv Rossii i puti ee resheniia [The degradation of physical properties of soils in Russia and ways to minimize it]. Pochvovedenie, 1999, no. 9, pp. 1126–1131.

- Gogmochadze G. D. *Degradatsiia pochv: prichiny, sledstviia, puti snizheniia i likvidatsii* [Soil degradation: causes, consequences, ways of reduction and elimination]. Moscow: Publishing house of Moscow University, 2011. 272 p.
- Davydova N. D., Znamenskaia T. I. Zagriaznenie stepnykh geosistem Iuzhno-Minusinskoï kotloviny fluoridami pri proizvodstve aliuminiia [Pollution of steppe geosystems of South-Minusinsk basin fluorides from aluminium production]. *Geografiia i prirodnye resursy*, 2016, no. 1, pp. 55–61.
- Dmitriev M. T., Kaznina N. I., Pinigina I. A. *Sanitarno-khimicheskii analiz zagriazniaiushchikh veshchestv v okruzhaiushchei srede. Spravochnoe izdanie* [Sanitary-chemical analysis of pollutants in the environment. Reference edition]. Moscow: Khimiia, 1989. 368 p.
- Metody otsenki stepeni degradatsii sel'skokhoziaistvennykh zemel'* [Methods for assessing the degree of degradation of agricultural lands] / Pod red. N. K. Kovaleva. Kolomna: IP Vorob'ev O. M., 2015. 32 p.
- Kirillova N. N., Pomazkina L. V. Vliianie urovnia zagriazneniia fluoridami aliuminievoï proizvodstva na degradatsiiu serykh lesnykh pochv Baikal'skogo regiona [Impact of pollution by aluminum industry fluorides on degradation of gray forest soils of Baikal region]. *Izvestiia VUZov. Prikladnaia khimiia i biotekhnologiia*, 2014, no. 5(10), pp. 82–87.
- Kremlenkova N. P. Nakoplenie i pereraspredelenie tekhnogennoï ftora v pochvakh iuzhnoi chasti Nechernozemnoi zony [Accumulation and redistribution of technogenic fluorine in soils of the southern part of the non-Chernozem zone]. *Pochvovedenie*, 1993, no. 9, pp. 87–93.
- Ovchinnikova M. F. *Osobennosti transformatsii gumusovykh veshchestv v raznykh usloviakh zemlepol'zovaniia (na primere derno-podzolistoi pochvy)* [Features of transformation of humic substances in different conditions of land use (for example, sod-podzolic soil). Abstract diss. doc. biol. sci.]. Avtoref. diss. doc. biol. nauk. Moscow: Publishing house Moscow University, 2007. 49 p.
- Orlov D. S., Biriukova O. N., Rozanova M. S. Dopolnitel'nye pokazateli gumusnogo sostoiianiia pochv i ikh geneticheskikh gorizontov [Revised system of the humus status parameters of soils and their genetic horizons]. *Pochvovedenie*, 2004, no. 8, pp. 918–926.
- Pomazkina L. V., Kotova L. G., Lubnina E. V., Zorina S. Yu., Lavrent'eva A. S. *Ustoichivost' agroekosistem k tekhnogennomu zagriazneniiu ftoridami* [The resistance of agroecosystems to fluoride pollution]. Irkutsk: IG SO RAN, 2004. 225 p.
- Pomazkina L. V. Integral'naia otsenka vliianiia tekhnogennoï zagriazneniia i klimaticheskikh faktorov na agroekosistemy Baikal'skoi prirodnoi territorii [Integral estimation of influence of technogenic pollution and climatic factors on agroecosystems of Baikal natural territory]. *Uspekhi sovremennoi biologii*, 2011, t. 131, no. 2, pp. 193–202.
- Pomazkina L. V., Kirillova N. N. *Degradatsiia agrosernykh pochv lesostepi Baikal'skogo regiona v usloviakh zagriazneniia ftoridami aliuminievoï proizvodstva* [Degradation of agricultural soils of the forest-steppe of the Baikal region in conditions of contamination with fluorides of aluminum production]. Gosudarstvennyi doklad «O sostoianii i ob okhrane okruzhaiushchei sredy Irkutskoi oblasti v 2013 godu». Irkutsk: Izd-vo IG SO RAN, 2014, pp. 325–328.
- Pomazkina L. V., Voronin V. I. Monitoring zagriazneniia pakhotnykh pochv ftoridami aliuminievoï proizvodstva [Monitoring of pollution of arable soils by fluorides from aluminum production]. *Gosudarstvennyi doklad «O sostoianii ozera Baikal i merakh po ego okhrane v 2014 godu»*. Irkutsk: Sib. filial FGUNPP «Rosgeolfond», 2015. 436 p.
- Predel'no dopustimye kontsentratsii (PDK) khimicheskikh veshchestv v pochve. Gigienicheskie normativy GN 2.1.7.2041-06* [Maximum permissible concentrations (MPC) of chemical substances in the soil. Hygienic standards GN 2.1.7.2041-06.].
- Problemy degradatsii i vosstanovleniia produktivnosti zemel' sel'skokhoziaistvennogo naznacheniiia v Rossii* [Problems of degradation and restoration of agricultural land productivity in Russia] // Pod red. A. V. Gordeeva, G. A. Romanenko. Moscow: Rosinformagrotekh, 2008. 67 p.
- Teoriia i praktika khimicheskogo analiza pochv* [Theory and practice of the chemical analysis of soils] / Pod red. L. A. Vorob'evoi. Moscow: GEOS, 2006. 400 p.
- Teorii i metody fiziki pochv. Kollektivnaia monografiia* [Theories and methods of soil physics: collective monograph] / Pod red. E. V. Sheina, L. O. Karpachevskogo. Moscow: «Grif i K», 2007. 616 p.
- Shelepova O. V., Potatueva Yu. A. Agroekologicheskoe znachenie ftora [Agroecological significance of fluorine]. *Agrokimiia*, 2003, no. 9, pp. 78–87.