

Научная статья

УДК 631.416.8

doi: 10.18522/1026-2237-2024-3-98-106

## РАЗЛИЧНЫЕ ФОРМЫ Sr В АГРОТЕМНОГУМУСОВЫХ ПОДБЕЛАХ ЮГА ПРИМОРСКОГО КРАЯ

**Яна Олеговна Тимофеева<sup>1✉</sup>, Дарья Олеговна Взорова<sup>2</sup>, Роман Витальевич Тимошинов<sup>3</sup>**

<sup>1, 2</sup> Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток, Россия

<sup>3</sup> Федеральный научный центр агробиотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки, Уссурийск, Россия

<sup>1</sup> timofeeva@biosoil.ru✉

<sup>2</sup> zaqdo@mail.ru

<sup>3</sup> fe.smc\_rf@mail.ru

**Аннотация.** Для оценки уровня концентрации и выявления основных фаз – носителей различных форм стронция (Sr) изучено валовое содержание и концентрация водорастворимых форм элемента в агротемногумусовых подбелах, составляющих основной объем пахотного фонда региона проведения исследований. Полнопрофильные почвенные разрезы были заложены на длительных залежных, фитомелиоративных и удобряемых минеральными и органическими удобрениями вариантах опыта. Исследование содержания различных форм Sr проводилось методами энергодисперсионной рентгенфлуоресцентной спектроскопии и атомно-абсорбционной спектрометрии. В почвах всех исследованных вариантов опыта основной объем Sr иммобилизован в составе минеральной фазы почв. Внесение в почву минеральных удобрений сопровождалось увеличением валового содержания (на 6,4 %) и концентрации водорастворимых форм (в 5,7 раза) Sr по сравнению с почвами залежи и активизацией сорбции Sr Mn-содержащими соединениями почв. Длительное внесение различных видов органических удобрений способствовало активизации формирования устойчивых Sr-органических комплексов. При использовании фитомелиорантов в условиях снижения кислотности почвенного раствора отмечено усиление влияния Ca-содержащих соединений почв на распределение Sr. Почвы всех исследованных вариантов опыта характеризовались отсутствием факторов и условий, способствующих значительному накоплению Sr в профиле, что подтверждается пониженным валовым содержанием Sr по сравнению с общемировым уровнем и содержанием в пахотных почвах Японии.

**Ключевые слова:** стронций (Sr), удобрения, агротемногумусовые подбелы, загрязнение почв

**Для цитирования:** Тимофеева Я.О., Взорова Д.О., Тимошинов Р.В. Различные формы Sr в агротемногумусовых подбелах юга Приморского края // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 3. С. 98–106.

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 124012400285-7).

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

## VARIOUS FORMS OF Sr IN ALBIC STAGNOSOILS FROM THE SOUTH OF PRIMORSKII REGION

**Yana O. Timofeeva<sup>1✉</sup>, Dariya O. Vzorova<sup>2</sup>, Roman V. Timoshinov<sup>3</sup>**

<sup>1, 2</sup> Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

<sup>3</sup> Chaika Federal Scientific Center of Agricultural Biotechnology of the Far East, Ussuriysk, Russia

© Тимофеева Я.О., Взорова Д.О., Тимошинов Р.В., 2024

<sup>1</sup> timofeeva@biosoil.ru 

<sup>2</sup> zaqdo@mail.ru

<sup>3</sup> fe.smc\_rf@mail.ru

**Abstract.** To assess the concentration level and identify the main phase-carriers of various forms of strontium (Sr), the total content, distribution and concentration of water-soluble forms of the element in Albic Stagnosols, which composed the bulk of the arable fund of the region under study, were studied. Full-profile soil pits were dug at the long-term fallow, phytoreclamative, and fertilized with mineral and organic fertilizer variants of the experience. The study of the different Sr forms contents was carried out by energy dispersive X-ray fluorescence spectroscopy and atomic absorption spectrometry. The main Sr volume was immobilized in the composition of soil mineral phase in soils of all variants of the experience. The addition of mineral fertilizers to soil was accompanied by an increase in the total content (by 6.4 %) and concentration of water-soluble (by 5,7 times) Sr forms, compared to the soil of fallow, and intensification of Sr sorption by Mn-containing soil compounds. The long-term addition of different types of organic fertilizers contributed to the activation of stable Sr-organic complexes formation. Under a green manure application in conditions of soil solution acidity decrease, the increase in the influence of Ca-containing soil compounds on the distribution of Sr has been shown. The soils of all variants of the experience were characterized by the absence of factors and conditions that contributed to the Sr accumulation in profiles, it was suggested by the lower total Sr content compared to the mean background content for surface soils around the world and to the mean content in agricultural soils in Japan.

**Keywords:** strontium (Sr), fertilizers, Albic Stagnosols, soils contamination

**For citation:** Timofeeva Ya.O., Vzorova D.O., Timoshinov R.V. Various Forms of Sr in Albic Stagnosols from the South of Primorskii Region. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(3):98-106. (In Russ.).

**Acknowledgments:** the research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. 124012400285-7).

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

## Введение

Согласно ГОСТ 17.4.1.02.83 (переизд. в августе 2008 г.), стронций (Sr) относится к элементам третьего класса опасности [1]. Уровень средних значений Sr в почвах разных стран мира весьма разнообразен [2]. Основным источником поступления Sr в почвы естественных ландшафтов являются горные породы, при выветривании которых Sr мобилизуется и поступает в почвенный раствор [3, 4]. Содержание Sr в почвах сельскохозяйственных угодий корректируется внесением удобрений, что сопровождается увеличением содержания и подвижности Sr в пахотных почвах [5–7]. Вертикальное распределение, накопление и мобилизация Sr в профиле почв контролируются широким набором физико-химических свойств. В большинстве исследований отмечается ведущая роль органического вещества, (гидр)оксидов Fe и глинистых минералов в накоплении и распределении Sr [2, 8]. Однако результаты отдельных работ указывают на варьирование набора основных фаз – носителей Sr в зависимости от условий почвообразования и интенсивности техногенного воздействия [9–11].

Результаты исследований содержания различных форм Sr в пахотных почвах юга Приморского края крайне эпизодичны и не дают полного представления о влиянии различных видов удобрений на содержание, распределение и накопление Sr в агротемногумусовых подбелах, составляющих основной объем пахотного фонда региона.

Целью настоящего исследования являлась количественная оценка валового содержания и концентрации водорастворимых форм Sr, а также определение основных фаз – носителей Sr в агротемногумусовых подбелах, подверженных различным приемам агротехнической обработки.

## Объекты и методы исследования

Объекты исследования – агротемногумусовые подбелы, используемые в длительных полевых опытах стационара ФНЦ агробиотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки. Названия почв приведены согласно классификации и диагностики почв России [12]. Образцы почв были отобраны из полнопрофильных разрезов, заложенных в залежном варианте опыта (выведены из сельскохозяйственного оборота 85 лет назад), фитомелиоративном варианте (посев костреца безостого (*Bromus inermis*) в течение 15 лет) и удобряемых вариантах опыта, включающих использование навоза КРС (62 года) и минеральных удобрений, вносимых в форме суперфосфата, хлористого калия и аммиачной селитры (80 лет). Морфологическое описание почвенных профилей и методика измерения величины  $pH_{H_2O}$ ,  $pH_{KCl}$  и содержания гумуса приведены в [13].

Содержание оксидов макроэлементов и уровень валового содержания Sr в образцах почв определялись методом энергодисперсионной рентгенфлуоресцентной спектроскопии на анализаторе EDX 800HS-P (Shimadzu, Япония) в формате количественного анализа согласно М-02-0604-2007 [14]. Концентрацию водорастворимых форм Sr определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии на спектрометре AA-6800 (Shimadzu, Япония) согласно рекомендациям [15].

В работе использовали современное научное оборудование центра коллективного пользования «Биотехнология и генетическая инженерия» на базе ФНЦ биоразнообразия ДВО РАН.

Математическая обработка полученных данных проводилась с применением программ Statistica и Microsoft Excel 2007. Уровень значимости полученных результатов ( $P$ ) не превышал 0,05.

## Результаты и обсуждение

На основе анализа литературных данных в качестве основных параметров, влияющих на содержание и распределение различных форм Sr в почвах, были выбраны величина pH, содержание гумуса и концентрация оксидов макроэлементов (Si, Ca, Mn, Fe). Анализу влияния различных приемов агротехнического возделывания на изменение уровней pH и содержания гумуса в исследованных почвах посвящена работа [13]. Для изучения вертикального распределения различных форм Sr в почвах отдельные результаты указанной работы использованы в настоящем исследовании (табл. 1).

Исследованные почвы относятся к малогумусированным, с резко убывающим количеством гумуса по профилю. Кислотность почв залежи и вариантов с использованием различных удобрений соответствовала слабокислоте диапазону, величина pH почв фитомелиоративного варианта варьировала от нейтральных до слабощелочных значений [13]. Наибольшее содержание  $SiO_2$  в исследованных почвах отмечено в верхней и средней частях профиля,  $Fe_2O_3$  – в средней и нижней частях, что характерно для большинства почв региона со схожей направленностью основных почвообразующих процессов (табл. 1). Содержание MnO в исследованных почвах различалось: почвы с внесением минеральных и органических удобрений характеризуются снижением величины содержания элемента по всему профилю по сравнению с почвами залежи. Почвы фитомелиоративного варианта отличались наиболее высоким уровнем содержания MnO. Распределение CaO в исследованных почвах характеризовалось элювиально-иллювиальной направленностью. По сравнению с почвами залежи отмечено увеличение содержания CaO в почвах фитомелиоративного варианта (на 35 %) и в почвах варианта с длительным применением минеральных удобрений (на 12 %). Некоторое увеличение уровня содержания оксидов Mn и Ca в почвах фитомелиоративного варианта, вероятно, связано со снижением подвижности элементов при нейтральных и слабощелочных значениях pH и активацией комплексообразования с органическим веществом [10].

Уровень валового содержания Sr оценивался по величине среднего содержания в почвах мира (175 мг/кг) и по значению среднего содержания в сельскохозяйственных почвах Японии (ближайший к исследуемой территории регион) (190 мг/кг) [2, 16].

Таблица 1 / Table 1

**Физико-химические свойства и содержание оксидов макроэлементов в почвах  
/ Physical and chemical properties and macroelements oxides content in soils**

Горизонт	Глубина, см	Гумус, %**	pH <sub>H2O</sub> **	pH <sub>KCl</sub> **	SiO <sub>2</sub> , %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %**	MnO, %**	CaO, %
Агротемногумусовый подбел типичный (залежь)								
PU	4–11	5,5±0,1*	5,9±0,1	5,1±0,1	79,7±2,7	4,0±0,2	0,08±0,004	0,9±0,03
PU–ELnn	11–35	4,1±0,1	6,1±0,1	5,1±0,1	79,8±2,6	3,9±0,1	0,09±0,005	0,9±0,03
ELnn	35–55	0,1±0,01	6,2±0,1	4,7±0,1	80,6±2,9	3,6±0,2	0,04±0,002	0,7±0,02
BTnn	55–111	0,2±0,01	6,2±0,1	4,5±0,1	77,5±2,8	7,9±0,3	0,05±0,001	0,8±0,03
BT	111–153	0,01±0,001	6,6±0,1	4,6±0,1	78,1±2,8	6,8±0,3	0,07±0,003	0,9±0,03
C	153–192	–	7,0±0,1	4,8±0,1	78,1±2,6	7,0±0,3	0,13±0,006	0,9±0,03
Агротемногумусовый подбел глееватый (фитомелиоративный опыт)								
PU	0–11	3,5±0,1	7,1±0,2	6,3±0,1	79,6±2,8	3,7±0,1	0,12±0,006	1,3±0,05
PU–ELnn	11–27	2,7±0,1	7,8±0,2	6,8±0,2	79,8±2,6	3,5±0,1	0,12±0,006	1,3±0,04
ELnn	27–49	1,4±0,03	7,9±0,2	6,8±0,2	79,9±2,8	3,9±0,1	0,22±0,011	1,0±0,04
BTnn,g	49–83	0,01±0,001	8,0±0,3	6,0±0,1	77,8±2,7	7,3±0,3	0,19±0,006	0,9±0,03
BTg	83–112	0,01±0,001	7,9±0,3	5,9±0,1	77,4±2,7	10,3±0,5	0,08±0,003	0,8±0,03
Cg	112–122	–	7,7±0,2	5,4±0,1	78,8±2,8	10,8±0,4	0,12±0,007	0,8±0,03
Агротемногумусовый подбел глеевый типичный (опыт с внесением органических удобрений)								
PU	0–27	3,8±0,1	5,8±0,1	4,7±0,1	80,1±3,2	3,6±0,1	0,05±0,002	0,9±0,03
ELnn,g	27–42	3,7±0,1	5,6±0,1	4,7±0,1	80,9±3,0	3,8±0,1	0,04±0,001	0,9±0,03
BTnn,g	42–91	0,4±0,02	5,9±0,1	4,5±0,1	77,6±2,7	7,4±0,3	0,03±0,001	0,9±0,03
G	91–132	1,0±0,04	6,3±0,1	4,4±0,1	78,3±2,9	6,3±0,3	0,04±0,001	0,8±0,03
CG	132–170	0,9±0,04	6,9±0,1	4,7±0,1	78,5±2,6	6,3±0,3	0,04±0,002	0,9±0,03
Агротемногумусовый подбел глеевый типичный (опыт с внесением минеральных удобрений)								
PU	0–30	1,2±0,03	6,2±0,1	5,3±0,1	80,1±3,0	3,7±0,1	0,05±0,002	1,0±0,04
ELnn,g	30–46	0,9±0,03	6,6±0,1	5,2±0,1	80,8±2,8	4,0±0,1	0,03±0,001	0,8±0,03
BTnn,g	46–83	1,6±0,04	6,3±0,1	4,8±0,1	78,3±2,5	5,8±0,2	0,02±0,001	0,9±0,03
G	83–119	0,7±0,02	6,4±0,1	4,7±0,1	77,4±2,4	7,1±0,34	0,03±0,001	0,9±0,02

**Примечание.** \* – среднее арифметическое значение ± значение среднего квадратического отклонения;  
\*\* – результаты представлены в работе [13].

В почвах залежного, фитомелиоративного и удобряемого органическими удобрениями вариантов отмечено пониженное валовое содержание Sr по сравнению со средним уровнем содержания в почвах Японии и в почвах мира (табл. 2).

В исследованных почвах максимальный уровень валового содержания Sr, локализованный в горизонте PU, был приближен к значениям среднего содержания в почвах мира. Результаты исследований, проведенных в различных регионах мира, указывают на активный привнос Sr в почвы при использовании различных видов минеральных и органических удобрений [2, 5–7, 17]. Почвы исследованного варианта опыта с 80-летним периодом внесения минеральных удобрений характеризовались увеличением валового содержания Sr только в пахотном горизонте. Повышение содержания было незначительным и превышало уровень содержания в почвах мира и в исследованных почвах залежи на 6,4 %.

Анализ взаимосвязи величины валового содержания Sr с исследованными свойствами почв указывает на наличие высокой корреляционной связи Sr с Si-содержащими компонентами, что подтверждает преимущественное нахождение Sr в составе минеральной фазы почв (рисунок). В почвах залежи содержание SiO<sub>2</sub> было единственным показателем, имеющим высокий уровень положительной корреляционной зависимости от валового содержания и распределения Sr. В почвах варианта опыта с длительным внесением минеральных удобрений, помимо SiO<sub>2</sub>, на содержание и распределение валового Sr существенное влияние оказывали Mn-содержащие соединения и уровень pH<sub>KCl</sub>. С учётом увеличения валового содержания Sr в почвах данного варианта опыта можно предположить, что при дополнительном внесении Sr в почвы, имеющие слабокислую реакцию среды и низкое содержание гумуса, происходит активизация сорбционной активности Mn-содержащих фаз в отношении ионов Sr.

Таблица 2 / Table 2

**Содержание Sr в почвах / Content of Sr in soils**

Горизонт	Глубина, см	Sr, мг/кг	
		валовое	водорастворимые формы
Агротемногумусовый подбел типичный (залежь)			
PU	4–11	175,99±6,93*	0,03±0,001
PU–ELnn	11–35	178,04±7,21	0,03±0,001
ELnn	35–55	175,52±6,98	0,01±0,001
BTnn	55–111	110,24±4,33	0,02±0,001
BT	111–153	139,70±5,00	0,02±0,001
C	153–192	134,82±5,37	0,01±0,001
Агротемногумусовый подбел глееватый (фитомелиоративный опыт)			
PU	0–11	179,03±7,36	0,06±0,002
PU–ELnn	11–27	176,66±6,61	0,09±0,003
ELnn	27–49	175,23±6,62	0,02±0,001
BTnn,g	49–83	128,71±4,97	0,04±0,001
BTg	83–112	106,93±3,92	0,04±0,001
Cg	112–122	159,63±5,70	0,01±0,001
Агротемногумусовый подбел глеевый типичный (опыт с внесением органических удобрений)			
PU	0–27	173,35±6,08	0,09±0,003
ELnn,g	27–42	167,01±6,41	0,08±0,003
BTnn,g	42–91	116,12±4,32	0,08±0,003
G	91–132	139,05±5,13	0,04±0,001
CG	132–170	144,76±5,72	0,01±0,001
Агротемногумусовый подбел глеевый типичный (опыт с внесением минеральных удобрений)			
PU	0–30	187,97±7,34	0,17±0,004
ELnn,g	30–46	172,94±6,53	0,08±0,003
BTnn,g	46–83	148,03±5,61	0,06±0,002
G	83–119	131,29±4,99	0,02±0,001

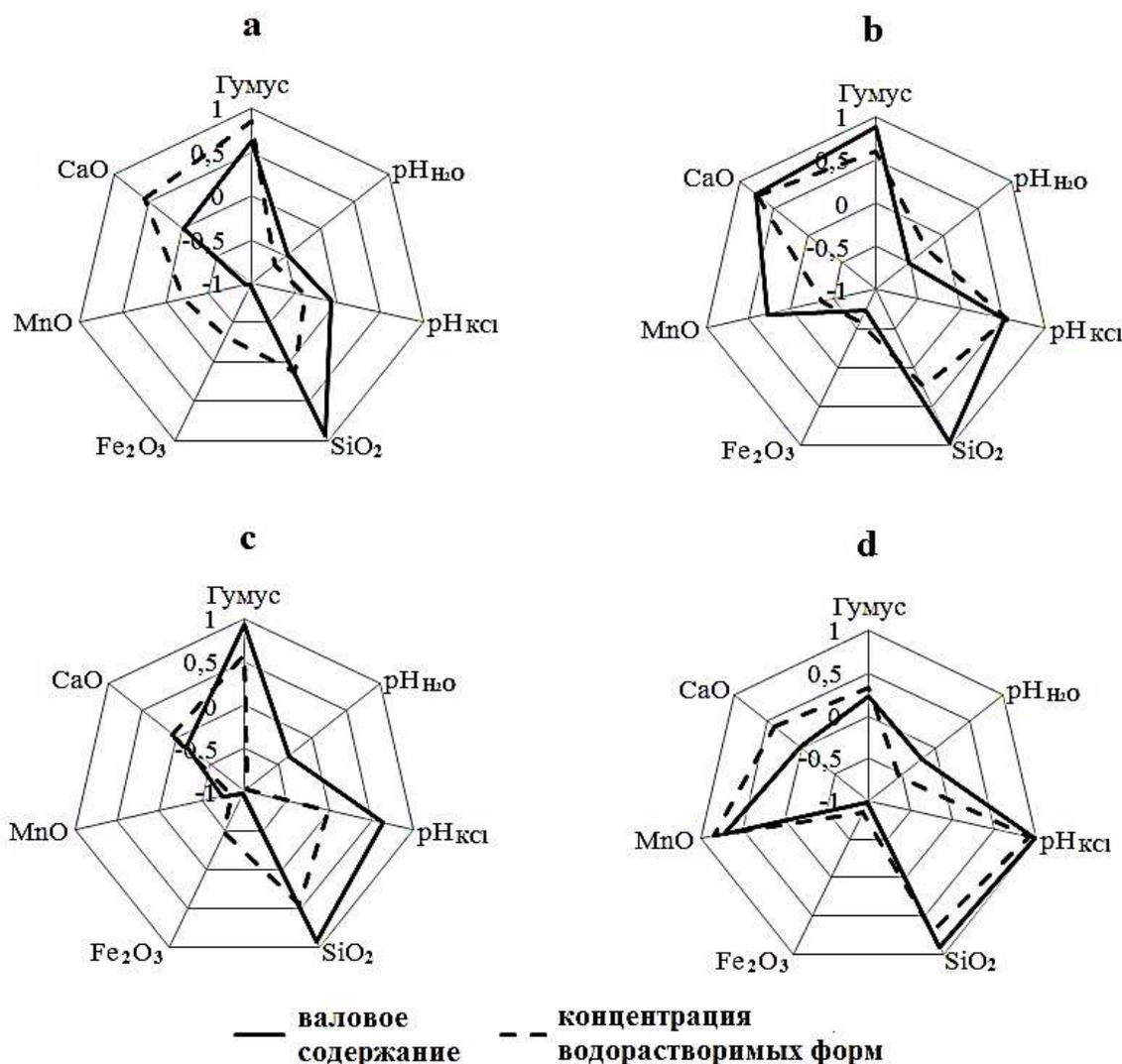
\* – среднее арифметическое значение ± значение среднего квадратического отклонения.

Внесение в почву различных органических удобрений сопровождалось увеличением уровня взаимосвязи между валовым содержанием Sr и содержанием гумуса. В целом образование Sr-органических комплексов сопровождается снижением сорбции Sr почвенными минералами [10]. Однако в почвах вариантов опыта с внесением фитомелиорантов и органических удобрений связь Sr с минеральными компонентами оставалась высокой. В почвах фитомелиоративного варианта отмечен высокий уровень корреляции Sr с CaO, что указывает на влияние ионов Ca на распределение Sr в почвах при снижении уровня кислотности почвенного раствора.

Содержание водорастворимых форм Sr в исследованных почвах выражалось в сотых долях процента от валового содержания. Наибольший уровень содержания водорастворимых форм Sr соответствовал максимальному уровню валового содержания элемента и был локализован в верхних горизонтах почв. Сравнительный анализ содержания водорастворимых форм Sr в верхних горизонтах почв разных вариантов опыта указывает на увеличение содержания в удобряемых почвах. При использовании фитомелиорантов отмечается увеличение содержания водорастворимых форм Sr в 2 раза, при использовании навоза – в 3, при использовании минеральных удобрений – в 5,7 раза. Отсутствие значительного увеличения валового содержания Sr в почвах удобряемых вариантов опыта по сравнению с почвами залежи позволяет предположить, что вероятной причиной увеличения концентраций водорастворимых форм Sr является изменение взаимосвязи между Sr и основными фазами – носителями элемента в почвах.

В почвах вариантов опыта с использованием минеральных и органических удобрений содержание водорастворимых форм Sr снижалось от верхней части профиля к нижней. В профиле почв залежи максимальное количество данной формы Sr отмечается в горизонтах PU и PU–ELnn,

в элювиальном горизонте происходит резкое снижение содержания, в нижележащих горизонтах установлено некоторое накопление водорастворимых форм Sr с последующим снижением в горизонтах C(g). Особенностью почв фитомелиоративного варианта опыта является максимальный уровень содержания водорастворимых форм Sr в подпахотном горизонте (PU–ELnn). Интенсивное биологическое поглощение Sr разными видами растений и увеличение накопления Sr надземной массой лугово-осоковой и разнотравной растительности подтверждают возможность активизации выноса водорастворимых форм Sr из пахотного горизонта (PU) почв исследованного фитомелиоративного варианта опыта в условиях активного развития растений с большой продуктивностью фитомассы [6, 18].



Коэффициенты корреляции между содержанием различных форм Sr и свойствами агротемногумусовых подбелов: а – залежь; б – фитомелиоративный опыт; с – опыт с внесением органических удобрений; д – опыт с внесением минеральных удобрений / Correlation coefficients between the content of different forms Sr and properties of Albic Stagnosols: a - fallow; b - phytoreclamation; c - manured; d - with mineral fertilizer

Внутрипрофильная миграция водорастворимых форм Sr связывается с диффузией почвенного раствора, содержащего соединения Sr в форме растворимых солей и комплексов с органическими лигандами [3, 9, 10]. Однако высокий уровень взаимосвязи между содержанием водорастворимых форм Sr и содержанием гумуса был отмечен только в почвах залежи, что может быть связано с формированием неустойчивых комплексных соединений Sr с органическим веществом.

В почвах вариантов опыта с внесением органических удобрений значимого влияния гумуса на содержание и распределение водорастворимых форм Sr не установлено. В почвах фитомелиоративного варианта наибольшее влияние на распределение водорастворимых форм Sr оказывало содержание CaO. Схожий уровень взаимосвязи между валовым содержанием Sr и CaO в почвах данного варианта позволяет утверждать, что в составе комплексных соединений с Ca часть Sr находится в легкоподвижном состоянии и переходит в почвенный раствор. В почвах варианта с длительным применением минеральных удобрений набор фаз и свойств, контролирующих содержание и распределение водорастворимых форм Sr, соответствовал показателям, контролирующим валовое содержание и распределение элемента. Вероятно, дополнительное поступление ионов Sr в почву при внесении минеральных удобрений сопровождается формированием легкоподвижных внешнесферных поверхностных комплексов Sr с минеральной фазой почв. В почвах варианта с длительным применением органических удобрений значимого влияния исследованных свойств почв на содержание и распределение водорастворимых форм Sr не установлено.

### Заключение

Изученные почвы характеризуются отсутствием факторов и условий, способствующих значительному накоплению Sr. Длительное внесение в почву минеральных удобрений сопровождалось дополнительным поступлением Sr и увеличивало уровень валового содержания. Несмотря на незначительные различия в валовом содержании Sr, почвы удобряемых вариантов характеризовались увеличением содержания водорастворимых форм Sr в верхней части профиля (от 2 до 5,7 раза) в результате изменения взаимосвязи между Sr и основными фазами – носителями элемента в почвах. Уровень валового содержания Sr в почвах контролируется преимущественно Si-содержащими фазами почв. В почвах залежи и вариантов с внесением органических удобрений различного происхождения Sr в составе Si-содержащих соединений находится в труднодоступной форме. Внесение в почву различных органических удобрений сопровождалось увеличением взаимосвязи Sr с гумусом и формированием устойчивых Sr-органических комплексов. В почвах фитомелиоративного варианта опыта отмечено усиление влияния Ca-содержащих соединений на распределение Sr. Часть Sr, входящего в состав комплексных соединений с Ca, находится в легкоподвижном состоянии и переходит в почвенный раствор. Дополнительное поступление ионов Sr в почву при внесении минеральных удобрений сопровождалось активизацией сорбции Sr Mn-содержащими соединениями и формированием легкоподвижных соединений Sr.

### Список источников

1. ГОСТ 17.4.1.02-83. Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения. М.: Стандартинформ, 2008.
2. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. N.Y.: CRC Press, 2011. 534 p.
3. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Плылова И.А. Пространственная неоднородность содержания стабильного стронция в целинной и пахотной дерново-подзолистых почвах и роль гумусовых веществ в его закреплении // Агрохимия. 2012. № 4. С. 77–88.
4. Медведев И.Ф., Деревягин С.С., Панасов М.Н., Ефимова В.И. Эколого-ландшафтные закономерности распределения валового стронция (Sr) в системе почва – вода – растение // Аграр. науч. журн. 2015. № 3. С. 14–18.
5. Карпова Е.А., Потатуева Ю.А. Последствия применения различных форм фосфорных удобрений: стронций в системе дерново-подзолистая почва – растения // Агрохимия. 2004. № 1. С. 91–96.
6. Литвинович А.В., Лаврищев А.В. Стронций в системе удобрения (мелиоранты) – почва – природные воды – растения – животные (человек) // Агрохимия. 2008. № 5. С. 73–86.
7. Литвинович А.В., Небольсина З.П., Витковская С.Е., Яковлева Л.В. Влияние длительного применения фосфорных удобрений и мелиорантов на накопление в почвах и растениях стабильного стронция // Агрохимия. 2011. № 1. С. 35–41.
8. Водяницкий Ю.Н., Савичев А.Т., Васильев А.А., Лобанова Е.С., Чащин А.Н., Прокопович Е.В. Содержание тяжелых щелочноземельных (Sr, Ba) и редкоземельных (Y, La, Ce) металлов в техногенно загрязненных почвах // Почвоведение. 2010. № 7. С. 879–890.
9. Dinu M.I. Interaction between metal ions in waters with humic acids in gley-podzolic soils // Geochemistry International. 2015. Vol. 53. P. 265–276.

10. Helal A.A., Imam D.M., Khalifa S.M., Aly H.F. Effect of some environmental ligands and fertilizers on humic acid complexation with strontium // *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 1998. Vol. 232. P. 159–161.
11. Timofeeva Ya.O., Kosheleva Yu.A., Semal V.A., Burdukovskii M.L. Origin, baseline contents, and vertical distribution of selected trace lithophile elements in soils from nature reserves, Russian Far East // *J. of Soils and Sediments*. 2018. Vol. 18. P. 968–982.
12. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
13. Пуртова Л.Н., Тимофеева Я.О. Изучение некоторых свойств и активности каталазы агротемногумусовых подбелов при различных видах агротехнического воздействия // *Почвоведение*. 2022. № 10. С. 1277–1289.
14. М-02-0604-2007. Методика выполнения измерений массовой доли кремния, кальция, титана, ванадия, хрома, бария, марганца, железа, никеля, меди, цинка, мышьяка, стронция, свинца, циркония, молибдена, в порошковых пробах почв и донных отложений рентгеноспектральным методом с применением энергодисперсионных рентгенофлуоресцентных спектрометров типа EDX фирмы Shimadzu. СПб., 2007. 17 с.
15. Seguin V., Gagnon C., Courchesne F. Changes in water extractable metals, pH and organic carbon concentrations at the soil-root interface of forested soils // *Plant and Soil*. 2004. Vol. 260. P. 1–17.
16. Takeda A., Kimura K., Yamasaki S.-I. Analysis of 57 elements in Japanese soils, with special reference to soil group, and agricultural use // *Geoderma*. 2004. Vol. 119. P. 291–307.
17. Кошелева Ю.А., Тимофеева Я.О. Стронций (Sr) и ванадий (V) в пахотных почвах при длительном внесении удобрений // *Аграр. вестн. Урала*. 2018. № 7. С. 26–33.
18. Каушин В.К. Стронций в растениях Забайкалья // *Агрохимия*. 2009. № 8. С. 65–71.

#### References

1. GOST 17.4.1.02-83. *Protection of Nature. Soils. Classification of chemicals for pollution control*. Moscow: Standartinform Publ.; 2008. (In Russ.).
2. Kabata-Pendias A. *Trace elements in soils and plants*. New York: CRC Press; 2011. 534 p.
3. Litvinovich A.V., Pavlova O.Yu., Lavrishchev A.V., Plylova I.A. Spatial variability of stable strontium and the role of humic substances in its immobilization in virgin and arable soddy-podzolic soils. *Agrokhimiya = Agrochemistry*. 2012;(4):77-88. (In Russ.).
4. Medvedev I.F., Derevyagin S.S., Panasov M.N., Efimova V.I. Ecological and landscape regularities of distribution of gross strontium (Sr) in the system the soil-the water-the plant. *Agrarnyi nauchnyi zhurnal = Agricultural Science Journal*. 2015;(3):14-18. (In Russ.).
5. Karpova E.A., Potatueva Yu.A. The effect of different phosphoric fertilizers: strontium in a soddy-podzolic soil-plant system. *Agrokhimiya = Agrochemistry*. 2004;(1):91-96. (In Russ.).
6. Litvinovich A.V., Lavrishchev A.V. Strontium in the soil-fertilizers (ameliorants)-natural water-plants-animals (humans) system. *Agrokhimiya = Agrochemistry*. 2008;(5):73-86. (In Russ.).
7. Litvinovich A.V., Nebol'sina Z.P., Vitkovskaya S.E., Yakovleva L.V. Effect of the long-term application of phosphoric fertilizers and ameliorants on the accumulation of stable strontium in soils and plants. *Agrokhimiya = Agrochemistry*. 2011;(1):35-41. (In Russ.).
8. Vodyanitskii Yu.N., Savichev A.T., Vasilyev A.A., Lobanova E.S., Chashchin A.N., Prokopovich E.V. Contents of heavy alkaline-earth (Sr, Ba) and rare-earth (Y, La, Ce) metals in technogenically contaminated soils. *Eurasian Soil Sci*. 2010;43(7):822-832.
9. Dinu M.I. Interaction between metal ions in waters with humic acids in gley-podzolic soils. *Geochemistry International*. 2015;53:265-276.
10. Helal A.A., Imam D.M., Khalifa S.M., Aly H.F. Effect of some environmental ligands and fertilizers on humic acid complexation with strontium. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 1998;232:159-161.
11. Timofeeva Ya.O., Kosheleva Yu.A., Semal V.A., Burdukovskii M.L. Origin, baseline contents, and vertical distribution of selected trace lithophile elements in soils from nature reserves, Russian Far East. *Journal of Soils and Sediments*. 2018;18:968-982.
12. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. *Classification and diagnostics of Russian soils*. Smolensk: Oikumena Publ.; 2004. 342 p. (In Russ.).
13. Purtova L.N., Timofeeva Ya.O. Study of some properties and catalase activity in Albic Stagnosols under different agrogenic impacts. *Eurasian Soil Sci*. 2022;55(10):1436-1445.
14. М-02-0604-2007. *Method for measuring the mass fraction of silicon, calcium, titanium, vanadium, chromium, barium, manganese, iron, nickel, copper, zinc, arsenic, strontium, lead, zirconium, molybdenum in powder samples of soils and bottom sediments by the X-ray spectral method using energy-dispersive X-ray fluorescence Shimadzu EDX type spectrometers*. St. Petersburg, 2007. 17 p. (In Russ.).

15. Seguin V., Gagnon C., Courchesne F. Changes in water extractable metals, pH and organic carbon concentrations at the soil-root interface of forested soils. *Plant and Soil*. 2004;260:1-17.

16. Takeda A., Kimura K., Yamasaki S.-I. Analysis of 57 elements in Japanese soils, with special reference to soil group, and agricultural use. *Geoderma*. 2004;119:291-307.

17. Kosheleva Yu.A., Timofeeva Ya.O. Strontium (Sr) and vanadium (V) in arable soils under long-term fertilization. *Agrarnyi vestnik Urala = Ural Agricultural Bulletin*. 2018;(7):26-33. (In Russ.).

18. Kashin V.K. Strontium in plans of the Transbaikalia. *Agrokhimiya = Agrochemistry*. 2009;(8):65-71. (In Russ.).

#### **Информация об авторах**

Я.О. Тимофеева – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории почвоведения и экологии почв.

Д.О. Взорова – ведущий инженер лаборатории почвоведения и экологии почв.

Р.В. Тимошинов – кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий отделом земледелия и агрохимии.

#### **Information about the authors**

Ya.O. Timofeeva - Candidate of Science (Biology), Leading Researcher, Laboratory of Soil Science and Ecology of Soil.

D.O. Vzorova - Lead Engineer, Laboratory of Soil Science and Ecology of Soil.

R.V. Timoshinov - Candidate of Science (Agriculture), Head of the Department of Agriculture and Agrochemistry.

Статья поступила в редакцию 29.02.2024; одобрена после рецензирования 24.03.2024; принята к публикации 04.07.2024.

The article was submitted 29.02.2024; approved after reviewing 24.03.2024; accepted for publication 04.07.2024.

---