

СТРОНЦИЙ (SR) И ВАНАДИЙ (V) В ПАХОТНЫХ ПОЧВАХ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ВНЕСЕНИИ УДОБРЕНИЙ

Ю. А. КОШЕЛЕВА, аспирант, ведущий инженер,

Я. О. ТИМОФЕЕВА, кандидат биологических наук, руководитель сектора,

Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН

(690022, г. Владивосток, пр. 100-летия Владивостока, 159; e-mail: yuliyashoo@yandex.ru)

Ключевые слова: пахотные почвы, органо-минеральные удобрения, стронций, ванадий, физико-химические свойства почв.

В большинстве стран мира Sr и V относятся к потенциально опасным для окружающей среды. Одним из наиболее распространенных источников поступления исследуемых элементов в почвы агроценозов является использование удобрений. На территории Российской Федерации не существует нормативных документов, определяющих допустимое содержание Sr и V в удобрениях. Объемы внесения удобрений на исследуемой территории практически не контролируются, что провоцирует изменение элементного состава почв. В связи с этим важно оценить влияние длительного внесения минеральных и органо-минеральных удобрений на содержание различных форм Sr и V. Исследования проведены на агрогумусовых типичных почвах агрохимического стационара Приморского НИИСХ ДВО РАН. К моменту проведения исследований прошло восемь полных ротаций 9-польного севооборота. В полевом севообороте были выбраны контрольные варианты опытов: без внесения удобрений (контроль), с внесением минеральных (NPK) и органо-минеральных удобрений (PK + навоз + известь). Исследование содержания Sr и V в почвах проводилось рентгенфлуоресцентным и атомно-эмиссионным методами. Длительное применение удобрений на опытных делянках агрохимического стационара сопровождается увеличением содержания различных форм Sr и V в пахотных почвах. Максимальное влияние длительного внесения удобрений отмечено на повышение концентрации водорастворимых (доступных для растений) форм Sr и V до 70 % и 75 % соответственно. Установлено, что наибольшее влияние на распределение, накопление и подвижность Sr и V в пахотных почвах оказывают Ca-, Mn-, P-содержащие фазы почв, в меньшей степени Si-, Al-, Fe-содержащие соединения и гумус. Дополнительное поступление элементов в составе удобрений приводит к их непрочному закреплению в составе органо-минерального почвенного комплекса и в составе вторичных почвенных минералов преимущественно в водорастворимой форме.

STRONTIUM (SR) AND VANADIUM (V) IN ARABLE SOILS UNDER LONG-TERM FERTILIZATION

Yu. A. KOSHELEVA, postgraduate student, leading engineer,

Ya. O. TIMOFEEVA, candidate of biological sciences, head of sector,

Federal scientific center of the East Asia terrestrial biodiversity FEB RAS

(159 Stoletiya Vladivostoka str., 690022, Vladivostok; e-mail: yuliyashoo@yandex.ru)

Keywords: arable soil, organic-mineral fertilizers, strontium, vanadium, physical and chemical properties of soils.

Strontium and Vanadium are considered to be potentially dangerous for the environment in most countries of the world. One of the most common sources of input of the studied elements in the agricultural soils is the use of fertilizers. There are no regulations defining the permissible content of Sr and V in fertilizers on the territory of the Russian Federation. The amount of fertilizer adding practically not controlled in the study area, which causes a change in the elemental composition of soil. Therefore, it is important to assess the influence of long-term adding of mineral and organo-mineral fertilizers on the different forms of Sr and V contents. The objects of this study were soils formed in the territory of agrochemical station of Primorye Research Institute of Agriculture Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences. By the time of the study, eight full rotations of 9-full crop rotation had been completed. In the field crop rotation control variants of experiments were selected – without fertilizer (control), with the adding of mineral (NPK) and organo-mineral fertilizers (PK + manure + lime). The study of the contents of Sr and V in the soils was carried out X-ray fluorescence and atomic emission methods. Fertilizer application is accompanied by an increase of the different forms Sr and V content in arable soils. The maximum influence of long-term fertilizer application was observed to increase the concentration of water-soluble (available for plants) forms Sr and V to 70 % and 75 % respectively. It was found that Ca-, Mn-, P-containing phases have the greatest influence on the distribution, accumulation and mobility of Sr and V in arable soils, Si-, Al-, Fe-containing compounds and humus have to a lesser impact. The additional input of elements with fertilizers leads to their weak fixation in the composition of the organo-mineral soil complex and in the secondary soil minerals, in water-soluble forms mostly.

Положительная рецензия представлена В. И. Головым, доктором биологических наук, профессором Дальрыбвтуз.

Одной из важнейших научных и практических проблем является устойчивость почвы к чрезмерному поступлению тяжелых металлов (ТМ). Обширные площади земель загрязнены ТМ [2; 8]. Основные источники их поступления на почвенный покров – химическое и физическое выветривание материнской горной породы (природные источники) и промышленные, транспортные, бытовые выбросы и отходы, а также средства сельскохозяйственной химизации (антропогенные источники) [9; 16]. Рост темпов развития промышленности неизбежно приводит к увеличению нагрузки на почвенный покров и экосистемы в целом [15; 13]. Подробно исследовано содержание, особенности распределения и накопления в почвах различных регионов РФ таких ТМ, как цинк, свинец, никель, кадмий, хром, медь. В то же время внимания к таким элементам, как стронций и ванадий, недостаточно для того, чтобы иметь реальное представление о фоновом содержании этих элементов в почвах, об особенностях взаимосвязи элементов с основными свойствами почвы, о миграционных потоках Sr и V в системе малого биологического круговорота.

Согласно токсикологическим классификациям элементов различных стран и организаций класс опасности Sr и V варьируется от наиболее опасного (программа ООН) до малоопасного. В большинстве стран мира исследуемые элементы относятся к потенциально опасным для окружающей среды [2]. Фитотоксикологическое воздействие Sr на растения и живые организмы определяется химическим сходством элемента к Ca и замещением его в метаболических процессах. Стронций является элементом интенсивного биологического поглощения (среднее значение 3,0) и характеризуется высокой подвижностью в почвах в широком диапазоне почвенных условий. Ванадий стимулирует процесс фотосинтеза в растениях, дефицит элемента снижает содержание хлорофилла, высокие концентрации V (более 2 ppm в растениях и более 140 ppm в почвенном растворе) вызывают хлороз и замедление роста [2; 9]. Биологическая доступность V в почве зависит от степени его окисления. Наиболее устойчивыми формами V в условиях окружающей среды являются V^{+4} и V^{+5} . Подвижность V^{+4} в почвах более низкая за счет образования гидроксидов и органических комплексных соединений, преимущественно с гуминовыми кислотами [9]. Подвижность V^{+5} считается высокой, однако в почвенном растворе его концентрация может быть снижена за счет специфической обратимой адсорбции с оксидами железа (Fe) и алюминия (Al) [14].

На основе опубликованных данных в почвах, используемых в сельском хозяйстве Швеции и Японии, средняя концентрация V составляет 69 мг/кг и 180 мг/кг соответственно, Sr – 163 мг/кг и 190 мг/кг

соответственно [9]. Одним из наиболее распространенных источников поступления исследуемых элементов в почвы агроценозов является использование фосфорных минеральных удобрений. Содержание Sr и V в фосфоритной муке, суперфосфатах, аммофосе и других фосфорсодержащих удобрениях варьируется от 25 до 500 мг/кг и от 2 до 180 мг/кг соответственно [4; 9]. В настоящее время на территории Российской Федерации не существует нормативных документов, определяющих допустимое содержание Sr и V в удобрениях.

В рамках реализации государственной программы развития Приморского края «Развитие сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия. Повышение уровня жизни сельского населения Приморского края» на 2013–2020 гг. увеличивается площадь земель, используемых в сельскохозяйственном производстве региона [7]. При этом объемы внесения удобрений на данной территории практически не контролируются, что провоцирует изменение элементного состава почв.

Цель и методика исследований

Наиболее подходящим объектом для исследования влияния внесения удобрений на элементный состав почв служат почвы агрохимических стационаров, где на протяжении длительного периода вносились различные виды удобрений, что поможет достоверно оценить влияние внесения удобрений на изменение элементного состава почв.

Целью настоящей работы была оценка влияния длительного внесения минеральных и органо-минеральных удобрений на содержание различных форм Sr и V в почвах агроценозов Приморского края.

В качестве объектов исследования были выбраны агрогумусовые типичные почвы агрохимического стационара Приморского НИИСХ ДВО РАН. Опыт внесения различных видов удобрений проводится на протяжении 77 лет.

Для исследуемого типа почв характерна высокая степень гумусированности и тяжелый гранулометрический состав (содержание глинистых и илистых частиц в верхнем горизонте достигает 80–85 %). Почвы формируются на озерно-аллювиальных отложениях, составляют основной пахотный фонд в Приморском крае и занимают более 50 % сельскохозяйственных угодий [1].

К моменту проведения исследований прошло восемь полных ротаций 9-польного севооборота. В течение этого времени было внесено $N_{2020}P_{3385}K_{2465}$ (в кг д.н.) в составе минеральных удобрений, 320 т/га навоза и 41,6 т/га извести. При подсчете количества внесенных удобрений в опыте с внесением минеральных удобрений учтена замена культур. С 2000 по 2009 г. был заложен дополнитель-

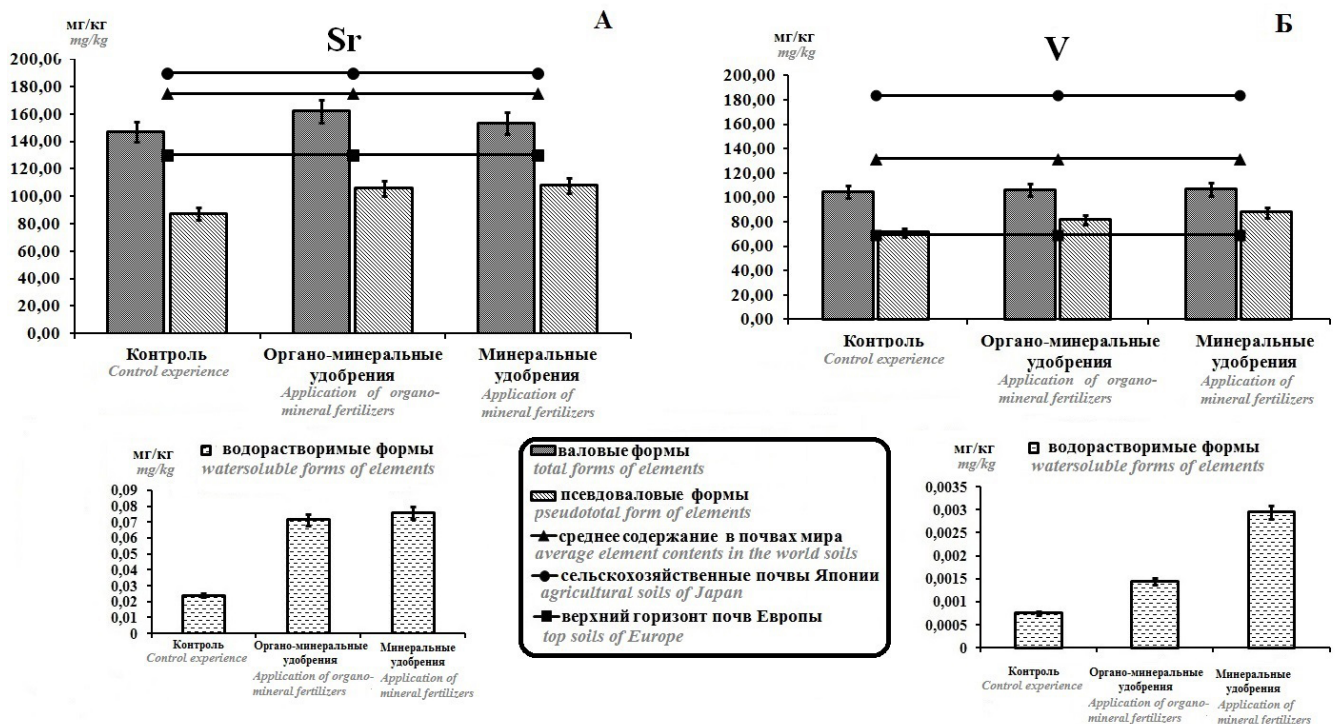


Рис. 1. Распределение различных форм Sr (А) и V (Б) в почвах изученных вариантов опыта
Fig. 1. Distribution of different forms of Sr (A) and V (Б) in soils of studied variants of experience

ный опыт с более высокими (от трех до пяти раз) дозами удобрений и разными способами обработки почвы [3].

Постановка эксперимента в полевых условиях проводилась на делянках в трехкратной повторности, с каждой из которых отбирался смешанный образец почвы на глубину пахотного горизонта ($n = 18$). Площадь делянки – 150 м². В полевом севообороте были выбраны контрольные варианты опытов: без внесения удобрений (контроль), с внесением минеральных (NPK) и органо-минеральных удобрений (PK + навоз + известь). Анализ почвенных образцов был проведен в Центре коллективного пользования «Биотехнология и генетическая инженерия» ФНЦ биоразнообразия ДВО РАН. Содержание валовых форм Sr и V определялось в пахотном слое мощностью до 25 см методом рентгенфлуоресцентной спектроскопии в вакуумной среде, в формате количественного анализа с использованием государственных стандартных образцов. Анализ концентрации элементов в опытных образцах проводился по K-линиям излучения. Восемь сертифицированных эталонных стандартных образцов почв (901 – 76, 902 – 76, 903 – 76, 2498 – 83, 2499 – 83, 2500 – 83, 2507 – 83, 2509 – 83) были использованы для построения калибровочных кривых. Верификация построенных калибровочных кривых проводилась на основе анализа стандартных эталонных материалов. Через каждые пять неизвестных проб анализировался один стандартный образец (2507 – 83).

Помимо валового содержания элементов изучено содержание потенциально доступных для растений

форм Sr и V. Формы элементов, извлекаемые смесью фтористой и азотной кислот по методике, описанной Pansu M. и Gautheyrou J., названы псевдоваловыми согласно исследованиям Нестеровой и др. [5; 6]. Водорастворимые формы элементов извлекались с помощью водной вытяжки при соотношении почва : вода – 1 : 10 [8]. Концентрацию элементов в кислотных и водных вытяжках измеряли с помощью метода атомно-абсорбционной спектрометрии, на атомно-абсорбционном спектрофотометре AA-7000, Shimadzu.

Содержание гумуса определено по методу Тюрина [16]. Величину рН определяли в соответствии с рекомендациями ГОСТ 26483–85 в трехкратной повторности [6].

Концентрации элементов в опытных образцах сравнивались с установленными средними концентрациями элементов в поверхностных горизонтах почв Европы, сельскохозяйственные почвах Японии и почвах мира [9].

Результаты исследования

На основе анализа содержания различных форм Sr и V в почвах агрохимического стационара установлен следующий убывающий ряд в почвах различных вариантов опыта: валовые формы Sr – органо-минеральные удобрения > минеральные удобрения > контроль. Псевдоваловые и водорастворимые формы Sr, а также все исследуемые формы V имеют идентичный ряд распределения: минеральные удобрения > органо-минеральные удобрения > контроль (рис. 1).

Сравнение полученных данных по содержанию валовых форм Sr и V в исследованных почвах

со средними концентрациями этих элементов в почвах Японии, Европы и мира указывает на наличие некоторых превышений установленных значений. Концентрация валовых форм Sr в почвах исследованных вариантов опыта была ниже среднего содержания этого элемента в почвах Японии и в почвах мира и незначительно превышала средний уровень содержания элемента в почвах Европы. Содержание валовых форм V в почвах исследованных вариантов опыта в 1,5 раза превышает среднее содержание этого элемента в почвах Европы.

В почвах контрольных вариантов опыта концентрация валовых форм Sr варьировала от 143 мг/кг до 151 мг/кг. Согласно данным, приведенным Кабата-Пендиас, содержание Sr в сельскохозяйственных почвах Японии варьировало от 32 мг/кг до 130 мг/кг; в пахотных почвах Швеции – от 112 мг/кг до 258 мг/кг [9].

Концентрация валовых форм Sr в почвах при внесении удобрений увеличилась на 10 %, содержание псевдоваловых и водорастворимых форм Sr увеличилось на 20 % и 70 % соответственно (см. рис. 1А). Псевдоваловые формы Sr непрочны закреплены в со-

ставе Si-фазы почв, такие соединения характеризуются большей подвижностью по сравнению с валовыми формами.

Содержание валовых форм V в контрольных вариантах опыта варьировало от 96 мг/кг до 107 мг/кг. Пахотные почвы Швеции характеризуются содержанием V в пределах от 28 мг/кг до 111 мг/кг; сельскохозяйственные почвы Японии – от 94 мг/кг до 250 мг/кг [9].

Внесение органо-минеральных и минеральных удобрений несущественно отразилось на увеличении содержания валовых форм V в почвах (не более 2 %). Увеличение концентрации водорастворимых и псевдоваловых форм V отмечено на уровне 75 % и 19 % соответственно (см. рис. 1Б).

Анализ взаимосвязи содержания различных форм Sr и V в почвах агрохимического стационара выявил ряд особенностей накопления элементов в почвах (рис. 2).

В почвах контрольных вариантов опыта наибольший уровень корреляционной связи валовых форм Sr отмечен с величиной кислотности среды почвенного раствора ($r_{Srвал-pH_{KCl}} = 0,99$) и с Ca-, P-, Mn-содержащими

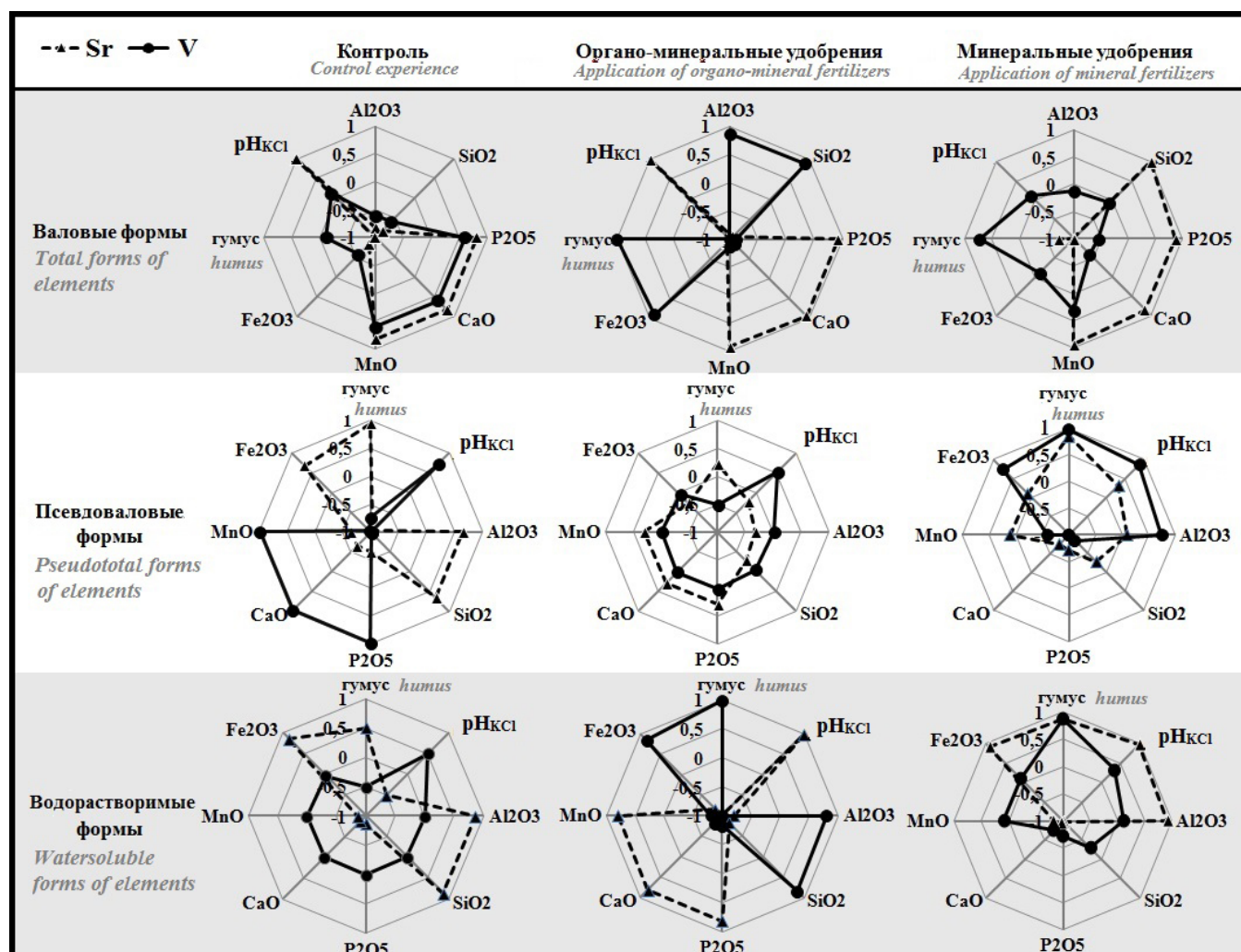


Рис. 2. Коэффициенты корреляции между содержанием Sr и V и физико-химическими свойствами почв
Fig. 2. The correlation coefficients between the contents of Sr and V and the physical-chemical properties of soils

фазами ($r_{\text{Sгвал-Са, -Р, -Мн}}$ 0,82). Содержание псевдоваловых форм Sr в большей степени коррелирует с содержанием гумуса ($r_{\text{Sгпсевдовал.-гумус}}$ 0,95) и указывает на наличие взаимосвязи с Al-, Fe-, Si-содержащими фазами ($r_{\text{Sгпсевдовал.-Al, -Si}}$ 0,65; $r_{\text{Sгпсевдовал.-Fe}}$ 0,68). Водорастворимые формы Sr в почвах контрольных вариантов опыта характеризуются наличием тесной корреляционной связи только с Al-, Fe-, Si-содержащими фазами ($r_{\text{Sгводораст.-Al}}$ 0,87; $r_{\text{Sгводораст.-Fe}}$ 0,85; $r_{\text{Sгводораст.-Si}}$ 0,86).

При внесении органо-минеральных удобрений наблюдается увеличение корреляционной связи валовых форм Sr с Ca-, P-, Mn-фазами ($r_{\text{Sгвал-Са}}$ 0,92; $r_{\text{Sгвал-Р}}$ 0,92; $r_{\text{Sгвал-Мн}}$ 0,91). Основными фазами, контролирующими распределение и накопление водорастворимых форм Sr, в этих вариантах опыта также является содержание Ca-, P-, Mn-фаз ($r_{\text{Sгводораст.-Са, -Р}}$ 0,82; $r_{\text{Sгводораст.-Мн}}$ 0,80) и величина кислотности среды почвенного раствора ($r_{\text{Sгводораст.-рНKCl}}$ 0,99). Значимой корреляционной взаимосвязи псевдоваловых форм Sr с исследуемыми почвенными свойствами в почвах вариантов опыта с внесением органо-минеральных удобрений не обнаружено.

В вариантах опыта с внесением минеральных удобрений происходит увеличение корреляционной связи валовых форм Sr с Ca-, Mn-, P-фазами ($r_{\text{Sгвал-Са}}$ 0,84; $r_{\text{Sгвал-Мн}}$ 0,93; $r_{\text{Sгвал-Р}}$ 0,87) по сравнению с почвами контрольных вариантов опыта. Кроме того, отмечен высокий уровень взаимосвязи Sr с Si-фазами ($r_{\text{Sгвал-Si}}$ 0,99). Псевдоваловые формы Sr в этих вариантах опыта обнаруживают тесную корреляционную связь только с содержанием гумуса ($r_{\text{Sгпсевдовал.-гумус}}$ 0,86). Распределение и накопление водорастворимых форм Sr также контролируется содержанием гумуса ($r_{\text{Sгводораст.-гумус}}$ 0,87); Al-, Fe-фазами ($r_{\text{Sгводораст.-Al}}$ 0,92; $r_{\text{Sгводораст.-Fe}}$ 0,94) и величиной кислотности среды почвенного раствора ($r_{\text{Sгводораст.-рНKCl}}$ 0,98).

В естественных условиях Sr в почвах часто ассоциируется с кальцием и с фосфором в результате сходства геохимических характеристик, а также концентрируется в минералах, содержащих Mn [9]. Анализ взаимосвязи Sr в почвах контрольных вариантов опыта указывает на прочное закрепление элемента в составе прочно связанных соединений с Ca, P, Mn. Основная часть псевдоваловых (потенциально доступных для растений) форм Sr входит в состав органо-минерального почвенного комплекса и в состав минеральной фазы почв. Результаты предыдущих исследований показали, что Sr может накапливаться в почвах в составе гумусовых комплексов [9]. Исследованиями последних лет установлено, что Sr формирует неустойчивые комплексы с органическим веществом и в кислых условиях среды активно мигрирует за пределы почвенного профиля [17]. Результаты, полученные с почв контрольных вариантов опыта, не подтверждают данную тенденцию. От-

сутствие значимой взаимосвязи между содержанием водорастворимых форм Sr и содержанием гумуса в почвах контрольных вариантов опыта указывает на прочное закрепление элемента органическим веществом почвы. Исследованиями ряда авторов установлено, что наибольшее влияние на накопление Sr в почвах оказывают оксиды и гидроксиды Fe и содержание физической глины. В процессе выветривания Sr частично включается в состав вторичных глинистых минералов и накапливается в почвах [9; 10; 13; 17]. В исследуемых почвах на контрольных делянках часть Sr, входящего в состав минеральной фазы почв, находится в легко подвижном состоянии, вероятно за счет закрепления на внешнесферных поверхностных комплексах, и переходит в почвенный раствор. Преобладающим катионом Sr в почвах, который сорбируется глинистыми минералами, оксидами и гидроксидами Fe, является Sr^{2+} . В кислых условиях среды Sr^{2+} мигрирует за пределы почвенного профиля, в щелочных условиях и в почвенных горизонтах, богатых органическим веществом, он накапливается [9]. Однако обогащение поверхностных горизонтов почв Sr обнаружено лишь в промышленных зонах (с поступлением загрязняющих аэрозолей) и в прибрежных зонах (с поступлением морских солей) [9; 17]. В составе вносимых удобрений присутствуют фосфорные удобрения – источник фосфора – и известь – источник кальция, которые в себе несут дополнительные дозы элементов, чем и объясняется увеличение взаимосвязи Sr с Ca- и P-содержащими соединениями. Также отмечается увеличение накопления Sr в составе Mn-фаз. Однако поступление дополнительных доз Sr в вариантах опыта с внесением органо-минеральных удобрений сопровождается формированием легко подвижных соединений Sr с такими фазами-носителями, элемент активно переходит в почвенный раствор. При внесении минеральных удобрений Sr сорбируется на поверхности соединений Al и Fe в составе растворимых комплексов и мигрирует за пределы почвенного профиля.

В почвах контрольных вариантов опыта распределение и накопление валовых и псевдоваловых форм V контролируется содержанием Ca-, P-, Mn-фаз ($r_{\text{Vвал-Са, -Р, -Мн}}$ 0,60; $r_{\text{Vпсевдовал-Са}}$ 0,97; $r_{\text{Vпсевдовал-Р}}$ 0,97; $r_{\text{Vпсевдовал-Мн}}$ 0,97). Дополнительно содержание псевдоваловых форм контролируется величиной кислотности среды почвенного раствора ($r_{\text{Vпсевдовал-рНKCl}}$ 0,73). Для водорастворимых форм V значимой взаимосвязи с исследуемыми почвенными свойствами не обнаружено, низкий уровень корреляционной связи отмечен с величиной кислотности среды почвенного раствора ($r_{\text{Vводораст.-рНKCl}}$ 0,5).

Внесение органо-минеральных удобрений изменяет корреляционную взаимосвязь между содержанием валовых и водорастворимых форм V и иссле-

дуге почвенными свойствами. Распределение и накопление валовых и водорастворимых форм V в почвах контролируется содержанием гумуса ($r_{\text{вал-водораст-гумус}} = 0,99$) и Fe-, Al- и Si-содержащими фазами ($r_{\text{вал-Fe-Si}} = 0,89$; $r_{\text{водораст-Fe}} = 0,84$; $r_{\text{водораст-Si}} = 0,83$; $r_{\text{вал-Al}} = 0,86$; $r_{\text{водораст-Al}} = 0,80$). Псевдоваловые формы V в почвах таких вариантов опыта сохраняют корреляционную связь с величиной кислотности среды почвенного раствора ($r_{\text{псевдовал-рНКС}} = 0,52$). В почвах вариантов опыта с внесением минеральных удобрений корреляционная связь валовых и водорастворимых форм V установлена только с содержанием гумуса ($r_{\text{вал-гумус}} = 0,73$; $r_{\text{водораст-гумус}} = 0,86$). Накопление и распределение псевдоваловых форм V контролируется более широким набором почвенных свойств, таких как величина кислотности среды почвенного раствора ($r_{\text{псевдовал-рНКС}} = 0,87$), содержание гумуса ($r_{\text{псевдовал-гумус}} = 0,98$) и Fe-, Al-фазы ($r_{\text{псевдовал-Fe}} = 0,74$; $r_{\text{псевдовал-Al}} = 0,74$).

В почвах контрольных вариантов опыта приуроченность V к Ca-, P-, Mn-фазам может быть связана с поступлением элемента в ходе естественных процессов выветривания первичных почвенных минералов. Ряд исследований указывает на закрепление V в составе слаборастворимых комплексов с поливалентными катионами, такими как двухвалентный кальций [18]. Дополнительное поступление V с удобрениями приводит к активному закреплению элемента в составе органо-минерального почвенного комплекса и вторичных почвенных минералов, содержащих Fe и Al, но эта связь является непрочной и элемент легко переходит в почвенный раствор. Результаты работ ряда авторов также указывают на тесную взаимосвязь V с оксидами железа в почвах, где V замещает трехвалентное железо, и в составе комплексных соединений, при преобладании окислительной обстановки, накапливается в почвенном профиле [11; 14; 18]. Водорастворимые формы представляют собой доступные для растений соединения, легко мигрирующие по почвенному профилю. Исследованиями ряда авторов установлено, что наиболее подвижной формой V в почвах является катион ванадила (VO_2^+), который преобладает в кислых почвах и образует устойчивые комплексы с органическим веществом

почвы. Анионные формы этого металла VO_3^- , VO_4^{2-} и H_2VO_4^- чаще преобладают при нейтральных и щелочных условиях среды почвенного раствора [9; 14].

Выводы

При длительном внесении удобрений содержание валовых форм Sr увеличилось на 10 %; псевдоваловых форм Sr – на 20 %; водорастворимых форм Sr – на 70 % по сравнению с контрольными вариантами опыта. В почвах контрольных вариантов опыта валовые формы Sr входят в состав прочно связанных соединений с Ca-, P-, Mn-содержащими почвенными компонентами и тесно коррелирует с величиной кислотности среды почвенного раствора. Содержание псевдоваловых форм Sr в большей степени контролируется содержанием гумуса и Al-, Fe-, Si-содержащих фаз. Основным источником водорастворимых форм Sr являются минеральные почвенные компоненты. При внесении дополнительных доз Sr в составе удобрений увеличивается уровень взаимосвязи элемента с Ca-, P-, Mn- и Si-содержащими фазами-носителями. В вариантах опыта с дополнительным поступлением органического вещества установлено увеличение концентрации подвижных форм Sr в почвах за счет образования легко растворимых соединений с данными фазами. При внесении минеральных удобрений основными источниками водорастворимых соединений Sr являются Al- и Fe-содержащие соединения и гумус.

Значимого увеличения концентрации валовых форм V при внесении удобрений не установлено, однако содержание водорастворимых и псевдоваловых форм V увеличилось на 75 % и 19 % соответственно. В почвах контрольных вариантов опыта отмечена приуроченность V к Ca-, P-, Mn-фазам. Содержание псевдоваловых форм контролируется величиной кислотности среды почвенного раствора. Дополнительное поступление V с удобрениями приводит к непрочному закреплению элемента в составе органо-минерального почвенного комплекса и в составе вторичных почвенных минералов, где преобладающими формами V являются псевдоваловые и водорастворимые формы.

Литература

1. Бурдуковский М. Л., Голов В. И., Ковшик И. Г. Изменение агрохимических свойств основных пахотных почв юга Дальнего Востока при длительном сельскохозяйственном использовании // Почвоведение. 2016. № 10. С. 1244–1250.
2. Водяницкий Ю. Н. Загрязнение почв тяжелыми металлами и металлоидами и их экологическая опасность (аналитический обзор) // Почвоведение. 2013. № 7. С. 871–881.
3. Голов В. И., Бурдуковский М. Л., Ознобихин В. И. Роль физических факторов в повышении плодородия пахотных почв юга Дальнего Востока // Вестник ДВО РАН. 2018. № 2. С. 69–76.
4. Литвинович А. В., Лаврищев А. В., Буре В. М., Павлова О. Ю. Моделирование процессов вымывания кальция и стронция из дерново-подзолистой супесчаной почвы, мелиорированной конверсионным мелом // Агрохимия. 2017. № 2. С. 48–55.

5. Нестерова О. В., Трегубова В. Г., Семаль В. А. Использование нормативных документов для оценки степени загрязнения почв тяжелыми металлами // Почвоведение. 2014. № 11. С. 1375–1380.
6. Пансю М., Готеру Ж. Анализ почвы. Справочник. Минералогические, органические и неорганические методы анализа / пер. с англ.; под ред. Д. А. Панкратова. СПб. : Профессия, 2014. 800 с.
7. Постановление от 7 декабря 2012 г. № 392-па об утверждении государственной программы Приморского края «Развитие сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия. Повышение уровня жизни сельского населения Приморского края» на 2013–2020 гг. (с изм. на 9 апреля 2018 г.).
8. Савосько В. Н. Тяжелые металлы в почвах Кривбасса : моногр. Кривой Рог : Дионат, 2016. 288 с.
9. Alloway B. J. Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability. 3rd ed. L. : Springer, 2013. 613 p.
10. Dinu M. I. Interaction between metal ions in waters with humic acids in gley-podzolic soils // Geochem. Int. 2015. 53(3). P. 265–276.
11. Guagliardi I., Cicchella D., De Rosa R., Ricca N., Buttafuoco G. Geochemical sources of vanadium in soils: Evidences in a southern Italy area // Journal of Geochemical Exploration. 2018. 184. P. 358–364.
12. Jeske A., Gworek B. Content and mobility of strontium in forest soils according to north-south transect in Poland // Archives of environmental protection. 2013. V. 39. № 4. P. 113–122.
13. Kuznetsov P. V., Chuparina E. V., Proidakova O. A., Aisueva T. S. Specifics of strontium accumulation in the floodplain soils of the Kuda River, Irkutsk Region // Geochemistry International. 2017. V. 55. № 3. P. 299–305.
14. Palmer Sh., Cox S. F., McKinley J. M., Ofterdinger U. Soil-geochemical factors controlling the distribution and oral bioaccessibility of nickel, vanadium and chromium in soil // Geochemistry. 2014. 51. P. 255–267.
15. Skupinski S., Solecki J. Studies of strontium (II) sorption on soil samples in the presence of phosphate ions // Journal of Geochemical Exploration. 2014. 145. P. 124–128.
16. Minkina T. M., Pinskii D. L., Zamulina I. V., Nevidomskaya D. G., kun Gülser C., Mandzhieva S. S., Bauer T. V., Morozov I. V., Sushkova S. N., Kizilkaya R. Chemical contamination in upper horizon of Haplic Chernozem as a transformation factor of its physicochemical properties // J. Soils Sediments. 2018. 18.2. P. 418–2430.
17. 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. Soils Sediments. 2018. 18. P. 968–982.
18. Tracey A. S., Willsky G. R., Takeuchi E. S. Vanadium: Chemistry, Biochemistry, Pharmacology and Practical Applications. N. Y. : CRC press, 2015. 250 p.

References

1. Burdukovskiy M. L., Golov V. I., Kovshik I. G. Changes in the basic agrochemical properties of arable soils in the South of the Far East with long-term agricultural use // Soil science. 2016. No. 10. P. 1244–1250.
2. Vodyanitsky Yu. N. Soil contamination with heavy metals and metalloids and their environmental hazard (analytical review) // Soil science. 2013. No. 7. P. 871–881.
3. Golov V. I., Burdukovsky M. L., Oznobishin V. I. Role of physical factors in increasing the fertility of arable soils in the South of the Far East // Bulletin of DVO RAS. 2018. No. 2. P. 69–76.
4. Litvinovich A. V., Lavrishev A. V., Bure V. M., Pavlova O. Yu. Modeling of processes of calcium and strontium leaching from sod-podzolic sandy loam soil, reclaimed conversion chalk // Agrochemistry. 2017. No. 2. P. 48–55.
5. Nesterova O. V., Tregubova V. G., Semal V. A. The use of normative documents to assess the degree of soil contamination with heavy metals // Soil science. 2014. No. 11. P. 1375–1380.
6. Pansu M., Hotaru J. Soil Analysis. Handbook. Mineralogical, organic and inorganic methods of analysis / translated from English; ed. by D. A. Pankratov. SPb. : Profession, 2014. 800 p.
7. Resolution of December 7, 2012 No. 392-PA on approval of the state program of Primorsky region «Development of agriculture and regulation of markets for agricultural products, raw materials and food. Improving the standard of living of the rural population of Primorsky region» for 2013–2020 (with changes for April 9, 2018).
8. Savos'ko V. N. Heavy metals in the soils of Krivoi Rog basin : monograph. Krivoi Rog : Publishing House Di-anat, 2016. 288 p.
9. Alloway B. J. Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability. 3rd ed. L. : Springer, 2013. 613 p.
10. Dinu M. I. Interaction between metal ions in waters with humic acids in gley-podzolic soils // Geochem. Int. 2015. 53(3). P. 265–276.
11. Guagliardi I., Cicchella D., De Rosa R., Ricca N., Buttafuoco G. Geochemical sources of vanadium in soils: Evidences in a southern Italy area // Journal of Geochemical Exploration. 2018. 184. P. 358–364.

12. Jeske A., Gworek B. Content and mobility of strontium in forest soils according to north-south transect in Poland // Archives of environmental protection. 2013. V. 39. No. 4. P. 113–122.
13. Kuznetsov P. V., Chuparina E. V., Proidakova O. A., Aisueva T. S. Specifics of strontium accumulation in the floodplain soils of the Kuda River, Irkutsk Region // Geochemistry International. 2017. V. 55. No. 3. P. 299–305.
14. Palmer Sh., Cox S. F., McKinley J. M., Ofterdinger U. Soil-geochemical factors controlling the distribution and oral bioaccessibility of nickel, vanadium and chromium in soil // Geochemistry. 2014. 51. P. 255–267.
15. Skupinski S., Solecki J. Studies of strontium (II) sorption on soil samples in the presence of phosphate ions // Journal of Geochemical Exploration. 2014. 145. P. 124–128.
16. Minkina T. M., Pinskiy D. L., Zamulina I. V., Nevidomskaya D. G., kun Gülser C., Mandzhieva S. S., Bauer T. V., Morozov I. V., Sushkova S. N., Kizilkaya R. Chemical contamination in upper horizon of Haplic Chernozem as a transformation factor of its physicochemical properties // J. Soils Sediments. 2018. 18.2. P. 418–2430.
17. 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. Soils Sediments. 2018. 18. P. 968–982.
18. Tracey A. S., Willsky G. R., Takeuchi E. S. Vanadium: Chemistry, Biochemistry, Pharmacology and Practical Applications. N. Y. : CRC press, 2015. 250 p.