

УДК 502.1:502.55

Влияние фторсодержащих соединений на живые организмы (обзор)

© 2017. Е. А. Горностаева, к. б. н., старший преподаватель,
С. Л. Фукс, к. т. н., доцент,
Вятский государственный университет,
610000, г. Киров, ул. Московская, 36,
e-mail: g_lentochka@mail.ru

Ухудшение экологической ситуации из-за многостороннего загрязнения биосферы соединениями фтора требует обстоятельного исследования и оценки всех источников поступления фторсодержащих поллютантов в окружающую природную среду. Техногенное воздействие является существенным фактором, влияющим на устойчивость почв и грунтов. Вблизи крупных промышленных предприятий нередко формируются аномальные области загрязнения почв, отличающиеся изменённой структурой и составом комплексов микроорганизмов по сравнению с незагрязнёнными почвами. В условиях фторидного загрязнения наблюдается нарушение жизнедеятельности растений. Фторсодержащие соединения проявляют острую токсичность по отношению к животным и человеку.

Ключевые слова: фторсодержащие соединения, почвенные микроорганизмы, животные, растения.

The effect of fluorinated compounds on living organisms (review)

E. A. Gornostaeva, S. L. Fuks,
Vyatka State University,
36 Moscovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
e-mail: g_lentochka@mail.ru

The environmental degradation caused by diverse pollution of the biosphere with fluorine compounds requires a thorough study and assessment of all sources of fluoride pollutants in natural environment. The issue of fluorine compounds pollution of the areas directly adjacent to the enterprises which are the sources of pollution is especially urgent. Anthropogenic impact is a significant factor affecting the soil stability. One of the criteria of fluoride contamination of soil is the exceeding level of gross and soluble forms of fluorine compounds, as compared to the background area. The toxicity of high concentrations of fluorinated compounds has a negative impact on the main indicators of soil fertility. High level of pollution affects transformation of organic matter, it can cause degradation of humic substances. In the process of substrate oxidation highly toxic free radicals are formed, their appearance leads to damage processes of cells of the organisms. So, in the vicinity of polluting enterprises abnormal regions are formed, which are characterized with changes in structure and composition of microorganisms complexes as compared to unpolluted soils. Raise in the level of fluoride in soil leads to a significant decrease in the number of microorganisms, it suppresses their growth, and reduces species diversity of the microbial complexes. In case of fluoride contamination when fluoride concentration exceeds the limit of sustainability, violation of vital activity of plants takes place, such as inhibition of growth, leaf injury (destruction of chlorophyll pigment, tissue necrosis, etc.), and, in extreme cases, loss of sensitive species takes place. Fluorine-containing compounds are acutely toxic for animals and humans. High level of pollution with fluorine compounds has a negative impact on soil invertebrates communities. This is reflected in decline in taxonomic and trophic diversity, as well as in changing the structure of dominance and aggregation of animals.

Keywords: fluoride compounds, soil microorganisms, animals, plants.

В последние годы в результате производственной деятельности человека заметно усилилась техногенная нагрузка на экосистемы. Среди загрязняющих веществ особую опасность для живых организмов представляют соединения

фтора [1]. Известно, что высокие концентрации фторсодержащих соединений (ФСС) приводят к нарушениям функционирования экосистем, загрязнению почвы и растений, оказывают отрицательное влияние на здоровье человека

и животных [2–4]. Химия фтора отличается специфичностью, которая проявляется в высокой реакционной способности элемента и в своеобразии свойств ФСС. Фтор образует соединения со всеми элементами периодической системы, даже с инертными газами [1, 5–6].

Основными источниками выбросов ФСС являются металлургические предприятия, энергетические установки, производство фосфорных удобрений и фосфорной кислоты. При производстве последней отходящие газы содержат до 70–75% фтороводорода. Дополнительным источником загрязнения биосферы соединениями фтора являются сталелитейные, кирпичные и стекольные заводы [7].

Особенно остро возникает проблема локального загрязнения ФСС территорий, непосредственно прилегающих к предприятиям, являющимся источниками загрязнения [6, 8–10]. Так, при производстве алюминия в России наблюдаются значительные потери ФСС, которые приводят к негативным последствиям в сфере экологии [11–12]. В частности, в районах расположения алюминиевых заводов концентрация ФСС в воздухе в среднем составляет 1–5 мкг/м³ [13].

Фторсодержащие соединения в почве.

Почва – первоочередной объект исследования в условиях выраженного техногенного воздействия, которое является важнейшим фактором, влияющим на устойчивость почв [14]. Поступление ФСС в почвы и грунты происходит в основном за счёт выбросов предприятий, фосфорных удобрений и химических мелиорантов [15]. Содержание элемента в почвах и грунтах зависит от их физико-химических свойств и определяется интенсивностью сельскохозяйственного использования [16], а также может происходить и в ходе работы объектов по уничтожению химического оружия [17].

Почва, обладая высокими сорбционными свойствами, способна поглощать вещества из атмосферы, поэтому по мере приближения к предприятиям-загрязнителям наблюдается резкое повышение содержания ФСС в почвах и грунтах [18–21]. Например, выявлено существенное накопление фторидов в лесной подстилке в зоне действия Кандалакшского алюминиевого завода (Al-Fe-гумусовые подзолы): в зоне максимального загрязнения (2 км до завода) содержание ФСС выше ПДК в 5 раз, в зоне умеренного загрязнения (5–10 км) – выше ПДК в 2 раза.

ФСС, попадая в почву, могут частично закрепляться кристаллической решёткой глинистых минералов и химическими соеди-

нениями разной степени растворимости [17]. Щелочные и слабощелочные, богатые кальцием чернозёмы, каштановые почвы химически прочно связывают выбросы ФСС, попадающие на поверхность почв из атмосферы, переводя их в нерастворимые фторапатитовые, флюоритные и другие соединения [22].

Главным критерием оценки фторидного загрязнения почв и грунтов является превышение уровня содержания валовых и растворимых форм ФСС над фоном. Согласно литературным данным, фториды относятся к сильным водным мигрантам в широком диапазоне сочетаний условий миграции, подобно магнию, кальцию и стронцию. В связи с этим фториды могут быстро переходить в почвенный раствор. Установлено, что от суммарного количества элементов, поступающих в экосистемы, растворимые ФСС составляют 80%. Таким образом, потенциально опасным является не общее количество ФСС в почве, а наличие подвижных форм, способных мигрировать во все горизонты почвенного профиля [8, 23]. В частности, при сравнении валового содержания ФСС в почвах Северо-Западного Причерноморья Украины показано, что за счёт поступления влаги с оросительными водами происходит постепенный переход валовых форм в растворимые [16]. Установлено, что орошение слабоминерализованными щелочными водами может приводить к значительному увеличению концентраций водорастворимых ФСС в пахотном слое почв Барабинской равнины, в среднем на 1,5–2,0 единицы [24].

По литературным данным, содержание водорастворимых соединений фтора в почвах и грунтах соизмеримо с изменением значений pH. С ростом данного показателя происходит замещение фторид-иона, связанного с аморфными гидроксидами и глинистыми минералами, и возрастание концентрации фтора в почве. Смещение значений pH в щелочную сторону ведёт к увеличению растворимости ФСС в почве, приводит к попаданию и накоплению их в питьевой воде и сельскохозяйственной продукции [24].

Низким содержанием обменных катионов отличаются антропогенно-преобразованные серые лесные почвы сильной и слабой степени нарушенности, находящихся в зоне действия Иркутского алюминиевого завода. Это характеризует низкую ёмкость катионного обмена и небольшую степень насыщенности основаниями почвенного поглощающего комплекса [8]. В других работах показано, что трансформация ФСС может выражаться в относительном

уменьшении водо- и кислоторастворимых соединений [23]. Расчёты баланса углерода с использованием средних многолетних данных в агроэкосистемах Байкальского региона показывают, что в загрязнённых ФСС почвах дефицит углерода выше, чем в незагрязнённых [25].

Высокие концентрации фторсодержащих соединений отрицательно влияют и на основные показатели почвенного плодородия [20, 26]. На примере Байкальского региона было показано, что гумусное состояние почвы в техногенно-загрязнённых фторидами серой лесной и дерново-луговой пахотных почвах, загрязнённых выбросами алюминиевого завода ИркАЗ-СУАЛ, в составе которых в основном преобладают твёрдые отходы (NaF), связано с повышением подвижности гумусовых веществ. Свойства почв определяет их буферность по отношению к фторидам и их содержанию в водорастворимой форме. С повышением уровня загрязнения фторидами увеличивается плотность и снижается пористость почвы, что влияет на трансформацию органического вещества [20].

Водорастворимый фтор может связываться в верхних гумусовых горизонтах почвы за счёт образования малорастворимых соединений, например, в виде солей алюминия и кальция [27]. Количество валового и растворимого фтора в почвах Северо-Западного Причерноморья зависит от содержания в них гумуса [16].

Высокий уровень загрязнения ФСС может вызывать деструкцию гумусовых веществ [28]. Так, антропогенно-преобразованные серые лесные почвы в зоне действия Иркутского алюминиевого завода отличаются более низким содержанием гумуса (в 1,5–2 раза) по сравнению с фоновыми, что указывает на их меньшую буферную способность [8]. Изменение качественного состава гумуса было отмечено и при высоком уровне ФСС в тёмно-каштановой почве предгорной зоны: более чем в 1,5 раза повышается растворимость гумусовых веществ. Присутствие соединений фтора в почве благоприятствовало увеличению содержания общего гумуса в варианте с органическими добавками (гумат аммония, биоорганика) [15].

Важным экологическим показателем почвы является её ферментативная активность [29–31]. Имеются данные о снижении ферментативной активности некоторых почв при добавлении в почву фторида натрия [32]. С увеличением дозы ФСС в почве активность каталазы, инвертазы и протеазы снижается до 2,2 раза [33]. Уменьшение биологической активности почвы, увеличение щёлочности

наблюдалось при высоких дозах ФСС в предгорной зоне в тёмно-каштановой почве [15]. В других исследованиях выявлено, что в условиях повышенного техногенного воздействия на лесные территории в лесной подстилке, почве и напочвенной растительности, вокруг предприятий по производству алюминия и криолита происходит накопление ФСС, обладающих высокой биологической и химической активностью [23].

Фтор в силу своей окислительной активности способствует образованию перекисных соединений. В процессе окисления субстрата в присутствии пероксидазы образуются высокотоксичные и высокореагентные свободные радикалы, появление которых чревато процессами повреждения клеток организмов [19]. Поэтому вблизи предприятий-загрязнителей формируются аномальные области, отличающиеся изменённой структурой и составом комплексов микроорганизмов (МО) по сравнению с незагрязнёнными почвами [28, 33]. Сообщества МО адаптируются к данным условиям: у одних видов – за счёт физиологических механизмов, у других МО – благодаря генетической изменчивости и наследственности. Так, у бактерий в лесной подстилке в зоне действия Полевского криолитового завода и Первоуральско-Ревдинского промышленного узла наблюдается низкая затрата энергии на поддержание своей жизнеспособности, по сравнению с эукариотными МО [19]. Анализ микробиологической активности почв в зоне действия Братского алюминиевого завода позволяет сделать вывод, что процесс азотфиксации, происходящий в почве, резко уменьшается в радиусе 8 км от предприятия и постепенно возрастает на удалении 20 км. Таким образом, полного подавления биологической активности почвы не наблюдается, что также свидетельствует о развитии устойчивых к ФСС организмов [11]. Поэтому при оценке состояния почв крайне целесообразно изучать состояние почвенной микробиоты [33–36]. Например, в модельных опытах, проведённых с *Bacillus subtilis*, при воздействии HF доказано, что чем выше концентрация поллютанта, тем более резко идёт спад численности популяций этих бактерий [33]. Предложен способ биоиндикации серых лесных почв по доминированию в них представителей грибов р. *Penicillium* и бактерий р. *Bacillus* [4].

Под влиянием воздушных выбросов Кандалакшского алюминиевого завода происходит изменение структурных показателей сообществ почвенных МО. Известно, что вы-

сокие концентрации фторид-ионов приводят к ингибированию ряда ферментных реакций, к связыванию биогенных элементов (Са, Р, Mg и др.), что нарушает их баланс в живых организмах. Отмечено, что вблизи завода происходит подщелачивание почвы выбросами, содержащими фториды щелочных металлов – с рН 4,05 до 5,75 [37].

При изучении эколого-биохимических и биохимических особенностей почвы под влиянием выбросов алюминиевых заводов Восточной Сибири установлено, что в антропогенно-преобразованной дерновой лесной почве подтайги под влиянием водорастворимых соединений фтора (10–20 ПДК в слое почвы 0–10 см) наибольшее угнетение испытывают актиномицеты и хемоорганотрофные неспорообразующие эубактерии. Снижение уровня биохимической активности под действием ФСС (1–4 ПДК) наблюдается в малогумусном чернозёме степи в слое почвы на глубине 0–10 см [9].

Ингибирование почвенных МО отмечено и в исследованиях, проведённых на тёмно-каштановых почвах в предгорной зоне. Показано, что фториды в повышенных концентрациях (в дозе более 50 мг/кг) ингибируют их активность [15]. Другими авторами показано, что при концентрации ФСС, равной 10 мг/кг, в серой лесной почве не происходит нарушения видового состава и структуры микробного комплекса. Повышение уровня ФСС в почве ведёт к заметному снижению численности микробиоты, подавлению роста и уменьшению видового разнообразия микробных комплексов. Убывающий ряд почвенной микробиоты по устойчивости к фторидам для серой лесной почвы имеет вид: спорообразующие бактерии > микроскопические грибы > аспорогенные бактерии > актиномицеты [4].

Исследование количественного состава и биохимической активности почвенных МО в условиях влияния Красноярского алюминиевого завода показало, что загрязнение почв ФСС на уровне от 500 мг/кг и более подавляет развитие различных таксономических групп МО, снижая их численность, по сравнению с контрольными участками. Наиболее чувствительной к загрязнению фторсодержащими соединениями оказалась неспоровая бактериальная микрофлора, включая актиномицеты. Наиболее устойчивыми к воздействию фтористого водорода являются микромицеты и бациллы. Их численность увеличивалась с возрастанием концентрации токсиканта в почве [33]. Нарушение соотношения между МО

в микробных комплексах, увеличение бактериального спорообразования было выявлено в подстилке лесных почв сосновых насаждений в зоне действия Полевского криолитового завода и Первоуральско-Ревдинского промышленного узла, где приоритетными загрязнителями являются фтористые соединения. Растительный опад характеризовался наличием труднорастворимых соединений, присутствием фторид-иона, который инициирует образование перекисных соединений из-за своей окислительной способности [19].

Вблизи Кандалакшского алюминиевого завода показано, что количество бактерий, в том числе и актиномицетов, в почвах, загрязнённых ФСС, существенно возрастает. Длина мицелия актиномицетов в почве наиболее загрязнённого участка в 7 раз превосходила подобный показатель в почвах участков, удалённых от источника выбросов более чем на 10 км. Вероятнее всего, благоприятное воздействие на них оказало повышение рН почвы под действием фторидов щелочных металлов более чем на 1,7 единицы. Выявлена высокая чувствительность почвенных микроскопических грибов к загрязнению среды обитания соединениями фтора. Количество грибных зачатков в органогенном горизонте участка, расположенного в 2 км от завода, в 5 раз меньше их количества в почве участков в 10 и 20 км от завода [37]. Изменение соотношения тёмно- и светлоокрашенного мицелия в сторону увеличения пигментированного мицелия отмечали в лесной подстилке в зоне действия Полевского криолитового завода и Первоуральско-Ревдинского промышленного узла. В целом преобладание тёмноокрашенных форм мицелия микромицетов свидетельствует о высокой техногенной нагрузке на почву. Условия, сложившиеся в санитарной зоне предприятий, не способствуют развитию грибов, играющих первостепенную роль в разложении растительного опада. Происходит ингибирование процессов роста и развития микромицетов, наблюдается увеличение интенсивности их спорообразования [19, 34].

Фторсодержащие соединения в растениях. Фтор не относится к необходимым элементам для роста и развития растений, поэтому даже небольшие концентрации соединений фтора являются токсичными [6, 38]. В условиях фторидного загрязнения наблюдается нарушение жизнедеятельности растений: угнетение роста, разрушение хлорофилла, некроз тканей, деформация листьев, вплоть до гибели чувствительных видов [11, 17]. Признаки поражения ФСС наблю-

даются уже через 1–3 дня при концентрации 0,8 мг HF/м³ в воздухе и при содержании 0,25–0,30 мг HF/м³ в течение всего вегетационного периода [38].

Растения могут поглощать ФСС через корневую систему. Поступление ФСС в растение, а также изменение его миграционных свойств зависит от формы соединения, свойств почвы (кислотности, механического и минералогического составов). Поступая в почву, ФСС могут поглощаться растениями из почвы путём пассивной диффузии и легко переноситься в растительные ткани [7, 17, 23]. В первую очередь доступны растениям водно-кислоторастворимые формы [39]. Доказано, что плавиновый шпат, перемещаясь в водной среде, может образовывать дисперсные системы в виде аэрозолей, эмульсий, суспензий, которые, осаждаваясь на поверхности почв, могут привести к поглощению их растениями [4].

Доступность фтора для растений обычно не зависит от его общего содержания или количества растворимых форм. Однако в отдельных случаях отмечается прямая зависимость между содержанием этого элемента в растениях и его распределением в почвах. На примере лесных почв отмечено, что чем выше степень загрязнения почв, тем больше фторидов аккумулируется в растениях. В лесной почве в зоне действия Полевского криолитового и Богословского алюминиевого предприятий максимум поглощения элемента отмечали в 1,5 км от источника загрязнения. Высокие концентрации соединений фтора зарегистрированы в вейнике наземном – 58 мг/кг, в листьях земляники – 90 мг/кг, в коре сосны – 1625 мг/кг [23].

Различия в содержании ФСС в подстилках обусловлены разным уровнем антропогенного воздействия. В зоне действия Кандалакшского алюминиевого завода наблюдается накопление этого элемента в надземных частях вороники чёрной: с возрастанием содержания соединений фтора в подстилках увеличивалось его содержание и в растении, причём показатели коррелировали между собой ($r = 0,976$). Таким образом, повышенный фон содержания соединений фтора в почвах приводит к существенному накоплению его в тканях растений.

Особенно интенсивно накапливают фтор зелёные листостебельные мхи [21]. Некоторые виды растений могут накапливать фториды, вероятнее всего, за счёт образования комплекса с алюминием [47]. Это свидетельствует о том, что лесная растительность является мощным биологическим аккумулятором поллютантов, поэтому может служить чувствительным и

надёжным индикатором, способным сигнализировать о загрязнении окружающей среды.

Получены результаты по исследованию реакции аденилатциклазной сигнальной системы различных сельскохозяйственных культур на фторидное загрязнение почвы. В связи с этим изменение активности данной сигнальной системы растений при фторидном загрязнении можно использовать как диагностический показатель состояния почвы [39].

Особую опасность для экосистем представляет загрязнение агроценозов из-за накопления соединений фтора в товарной части сельскохозяйственной продукции. Это подтверждается данными по извлечению ФСС растениями на полях. Показано, что длительное применение суперфосфата повысило содержание ФСС в почве на 90% по сравнению с контролем. Существуют данные, свидетельствующие об очень высокой аккумуляции соединений фтора в семенах растений (до 3250 мг/кг сухой массы при содержании ФСС в растворе 50 мг/кг). Например, во Франции, где продолжительное время применялись высокие дозы минеральных удобрений, содержание ФСС в пищевых продуктах достигало до 10 мг/кг в сухом веществе. Установлено, что степень поглощения ФСС люцерной и пшеницей положительно коррелирует с его концентрацией в почвенном растворе [7, 13].

Установлено, что возрастающие концентрации компонентов маточных растворов – отходов производства фторопластов, приводят к снижению продуктивности ярового ячменя сорта Эльф. Это проявляется в снижении количества семян и их биомассы. При действии данных соединений происходит накопление фторид-ионов в семенах в количествах, токсичных для животных и человека. При этом происходит перераспределение фторид-ионов по органам – наибольшее накопление наблюдается в корне [40].

В опытах с ячменём сорта Новичок показано, что корневая система растений является чувствительной к действию фторида натрия, о чём свидетельствует активация пероксидаз и интенсификация процессов перекисного окисления липидов. Окислительные повреждения липидов мембран приводят к выходу электролитов, что ведёт к нарушению водного обмена клеток и тканей. Также наблюдается снижение темпов накопления биомассы [47].

Хотя растения могут довольно легко извлекать фтор из загрязнённых почв, более активно он поглощается растениями из воздуха. Даже незначительные концентрации фторидов

в атмосфере наносят огромный вред растениям [38, 41]. Растения аккумулируют ФСС, поступающие из атмосферы через устьица, особенно вблизи крупных промышленных центров. Растворимые соединения фтора также могут адсорбироваться через кутикулу в случае попадания их на листовую пластинку. Сначала ФСС накапливаются в покровных тканях, затем проникают в мезофилл листьев и адсорбируются оболочками клеток, нарушается нормальное функционирование плазмалеммы – поллютант проникает в цитоплазму, накапливается в жизненно важных органоидах клеток, например, в хлоропластах. Так, концентрация фтора в растении может возрастать от 10 до 100 раз [7, 13]. Известно, что концентрация фторид-ионов в фасоли и томатах, выращенных вблизи алюминиевого завода, увеличивалась пропорционально его содержанию в атмосфере [42].

Отмечено, что более высокие концентрации ФСС обычно характерны для надземных частей растения. Например, на территории Красноярска выявлены симптомы поражения листьев купены лекарственной в течение всего вегетационного периода. Выявлена взаимосвязь степени поражения листьев с уровнем накопления в них фторид-иона [38]. Используя такие биоиндикаторы, как чёрная смородина и берёза, выявили, что ФСС в основном поглощают надземные части, а не корни [13].

Как правило, содержание ФСС в растениях незагрязнённых территорий не превышает 30 мг/кг сухой массы [7, 13, 43–44]. В целом наименьшее количество ФСС накапливается в овощных культурах. Среди многолетних трав сильными аккумуляторами фтора являются злаки и разнотравье. При содержании в почве фторид-ионов в количестве 210 мг/кг их содержание в разнотравье составляло 158 мг/кг [45].

Выявлено, что в полевых условиях под влиянием промышленных выбросов, содержащих ФСС, солома и зерно ячменя, пшеницы и овса являются загрязнёнными при содержании водорастворимых ФСС в почве более 1 ПДК [13]. Для растений райграса *Lolium multiflorum* отмечено, что при содержании ФСС в почве на каждые 100 мг/кг увеличивалась концентрация соединений в надземной части растений. Так, при первом укосе содержания ФСС в растении возрастало на 18 мг/кг сухой массы, при втором укосе – на 8 мг/кг, при третьем укосе – на 5 мг/кг. Следовательно, в надземной биомассе фтор накапливался в количестве 31% от вносимой дозы ФСС [46].

Имеются данные об устойчивости и чувствительности к воздействию ФСС некоторых

дикорастущих и культурных растений, которые зависят от особенностей генотипа, ряда биологических и природных факторов. К устойчивым к действию ФСС растениям относят спаржу, фасоль, капусту, морковь. Наиболее устойчивыми древесными растениями являются лиственные породы по сравнению с хвойными. К чувствительным видам относятся ячмень, кукуруза, овёс, гладиолус, абрикос, сосна, лиственница [11].

Оценка состояния древостоя в санитарно-защитной зоне Братского завода свидетельствует о сильном влиянии загрязнения на их жизнеспособность. Отмечено изменение таксационных показателей древостоев, их жизнеспособности, уменьшения продолжительности жизни деревьев до 30 лет. Средний балл категории состояния деревьев составлял 3 балла, что свидетельствует об ослабленности растительности. Воздействие ФСС на растения приводило к угнетению процесса фотосинтеза, к ожогам и отмиранию листьев и хвои [11].

Некоторые виды растений могут не только аккумулировать ФСС, но и специфически реагировать на фторидное загрязнение (*Pinus*, *Eucalyptus*, *Berberis*, *Convallaria*, *Gladiolus* и др.) [38].

Фторсодержащие соединения в организме животных и человека. Известно, что фтор является жизненно важным микроэлементом для осуществления жизнедеятельности животных и человека [6].

В начале XX века стало известно, что недостаток фтора в организме вызывает появление кариеса. Многочисленные работы медиков во всём мире показывают корреляцию между недостатком фтора в питьевой воде и процентом заболеваемости кариесом. Например, большинство населения (до 81%) рудничных поселков страдают кариесом зубов. Установлена ориентировочная граница минимума содержания фтора: 0,8–1,0 мг/л воды. Недостающий фтор восполняют фторированием воды, введением фторсодержащих препаратов в зубные пасты и эликсиры и т. п.

Однако повышенное содержание ФСС также крайне опасно. В больших концентрациях ФСС способствуют возникновению флюороза. Поскольку поллютант способен накапливаться в корме животных, то у животных тоже возможно развитие флюороза. Также может нарушаться синтез коллагена, работа иммунной системы (атакуются собственные ткани организма), функции воспроизводства потомства, наблюдается разрушение костей, заболевание почек, возникают глазные и нервные болезни.

Государственный стандарт на питьевую воду ограничивает верхний предел содержания фтора в ней на уровне 1,5 мг/л. При передозировке элемента наблюдается тошнота, рвота с кровью, диарея, боли в животе и т. д. Токсическое действие ФСС может привести даже к смертельному исходу [1, 6, 43, 47].

По деструктивному действию фтор стоит сразу же после ртути, проявляет острую токсичность по отношению к животным и человеку [6]. Особенностью соединений фтора является их кумулятивное действие и образование высокотоксичных соединений [37].

Известно, что фториды накапливаются в сыворотке крови, молоке, моче, костях. Например, у животных ФСС сначала аккумулируются в костях и твёрдых покровах, а затем – в мягких тканях [6]. В частности, содержание фторидов в костях малой лесной мыши *Sylvaeomys uralensis* Pallas, обитающей в техногенной зоне Южного Урала, составило 6000 мг/кг, в то время как в контрольном варианте было не более 500 мг/кг. Для характеристики морфологической изменчивости животного была изучена форма его нижней челюсти. При высоком содержании ФСС нижняя челюсть мыши становилась более массивной, укорачивалась резцовая часть, удлинялся и вытягивался в каудальном направлении венечный отросток [48].

В исследованиях, проведённых в районах воздействия Красноярского алюминиевого завода на тёмно-бурых пойменных почвах, определено снижение обилия почвенной мезофауны с увеличением содержания фтора в почве. Наиболее явная корреляционная зависимость наблюдалась у имаго и личинок жуков стафилинов, жужелиц и личинок двукрылых. Практически не встречались кольчатые черви: дождевые и энхитреиды. Потому данные группы организмов можно использовать в качестве тест-организмов на загрязнение почв и грунтов ФСС [35].

Изучение влияния промышленного загрязнения почвы Кандалакшского алюминиевого завода фторсодержащими выбросами на структурные показатели беспозвоночных животных также показало, что высокий уровень загрязнения среды ФСС негативно воздействует на сообщество почвообитающих беспозвоночных. Это выражается в снижении таксономического и трофического разнообразия, общей биомассы мезофауны и численности ряда групп беспозвоночных, смене структуры доминирования и агрегирования животных. Показано, что для насекомых-фитофагов среди соединений фтора наиболее опасен фтористый

водород, оказывающий прямое токсическое действие на исследуемые организмы. По данным ряда авторов, концентрация ФСС в теле различных видов насекомых достигает, мкг/г: у саранчовых – 20, жужелиц – 50, муравьев – до 130. Содержание этого элемента в организме чешуекрылых (пяденицы) и клопов в зоне промышленных выбросов может превышать контрольные значения более чем в 250 и 200 раз соответственно [21, 37]. Также показано, что по мере приближения к промышленным предприятиям – Кандалакшскому алюминиевому заводу и медно-никелевому комбинату «Североникель» происходит снижение численности такого членистоногого, как многоножка-костянка *Monotarsobius curtipes*. Выявлено преобладание взрослых особей в популяции, смещение половой пропорции в сторону самцов, что говорит о нарушении нормальных процессов размножения и развития организмов. Данные показатели можно использовать в качестве биоиндикаторов техногенной трансформации почв [49].

Заключение

Фторсодержащие соединения являются потенциально опасными как для почвы, так и для организмов, обитающих в данной среде. Доказано, что ФСС негативно влияют на основные показатели почвенного плодородия и ферментативную активность почв. В результате воздействия ФСС в клетках живых организмов накапливаются перекисные соединения – высокотоксичные и высокореагентные свободные радикалы, что приводит к клеточным повреждениям. В условиях загрязнения ФСС происходит снижение численности микробиоты, подавление её роста, уменьшение видового разнообразия микробных комплексов, изменение их структуры.

Губительное воздействие ФСС оказывают и на растения. Даже небольшие количества фтора являются фитотоксичными, приводя к нарушению жизнедеятельности растений. В то же время некоторые растения способны аккумулировать ФСС. Особую опасность для человека и животных представляет их накопление в товарной части сельскохозяйственной продукции.

Несмотря на то что фтор является жизненно важным микроэлементом для животных и человека, его повышенное содержание в организме крайне опасно и может привести к нарушению работы организма, вплоть до смертельного исхода.

Поэтому важно выявлять все источники попадания ФСС в природную среду, изучать

пути их химических превращений. К сожалению, в настоящее время не уделяется должного внимания разработке и применению системы мер по предотвращению загрязнения окружающей среды соединениями фтора. До сих пор остаются без ответа следующие вопросы: каковы механизмы трансформации ФСС, в какие соединения они превращаются, где преобразуются, какими свойствами обладают образующиеся из них химические соединения, какова степень их токсичности, где разрушаются, каким образом химические соединения проникают внутрь живого организма и как выводятся [50]. Ответы на эти вопросы могут послужить теоретической основой разработки эффективных приёмов снижения содержания ФСС в окружающей среде и влияния данных поллютантов на биоту.

Литература

1. Михайленко Н.Н., Торгаев В.В. Фторовый техногенез и окружающая среда Восточного Забайкалья // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2007. № 3. С. 120–122.
2. Franzaring J., Hrenn H., Schumm C., Klumpp A., Fangmeier A. Environmental monitoring of fluoride emissions using precipitation, dust, plant and soil samples // *Environmental Pollution*. 2006. V. 144. № 1. P. 158–165.
3. Шебалова Н.М. Влияние фторсодержащих промышленных выбросов на структуру микробиоценозов лесных почв // Леса Урала и хозяйство в них. 1993. № 16. С. 213–218.
4. Берсенева О.А., Саловарова В.П., Приставка А.А. Влияние фторидов на функционирование почвенного микробного сообщества // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2010. № 10. С. 10.
5. Орлов Д.С., Садовникова Л.К., Лозановская И.Н. Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении. М.: Высш. шк., 2002. 334 с.
6. Полонский В.И., Полонская Д.Е. Фторидное загрязнение почвы и фиторемедиация // Сельскохозяйственная биология. 2013. № 1. С. 3–14.
7. Танделов Ю.П. Фтор в системе почва-растение. М.: РАСХН, 2004. 146 с.
8. Козлова А.А., Лопатовская О.Г., Градина Н.И., Чипанина Е.В., Кучменко Е.В., Бобров А.Н. Фторидное загрязнение серых лесных почв, находящихся в зоне влияния Иркутского алюминиевого завода // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Биология. Экология». 2011. Т. 4. № 1. С. 87–94.
9. Напрасникова Е.В., Макарова А.П. Эколого-микробиологическая и биохимическая характеристика почвенного покрова в условиях аэротехногенного загрязнения // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Биология. Экология». 2012. Т. 5. № 2. С. 19–26.
10. Евдокимова Г.А., Мозгова Н.П. Оценка загрязнения почв и растений в зоне воздействия газовой воздушной выбросов алюминиевого завода // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 4. С. 64–68.
11. Рунова Е.М., Чжан С.А. Экологические аспекты состояния лесов в санитарно-защитных зонах алюминиевых заводов // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. 2003. № 4. С. 102–105.
12. Петлин И.В., Дьяченко А.Н. Исследование сернокислотного разложения фторсодержащих отходов алюминиевого производства с целью выделения фторида водорода // Химия в интересах устойчивого развития. 2014 № 3. С. 319–325.
13. Танделов Ю.П. Фтор в системе почва-растение / Под ред. В.Г. Минеева. Красноярск: Красноярская городская типография, 2012. 146 с.
14. Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Функционирование почв в биосфере и экосистемах. М.: Наука, 1990. 270 с.
15. Томина Т.К. Снижение влияния фторидного загрязнения на свойства тёмно-каштановой почвы в предгорной зоне // Вермикомпостирование и вермикультивирование как основа экологического земледелия в XXI веке: достижения, проблемы, перспективы»: Сб. научн. тр. Минск. 2013. С. 131–137.
16. Тригуб В.И. Эколого-геохимические и географогенетические особенности распространения фтора в почвах северо-западного причерноморья Украины // Научные ведомости. Серия естественные науки. 2013. № 24 (167). Вып. 25. С. 143–149.
17. Свинолупова Л.С., Огородникова С.Ю., Ашихмина Т.Я. Ответные реакции растений ячменя на действие фторида натрия // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2012. № 12 (98). С. 17–20.
18. Евдокимова Г.А. Эколого-микробиологические основы охраны почв Крайнего Севера. Апатиты: Изд-во Кольского НЦ РАН, 1995. 272 с.
19. Шебалова Н.М. Некоторые механизмы адаптации микроорганизмов лесной подстилки сосновых насаждений, произрастающих в зонах аэротехногенного загрязнения // Аграрный вестник Урала. 2009. № 2 (56). С. 83–85.
20. Савченков М.Ф., Николаева Л. А. Загрязнение почвенного покрова фтористыми соединениями // Сибирский медицинский журнал (Иркутск). 2011. Т. 100. № 1. С. 10–13.
21. Евдокимова Г.А., Зенкова И.В., Мозгова Н.П., Переверзев В.Н. Почва и почвенная биота в условиях загрязнения фтором. Апатиты: Изд-во Кольского НЦ РАН, 2005. 155 с.
22. Антонов И.С., Градобоева Н.А. Фтор в почве и сопредельных средах в зоне влияния Саянского алюминиевого завода // Результаты наблюдений за 1989–1995 гг. в таблицах и пояснениях. ГСАС «Хакасская». 1996. С. 67–70.

23. Коковкина Т.Ф., Бабушкина Л.Г. Техногенное загрязнение лесных почв // Леса Урала и хозяйство в них. Екатеринбург. 1993. № 16. С. 199–207.
24. Ермолов Ю.В. Влияние орошения на подвижность фтора в посевах Барабинской равнины // Сибирский экологический журнал. 2000. № 2. С. 243–246.
25. Помазкина Л.В., Соколова Л.Г., Звягинцева Е.Н. Мониторинг трансформации углерода в агроэкосистемах Байкальского региона в зависимости от загрязнения почв фторидами алюминиевого производства и климатических факторов // Известия Самарского НЦ РАН, 2010. Т. 12. № 1 (4). С. 1049–1054.
26. Кремленкова Н.П., Гапонюк Э.И. Изменение состава гумуса и ферментативной активности почв под влиянием фторида натрия // Почвоведение. 1984. № 11. С. 73–77.
27. Бобров А.Н. Исследование серых лесных почв при загрязнении их фторидами в зоне действия эмиссий ИркаЗа // Почвы в условиях природных и антропогенных стрессов: Матер. Всеросс. науч. конф. XIV Докучаевские молодежные чтения. СПб., 2011. С. 112–114.
28. Гапонюк Э.И., Кремленкова Н.П., Моршина Т.Н. Влияние фтора на свойства почв в районах промышленных выбросов // Загрязнение атмосферы, почв и природных вод. Л.: Гидрометеиздат. 1981. 59 с.
29. Сорокин Н.Д., Афанасова Е.Н. Микробная индикация почв, загрязненных промышленными эмиссиями // Сибирский экологический журнал. 2011. № 5. С. 689–695.
30. Галстян А.Ш. Некоторые вопросы почвенной ферментологии // Почвоведение. 1995. № 2. С. 205–210.
31. Хазиев Ф.Х. Ферментативная активность почв. М.: Наука, 1976. 180 с.
32. Russel S., Swiecicki C. Wplyw fluoru na biologiczna aktywnosc czarnej ziemi i gleby pseudobielicowej // Roczniki Nauk Rolniczych. Seria A. Produkcja Roslinna. 1978. № 3. P. 47–57.
33. Сорокин Н.Д., Афанасова Е.Н. Микробная индикация почв, загрязнённых промышленными эмиссиями // Сибирский экологический журнал. 2011. № 5. С. 689–695.
34. Домрачева Л.И. «Цветение» почвы и закономерности его развития. Сыктывкар: Коми научный центр УрО РАН. 2005. 336 с.
35. Горлова О.П. Влияние фтористых загрязнений на трансформацию сообществ мезофауны в чернозёмах окрестностей г. Красноярска // Теоретические и практические вопросы развития научной мысли в современном мире. Уфа, 2013. С. 8–13.
36. Горностаева Е.А. Влияние ионов меди и никеля на почвенные цианобактерии и цианобактериальные сообщества: Автореф. дис... канд. биол. наук. Москва, 2015. 26 с.
37. Евдокимова Г.А., Зенкова И.В. Влияние выбросов алюминиевого завода на биоту почв Кольского полуострова // Почвоведение. 2003. № 8. С. 973–979.
38. Отнюкова Т.Н. Купена лекарственная (*Polygonatum odoratum*) – индикатор атмосферного загрязнения фтором // Вестник КрасГАУ. 2013. № 4. С. 111–117.
39. Ломоватская Л.А., Рыкун О.В., Симакова А.А., Соколова Л.Г., Романенко А.С., Помазкина Л.В. Влияние повышенных доз фторидов в почве на активность аденилатциклазной сигнальной системы растений // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Биология. Экология». 2014. Т. 7. С. 11–19.
40. Фукс С.Л., Хитрин С.В., Девятерикова С.В., Елькина Т.С., Домрачева Л.И., Наговицына О.А., Пшеничникова Л.Н. Изучение влияния отходов фторполимерного производства на ячмень сорта Эльф // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 4. С. 52–58.
41. Weinstein L.H., Davidson A.W. Fluorides in the Environment. Newcastle: CABI Publishing, 2004. 287 p.
42. Помазкина А.В. Котова Л.Г., Раднаев А.Б.-Д., Соколова Н.А. Влияние уровней загрязнения почв фторидами на циклы азота в агроэкосистемах Прибайкалья // Агрехимия. 2000. № 12. С. 62–69.
43. Малафеева А.В., Евдокимова Р.С., Каримова А.З. Проблема загрязнения фтором поверхностных вод в зоне влияния криолитового производства // Международная студенческая электронная научная конференция «Студенческий научный форум» 2013 [Электронный ресурс] <http://www.scienceforum.ru/2013/44/1632>. Дата обращения 23.12.2016.
44. Омелянюк Л.В. Селекционная ценность сортов гороха // Доклады РАСХН. 2006. № 1. С. 6–9.
45. Крупкин П.И. Пути рационального использования почв, загрязнённых фтором // Агрехимия. 2005. № 3. С. 79–87.
46. Davis R.D. Uptake of fluoride by ryegrass grown in soil treated with sewage sludge // Environmental Pollution. 1980. V. 1. № 4. P. 277–284.
47. Плахотник В.Н. Фториды вокруг нас // Соровский образовательный журнал. 1998. № 2. С. 95–100.
48. Большаков В.Н., Васильев А.Г., Васильева И.А., Городилова Ю.В., Любашевский Н.М., Чибиряк М.В. Морфологическая изменчивость малой лесной мыши *Sylvaemus uralensis* на Южном Урале: техногенный аспект // Вестник ОГУ. 2011. № 12 (131). С. 37–39.
49. Петрашова Д.А. Многоножка-костянка *Monotarsobius curtipes* как неспецифический индикатор загрязнения почв выбросами промышленных предприятий // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12. № 1 (8). С. 1947–1950.
50. Рожанская А.В. Исследование процессов трансформации фторорганических веществ, выделяющихся в атмосферный воздух // Бюллетень ВСНЦ СО РАН. 2005. № 8 (46). С. 161–163.

References

1. Mihaylenko N.N., Torgaev V.V. Fluoride technogenesis and environment of East Transbaikalia // Gorniyi

informatсионno-analiticheskiy byulleten (nauchno-technicheskiy zhurnal). 2007. № 3. P. 120–122 (in Russian).

2. Franzaring J., Hrenn H., Schumm C., Klump A., Fangmeier A. Environmental monitoring of fluoride emissions using precipitation, dust, plant and soil samples // *Environmental Pollution*. 2006. V. 144. № 1. P. 158–165.

3. Shebalova N. M. Effect of fluorine-containing industrial emissions on the structure of forest soil microbiocenoses // *Lesa Urala i hozyaystvo v nih*. 1993. № 16. P. 213–218 (in Russian).

4. Berseneva O.A., Salovarova V.P., Pristavka A.A. Effect of fluoride on the functioning of the soil microbial community // *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy*. 2010. № 10. P. 10 (in Russian).

5. Orlov D.S., Sadovnikova L.K., Lozanovskaya I.N. Ecology and protection of the biosphere in case of chemical pollution. M.: Vyssh. shk., 2002. 334 p. (in Russian).

6. Polonskiy V.I., Polonskaya D.E. Fluoride contamination of soil and phytoremediation // *Selskohozyaystvennaya biologiya*. 2013. № 1. P. 3–14 (in Russian).

7. Tandelov Yu.P. Fluoride in the soil-plant system. M.: Ros. akad. s.-h. nauk, 2004. 146 p. (in Russian).

8. Kozlova A.A., Lopatovskaya O.G., Granina N.I., Chipanina E.V., Kuchmenko E.V., Bobrov A.N. Fluoride contamination of gray forest soils in the zone of influence of the Irkutsk aluminum smelter // *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Biologiya. Ekologiya»*. 2011. T. 4. № 1. P. 87–94 (in Russian).

9. Naprasnikova E.V., Makarova A.P. Ecological and microbiological and biochemical characteristics of soil in conditions of environmental contamination // *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Biologiya. Ekologiya»*. 2012. T. 5. № 2. P. 19–26. (in Russian).

10. Evdokimova G.A., Mozgova N.P. Assessment of soil and plant contamination in the area affected by gas emissions of aluminum plant // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2015. № 4. P. 64–68 (in Russian).

11. Runova E.M., Chzhan S.A. Environmental aspects of the state of forests in the buffer zones of aluminum smelters // *Trudy lesoinzhenernogo fakulteta PetrGU*. 2003. № 4. P. 102–105 (in Russian).

12. Petlin I.V., Dyachenko A.N. A study of sulfuric acid decomposition of fluorine-containing waste of aluminum production in order to separate hydrogen fluoride // *Himiya v interesah ustoychivogo razvitiya*. 2014. № 3. P. 319–325 (in Russian).

13. Tandelov Yu.P. Fluoride in the soil-plant system / Ed. V.G. Mineev. Krasnoyarsk: Krasnoyarskaya gorodskaya tipografiya, 2012. 146 p. (in Russian).

14. Dobrovolskiy G.V., Nikitin E.D. Functioning of soil in the biosphere and ecosystems. M.: Nauka, 1990. 270 p. (in Russian).

15. Tomina T.K. Reducing the influence of fluoride contamination on the properties of dark chestnut soils in foothill zone // *Vermikompostirovanie i vermikulirovanie kak osnova ekologicheskogo zemledeliya v XXI*

veke: dostizheniya, problemy, perspektivy»: Sb. nauchn. tr. Minsk. 2013. P. 131–137 (in Russian).

16. Trigub V.I. Ecological-geochemical and geographical-genetic peculiarities of fluorine spread in soils of the north-western Black Sea coast of Ukraine // *Nauchnye vedomosti. Seriya estestvennyye nauki*. 2013. № 24 (167). V. 25. P. 143–149 (in Russian).

17. Svinolupova L.S., Ogorodnikova S.Yu., Ashihmina T.Ya. Response of barley to the action of sodium fluoride // *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2012. № 12 (98). P. 17–20 (in Russian).

18. Evdokimova G.A. Ecological and microbiological basis for protection of the Far North land. Apatity: Izd-vo Kolskogo NTs RAN, 1995. 272 p. (in Russian).

19. Shebalova N.M. Some mechanisms of microbial adaptation of forest litter of pine stands in the areas of environmental contamination // *Agrarnyy vestnik Urala*. 2009. № 2 (56). P. 83–85 (in Russian).

20. Savchenkov M.F., Nikolaeva L.A. Soil pollution fluorides // *Sibirskiy meditsinskiy zhurnal (Irkutsk)*. 2011. T. 100. № 1. P. 10–13 (in Russian).

21. Evdokimova G.A., Zenkova I.V., Mozgova N.P., Pereverzev V.N. Soil and soil biota in condition of fluoride pollution. Apatity: Izd-vo Kolskogo NTs RAN, 2005. 155 p. (in Russian).

22. Antonov I.S., Gradoboeva N.A. Fluoride in soils and adjacent environments in zone of influence of the Sayan Aluminum Plant // *Rezultaty nablyudeniya za 1989–1995 v tablitsah i pojasneniyah. GSAS «Hakasskaya»*. 1996. P. 67–70.

23. Kokovkina T.F., Babushkina L.G. Anthropogenic pollution of forest soils // *Lesa Urala i hozyaystvo v nih. Ekaterinburg*. 1993. № 16. P. 199–207 (in Russian).

24. Ermolov Yu.V. Effect of irrigation on fluoride mobility in crops in the Baraba plains // *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal*. 2000. № 2. P. 243–246 (in Russian).

25. Pomazkina L.V., Sokolova L.G., Zvyagintseva E.N. Monitoring of carbon transformation in agroecosystems of Baykalkiy region caused by soil pollution with fluorides of aluminum production and by climatic factors // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. 2010. T. 12. № 1 (4). P. 1049–1054 (in Russian).

26. Kremlinikova N.P., Gaponyuk E.I. Changes in the composition of humus and soil enzyme activity under the influence of sodium fluoride // *Pochvovedenie*. 1984. № 11. P. 73–77 (in Russian).

27. Bobrov A.N. Study of gray forest soils polluted with fluoride in the area of the IrkAZ emission // *Pochvy v usloviyah prirodnykh i antropogennykh stressov: Mater. Vseross. nauch. konf. XIV Dokuchaevskie molodezhnyie chteniya*. SPb, 2011. P. 112–114 (in Russian).

28. Gaponyuk E.I., Kremlinikova N.P., Morshina T.N. Effect of fluoride on the properties of soil in the areas of industrial emissions // *Zagryaznenie atmosfery, pochvy i prirodnykh vod*. L.: Gidrometiozdat. 1981. 59 p. (in Russian).

29. Sorokin N.D., Afanasova E.N. Microbial indication of soil contaminated with industrial emissions // *Sibirskiy ekologicheskii zhurnal*. 2011. № 5. P. 689–695 (in Russian).
30. Galstyan A.Sh. Some issues of soil enzymology // *Pochvovedenie*. 1995. № 2. P. 205–210 (in Russian).
31. Haziev F.H. Enzymatic activity of soils. M.: Nauka, 1976. 180 p. (in Russian).
32. Russel S., Swiecicki C. Wplyw fluoru na biologiczna aktywnosc czarnej ziemi i gleby pseudobielicowej // *Roczniki Nauk Rolniczych. Seria A. Produkcja Roslinna*. 1978. № 3. P. 47–57.
33. Sorokin N.D., Afanasova E.N. Microbial indication of soil contaminated with industrial emissions // *Sibirskiy ekologicheskii zhurnal*. 2011. № 5. P. 689–695 (in Russian).
34. Domracheva L.I. «Flowering» of soil and the laws of its development. Syktyivkar: Komi nauchnyiyy tsentr UrO RAN. 2005. 336 p. (in Russian).
35. Gorlova O.P. Effect of fluoride contamination on transformation of chernozem mesofauna communities in the neighborhood of the city of Krasnoyarsk // *Teoreticheskie i prakticheskie voprosyi razvitiya nauchnoy myisli v sovremennom mire*. Ufa, 2013. P. 8–13 (in Russian).
36. Gornostaeva E.A. Influence of copper and nickel ions on soil cyanobacteria and cyanobacterial community: Avtoref. dis... kand. biol. nauk. Moskva, 2015. 26 p. (in Russian).
37. Evdokimova G.A., Zenkova I.V. Effect of aluminum plant emissions on soil biota of the Kola Peninsula // *Pochvovedenie*. 2003. № 8. P. 973–979 (in Russian).
38. Otnyukova T.N. Solomon's seal (*olygonatum odoratum*) as an atmospheric fluoride pollution indicator // *Vestnik KrasGAU*. 2013. № 4. P. 111–117 (in Russian).
39. Lomovatskaya L.A., Ryikun O.V., Simakova A.A., Sokolova L.G., Romanenko A.S., Pomazkina L.V. Effect of high doses of fluoride in soil on the activity of adenyl cyclase signaling system of plants // *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Biologiya. Ekologiya»*. 2014. T. 7. P. 11–19 (in Russian).
40. Fuks S.L., Hitrin S.V., Devyaterikova S.V., Elkina T.S., Domracheva L.I., Nagovitsyina O.A., Pshenichnikova L.N. The study of influence of fluoropolymer production wastage on barley of the species «Elf» // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2015. № 4. P. 52–58 (in Russian).
41. Weinstein L.H., Davidson A.W. Fluorides in the Environment. Newcastle: CABI Publishing, 2004. 287 p.
42. Pomazkina A.V., Kotova L.G., Radnaev A.B.-D., Sokolova N.A. Effect of levels of fluoride soil contamination on the nitrogen cycle in agro-ecosystems of the Baikal region // *Agrohimiya*. 2000. № 12. P. 62–69 (in Russian).
43. Malafeeva A.V., Evdokimova R.S., Karimova A.Z. The problem of contamination of surface water with fluorine in the zone of influence of cryolite production // *Mezhdunarodnaya studencheskaya elektronnyaya nauchnaya konferentsiya «Studencheskiy nauchnyi forum» 2013* [Electronic resource] <http://www.scienceforum.ru/2013/44/1632>. Date of the application 23.12.2016 (in Russian).
44. Omelyanyuk L.V. Selection value of pea species // *Doklady RASHN*. 2006. № 1. P. 6–9 (in Russian).
45. Krupkin P.I. Ways of rational use of soil contaminated with fluorine // *Agrohimiya*. 2005. № 3. P. 79–87 (in Russian).
46. Davis R.D. Uptake of fluoride by ryegrass grown in soil treated with sewage sludge // *Environmental Pollution*. 1980. V. 1. № 4. P. 277–284.
47. Plakhotnik V.N. Fluoride is all around us // *Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal*. 1998. № 2. P. 95–100 (in Russian).
48. Bolshakov V.N., Vasilev A.G., Vasileva I.A., Gorodilova Yu.V., Lyubashevskiy N.M., Chibiryak M.V. Morphological variability of small wood mouse *Sylvaemus uralensis* in the Southern Urals: man-made aspect: technogenic aspect // *Vestnik OGU*. 2011. № 12 (131). P. 37–39 (in Russian).
49. Petrashova D.A. *Monotarsobius curtipes* as a nonspecific indicator of soil pollution emissions of industrial enterprises // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2010. T. 12. № 1 (8). P. 1947–1950 (in Russian).
50. Rozhanskaya A.V. The study of transformation processes of fluoro-organic substances released into the air // *Byullyuten VSNTs SO RAN*. 2005. № 8 (46). P. 161–163 (in Russian).