

УДК 631.41

СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРАНСФОРМАЦИИ ТОКСИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В СИСТЕМЕ “ПОЧВА–РАСТЕНИЕ” (ОБЗОР)

© 2021 г. В. С. Цицуашвили^{а, *}, Т. М. Минкина^{а, **},
А. В. Солдатов^б, Д. Г. Невидомская^а

^аАкадемия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского,
Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 344090 Россия

^бМеждународный исследовательский институт интеллектуальных материалов,
Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 344090 Россия

*e-mail: viktoria447@yandex.ru

**e-mail: tminkina@mail.ru

Поступила в редакцию 04.12.2020 г.

После доработки 25.01.2021 г.

Принята к публикации 28.01.2021 г.

Для правильной оценки экологического риска загрязнения почвы очень важно установить вид и подвижность поллютантов. В статье приводится обзор литературных источников и раскрывается информация о различных высокотехнологичных методах, в основе которых лежит использование синхротронного излучения, способных выявить основные механизмы, ответственные за подвижность загрязняющих веществ в почве, а также проследить дальнейшее их перемещение по пищевой цепи. Установлено, что некоторые виды растений являются эффективными биоиндикаторами экологического состояния техногенной среды. Обосновывается необходимость комплексной диагностики структуры исследуемых образцов методами синхротронного излучения для исследования видообразования металлов. Дальнейший прогресс в исследовании почв и растений будет достигаться путем использования междисциплинарного подхода, который направлен на развитие научно-исследовательских платформ на молекулярном уровне.

Ключевые слова: XRF, XRD, XAFS, Micro-FTIR, μ -СТ, XPS, почвенные компоненты, растения, тяжелые металлы, видообразование.

DOI: 10.31857/S1028096021070232

ВВЕДЕНИЕ

Техногенное загрязнение окружающей среды является одной из наиболее серьезных проблем, стоящей перед современным человечеством. До 95% выбрасываемых поллютантов аккумулируется почвой. Загрязнение почв отражается на всей экосистеме. Особый интерес представляют исследования тяжелых металлов (ТМ), их воздействие на компоненты экосистемы. Избыточное накопление ТМ в растениеводческой продукции представляет серьезную угрозу здоровью человека и животных [1–3]. Для оценки экологических рисков, связанных с передвижением ТМ по пищевой цепи, необходимы данные о формах их нахождения в почвах, определяющих миграционную способность и токсичность [4, 5]. Почва способна не только поглощать, но и трансформировать поглощенные ею поллютанты в разнообразные соединения, от которых зависит их биодоступность растениям. В связи с чем, исследования загрязне-

ния почв, ориентированные на получение объективной информации о видообразовании ТМ, являются актуальной междисциплинарной задачей. Для определения состава соединений ТМ широко используются экстракционные методы. Однако действие экстрагентов не является селективным и дает лишь косвенную информацию о связи металлов с разными почвенными компонентами [6–11]. Поскольку почва удерживает ТМ в основном в составе своих органоминеральных соединений, являющиеся носителями сорбционных центров, состав собственных фаз ТМ остается неизвестным. Недостаточно информации о пространственном распределении и видообразовании ТМ в растениях [12], что позволит оценивать экологические риски для здоровья человека.

Для решения подобных амбициозных задач в последнее время все чаще начинают применяться уникальные высокотехнологичные методы, основанные на использовании исследовательской

инфраструктуры мега-класса – синхротронных центров и рентгеновских лазеров на свободных электронах [13]. Следует отметить, что за последние два десятилетия методы, развиваемые в центрах синхротронных исследований, достаточно широко стали применяться для изучения структуры самых широких классов материалов: от идеальных монокристаллов до неупорядоченных аморфных материалов, жидкостей и биологических тканей [14, 15]. Важной тенденцией последних лет становится переход к методикам, позволяющим исследовать характеристики материалов с высоким разрешением в пространстве и/или по времени [16, 17]. Существенный подъем яркости современных источников синхротронного излучения позволяет существенно поднять уровень чувствительности к “следовым” уровням концентрации исследуемых элементов [18].

Настоящая работа содержит обзор применения инструментальных высокотехнологичных методов рентгеновского синхротронного излучения для исследования видообразования ТМ в почвах и растениях.

МЕТОД РЕНТГЕНОВСКОГО ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА

Одним из наиболее часто используемых методов для определения относительной концентрации того или иного элемента является метод рентгеновского флуоресцентного анализа (РФА, международный термин – XRF) [19]. Успехи в развитии методов фокусировки рентгеновского излучения позволили существенно продвинуться в развитии метода рентгенофлуоресцентного микроанализа (микро-РФА, международный термин – μ -XRF), который позволяет исследовать концентрацию химических элементов с высоким пространственным разрешением вплоть до десятков нанометров.

Рентгенофлуоресцентная спектрометрия с полным отражением (TXRF) – это хорошо зарекомендовавший себя метод анализа микроэлементов в различных образцах, который используется для мониторинга концентрации токсичных элементов в верхних слоях почвы. При использовании TXRF определены концентрации ряда потенциально опасных металлов в почвах (Cr, Ni, Cu, Zn и Pb) и элементов их природного состава (Al, Si, S, Cl, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Rb и Sr) на территории, расположенной вблизи автомагистралей с наибольшим транспортным потоком между крупными городами (г. Сан-Паулу и г. Кампинас в Бразилии). Установлено снижение концентраций Ni, Cu, Zn в почвах при удалении от шоссе [20].

Результаты РФА показали, что элементы, выделяемые батарейками (K, Mn, Fe, Cu, Zn и Pb) и электронными устройствами (Ti, Mn, Fe, Cu, Zn

и Pb), аккумулируются в основном в 10-сантиметровом верхнем слое почвы. Наиболее высокие концентрации зафиксированы для элементов K, Mn и Zn [21].

По сравнению с традиционным методом кислотного разложения, метод μ -XRF способен выявить взаимосвязи между элементами в почве, поэтому является полезным инструментом для общей оценки и прогнозирования загрязнения почвы ТМ. Микро-РФА использовался для анализа элементного состава, химических свойств, структуры и двумерного распределения элементов в почвенном образце с высоким содержанием Sb и As [22]. Выявлена тесная связь As с оксидами Fe и Mn.

Метод рентгеновского микрофлуоресцентного анализа позволил установить неоднородное распределение Cu и S в почве, на которой применялись серосодержащие удобрения и обнаружить зависимость распределения данных элементов от различных режимов затопления почв при возделывании риса [23].

Применение микро-РФА для изучения пространственного распределения Pb в тканях двух разных видов растений, таких как рапс (*Brassica napus*) и овсяница тростниковая (*Festuca arundinacea*), позволило добиться значительных успехов в исследованиях фиторемедиации почв. Результаты анализа показали, что рапс извлекает Pb из почвы и перемещает его к листьям более эффективно, чем овсяница тростниковая, выращенная на загрязненной почве, где Pb остается в корне. Кроме того, метод позволил изучить распределение и других элементов, таких как Zn, P, S и Fe [25].

В результате исследования методом РФА впервые получены достоверные данные о содержании 20 элементов в надземных (листья) и подземных (корневище) органах лилейника гибридного (*Heimerocallis hybrida*). Показано, что максимальная концентрация большинства элементов сосредоточена в растениях, произрастающих в импактных зонах. Выявленное высокое содержание в листьях Pb, Zn, Fe, Mn, Cu говорит о том, что лилейник гибридный является эффективным биоиндикатором экологического состояния техногенной среды [26].

Весьма интересным приложением метода μ -XRF является изучение пространственного распределения ТМ в органах растений. В частности, было установлено, что Cu преимущественно находится в верхнем слое меристематической ткани кончиков корней и стеблей ивы цельнолистной (*Salix S. Integra*) [27]. Было также показано, что большая часть Cu, поглощаемого растениями, сохраняется в корнях из-за высокого связывания с соединениями клеточной стенки, предотвращая, таким об-

разом, перемещение металла в надземные части растения [28, 29].

Исследования рисовников в Индии, выполненные с применением метода μ -XRF [30], показали, что As и другие редокс-чувствительные элементы (такие как Mn и Fe) аккумуляровались в покровных слоях корней риса. Цинк и Ti имели большее сродство с фазами почвенной матрицы – Fe(гидро)оксидами. После уборки риса большая часть As, содержащаяся в корнях, остается в почве. Данные исследования осветили механизмы распределения As на микроуровне “почва–растение” в анаэробных условиях среды.

Для оценки микромасштабных процессов, происходящих на биогеохимических границах раздела между тканями растений, микробными клетками и металлоидами применяются и комплексные методы, например, флуоресцентная *in situ* гибридизация (FISH) с мультэнергетической микро-сфокусированной рентгеновской флуоресцентной микросондовой визуализацией (ME μ -XRF)) [31, 32].

Для получения более детальной информации о трансформации ТМ и их распределении в исследуемом образце почвы спектроскопические методы применяются в комплексе с геохимическими. С использованием данного подхода определена эффективность воздействия биочара на иммобилизацию Pb [33]. Обобщенная информация о возможном применении РФА, а также других методах, основанных на синхротронном излучении, отражена в табл. 1.

МЕТОД РЕНТГЕНОВСКОЙ ДИФРАКЦИИ

Рентгеновская дифракция (международный термин – XRD) является еще одним широко распространенным методом исследования структуры почвы [34]. Она позволяет определить атомную структуру кристаллической части почвы (параметры элементарной ячейки, пространственную симметрию, координаты и типы атомов). По положениям атомов в элементарной ячейке кристалла можно рассчитать такие характеристики, как межатомные расстояния, валентные и торсионные углы и др. Метод XRD позволяет определить структуру исследуемого микрокристалла без каких-либо предварительных сведений о его структуре и даже элементном составе. Этим методом можно также оценивать средний размер нанокристаллитов по ширине спектральных особенностей дифракционных максимумов, используя формулу Шеррера [35]. Почвы, как гетерогенные многофазные системы с нанометровыми размерами частиц, содержат зачастую только один широкий рефлекс дифракционных максимумов. Достоинство СИ выражается в возможности получения исключительно тонкого высокоинтен-

сивного и параллельного пучка рентгеновских лучей, что уменьшает гетерогенность материала в исследуемой области почвенного образца. Узкий источник рентгеновского излучения позволяет собрать с одного образца большое количество дифракционных картин. Экспериментальные данные, полученные с помощью XRD, позволили изучить механизм поглощения Cs, Rb, Ba, K отдельными минеральными фазами высокогорных почв [36, 37]. Удалось определить нахождение наночастиц иллита, каолинита, гетита и гематита в почвах в различных по размеру фракциях (<2000, 450–2000, 100–450 и 1–100 нм) [38].

В случае неоднородных по структуре образцов (таких, например, как почва) современное оборудование на станциях в синхротронных центрах позволяет проводить сканирование по поверхности образца с высоким пространственным разрешением и производить картирование дифракционных характеристик (международный термин *micro-X-ray Diffraction* (μ -XRD)).

Комбинирование методик, например, совместное использование методов μ -XRF и μ -XRD позволяет комплексно исследовать микроструктуру почвенных образцов. Удалось показать, что содержащиеся в городских почвах техногенные магнитные частицы обогащены Pb, Cd, Zn, Cu и Cr, которые включены в кристаллическую решетку магнетита/гематита или адсорбируются на поверхности этих минералов [39]. Этот метод позволил определить пространственное распределение Pb, Sb, Cu, Fe и других элементов в почвах стрельбищ, попадающих из сплавов пуль, найденных на полигоне [40]. Рентгеновская микродифракция позволяет идентифицировать минералы без разрушения образца. Метод позволяет определить долю фазовых компонентов, диагностировать количество аморфных и кристаллических фаз, что особенно ценно для антропогенно-трансформированных загрязненных почв [41]. Применяя методы синхротронного излучения в сочетании с рентгеновской дифракцией, сканирующей электронной микроскопией (*scanning electron microscope* – SEM) и химическим анализом, удалось показать, что кварц, доломит и минерал уэдделлит (оксалат кальция) осаждаются в корнях, стеблях и листьях бессмертника итальянского (*Helichrysum microphyllum* subsp.). Также отмечено, что Zn, Pb и Cd являются наиболее распространенными металлами в почве, причем высокие концентрации Zn в ризосфере вызывают повреждение корней в результате окислительных реакций [42]. На примере изучения высоко загрязненных Technosol импактной зоны воздействия химического завода данные SEM–EDX подтвердили, что преобладающая форма Zn с S представлена вюртцитом, а Cu наблюдается только в связи с глинистыми агрегатами [43].

Таблица 1. Применение методов синхротронного излучения для изучения воздействия химических элементов на компоненты природной среды

Метод исследования	Объект исследования	Элемент, минерал	Ссылка на источник
TXRF	Почва	Cr, Ni, Cu, Zn и Pb	[20]
XRF	Почва	K, Mn, Fe, Cu, Zn и Pb, Ti	[21]
μ-XRF	Почва	As, Fe, Mn	[22]
μ-XRF	Почва	Cu, S	[23]
μ-XRF	Растение	Pb, Zn, P, S и Fe	[25]
XRF	Растение	Pb, Zn, Fe, Mn, Cu	[26]
μ-XRF	Растение, почва	Cu	[27]
XRF, XAS	Почва	Zn	[85]
XRF	Растение	Cu	[28]
XRF	Растение	Cu, Cd, Zn	[29]
XRF, XRD, EXAFS	Почва	Zn	[45]
μ-XRF	Почва, растение	As, Mn, Fe, Ti	[30]
FISH, ME μ-XRF	Растения, почвенные бактерии	As, Fe	[31]
FISH, ME μ-XRF	Растения, микориза	Cr	[32]
μ-XRF, XAFS, SEM, EDX	Биочар	Pb	[33]
XRD	Почва	Наночастицы иллита, каолинита, гетита и гематита	[38]
XRD	Почва	Cs, Rb, Ba, K/каолинит, кварц, иллит	[37]
XRD	Ризосфера, растение	Zn, Fe	[36]
μ-XRF, μ-XRD	Почва	Pb, Cd, Zn, Cu и Cr	[39]
μ-XRF, μ-XRD	Почва	Pb, Sb, Cu, Fe	[40]
XRD, SEM	Растения, кварц, доломит, уэдделлит	Zn, Pb и Cd	[42]
XAS, XRD, SEM-EDX	Почва	Cu, Zn	[43]
TEM-EDX	Растение	Наночастицы CuO	[44]
XAFS, XRD	Почва, монтмориллонит	Zn, Cu	[58]
XANES	Почва	Cu	[59]
XANES	Растения	Hg	[85]
XANES, EXAFS	Почва	Pb	[60]
XANES, XRF	Почва	Co, Cr, Cu, Mn, Ti, Zn, As	[61]
XANES, XRF	Почва, ТМЧ	Fe, Co, Cr и Pb	[62]
XRF, XANES	Почва	Pb	[63]
XRF, XANES	Биопленки	Cr	[64]
XRF, XANES	Почва	Cu, Ni, Zn	[65]
EXAFS, XRF, CMXRFI	Биочар	Hg, S, Cu, Fe, Mn и Zn	[66]
XANES	Растение	Наночастицы CuO	[67]
STXM, XANES, μ-XRF	Растение, ризосфера	Cu	[68]
XRF, XANES, STXM	Растение	Fe	[69]
XANES, STXM	Растение	Pb	[70]
SR-FTIR, μ-XRF	Почва	Cu	[74]
micro-FTIR	Почвенная микрофлора	Cd	[77]
μ-CT, μ-XRF, μ-XRD	Почва	Радионуклиды, металлы	[79]
SR-μ-CT, SEM-EDS	Почва	Fe, Ni, Cu, Zn, Pb, Mn	[80]
μ-CT, μ-XRF	Почва, растения	Fe, Mn, Cu, Pb и Zn	[81]
XPS	Почва, горные породы	Cs	[83]

Результаты, полученные с помощью просвечивающего электронного микроскопа (transmission electron microscopy – TEM), выявили наличие электронно-плотного материала на стенках клеток и в плазмалемме клеток корня ячменя при загрязнении CuO [44]. В работах отмечается необходимость использования междисциплинарного подхода в изучении почв и растений, например, при изучении механизмов устойчивости растений к неблагоприятным условиям, с последующим его применением для анализа механизмов фитоэкстракции и фитостабилизации растений [45–47].

МЕТОД XAFS

Рентгеновская спектроскопия поглощения (международный термин X-ray absorption fine structure – XAFS) позволяет исследовать сразу несколько взаимодополняющих характеристик материалов [48]. Следует отметить, что существует две достаточно независимых разновидности метода, которые используют две части спектра: ближнюю тонкую структуру рентгеновского поглощения (международный термин X-ray absorption near edge structure – XANES) и дальнюю (протяженную) тонкую структуру рентгеновского поглощения (международный термин extended X-ray absorption fine structure – EXAFS) [49]. Эти две группы спектроскопий, как правило, используются для получения существенно различной информации об исследуемом материале. Анализ спектра EXAFS позволяет определить функцию радиального распределения атомов, вокруг атома, поглощающего излучение (иными словами, можно узнать, сколько атомов данного типа и на каком расстоянии находятся от атома, спектр рентгеновского поглощения которого измеряется) [50]. Кроме того, можно изучить степень структурного несовершенства исследуемого материала, определив для атомов так называемый фактор Дебая–Валлера, характеризующий среднеквадратичное отклонение атомов от положения в узле кристаллической решетки [51]. Анализируя энергетическое положение основного края спектра XANES, можно определить зарядовое состояние исследуемого типа атома (используя эффект химического сдвига этого края) [52]. Кроме того, метод XANES часто используют в подходе “отпечатка пальца”, когда форма спектра исследуемого образца сопоставляется со спектрами известных стандартных образцов [53]. Несмотря на то, что в спектре XANES (в принципе) содержится полная информация о локальной трехмерной структуре вокруг поглотившего рентгеновское излучение атома, однако для решения этой задачи необходим требующий достаточно больших вычислительных затрат теоретический анализ спектров XANES [54, 55]. Следует отметить, что

на современном этапе развития технологий искусственного интеллекта удастся существенно уменьшить трудоемкость анализа спектров XANES при выделении из спектра 3D-структурной информации [56, 57].

Методом XANES определены механизмы, контролируемые закрепление Cu твердофазными компонентами чернозема обыкновенного на молекулярном уровне. Установлено, что структура поверхности и состав функциональных групп адсорбента имеют ведущее значение в сорбции металлов [58, 59]. Показана зависимость прочности связи Pb с органоминеральными компонентами почвы от уровня загрязнения почвы и состава экзогенных соединений металла [60].

Комплексное применение синхротронных методов XANES и μ -XRF помогает отслеживать очаги антропогенного воздействия и исследовать механизм магнитных фаз, обогащенных TM [61]. С использованием рентгенофлуоресцентного микроанализа с синхротронным излучением установлены тесные корреляции Fe с Co, Cr и Pb в техногенных магнитных частицах, отобранных в зоне влияния предприятия черной металлургии [62].

Используя XRF и XANES исследовано распределение, видообразование и биодоступность Pb в почвах, загрязненных TM, в районе предприятий по добычи Pb и Zn [63]. Данные методы улучшают понимание процесса накопления, распределения и восстановления Cr в ненасыщенных биопленках [64]. Анализ результатов эксперимента эффективен для разработки методов биоремедиации почв, загрязненных Cr.

Показано [65], что Cu, Ni и Zn могут удерживаться в почве такими компонентами, как аморфные фазы железа, органическое вещество и глинистые минералы. Разложение органического вещества влияет на подвижность металла, в особенности Ni, в то время как Cu и Zn прочно связаны с оксидами железа.

Моделирование протяженной тонкой структуры расширенного поглощения рентгеновских лучей (EXAFS) показало, что Hg находится в форме оксида на поверхности частиц (гидро)оксида Fe и в форме сульфида Hg в образцах биочара. Микрорентгенфлуоресцентная визуализация (CMXRFI) и микрорентгеновская флуоресценция (микро-XRF) определила, что Hg сосуществует с S, Cu, Fe, Mn и Zn как на поверхности, так и внутри частиц биочара [66].

Анализ данных спектроскопии рентгеновского поглощения вблизи края XANES показал [67], что побеги проростков пшеницы, корни которой обрабатывались наночастицами CuO, содержат соединение CuO. Комбинация визуального метода сканирующей просвечивающей рентгеновской микроскопии (X-ray scanning transmission microscopy – STXM) и синхротронных методов спектро-

скопии рентгеновского поглощения XANES и μ -XRF позволила диагностировать видообразование Cu содержащих соединений и оценить распределение и концентрацию Cu внутри корня растений риса (*Oryza sativa* L.). На клеточном уровне была показана транслокация Cu в форме CuO и Cu-цитратов из ризосферы в корень растения с аккумуляцией в эпидермисе и коре корня. Соединения Cu постепенно достигают и эндодермы через верхушечную наиболее плохо сформированную часть корня и боковые придаточные корни и далее распространяются в другие части растения [68].

Методы XRF и XANES, дополненные анализом с применением просвечивающей рентгеновской микроскопии, демонстрируют неоднородное распределение Fe в эпидермисе корней отдельных видов водно-болотных растений (*Phragmites australis*, *Typha latifolia* и *Spartina alterniflora*) и трехвалентное нахождение Fe (Fe^{3+}) в корневой системе [69].

Результаты XANES совместно с электронной просвечивающей микроскопией, масс-спектрометрией показали, что Pb сосредоточен в клеточной стенке, межклеточном пространстве и плазматических мембранах капусты китайской (*Brassica chinensis* L.). Около 71% Pb локализовалось на клеточной стенке в растворимой фракции. Свинец блокируется клеточными стенками в виде отложений пироморфита и карбоната Pb и разделяется вакуолями, которые играют важную роль в детоксикации клеток [70].

МЕТОД ИНФРАКРАСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ С ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ФУРЬЕ MICRO-FTIR (SPECTROMICROSCOPY)

Инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье (Fourier transform infrared spectroscopy – FTIR) может предоставить фундаментальную информацию о молекулярной структуре органических и неорганических компонентов почвы и является в настоящее время одним из наиболее универсальных аналитических методов неразрушающего диагностирования материалов. Механизм, лежащий в основе метода FTIR, связан с переходами между квантованными состояниями колебательной энергии. Энергия пиков ИК-поглощения определяется энергетической структурой входящих в состав исследуемого образца молекул [71]. В частности, отдельные химические группы проявляют себя в спектре определенным образом и, анализируя их характерные частоты колебаний, можно как по отпечатку пальца изучать составляющие исследуемого образца почв. Благодаря достаточно высокой интенсивности инфракрасного потока на источниках синхротронного излучения удается проводить FTIR кар-

тирование образца, исследуя с высоким пространственным разрешением поверхностное распределение характерных колебательных частот [72]. Соответствующий метод получил название micro-FTIR.

Исследования с помощью картирования SR-FTIR (Synchrotron-radiation-based FTIR), дополненные методом микро-РФА, показали неоднородное распределение металла, глинистых минералов и органических функциональных групп в микромасштабе [75, 76]. Внутриводородные связи в минералах (clay-OH minerals) и связи Si-O-металл (Si-O-metal) были более распространены в почвах Ferralic Cambisol, чем в почвах Typic Haapludoll [77]. Понимание характеристик связывания металла с различными функциональными группами в растворенном в почве органическом веществе (ПОВ) важно для изучения токсичности и биодоступности элемента в окружающей среде.

Метод micro-FTIR также успешно использовался для изучения почвенной микрофлоры. Исследования показали слабую взаимосвязь между функциональными группами (O-H и C-H) после вермикомпостирования, делая вывод о том, что активность дождевых червей или связанных с ними бактерий влияет на адсорбционные центры и биодоступность ТМ [78].

МЕТОД РЕНТГЕНОВСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ МИКРОТОМОГРАФИИ

Рентгеновская компьютерная микротомография (международный термин X-ray computed microtomography – μ -СТ) с использованием синхротронного излучения позволяет получать трехмерные изображения материалов с весьма высоким пространственным разрешением (порядка сотен нанометров) [79].

Объединив информацию, полученную с помощью рентгеновского поглощения μ -СТ, а также других методов СИ (μ -XRF и μ -XRD), как в двух-, так и в трехмерном (томографическом) режиме, удалось показать неоднородное распределение радионуклидов и металлов как в образцах почвы, так и в отдельных агрегатах, обогащенных Тм, а также различные уровни концентрации элементов [80].

Методы SR- μ -СТ и SEM-EDS выявили внутреннюю микроструктуру Fe-Mn конкреций и геохимическую миграцию ТМ в почвенной системе. В конкрециях наблюдалось четкое разделение ТМ между фазами оксидов Mn и Fe, что указывает на то, что Pb в основном присутствует в оксидах Fe, а Ni, Cu и Zn в основном связаны с фазами оксидов Mn [81].

Измерение структуры корня методом μ -СТ показало, что в эпидермисе тростника обыкно-

венного (*Phragmites australis*) и рогоза широколистного (*Typha latifolia*), произрастающих на городской заброшенной территории с различным уровнем загрязнения почв, появилось вещество с высоким ослаблением рентгеновского излучения [82]. Дополнить исследование позволило измерение μ -XRF, которое показало, что концентрации и распределение металлов (Fe, Mn, Cu, Pb и Zn) в поперечном сечении корня между эпидермисом и тканью сосудов статистически различались. Значительные корреляции были обнаружены между концентрациями металлов (Cu, Mn, Pb и Zn) и железа в эпидермисе, что означает, что металлы поглощаются оксидами Fe.

МЕТОД РЕНТГЕНОВСКОЙ ФОТОЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (международный термин X-ray photoelectron spectroscopy – XPS) позволяет получить информацию, аналогичную при использовании метода XRF, но с поверхностных слоев образца, а также определять концентрацию и зарядовое состояние того или иного химического элемента (начиная с бора и более тяжелые) [83].

Чтобы определить химическое состояние радиоактивного Cs, сорбированного в различных компонентах природной среды, таких как почва и горные породы (ил, песок и др.), были измерены рентгеновские фотоэлектронные спектры Cs, адсорбированного на SiO_2 и Al_2O_3 , которые являются основными элементами этих природных тел [84]. Несмотря на чрезвычайно малое количество атомов в радиоактивном цезии (^{134}Cs или ^{137}Cs), методом XPS удалось продемонстрировать, что Cs адсорбируется за счет слабой силы Ван-дер-Ваальса, а также определить тип связи Cs с поверхностью SiO_2 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

До сих пор существует постоянный приток ТМ и других загрязняющих веществ в биосферу со стороны естественных и антропогенных источников. Некоторые химические и биологические процессы могут эффективно изолировать ТМ из биосферы, а некоторые вызывают их освобождение или преобразовывают в различные формы, которые могут быть в большей или меньшей степени биодоступны и токсичны для живых организмов. Особенности протекания сложных процессов взаимодействия поллютантов с почвенными компонентами необходимо рассматривать на молекулярном уровне, так как это позволит детально моделировать и в дальнейшем контролировать циклы элементов в почвах и растениях.

На современном этапе использование высокотехнологичных методов синхротронного излучения позволяет изучить состав твердой фазы в микрообъеме, состояние окисления элементов с переменной валентностью, распределение ТМ и металлоидов в ненарушенных почвенных и растительных образцах и видообразование ТМ с фазами-носителями. Применение комплексного подхода, базирующегося на использовании методов рентгеновской спектроскопии поглощения в сочетании с химическими методами, позволяет получить новые знания о взаимодействии адсорбционных центров минералов и органических компонентов в почве с ТМ. В дальнейшем способствует прогрессивному развитию физиологии растений и почвоведения в направлении исследования биологических и химических процессов на молекулярном уровне. В связи с усовершенствованием источников синхротронного излучения (увеличении яркости генерируемого пучка, степени пространственной и временной когерентности, диапазона доступных энергий) расширяются возможности каждого из рассмотренных методов, позволяя всесторонне изучить и получить новые данные об объекте исследования.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ 20-14-00317.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Seth C.S. // The Botanical Review. 2012. V.78. № 1. P. 32. <https://doi.org/10.1007/s12229-011-9092-x>
2. Roy M., McDonald L. M. // Land Degradation & Development. 2015. V. 26. № 8. P. 785. <https://doi.org/10.1002/LDR.2237>
3. Abel S., Nehls T., Mekiffer B., Wessolek G. // J. Soils Sediments. 2015. V. 15. P. 1771. <https://doi.org/10.1002/LDR.2237>
4. Formentini T.A., Mallmann F.J.K., Pinheiro A., Fernandes C.V.S., Bender M.A., da Veiga M., dos Santos D.R., Doelsch E. // Science of The Total Environment. 2015. V. 536. P. 831. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.110>
5. Водяницкий Ю.Н. Загрязнение почв тяжелыми металлами и металлоидами. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2017. 191 с.
6. Minkina T.M., Soldatov A.V., Motuzova G.V., Podkovyrina Y.S., Nevidomskaya D.G. // Doklady Earth Sciences. 2013. V. 449. № 2. P. 418. <https://doi.org/10.1134/S1028334X13040132>
7. Minkina T.M., Soldatov A.V., Motuzova G.V., Podkovyrina Y.S., Nevidomskaya D.G. // J. Geochemical Exploration. 2014. V. 144. P. 306. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.03.013>
8. Minkina T.M., Pinskii D.L., Bauer T.V., Nevidomskaya D.G., Mandzhieva S.S., Sushkova S.N. // J. Geo-

- chemical Exploration. 2017. V. 174. P. 107.
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.06.002>
9. *Minkina T.M., Nevidomskaya D.G., Shuvaeva V.A., Soldatov A.V., Tsitsuashvili V.S., Zubavichus Y.V., Rajput V.D., Burachevskaya M.V.* // J. Geochemical Exploration. 2018. V. 184. P. 365.
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.10.007>
 10. *Minkina T., Nevidomskaya D., Bauer T., Linnik V.G., Shuvaeva V., Mandzhieva S., Soldatov A., Zubavichus Y., Trigub A.* // Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis. 2018b. V.19. № 2. P. 101.
<https://doi.org/10.1144/geochem2017-106>
 11. *Minkina T., Nevidomskaya D., Bauer T., Shuvaeva V., Soldatov A., Mandzhieva S., Zubavichus Y., Trigub A.* // Science of the Total Environment. 2018. V. 634. P. 1165.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.118>
 12. *DalCorso G., Manara A., Furini A.* // Metallomics. 2013. T. 5. № 9. P. 1117–1132.
<https://doi.org/10.1039/c3mt00038a>
 13. *Singh B., Grafe M.* Synchrotron-Based Techniques in Soils and Sediment. Elsevier Science, 2010. P. 480.
<https://doi.org/10.1016/c2009-0-01719-x>
 14. *Фетисов Г.В.* Синхротронное излучение. Методы исследования структуры веществ. М.: Изд-во Физматлит, 2007. 672 с.
 15. *Willmott P.* An Introduction to Synchrotron Radiation: Techniques and Applications. John Wiley & Sons, 2019. P. 504.
 16. *Mobilio S., Boscherini F., Meneghini C.* Synchrotron Radiation: Basics, Methods and Applications. Springer, 2015. P. 799.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-55315-8>
 17. *Зубавичус Я.В., Словохотов Ю.Л.* // Успехи химии. 2001. Т. 70. № 5. С. 429.
 18. *Jaeschke E., Khan S., Schneider J.R., Hastings J.B.* Synchrotron Light Sources and Free-Electron Lasers: Accelerator Physics, Instrumentation and Science Applications. Springer, 2016. P. 1840.
 19. *Majumdar S., Peralta-Videa J.R., Castillo-Michel H., Hong J., Rico C.M., Gardea-Torresdey J.L.* // Analytica Chimica Acta. 2012. V. 755. P. 1. Doi
<https://doi.org/10.1016/j.aca.2012.09.050>
 20. *Canteras, F.B., Oliveira, B.F.F., Moreira, S.* // Environmental Science and Pollution Research. 2019. V. 26. № 20. P. 20839.
<https://doi.org/10.1007/s11356-019-05425-2>
 21. *Rodrigues dos Santos, F., de Almeida, E., da Cunha Kemerich, P.D., Melquiades, F.L.* // X-Ray Spectrometry. 2017. V. 46. № 6. P. 512.
<https://doi.org/10.1002/xrs.2784>
 22. *Fan J.-X., Wang Y.-J., Cui X.-D., Fan T.-T., Zhou D.-M.* // J. Ecology and Rural Environment. 2013. V. 29. № 3. P. 375.
 23. *Zhu S., Yang J., Sun L., Shi J.* // J. Zhejiang University, Science Edition. 2014. V. 41. № 3. P. 331.
<https://doi.org/10.3785/j.issn.1008-9497.2014.03.019>
 24. *Wynn P.M., Fairchild I.J., Spötl C., Hartland A., Matthey D., Fayard B., Cotte M.* // Environmental Chemistry. 2014. V. 11. № 1. P. 28.
<https://doi.org/10.1071/EN13082>
 25. *Mera M.F., Rubio M., Pérez C.A., Cazón S., Merlo M., Muñoz S.E.* // Radiation Physics and Chemistry. 2019. V. 154. P. 69.
<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.05.001>
 26. *Sedelnikova L.L.* // Ecology and Industry of Russia. 2019. V. 23. № 5. P. 62.
<https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-05-62-66>
 27. *Cao Y., Ma C., Zhang J., Wang S., White J.C., Chen G., Xing B.* // Environmental Pollution. 2019. V. 246. P. 980.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.12.025>
 28. *Lu L., Xie R., Liu T., Wang H., Hou D., Du Y., He Z., Yang X., Sun H., Tian S.* // Chemosphere. 2017. V. 175. P. 356.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.082>
 29. *Li Z., Wu L., Hu P., Luo Y., Christie P.* // J. Hazardous Materials. 2013. V. 261. P. 332.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.07.050>
 30. *Kramar U., Norra S., Berner Z., Kiczka M., Chandrasekharan D.* // Applied Geochemistry. 2017. V. 77. P. 4.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.11.006>
 31. *Honeker L.K., Root R.A., Chorover J., Maier R.M.* // J. Microbiological Methods. 2016. V. 131. P. 23.
<https://doi.org/10.1016/j.mimet.2016.09.018>
 32. *Wu S., Zhang X., Chen B., Wu Z., Li T., Hu Y., Sun Y., Wang Y.* // Environmental and Experimental Botany. 2016. V. 122. P. 10.
<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.08.006>
 33. *Li J., Wang S.-L., Zheng L., Chen D., Wu Z., Xie Y., Wu W., Niazi N.K., Ok Y.S., Rinklebe J., Wang H.* // Geoderma. 2019. V. 350. P. 52.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.05.008>
 34. *Zhou Xiang, Liu D., Bu H., Deng L., Liu H., Yuan P., Du P., Song H.* // Solid Earth Sciences. 2018. V. 3. P. 16.
<https://doi.org/10.1016/j.SESCI.2017.12.002>
 35. *Scherrer P.* Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse. 1918. V. 2. P. 98.
 36. *Fancello D., Scalco J., Medas D., Rodeghero E., Martucci A., Meneghini C., De Giudici G.* // International J. Environmental Research and Public Health. 2019. V. 16. № 11. 1976.
<https://doi.org/10.3390/ijerph16111976>
 37. *Zaunbrecher L.K., Elliott W.C., Wampler J.M., Perdrial N., Kaplan D.I.* // Environmental Science and Technology. 2015. V. 49. № 7. P. 4226.
<https://doi.org/10.1021/es5054682>
 38. *Tsao T., Chen Y., Sheu H., Tzou Y., Chou Y., Wang M.* // Applied Clay Science. 2013. V. 85. № 1. P. 1.
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.09.005>
 39. *Lu S., Yu X., Chen Y.* // Science of the Total Environment. 2016. V. 543. P. 239.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.046>
 40. *Mera M.F., Rubio M., Pérez C.A., Galván V., Germanier A.* // Microchemical J. 2015. V. 119. P. 114.
<https://doi.org/10.1016/j.microc.2014.11.010>
 41. *Водяницкий Ю.Н., Ладонин Д.В., Савичев А.Т.* // Загрязнение почв тяжелыми металлами. Москва: Типография Россельхозакадемии, 2012. С. 304.
 42. *Boi M.E., Medas D., Aquilanti G., Bacchetta G., Birarda G., Cappai G., Carlomagno I., Casu M.A., Gianoncelli A.,*

- Meneghini C., Piredda M., Podda F., Porceddu M., Rimondi V., Vaccari L., De Giudici G.* // Minerals. 2020. V. 10. № 3. 259.
<https://doi.org/10.3390/min10030259>
43. *Nevidomskaya D.G., Minkina T.M., Soldatov A.V., Bauer T.V., Shuvaeva V.A., Zubavichus Y.V., Trigub A.L., Mandzhieva S.S., Dorovatovskii P.V., Popov Y.V.* // Environmental Geochemistry and Health. 2020.
<https://doi.org/10.1007/s10653-020-00693-1>
44. *Fedorenko A.G., Minkina T.M., Chernikova N.P., Fedorenko G.M., Mandzhieva S.S., Rajput V.D., Burachevskaya M.V., Chaplygin V.A., Bauer T.V., Sushkova S.N., Soldatov A.V.* // Environmental Geochemistry and Health. 2020.
<https://doi.org/10.1007/s10653-020-00530-5>
45. *Manceau A., Marcus M.A., Tamura N., Proux O., Geoffroy N., Lanson B.* // Geochim Cosmochim Acta. 2004. V. 68. P. 2467.
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2003.11.021>
46. *Manceau A., Marcus M.A., Tamura N.* // Applications of Synchrotron Radiation in Low-Temperature Geochemistry and Environmental Science. Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2002. V. 49. P. 341.
<https://doi.org/10.2138/gsrmg.49.1.341>
47. *Pongrac P., Serra T.S., Castillo-Michel H., Vogel-Mikuš K., Arčon I., Kelemen M., Jenčič B., Kavčič A., Villafort Carvalho M.T., Aarts M.G.M.* // Metallomics. 2018. V. 10. № 11. P. 1576.
<https://doi.org/10.1039/c8mt00149a>
48. *Calvin S.* // XAFS for Everyone. CRC Press, 2013. P. 457.
<https://doi.org/10.1201/b14843>
49. *Iwasawa Y., Asakura K., Tada M.* XAFS Techniques for Catalysts, Nanomaterials, and Surfaces. Springer, 2017. 150 p.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-43866-5>
50. *Evans J.* X-Ray Absorption Spectroscopy for the Chemical and Materials Sciences. John Wiley & Sons Ltd., 2018.
51. *Mastelaro V.R., Zanutto E.D.* // Materials. 2018. V. 11. № 2. P. 204.
<https://doi.org/10.3390/ma11020204>
52. *Bunker G.* Introduction to XAFS: A Practical Guide to X-ray Absorption Fine Structure Spectroscopy. Cambridge University Press, 2010.
<https://doi.org/10.1017/cbo9780511809194>
53. *Кравцова А.Н., Гуда Л.В., Положенцев О.Е., Панкин И.А., Солдатов А.В.* // Журн. структурной химии. 2018. Т. 59. С. 1749.
54. *Della Longa S., Pin S., Cortès R., Soldatov A.V., Alpert B.* // Biophysical J. 1998. V. 75. № 6. P. 3154.
[https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(98\)77757-4](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(98)77757-4)
55. *Smolentsev G., Soldatov A.* // J. Synchrotron Radiation. 2006. V. 13. P. 19.
<https://doi.org/10.1107/S0909049505038975>
56. *Martini A., Guda S.A., Guda A.A., Smolentsev G., Algasov A., Usoltsev O., Soldatov M.A., Bugaev A., Rusalev Yu., Lamberti C., Soldatov A.V.* // Computer Physics Communications. 2019. V. 250. P. 107064.
<https://doi.org/10.1016/j.cpc.2019.107064>
57. *Guda A.A., Guda S.A., Martini A., Bugaev A.L., Soldatov M.A., Soldatov A.V., Lamberti C.* // Radiation Physics and Chemistry. 2019. V. 175. P. 108430.
<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108430>
58. *Bauer T.V., Pinski D.L., Minkina T.M., Shuvaeva V.A., Soldatov A.V., Mandzhieva S.S., Tsitsuashvili V.S., Nevidomskaya, D.G., Semenov I.N.* // Environmental Geochemistry and Health. 2020.
<https://doi.org/10.1007/s10653-020-00773-2>
59. *Minkina T., Nevidomskaya D., Burachevskaya M., Bauer T., Shuvaeva V., Soldatov A., Mandzhieva S., Zubavichus Y.* // Applied Geochemistry. 2019. V. 102. P. 55.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.01.005>
60. *Nevidomskaya D.G., Minkina T.M., Soldatov A.V., Shuvaeva V.A., Zubavichus Y.V., Podkovyrina Y.S.* // J. Soils and Sediments. 2016. V. 16. № 4. P. 1183.
<https://doi.org/10.1007/s11368-015-1198-z>
61. *Yu X., Wang Y., Lu S.* // J. Hazardous Materials. 2020. V. 382. 121114.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121114>
62. *Yu X., Lu S.* // Environmental Pollution. 2016. V. 219. P. 19.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.09.053>
63. *Sun X.-Y., Liu J., Luo L.-Q.* // Huanjing Kexue. Environmental Science. 2018. V. 39. № 8. P. 3835.
<https://doi.org/10.13227/j.hjhx.201712146>
64. *Long D., Zou L., Hashmi M.Z., Cai K., Tang X., Chen G., Shi J.* // Chemical Engineering J. 2015. V. 280. P. 763.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.06.013>
65. *Mamindy-Pajany Y., Sayen S., Mosselmans J.F.W., Guillon E.* // Environmental Science and Technology. 2014. V. 48. № 13. P. 7237.
<https://doi.org/10.1021/es5005522>
66. *Liu P., Ptacek C.J., Blowes D.W., Finckel Y.Z.* // Science of the Total Environment. 2019. V. 662. P. 915.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.148>
67. *Dimkpa C.O., McLean J.E., Latta D.E., Manangón E., Britt D.W., Johnson W.P., Boyanov M.I., Anderson A.J.* // J Nanopart Res. 2012. V. 14. P. 1125.
<https://doi.org/10.1007/s11051-012-1125-9>
68. *Peng C., Duan D., Xu C., Chen Y., Sun L., Zhang H., Yuan X., Zheng L., Yang Y., Yang J., Zhen X., Chen Y., Shi J.* // Environmental Pollution. 2015. V. 197. P. 99.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.12.008>
69. *Feng H., Zhang W., Wang J.-J., Qian Y., Gallagher F.J., Yu L., Liu W., Liu H., Li Y., Mahajan M.D., Wang J., Eng C., Jones K.W., Liu C.-J., Tappero R. A.* Submicroscale investigation of Fe plaque distribution in a selected wetland plant root epidermis, in Trace Metals: Evolution, Environmental and Ecological Significance / Ed. McCarthy M. Nova, 2017. P. 57.
70. *Sun J., Luo L.* // J. Agricultural and Food Chemistry. 2018. V. 66. № 26. P. 6675.
<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b03605>
71. *Miller L.M., Dumas P.* Infrared Spectroscopy using Synchrotron Radiation, in Encyclopedia of Biophysics / Ed. Roberts G.C.K. Springer, 2013. P. 1106.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-16712-6_128
72. *Chen Y., Zou C., Mastalerz M., Hu S., Gasaway C., Tao X.* // Int. J. Mol. Sci. 2015. V. 16. P. 30223.
<https://doi.org/10.3390/ijms161226227>
73. *Shen Y.-T.* // Guang Pu Xue Yu Guang Pu Fen Xi / Spectroscopy and Spectral Analysis. 2014. V. 34. № 3.

- P. 818.
[https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593\(2014\)03-0818-05](https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593(2014)03-0818-05)
74. Sun F., Polizzotto M.L., Guan D., Wu J., Shen Q., Ran W., Wang B., Yu G. // *J. Hazardous Materials*. 2017. V. 326. P. 18.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.12.019>
75. Sun F., Li Y., Wang X., Chi Z., Yu G. // *Environmental Pollution*. 2017. V. 223. P. 457.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.01.046>
76. Xiao J., Wen Y., Yu G., Dou S. // *Soil Science Society of America J.* 2018. V. 82. № 6. P. 1583.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2018.05.0211>
77. Sun F.-S., Yu G.-H., Ning J.-Y., Zhu X.-D., Goodman B.A., Wu J. // *Bioresource Technology*. 2020. V. 312. In press.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123635>
78. Wu S.C., Xiao T.Q., Withers P.J. // *Engineering Fracture Mechanics*. 2017. V. 182. P. 127.
<https://doi.org/10.1016/J.ENGFRACMECH.2017.07.027>
79. Cagno S., Lind O.C., Popic J.M., Skipperud L., De Nolf W., Nuyts G., Vanmeert F., Jaroszewicz J., Janssens K., Salbu B. // *J. Environmental Radioactivity*. 2020. V. 219.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106273>
80. Yu X., Lu S. // *J. Soils and Sediments*. 2016. V. 16. № 2. P. 621.
<https://doi.org/10.1007/s11368-015-1212-5>
81. Feng H., Qian Y., Gallagher F.J., Zhang W., Yu L., Liu C., Jones K.W., Tappero R. // *J. Environmental Sciences (China)*. 2016. V. 41. P. 172.
<https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.07.015>
82. Paul van der Heide. *X-ray Photoelectron Spectroscopy: An introduction to Principles and Practices*. John Wiley & Sons, 2011. 100 p
83. Baba Y., Shimoyama I., Hirao N., Izumi T. // *e-J. Surface Science and Nanotechnology*. 2015. V. 13. P. 417.
<https://doi.org/10.1380/ejsnt.2015.417>
84. Minkina T., Nevidomskaya D., Shuvaeva V., Bauer T., Soldatov A., Mandzhieva S., Trigub A., Zubavichus Y., Ghazaryan K. // *Applied Geochemistry*. 2019. V. 104. P. 168.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.03.021>
85. Manceau A., Wang J., Rovezzi M., Glatzel P., Feng X. // *Environmental Science and Technology*. 2018. V. 52. № 7. P. 3935.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05452>

Synchrotron Radiation for the Study of Toxic Elements Transformation in the Soil–Plant System (Review)

V. S. Tsitsuashvili¹*, T. M. Minkina¹**, A. V. Soldatov², D. G. Nevidomskaya¹

¹*Academy of Biology and Biotechnologies, Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344090 Russia*

²*The Smart Materials Research Institute, Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344090 Russia*

*e-mail: viktoria447@yandex.ru

**e-mail: tminkina@mail.ru

For a correct assessment of the environmental risk of soil pollution, it is very important to establish the type and mobility of pollutants. The article provides an overview of the literature and discloses information on various high-tech methods based on the use of synchrotron radiation, capable of identifying the main mechanisms responsible for the mobility of trace elements of pollutants in the soil, as well as tracing their further transfer along the food chain. It has been found that some plant species are effective bioindicators of the ecological state of the technogenic environment. The article substantiates the need for complex characterization of the samples structure by the synchrotron radiation methods to study the speciation of metals in soils. Further progress in soil and plant research will be achieved through an interdisciplinary approach that aims to develop research platforms at the molecular level.

Keywords: XRF, XRD, XAFS, Micro-FTIR, μ -CT, XPS, soil components, plants, heavy metals, speciation.