15

Рентгенооптическая схема станции „РФА-Геология“ ЦКП „СКИФ“

© Я.В. Ракшун,[1,2] Ю.В. Хомяков,[2,3] А.С. Гоголев,[4] А.В. Дарьин,[1] Ф.А. Дарьин,[3] И.П. Долбня,[5] И.Р. Прокопьев,[1] С.В. Ращенко,[1] С.В. Хрущев,[2] В.А. Чернов,[2] А.Ф. Шацкий,[6] В.А. Шкаруба[2]

[1] Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
[2] Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
[3] Центр коллективного пользования „Сибирский кольцевой источник фотонов“,
630559 Кольцово, Новосибирская обл., Россия
[4] Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050 Томск, Россия
[5] Diamond Light Source,
OX11 0DE Дидкот, Великобритания
[6] Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН,
119991 Москва, Россия
e-mail: yu.v.khomyakov@yandex.ru

Поступило в Редакцию 30 апреля 2026 г.
В окончательной редакции 30 апреля 2026 г.
Принято к публикации 30 апреля 2026 г.

Представлен концепт экспериментальной станции „РФА-Геология“ второй очереди ЦКП „СКИФ“. Станция предназначена для проведения экспериментов в жестком рентгеновском диапазоне следующими методами: рентгеновская дифракция с энергетической и угловой дисперсией, рентгенография в абсорбционном и фазовом контрасте, рентгенофлуоресцентная спектрометрия (в т.ч. в режиме микроскопии), сканирующая просвечивающая рентгеновская микроскопия (в т.ч. в режиме микротомографии) и полнопольная рентгеновская томография. Для формирования яркого точечного источника жесткого рентгеновского излучения предложено использовать короткий сверхпроводящий сильнопольный шифтер (магнитная длина главного диполя ~ 50 mm) с изменяемым магнитным полем (до 8 T). Предложена согласованная с источником рентгенооптическая схема, основанная на оптике с большой горизонтальной апертурой: планарной вертикально фокусирующей линзе, горизонтально фокусирующем асимметричном Лауэ кристалле с меридиональным изгибом и двухзеркальном многослойном монохроматоре. Описанные решения позволят проводить исследования перечисленными методами в энергетическом диапазоне 40–140 keV, используя „белые“ ($\Delta E/E \sim 1$) и „розовые“ ($\Delta E/E \sim 10^{-2}$) пучки синхротронного излучения с поперечными размерами от менее 5 μm до более 10 cm.

Ключевые слова: синхротронное излучение, жесткое рентгеновское излучение, рентгеноструктурный анализ, рентгенофлуоресцентный анализ, компьютерная томография, планарная рентгеновская линза, фокусирующий кристалл Лауэ с меридиональным изгибом, длинные многослойные рентгеновские зеркала, многопуансонный пресс.

DOI: 10.61011/JTF.2026.10.63632.128-26

Введение

Высокая проникающая способность жесткого рентгеновского излучения с энергией фотонов ~ 100 keV обеспечивает широкие возможности для геологических изысканий, позволяя проводить неразрушающий анализ плотных макрообъектов (например, минералов или расплавов), содержащих заметные концентрации элементов с высоким атомным номером. В число таких объектов входят, например, мантийные ксенолиты (в т.ч. алмазоносные) и фрагменты пород щелочных комплексов, с которыми связаны месторождения редких (Nb, Ta, Zr), редкоземельных (REE), черных (Fe, Mn), цветных (Cu) и благородных (Au, Ag, Pt) металлов, радиоактивных (Th, U) элементов, а также апатита (P), флюорита (F), бария (Ba) и стронция (Sr). Для задач геофизики и геологоразведки важны визуализация внутреннего строения образцов пород и пространственного распределения минеральных фаз, идентификация индивидуальных, в том числе новых, минералов, визуализация взаимной ориентировки кристаллических зерен. Для реконструкции происхождения месторождений, т.е. механизмов концентрирования рудных компонентов, необходимо исследование структуры и физических свойств глубинного вещества, определение фундаментальных констант и $P-V-T$-уравнений состояния кристаллических веществ, жидкостей и флюидов, исследование кинетики протекания химических реакций *in situ* при высоких давлениях и температурах. Кроме того, выбор экономически выгодных и экологически эффективных методов обогащения руд и непосредственного извлечения рудных компонентов требует проведения современных

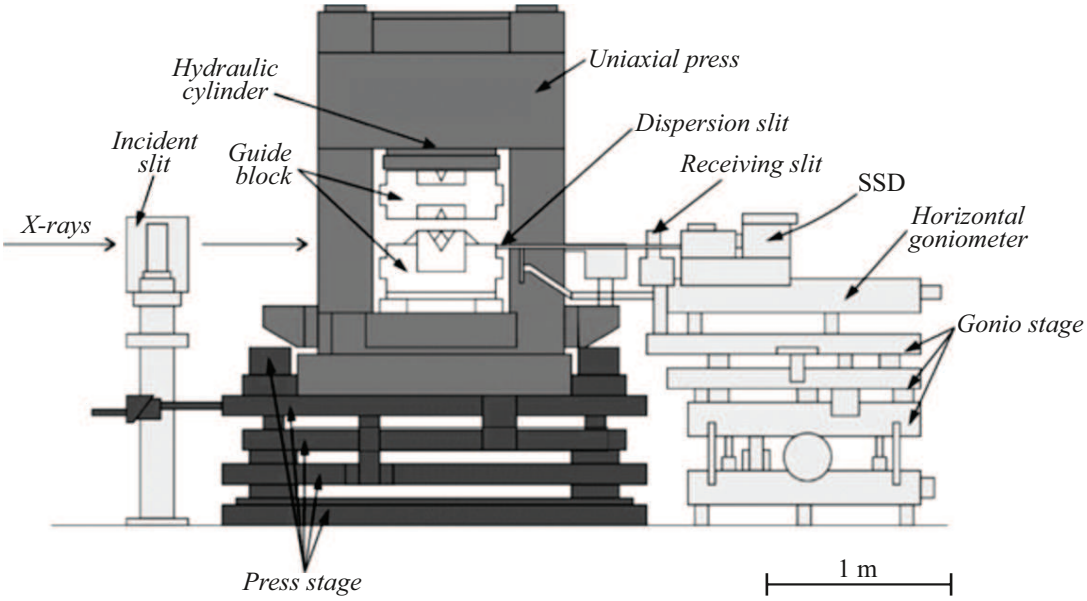

Рис. 1. Принципиальная схема системы окружения образца с многопуансонным прессом высокого давления [4] на станции источника СИ.

высокоточных аналитических исследований их минералогических и технологических характеристик. Вся эта информация может быть получена комбинацией методов дифракции, рентгенографии и рентгенофлуоресцентной спектрометрии в жестком рентгеновском диапазоне на пучках синхротронного излучения (СИ) с поперечными размерами от единиц микрон до дециметра.

Для решения задач геологии и геофизики в рамках второй очереди ЦКП „СКИФ“ [1] запланировано создание станции „РФА-Геология“, которая будет функционировать в диапазоне энергий $\sim 40-140$ keV. Для генерации жесткого рентгеновского изучения на станции будет использован короткий сверхпроводящий шифтер с высоким магнитным полем, что позволит не только работать с широкими пучками СИ, но и с помощью специализированной фокусирующей оптики формировать интенсивный рентгеновский микрозонд, тем самым реализуя преимущество источника СИ 4-го поколения — сверхнизкий эмиттанс.

В настоящей работе предложена согласованная с источником оптическая схема станции „РФА-Геология“, основанная на рентгенооптических элементах с большой горизонтальной апертурой: вертикально фокусирующей планарной линзе, горизонтально фокусирующем кристалле Лауэ с меридиональным изгибом и двухзеркальном многослойном монохроматоре. Оптическая схема позволит проводить эксперименты перечисленными ранее методами как минимум в пяти различных системах окружения образца (СОО).

1. Задачи и методы

Исследование вещества при высоких давлениях и температурах является важной задачей наук о Земле, планетах и материалах. Классический способ создания высоких статических давлений и температур в большом сжимаемом объеме состоит в использовании многопуансонных прессовых аппаратов (рис. 1). Различные конфигурации таких прессов обеспечивают возможность проведения широкого спектра измерений структуры и физических свойств не только кристаллических веществ, но и жидкостей: вязкости, плотности, электропроводности, скорости звука, способности смачивать кристаллические агрегаты. Достижимые давления и температуры в областях интереса составляют ~ 100 GPa и 3000 K соответственно [2,3]. Основными методами исследования вещества при высоких давлениях и температурах являются рентгеновская дифракция с угловой и энергетической дисперсией (ADXRD и EDXRD соответственно), а также рентгенография в абсорбционном и фазовом контрасте.

Вопросы физико-химических условий формирования руд редкометалльных месторождений, минералого-технологические характеристики руд и, как следствие, разработка эффективных и экологичных технологий переработки редкоземельно- редкометалльного (РЗ-РМ) сырья актуальны и остро востребованы. На сегодняшний день в крупнейших месторождениях карбонатиты являются главным источником ряда стратегических элементов, таких как редкоземельные элементы, ниобий, цирконий и другие. Основной сдерживающий фактор развития извлечения и обогащения руд РЗ-РМ заключается в крайне слабом понимании распределения рудного вещества в объеме образцов руд и отдельных рудных тел или зон ($3D$-проекция) в микромасштабе ($10\,\mu$m и менее). Коммерчески доступные лабораторные рентгеновские установки способны обеспечивать необходимое разрешение в томографических исследованиях

Требования к пучку для различных методов

Метод	Оборудование	Спектральные характеристики	Геометрические характеристики
EDXRD	Прессы высокого давления	„Белый“ пучок, 40–140 keV	от $50 \times 50\,\mu$m до 1×1 mm
Рентгенография (абслютный контраст)			5×5 mm
ADXRD		„Розовый“ пучок, 60 keV, $\Delta E/E \sim 10^{-2}$	от $50 \times 50\,\mu$m до 1×1 mm
Рентгенография (фазовый контраст)			5×5 mm
μXRF+STXM ($2D$ и $3D$)	Системы поворота и протяжки образца	„Розовый“ пучок, 42, 84 и 126 keV, $\Delta E/E \sim 10^{-2}$	от $5 \times 5\,\mu$m до $100 \times 100\,\mu$m
XRF ($1D$)		„Розовый“ пучок, 60 keV, $\Delta E/E \sim 10^{-2}$	$20 \times 0.1-1$ mm
XRF (полное поле)			от 60×5 mm
CT		„Белый“ пучок, 40–140 keV	от 120×10 mm

массивных плотных образцов кор выветривания карбонатитов с тяжелой матрицей (состоящей из элементов с относительно высоким атомным номером), однако значительно уступают источникам СИ как в полезном потоке фотонов (т. е. времени эксперимента), так и в достижимой „жесткости“ спектра (т. е. максимальных размерах образца). Синхротрон ЦКП „СКИФ“ позволит сформировать яркий источник жесткого рентгеновского излучения, применимый как для зондовых методов, включая рентгенофлуоресцентную (μXRF) и сканирующую просвечивающую рентгеновскую микроскопию (STXM) и микротомографию, так и для полнопольных, включая рентгенофлуоресцентную спектрометрию (XRF) и компьютерную томографию (CT) макрообразцов. Это выведет исследование распределения рудного вещества в образцах руд и кернах разведочных скважин на качественно новый уровень и окажет влияние на выработку оптимальных схем глубокой переработки комплексных РЗ-РМ руд.

Реализация перечисленных экспериментальных методов обусловливает выдвигаемые требования к пучку СИ, приведенные в таблице.

2. Вставное устройство и параметры генерируемого излучения

Генерация высокоэнергетических рентгеновских квантов остается решаемой технологической задачей, несмотря на то что энергия электронов в накопительном кольце строящегося ЦКП „СКИФ“ составляет невысокие по меркам источников СИ 3 GeV. Для ее решения существует два принципиально разных подхода: использование многопериодных вигглеров [5,6] или сильнопольных шифтеров [7]. В первом случае за высокий поток фотонов в жестком диапазоне приходится расплачиваться крайне высокими тепловыми нагрузками на элементы фронтенда (канала для вывода излучения из накопительного кольца) и оптику экспериментальных станций из-за интенсивности „паразитного“ излучения в низко- и среднеэнергетической части спектра. Кроме того, вигглер формирует набор точечных источников вблизи оси излучения (магнитная длина ~ 1 m, число периодов ~ 10), что существенно затрудняет формирование „микрозонда“ рентгеновской оптикой из-за ограниченности глубины резко изображаемого пространства. В свою очередь, даже для короткого шифтера (с длиной диполя ~ 100 mm) достижимы в разы более высокие магнитные поля и соответствующие критические энергии СИ. Иначе говоря, шифтер позволяет формировать точечный источник с максимальной жесткостью спектра излучения, подходящий для задач как с микрофокусировкой ($\sim 5\,\mu$m и менее), так и с широким пучком СИ (~ 10 cm и более).

По указанным причинам в качестве вставного устройства станции „РФА-Геология“ второй очереди ЦКП „СКИФ“ предлагается использовать сверхпроводящий сильнопольный шифтер, состоящий из одного короткого основного диполя с максимальным магнитным полем в зазоре $B = 8$ T при магнитной длине 70 mm (48 mm на половине амплитуды) и четырех корректирующих диполей с относительно слабыми магнитными полями $|B| < 1$ T (рис. 2). Такой шифтер позволит генерировать СИ с наибольшей жесткостью спектра среди всех со-

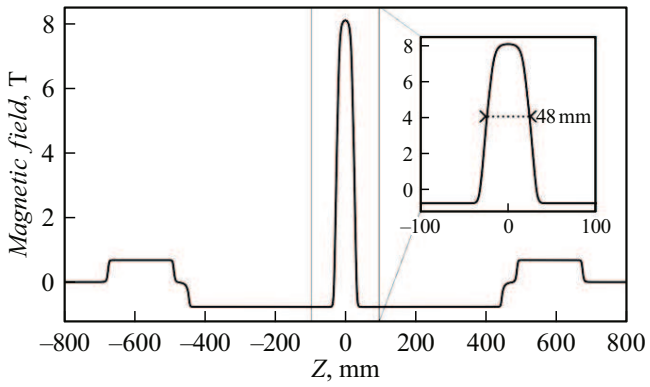

Рис. 2. Магнитное поле внутри сверхпроводящего шифтера при настройке на 8 T.

здающихся и запланированных станций ЦКП „СКИФ“, максимальная критическая энергия излучения составит 48 keV. При этом источник, формируемый основным диполем, будет отдален от побочных источников, формируемых корректирующими диполями, как геометрически, так и спектрально, что позволит выделить его с помощью фокусирующей рентгеновской оптики и фильтров.

Плотность потока фотонов на оси шифтера и спектральная яркость источника при магнитном поле основного диполя 4, 6 и 8 T приведены на рис. 3. В качестве референсных выбраны спектры СИ из поворотного магнита станции BL04B1 SPring-8, на которой рутинно проводятся эксперименты с многопуансонными прессами [8–10], аналоги которых будут использоваться на станции „РФА-Геология“. Вертикальный профиль генерируемого шифтером пучка СИ в дальней зоне и профиль эффективного источника при горизонтальной апертуре 2 mrad приведены на рис. 4.

Отметим, что излучение из шифтера оказывает относительно низкую тепловую нагрузку на рентгеновскую оптику станции. При работе с максимальным магнитным полем 8 T плотность мощности составляет 1.4 kW/mrad^2, что более чем на порядок ниже по сравнению с вигглерными станциями ЦКП „СКИФ“.

Также отметим, что жесткость спектра может быть настроена в соответствии со спецификой каждого эксперимента путем изменения тока катушек шифтера без поперечного сдвига источника. Благодаря возможности устанавливать значение критической энергии СИ пользователи станции смогут с помощью подбора материалов и толщин рентгеновских фильтров формировать куполообразный спектр с настраиваемой шириной и положением центральной энергии фотонов (рис. 5).

3. Оптическая схема станции

Предлагаемый вариант оптической схемы станции „РФА-Геология“ приведен на рис. 6. Схема основана на трех ключевых оптических элементах с большой горизонтальной апертурой, размещенных в двух линиях, и включает пять систем окружения образца (СОО на рис. 6 обозначены цифрами от *1* до *5*) для реализации различных экспериментальных методов в жестком рентгеновском диапазоне. Прямая линия (СОО *1,3–5*), предназначенная для работы с широкими (до 10 cm и более) „белыми“ и „розовыми“ пучками, включает вводимый двухзеркальный многослойный монохроматор. Боковая линия (СОО *2*), предназначенная для работы с „розовыми“ микропучками (менее 5 μm), основана на комбинации вертикально фокусирующей планарной линзы и горизонтально фокусирующего асимметричного Лауэ кристалла с меридиональным изгибом.

Генерируемое шифтером СИ проходит через вакуумное окно (W) и коллимирующие маски (S1) во фронтенде. После стены биозащиты пучок СИ попадает в хатч I (радиационно-защищенное помещение в экспериментальном зале), в котором расположены блоки охлаждаемых фильтров (F) и щелей (S2), а за ними следует СОО *1* с многопуансонным прессом. Здесь на станции будут проводиться исследования минералов в условиях высокого давления до ~ 100 GPa и температуры до ~ 3000 K методами EDXRD и рентгенографии с абсорбционным контрастом в „белом“ пучке с $E = 40-140$ keV.

Далее при выведенном прессе (когда СОО *1* не используется) пучок СИ попадает в хатч II, в котором расположены ключевые оптические элементы и, начиная с которого станция разделяется на две линии. В боковой линии пучок СИ проходит через составную планарную линзу (L) [12] с горизонтальной апертурой ~ 20 mm, которая фокусирует излучение по вертикали на образце в СОО *2* в хатче III. Здесь будут проводиться исследования образцов породы методами μXRF и STXM в $2D$ и $3D$ при энергии зондирующего излучения 42, 84 или 126 keV. Составная линза представляет собой ряд из двояковогнутых (или плоско-вогнутых) цилиндрических алюминиевых линз с параболическим профилем, выбор числа которых позволяет настраивать оптическую силу для заданной рабочей энергии фотонов. Следующий оптический элемент боковой линии — фокусирующий по горизонтали кристалл Лауэ (L) с меридиональным изгибом и асимметричным срезом [13], который захватывает весь прошедший через линзу пучок СИ и формирует полихроматический фокус со спектральной шириной $\Delta E/E \sim 10^{-2}$ на образце в СОО *2* для указанных ранее энергий. Между кристаллом и СОО *2* располагается апертурная диафрагма (S3), регулирующая как освещенность и глубину фокуса, так и спектральную ширину выходного пучка. Ввод непосредственно перед образцом в СОО *2* щелевой диафрагмы (S4) позволяет использовать свойственный преломляющей оптике хроматизм положения для подавления неиспользуемых дифракционных порядков.

Отметим, что альтернативой обычной планарной линзе может служить мультипризматическая линза с плавной настройкой оптической силы [14] и сопоставимой горизонтальной апертурой. Микрофокусировка в жестком

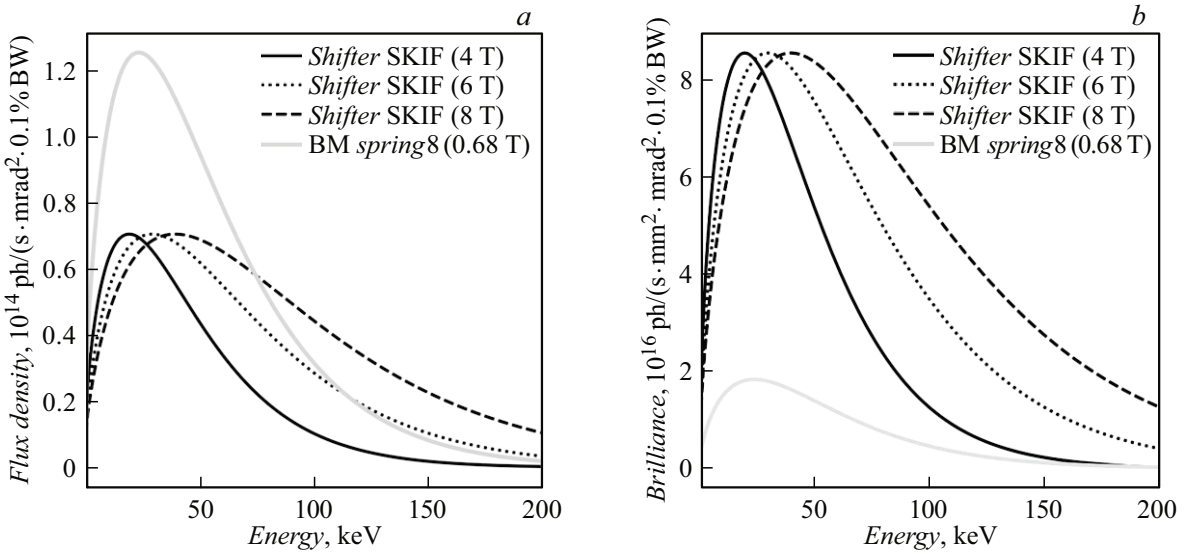

Рис. 3. Спектры генерируемого шифтером СИ при разном магнитном поле: плотность потока фотонов на оси (*a*) и спектральная яркость источника (*b*). Для сравнения приведены спектры СИ из поворотного магнита SPring-8. Рассчитано в Spectra [11].

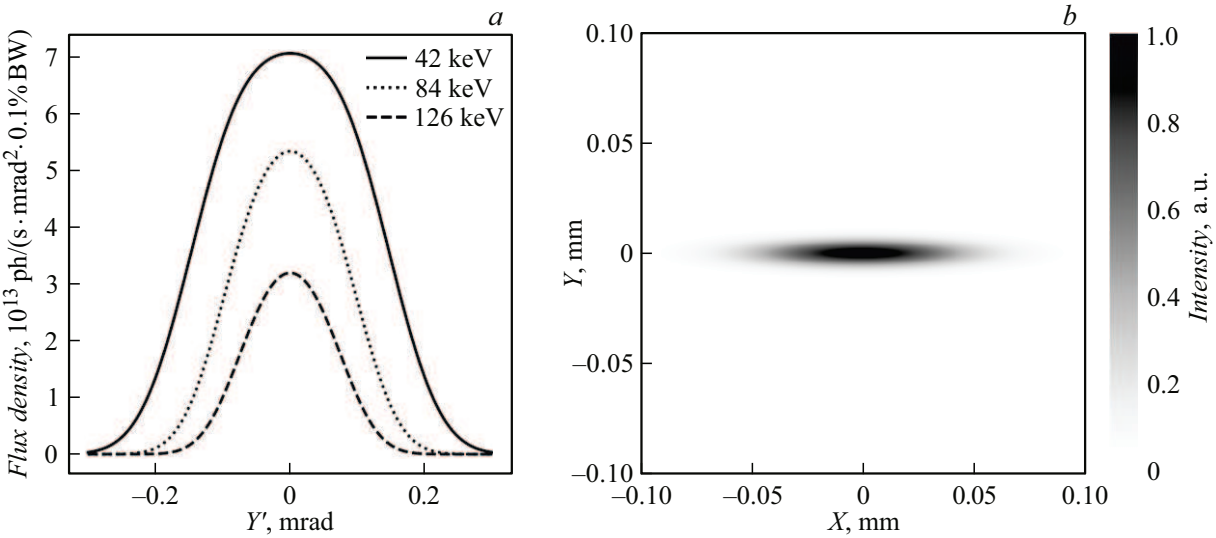

Рис. 4. Вертикальный профиль пучка в дальней зоне (*a*) и профиль эффективного источника на 124 keV (*b*). Рассчитано в Spectra для магнитного поля 8 T.

рентгеновском диапазоне с использованием мультипризматической линзы осуществима на практике [15], однако требует технологической проработки.

В прямую линию в хатче II может вводиться монохроматор (DMM) на основе пары плоских параллельных длинных многослойных рентгеновских зеркал, отражающих по вертикали и имеющих горизонтальную апертуру ~ 60 mm. Монохроматор рассчитан на работу при фиксированной энергии 60 keV с шириной полосы пропускания $\Delta E/E \sim 10^{-2}$. Монохроматизированный пучок, сдвинутый по вертикали параллельно „белому“, проходит через выходные щели S5 и попадает в хатч IV, где располагаются СОО *3–5* с соответствующими полевыми диафрагмами S6, S7 и S8.

В СОО *3* будут проводиться экспрессные исследования макроскопических образцов методом XRF, в т. ч. в режиме 1*D*-сканирования широким тонким пучком, а также в режиме полнопольной визуализации с применением энергодисперсионного двухкоординатного детектора и изображающей ахроматической оптики (пинхола, кодирующей апертуры или зеркал Вольтера полного внешнего отражения [16–18]). Для выявленных в СОО *3* областей интереса более детализированные карты распределения концентраций химических элементов могут быть получены в СОО *2* или на станции 1-1 „Микрофокус“ [19].

СОО *4* включает многопуансонный пресс высокого давления с механизмом качания и будет использоваться

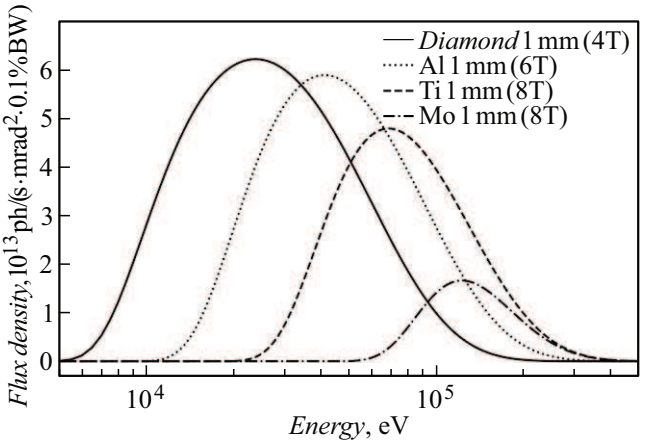

Рис. 5. Примеры спектров СИ при разных фильтрах и магнитных полях.

для проведения исследований методами ADXRD и рентгенографии в абсорбционном и фазовым контрасте. При выведенном из пучка монохроматоре в СОО *4* также будет доступен метод EDXRD.

Расположенная в конце прямой линии СОО *5* предназначена для СТ макроскопических образцов (в частности, кернов) с применением „белого“ или „розового“ пучка шириной более 10 cm. При работе с „белым“ пучком возможность изменения критической энергии позволит корректировать спектр СИ индивидуально для каждого образца с целью повышения контраста.

Отметим, что помимо основного радиационного затвора во фронтенде (SH1) в хатче II после рентгеновской оптики предусмотрены дополнительные затворы (SH2 и SH3), позволяющие без нарушения постоянства тепловых нагрузок на оптику эксплуатировать прямую и боковую линии станции одновременно и независимо, когда пресс СОО *1* не перекрывает пучок СИ. В противном случае в остальных СОО может проводиться подготовка к предстоящим экспериментам.

Также отметим, что предложенный подход с набором СОО позволит вводить станцию в эксплуатацию постепенно, начиная с СОО *1*, для которой вовсе не требуется применение высокотехнологичной рентгеновской оптики. Кроме того, пространство между СОО *4* и *5* в будущем может быть использовано для модернизации станции, а именно для внедрения дополнительных СОО (в том числе с многопуансонными прессами), а также фокусирующей оптики или расширителей пучка.

4. Моделирование

Далее приведены оценки спектральных и геометрических характеристик СИ на образце для всех СОО станции „РФА-Геология“ при магнитном поле шифтера 8 T. В расчетах заданы следующие параметры накопительного кольца ЦКП „СКИФ“ [1]: энергия электронов 3 GeV, относительный энергетический разброс 0.0011, ток пучка 400 mA, натуральный эмиттанс 75 pm·rad, коэффициент связи 0.1, горизонтальная и вертикальная бета-функции в центре прямолинейного промежутка 15.6 и 2.4 m соответственно. Излучение корректирующих диполей шифтера, а также поглощение СИ при прохождении через вакуумные окна в расчетах пренебрегаются. Использованные параметры рентгеновской оптики являются предварительными.

4.1. СОО *1*

Для EDXRD и рентгенографии в СОО *1* используются только два оптических элемента: фильтр и щели. Рассмотрен случай применения Ti-фильтра толщиной 1 mm, формирующего спектральную полосу 38–140 keV (FWHM) (рис. 5).

Поток фотонов на образце, расположенном в 28 m от источника, при выделения щелями поля $1 \times 1\,\mathrm{mm}^2$ (для EDXRD) составляет $8.1 \cdot 10^{13}$ ph/s, соответствующая мощность 1.1 W, неоднородность освещенности в плоскости образца внутри указанного поля 2.7 % (PV). При выделении поля $5 \times 5\,\mathrm{mm}^2$ (для рентгенографии) поток составляет $1.8 \cdot 10^{15}$ ph/s, соответствующая мощность 23 W, неоднородность освещенности 50 % (PV).

4.2. СОО *2*

Для μXRF и STXM в СОО *2* используются щели, вертикально фокусирующая составная линза, горизонтально фокусирующий Лауэ кристалл и апертурная диафрагма. При этом расположенный в первом хатче фильтр может быть выведен из пучка СИ.

В расчетах полагалось, что составная линза образована двояковогнутыми алюминиевыми цилиндрическими линзами параболического профиля с радиусом кривизны 0.2 mm и толщиной 1 mm. Расстояние между вершинами парабол задавалось равным 10 μm. Геометрическая апертура по вертикали 0.89 mm, по горизонтали — 20 mm. Расстояние от источника до первой линзы — 32 m, от источника до образца — 38 m. Число линз при работе на 42, 84 и 126 keV составляет 65, 262 и 607 соответственно. Несмотря на значительное поглощение падающего излучения (до 86 %), такая составная линза обеспечивает усиление интенсивности в плоскости образца ~ 100 во всем рабочем диапазоне благодаря малому вертикальному размеру источника (рис. 4, *b*).

Задавался меридионально изогнутый кремниевый кристалл Лауэ толщиной 1 mm с асимметричным срезом 2° и горизонтальной апертурой 20 mm. Полагалось, что кристалл используется для работы на 42, 84 и 126 keV на отражениях Si(220), Si(440) и Si(660) соответственно при неизменных ориентации ($\Theta_B = 4.409°$) и радиусе изгиба 4.3 m. Расстояние от источника до кристалла — 36 m, от кристалла до образца — 2 m. На рис. 7 приведены кривые качания кристалла, рассчитанные путем численного решения уравнений Такаги–Топена. На рис. 8 приведены характеристики пучка СИ на образце,

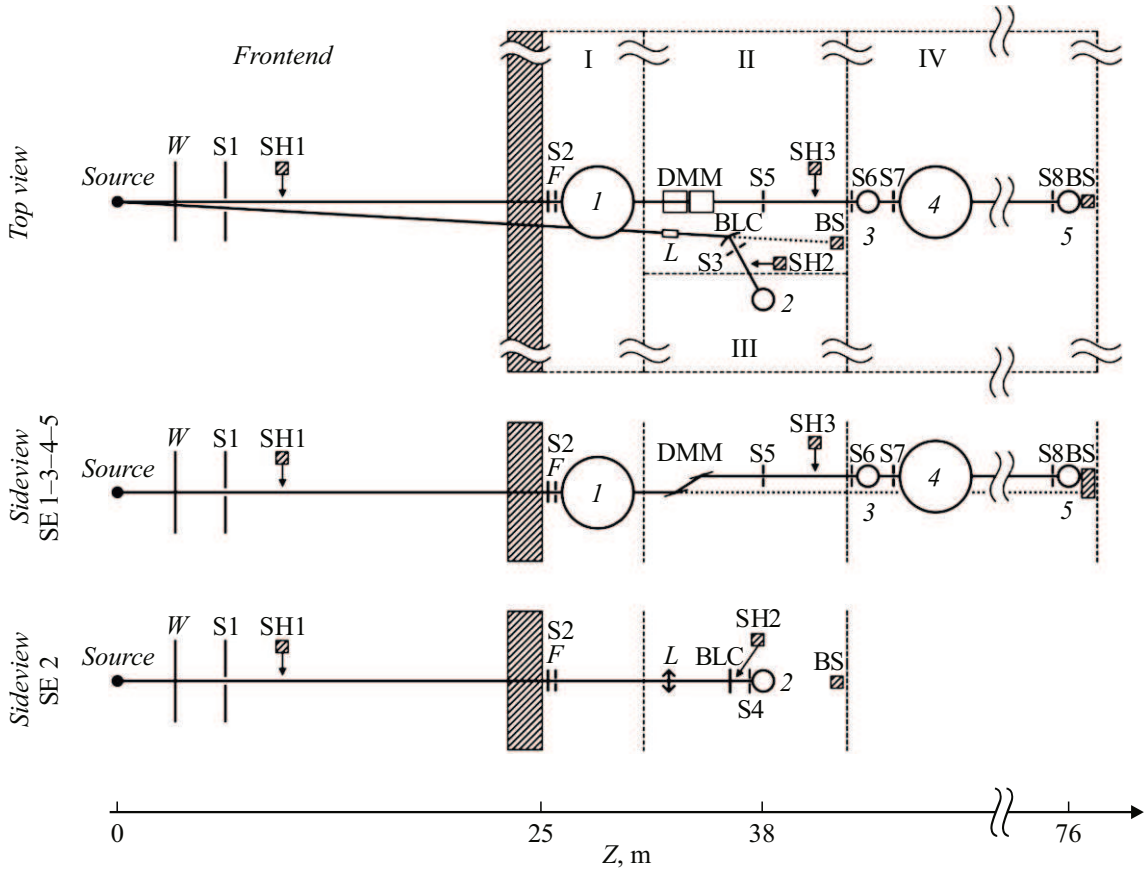

Рис. 6. Оптическая схема станции „РФА-Геология“. Арабскими цифрами пронумерованы системы окружения образца, римскими — радиационно-защищенные хатчи. Штриховой линией обозначены границы хатчей, пунктирной — ход неотклоненных лучей. Source — точка излучения, W — вакуумное окно, S1-S8 — щелевые диафрагмы, SH1-SH3 — радиационные затворы, F — блок охлаждаемых фильтров, BS — бимстоп, L — вертикально фокусирующая планарная линза, BLC — горизонтально фокусирующий изогнутый Лауэ кристалл, DMM — двухзеркальный многослойный монохроматор.

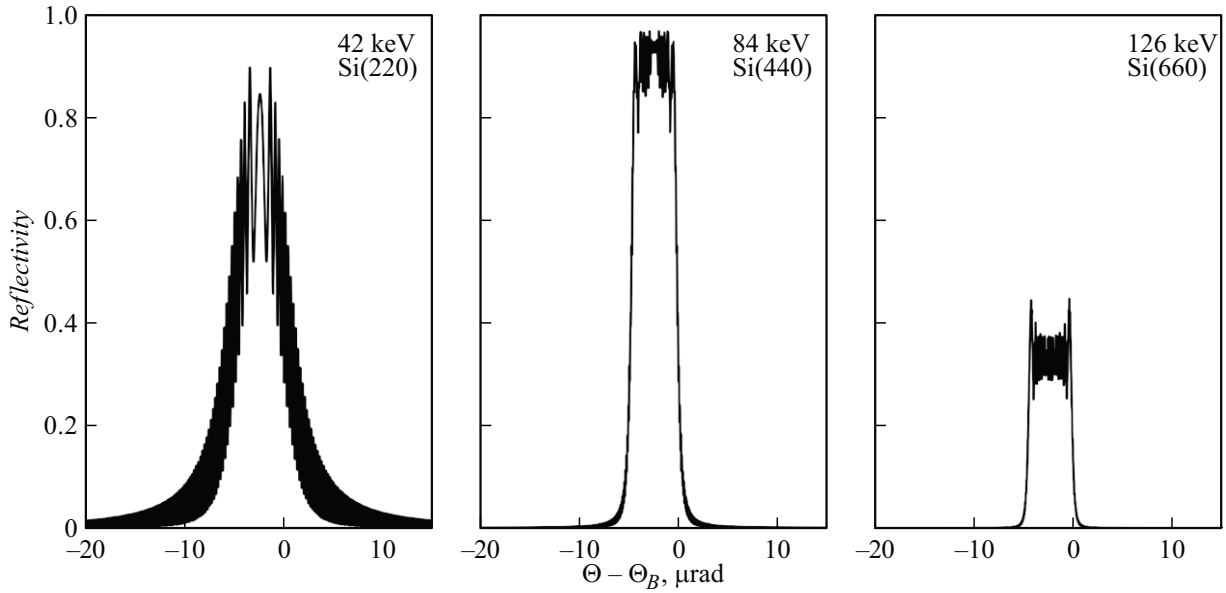

Рис. 7. Кривые качания фокусирующего асимметричного кристалла Лауэ с меридиональным изгибом. Рассчитано в XRT [20].

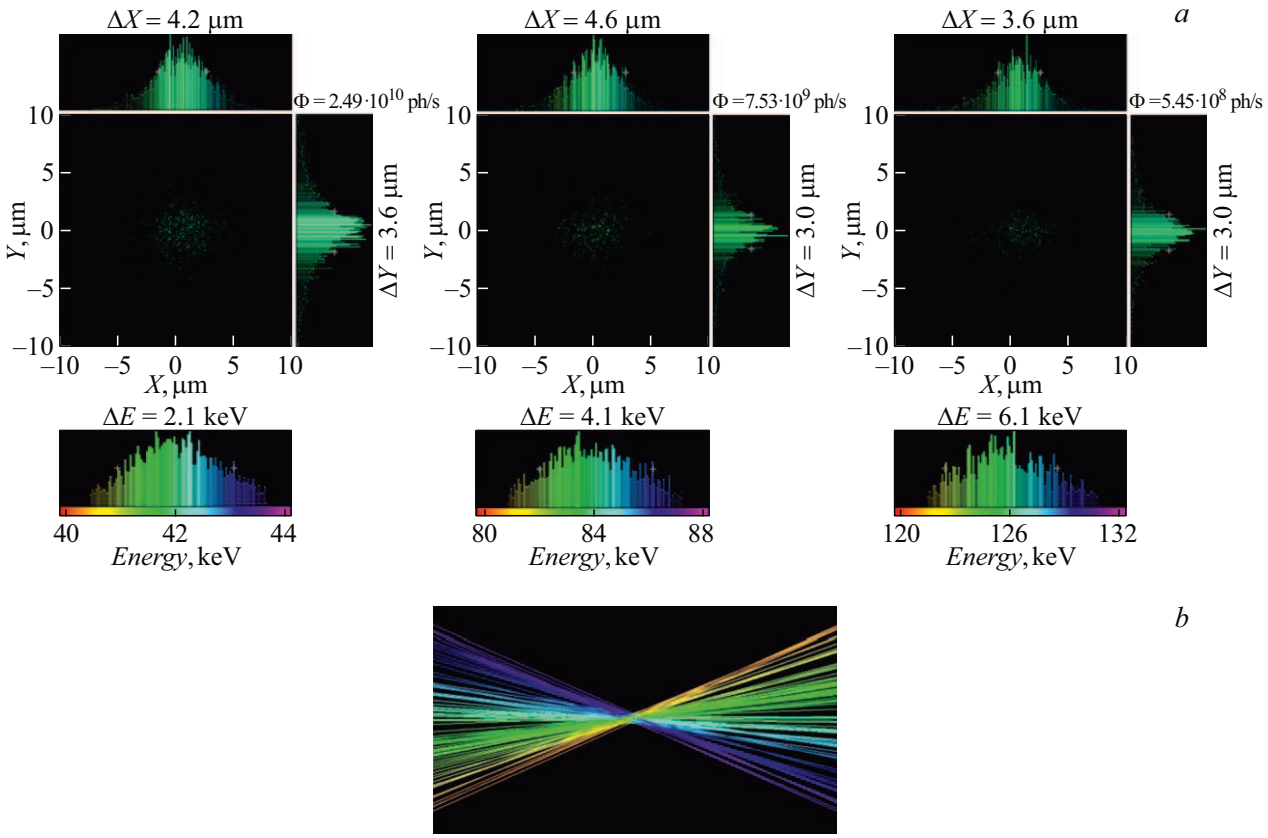

Рис. 8. Результаты трассировка лучей в СОО *2*: фокусное пятно для 42, 84 и 126 keV (*a*), характер хода лучей вблизи фокуса — вид сверху, не в масштабе (*b*). Указаны размеры фокусного пятна, ширины спектральных полос и потоки фотонов пучка СИ. Рассчитано в XRT [21].

полученные в результате трассировки лучей с учетом рассчитанных кривых качания.

Явная дисперсия сходящегося пучка СИ после кристалла, допустимая в методах μXRF и STXM, позволяет регулировать спектральную ширину зондирующего излучения с помощью апертурной диафрагмы. В приведенном на рис. 8 случае эта диафрагма полностью открыта. Отметим, что при необходимости геометрический размер рентгеновского микрозонда может быть увеличен путем сдвига образца вдоль оптической оси или разъюстировки фокусирующей оптики.

4.3. СОО *3*

Для XRF в СОО *3* применяется фильтр, двухзеркальный многослойный монохроматор и полевая диафрагма. Здесь и далее в расчетах полагалось, что монохроматор настроен на пропускание спектральной полосы шириной $\Delta E/E = 10^{-2}$ на фиксированной энергии 60 keV, а зеркала монохроматора имеют рабочую область 60×1500 mm с периодическим многослойным покрытием W/B_4C. Задавалось покрытие с 200 слоев и линейно меняющимся вдоль зеркала периодом от 1.960 до 2.042 nm при равенстве толщин подслоев W и B_4C (по аналогии с [22]). Малый градиент периода необходим для компенсации уширения полосы пропускания, связанного с вертикальной расходимостью пучка СИ. Зеркала выставлены под углом 5.265 mrad к плоскости орбиты электронного пучка, центр монохроматора расположен в 33.5 m от источника, расстояние между центрами зеркал 1.5 m. Апертура монохроматора составляет 60×7.9 mm. Выходящий из монохроматора „розовый“ пучок параллелен „белому“ и смещен относительно него по вертикали на 15.8 mm. Для подавления низкоэнергетического излучения, способного пройти через монохроматор вследствие полного внешнего отражения, в пучок СИ вводится Ti-фильтр толщиной 0.5 mm. Коэффициенты пропускания монохроматора и фильтра, как функции энергии фотонов, приведены на рис. 9. При 60 keV они равны 0.79 и 0.84 соответственно.

Максимальный размер пучка СИ на образце, расположенном в 40 m от источника, составляет 68.6×9 mm. Соответствующие поток фотонов и мощность — $1.2 \cdot 10^{14}$ ph/s и 1.2 W. Неоднородность засветки 43 % (PV).

4.4. СОО *4*

Для ADXRD и рентгенографии в фазовом контрасте в СОО *4* также используются Ti-фильтр 0.5 mm, мно-

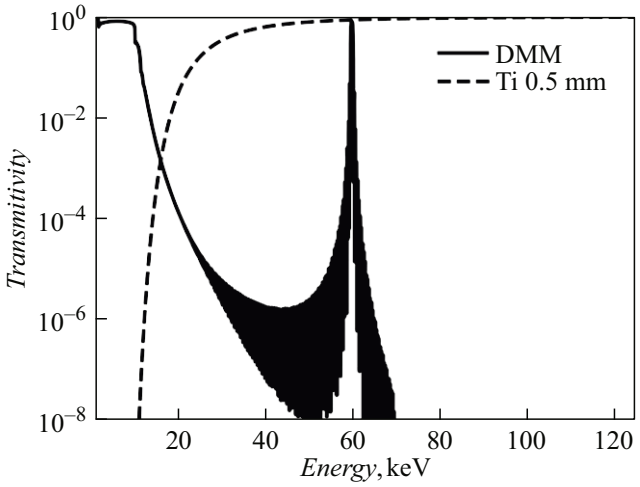

Рис. 9. Коэффициенты пропускания фильтра и двухзеркального многослойного монохроматора. Вторая гармоника подавлена, поскольку толщины подслоев W и B_4C равны. Рассчитано в XRT.

гослойный монохроматор и полевая диафрагма. Поток фотонов на образце, расположенном в 44 m от источника, при выделении поля 1×1 mm (для ADXRD) составляет $1.8 \cdot 10^{11}$ ph/s, соответствующая мощность 1.8 mW, неоднородность освещенности в плоскости образца внутри указанного поля 0.4 % (PV). При выделении поля 5×5 mm (для рентгенографии) поток составляет $4.6 \cdot 10^{12}$ ph/s, соответствующая мощность 44 mW, неоднородность освещенности 11 % (PV).

Для EDXRD и рентгенографии в абсорбционном контрасте монохроматор выводится из пучка, применяется фильтр Ti 1 mm, а пресс СОО *4* опускается на 15.8 mm. При выделении поля 1×1 mm (для EDXRD) поток составляет $3.3 \cdot 10^{13}$ ph/s, соответствующая мощность 0.46 W, неоднородность освещенности 1.1 % (PV). При выделении поля 5×5 mm (для рентгенографии) поток составляет $7.8 \cdot 10^{14}$ ph/s, соответствующая мощность 11 W, неоднородность освещенности 24 % (PV).

4.5. СОО *5*

Для СТ в СОО *5* используется фильтр и полевая диафрагма. Рассмотрен случай применения Ti-фильтра 1 mm. Максимальные размеры пучка СИ на расположенном в 76 m от источника образце составляют 130 mm по горизонтали и 17 mm (FWHM) по вертикали. Поток фотонов $2.4 \cdot 10^{16}$ ph/s, соответствующая мощность 297 W.

Заключение

Использование сильнопольного короткого сверхпроводящего шифтера на станции „РФА-Геология“ расширяет доступный спектральный диапазон для пользователей ЦКП „СКИФ“ в область высоких энергий порядка 100 keV и выше, в том числе, позволяя формировать рентгеновский микрозонд. Простая оптическая схема станции разработана с учетом требований к пучку СИ, налагаемых задачами геологоразведки, геофизики и геодинамики при исследованиях такими методами, как дифракция с энергетической и угловой дисперсией, рентгенография в абсорбционном и фазовом контрасте, рентгенофлуоресцентная спектрометрия и томография в режимах микрозонда и широкого пучка. Конфигурация станции из двух линий и пяти специализированных систем окружения образца позволяет проводить эксперименты и подготовительные работы одновременно, что особенно важно при длительном выходе прессов высокого давления на рабочие режимы.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ИГМ СО РАН (FWZN-2026-0018), и государственного задания ЦКП „СКИФ“ Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН (FWUR-2024-0042) и государственного задания ГЕОХИ РАН (FMMZ-2024-0056).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] G. Baranov, A. Bogomyagkov, I. Morozov, S. Sinyatkin, E. Levichev. Phys. Rev. Accel. Beams, **24** (12), 120704 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.24.120704

[2] A. Shatskiy, D. Yamazaki, G. Morard, T. Cooray, T. Matsuzaki, Y. Higo, K.I. Funakoshi, H. Sumiya, E. Ito, T. Katsura. Rev. Sci. Instrum., **80** (2) (2009). DOI: 10.1063/1.3084209

[3] D. Yamazaki, E. Ito, T. Yoshino, N. Tsujino, A. Yoneda, H. Gomi, J. Vazhakuttiyakam, M. Sakurai, Y. Zhang, Y. Higo, Y. Tange. C.R. Geosci., **351** (2–3), 253 (2019). DOI: 10.1016/j.crte.2018.07.004

[4] T. Katsura, K.I. Funakoshi, A. Kubo, N. Nishiyama, Y. Tange, Y.I. Sueda, T. Kubo, W. Utsumi. Phys. Earth Planet. Inter., **143**, 497 (2004). DOI: 10.1016/j.pepi.2003.07.025

[5] A.A. Sedov, A.V. Bragin, A.A. Volkov, A.I. Erokhin, A.V. Zorin, F.P. Kazantsev, P.V. Kanonik, N.A. Mezentsev, A.N. Safronov, O.A. Tarasenko, S.V. Khrushchev. Instrum. Exp. Tech., **67** (Suppl 2), S293 (2024). DOI: 10.1134/S0020441224701896

[6] В.А. Шкаруба, А.В. Брагин, А.А. Волков, А.И. Ерохин, А.В. Зорин, Ф.П. Казанцев, П.В. Каноник, Н.А. Мезенцев, А.Н. Сафронов, А.А. Седов, О.А. Тарасенко. Письма в ЭЧАЯ, **20** (4), (2023). EDN NEMKHQ

[7] V.M. Borovikov, V.K. Djurba, M.G. Fedurin, V.V. Repkov, G.V. Karpov, G.N. Kulipanov, M.V. Kuzin, N.A. Mezentsev, V.A. Shkaruba, D. Kraemer, D. Richter. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, **467**, 181 (2001). DOI: 10.1016/S0168-9002(01)00269-8

[8] A. Shatskiy, K.D. Litasov, H. Terasaki, T. Katsura, E. Ohtani. High Press. Res., **30** (3), 443 (2010). DOI: 10.1080/08957959.2010.515079

[9] K.D. Litasov, A. Shatskiy, Y. Fei, A. Suzuki, E. Ohtani, K. Funakoshi. J. Appl. Phys., **108** (5), (2010). DOI: 10.1063/1.3481667
[10] T. Katsura, A. Shatskiy, M.G.M. Manthilake, S. Zhai, H. Fukui, D. Yamazaki, T. Matsuzaki, A. Yoneda, E. Ito, A. Kuwata, A. Ueda. Phys. Earth Planet. Inter., **174** (1–4), 86 (2009). DOI: 10.1016/j.pepi.2008.08.002
[11] T. Tanaka. J. Synchrotron Radiat., **28** (4), 1267 (2021). DOI: 10.1107/S1600577521004100
[12] T. Tomie. Spectrochim. Acta Part B, **65** (3), 192 (2010). DOI: 10.1016/j.sab.2010.02.009
[13] C. Schulze, U. Lienert, M. Hanfland, M. Lorenzen, F. Zontone. J. Synchrotron Radiat., **5** (2), 77 (1998). DOI: 10.1107/S0909049597014568
[14] B. Cederström, R.N. Cahn, M. Danielsson, M. Lundqvist, D.R. Nygren. Nature, **404** (6781), 951 (2000). DOI: 10.1038/35010190
[15] S.D. Shastri, P. Kenesei, A. Mashayekhi, P.A. Shade. J. Synchrotron Radiat., **27** (3), 590 (2020). DOI: 10.1107/S1600577520003665
[16] F.P. Romano, C. Caliri, L. Cosentino, S. Gammino, L. Giuntini, D. Mascali, L. Neri, L. Pappalardo, F. Rizzo, F. Taccetti. Anal. Chem., **86** (21), 10892 (2014). DOI: 10.1021/ac503263h
[17] A. Haboub, A.A. MacDowell, S. Marchesini, D.Y. Parkinson. Rev. Sci. Instrum., **85** (6), (2014). DOI: 10.1063/1.4882337
[18] S. Aoki, A. Takeuchi, M. Ando. J. Synchrotron Radiat., **5** (3), 1117 (1998). DOI: 10.1107/S0909049597018542
[19] Я.В. Ракшун, Ю.В. Хомяков, Е.И. Глушков, А.С. Гоголев, М.В. Горбачев, А.В. Дарьин, Ф.А. Дарьин, И.П. Долбня, С.В. Ращенко, В.А. Чернов, Н.И. Чхало. Изв. ТПУ. Инжиниринг георесурсов, **336** (5), 229 (2025). DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5122
[20] K. Klementiev, R. Chernikov. Synchrotron Radiat. News, **36** (5), 23 (2023). DOI: 10.1080/08940886.2023.2274735
[21] K. Klementiev, R. Chernikov. Proc. SPIE, **9209**, 60 (2014). DOI: 10.1117/12.2061400
[22] T. Koyama, Y. Senba, H. Yamazaki, T. Takeuchi, M. Tanaka, Y. Shimizu, K. Tsubota, Y. Matsuzaki, H. Kishimoto, T. Miura, S. Shimizu. J. Synchrotron Radiat., **29** (5), 1265 (2022). DOI: 10.1107/S1600577522006610