

УДК 549.211, 549.212, 620.187.3, 523.681.8

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПАКТНОГО УГЛЕРОДНОГО ВЕЩЕСТВА
КАРСКОЙ АСТРОБЛЕМЫ МЕТОДОМ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ
СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

**В.В. Уляшев¹, А.А. Велигжанин², Т.Г. Шумилова¹,
Б.А. Кульницкий³, И.А. Пережогин³, В.Д. Бланк³**

¹*Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, ул. Первомайская 54, г. Сыктывкар, 167982 Россия;
vvulashev@geo.komisc.ru*

²*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», пл. Академика Курчатова,
г. Москва, 123182 Россия*

³*Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов, ул. Центральная 7а,
г. Москва, г. Троицк, 108840 Россия*

**STUDY OF IMPACT CARBON MATTER OF THE KARA ASTROBLEME
BY SMALL-ANGLE SCATTERING OF SYNCHROTRON RADIATION**

**V.V. Ulyashev¹, A.A. Veligzhanin², T.G. Shumilova¹,
B.A. Kulnitskiy³, I.A. Perezhogin³, V.D. Blank³**

¹*IG Komi SC UB RAS, ul. Pervomaiskaya 54, Syktyvkar, 167982 Russia; vvulashev@geo.komisc.ru*

²*National Research Center «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, Moscow, 123182 Russia*

³*Technological Institute of Superhard and Novel Carbon Materials, ul. Tsentral'naya 7a, Moscow, Troitsk, 108840 Russia*

В статье описываются результаты изучения метаморфизованного углеродистого вещества (МУВ) Карской астроблемы (Пай-Хой, Россия) методом малоуглового рассеяния рентгеновского синхротронного излучения (МУР) в сопоставлении с данными высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии (ВРПЭМ). Приводятся результаты сравнения наноструктурных особенностей импактно-метаморфизованного и первичного углеродистого вещества осадочных пород мишени в модели рассеяния синхротронного излучения на объектах сферической формы с логнормальным распределением. Для МУВ характерен размер рассеивателей около 6 нм и нанопористая структура. Первичное углеродистое вещество не имеет рассеивателей выделенного размера в исследованном диапазоне малоуглового рассеяния рентгеновского синхротронного излучения.

Илл. 4. Табл. 1. Библ. 17.

Ключевые слова: импактный метаморфизм, Карская астроблема, Пай-Хой, слабоупорядоченное углеродное вещество, малоугловое рассеяние синхротронного рентгеновского излучения, высокоразрешающая просвечивающая электронная микроскопия.

The study of the metamorphosed carbonaceous matter (MCM) of the Kara astrobleme (Pay-Khoy, Russia) by the methods of small-angle scattering of X-ray synchrotron radiation (SAXS) and high resolution transmission electron microscopy (HRTEM) is described. The nanostructured features of the impactmetamorphosed and primary carbonaceous matter of sedimentary rocks are analyzed in the framework of the model of synchrotron radiation scattering by lognormal distribution of spherical particles. The MCM is characterized by 6 nm structural elements and nanoporous structure; no scattering elements with characteristic size within the analyzed small-angle X-ray scattering range were identified for the primary carbonaceous matter.

Figures 4. Tables 1. References 17.

Key words: impact metamorphism, Kara astrobleme, Pay-Khoy, low ordered carbon matter, small-angle X-ray scattering, high resolution transmission electron microscopy.

Введение

Импактный метаморфизм вызывает исследовательский интерес в связи с экстремальными условиями преобразования вещества в природе. В зависимости от степени интенсивности воздействия ударный процесс вызывает различные фазовые трансформации (Масайтис и др., 1979; Melosh, 1989). Преобразование слабоупорядоченного углеродистого вещества осадочных пород мишени во время импактного метаморфизма остается слабо изученным, хотя широко распространено в импактных объектах.

К основным методам изучения углеродного вещества, в том числе и импактно-метаморфизованного, относятся рентгеновская дифрактометрия, сканирующая электронная микроскопия, атомно-силовая микроскопия, просвечивающая электронная микроскопия, Рамановская спектроскопия, ИК-спектроскопия, термический анализ. Дополнительные структурные данные можно получить неразрушающим методом малоуглового рассеяния синхротронного (рентгеновского) излучения. Данный подход не требует сложной пробоподготовки и успешно используется для выявления нанокристаллических фаз в образцах и исследования особенностей наноструктуры слабоупорядоченных и аморфных материалов.

Согласно ранее полученным данным, метаморфизованное углеродное вещество (МУВ) Карской астроблемы можно отнести к слабоупорядоченному (Уляшев и др., 2018; Shumilova et al., 2018), которое характеризуется наноструктурированием и агрегируется (Уляшев и др., 2018) из графеновых сеток, что требует их исследования высокоразрешающими методами. Рентгеновские исследования слабоупорядоченных углеродных веществ применяются достаточно активно (Ковалевский, 1994; Jurkiewicz et al., 2017), однако их рентгеноаморфность предопределяет неопределенность интерпретации традиционных дифракционных данных. Структурообразование УВ характеризуется атомно-молекулярным уровнем с формированием надмолекулярных кластеров, размеры которых варьируются в пределах первых десятков нанометров (Юшкин, 1994). Для изучения строения твердых тел на таком структурном уровне активно используется малоугловое рассеяние рентгеновского синхротронного излучения (МУР).

Различные типы УВ (природные, техногенные) обычно анализируются методами малоуглового

рентгеновского рассеяния (МУРР) и малоуглового нейтронного рассеяния (МУНР) (Nishikawa et al., 1998; Avdeev et al., 2006; Zhao et al., 2014), с помощью которых определяются параметры структурных элементов (СЭ), оцениваются фрактальные размерности структуры, пористость, эффективная поверхность и т.д. Для ударно-метаморфизованных УВ подобные исследования до настоящего времени не проводились. Поэтому применение новых для данного объекта высокоразрешающих технологий исследования наноструктурного упорядочения является актуальным, позволяя понять возможные варианты преобразования осадочного УВ в процессе метаморфизма.

Благодаря появлению мощных источников синхротронного излучения, информативность методов МУР в последние годы значительно выросла. Тем не менее, наиболее эффективным способом анализа наноразмерных структур является сопоставление результатов малоуглового рассеяния и высокоразрешающих методов прямого наблюдения (Свергун и др., 2011). Т.к. малоугловое рассеяние не различает рассеяния на плотных частицах и на порах, высокоразрешающие методы прямого наблюдения позволяют определить природу рассеивающих объектов. Такой подход используется и для изучения кристаллических и некристаллических углеродных материалов.

Нами проведены исследования ударно-метаморфизованного и первичного УВ методом малоуглового рассеяния с использованием источника синхротронного рентгеновского излучения путем сравнительного анализа результатов различных методик расчета структурных параметров с данными метода высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии (ВРПЭМ).

Объект исследования

Образцы ударно-метаморфизованных и первичных осадочных пород были отобраны сотрудниками лаборатории минералогии алмаза Института геологии Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар) в ходе экспедиционных работ в 2015 и 2017 гг. в южной части Карской астроблемы и ее обрамления. Углеродные фазы были извлечены из импактных и первичных осадочных пород методом термохимического извлечения микроалмазов. Технология позволяет обогащать как микроалмазы, так и другие углеродные фазы размерами от первых микрометров и более и включает в себя комплексную

многоступенчатую химическую обработку с применением кислотного разложения и щелочного сплавления, стандартная навеска для обогащения составляет 5 г исходной породы. Обогащенные черные углеродные частицы собирались с фильтров под оптическим бинокулярным микроскопом. Для изучения УВ методами МУР и ВПРЭМ частицы растирались в агатовой ступке до образования однородного порошка, что необходимо для равномерного распределения частиц на подложке на большей площади при изучении методом МУР, а также для образования естественных тонких слоев при изучении с помощью ВПРЭМ.

Методы и методика эксперимента

Образцы были исследованы методом малоуглового рассеяния на установке «Дикси» Курчатовского источника синхротронного излучения (Korneev et al., 2005) при длине волны излучения 0.16 нм и расстоянии образец-детектор около 2.4 м. На станции использована точечная коллимация. Съемка производилась в интервале 0.07–1.1 нм⁻¹. Рассеянное излучение измерялось с помощью двумерного детектора MarCCD165. Экспозиция варьировалась от 20 до 600 с в зависимости от интенсивности рассеяния излучения образцом. Калибровка была проведена с помощью бегената серебра (Huang et al., 1993), имеющего межплоскостное расстояние 5.838 нм и серию дифракционных пиков в малоугловой области.

При малоугловом рассеянии определяется зависимость интенсивности рассеяния $I(q)$ от величины модуля вектора рассеяния [Glatter, Kratky, 1982]:

$$q = \frac{4\pi \sin \theta}{\lambda} \quad (1)$$

где θ – угол рассеяния, λ – длина волны. Для обработки результатов синхротронного рассеяния использовалось программное обеспечение SAXSFit (Ingham et al., 2008). В этой программе на основе аппроксимации экспериментальных данных МУР рассчитываются распределения рассеивающих сферических объектов по размерам с логнормальным распределением. Данный вид распределения наиболее характерен для природных объектов и часто применяется при описании распределения микро- и мезопор в углях (Zhao et al., 2014).

Для описания логнормального распределения используются два параметра: R_0 – центр распределения и σ – дисперсия распределения. Кроме

рассеяния от логнормального ансамбля частиц, учитываются возможный постоянный фон и закон рассеяния Aq^{-B} , отвечающий рассеянию на более крупных агрегатах.

Другой способ оценки размеров рассеивающих объектов использует расчет инвариантов. Малоугловое рассеяние любым рассеивающим объектом при $q \rightarrow 0$ описывается зависимостью $I(q) = N n^2 \exp(-q^2 R_g^2 / 3)$, где N – количество областей неоднородности в исследуемом объеме, n – количество рассеивающих электронов в одной области и R_g – радиус инерции области неоднородности (Свергун, Фейгин, 1986). В случае полидисперсной системы определяется массово-взвешенное среднее значение R_g для входящих в систему объектов. В случае объектов сферической формы их геометрический радиус R связан с R_g формулой (Свергун, Фейгин, 1986):

$$R^2 = \frac{5}{3} R_g^2 \quad (2)$$

Радиус инерции определялся по поведению кривой МУР в области малых углов двумя способами. Первый заключался в измерении угла наклона прямолинейных участков, областей Гинье, кривой МУР, построенной в координатах $\ln(I)$ от q^2 (Свергун, Фейгин, 1986). Второй способ, метод Кратки, использует координаты $q^2 I$ от q . Если размеры рассеивающих объектов попадают в область Гинье ($q \ll D^{-1}$), то на графике Кратки будет наблюдаться максимум в точке $q=q_m$, связанной с радиусом инерции соотношением:

$$R_g = \sqrt{3} / q_m \quad (3)$$

Наноструктурные особенности, энергодисперсионные спектры и спектры характеристических потерь энергии электронов были получены на высокоэнергетическом просвечивающем электронном микроскопе (ВПЭМ) JEM-2010 при напряжении 200 кВ (Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов, Москва, Троицк).

Результаты

Ввиду слабоупорядоченного характера исследуемых веществ при анализе данных малоуглового рассеяния нами учитывался постоянный вклад I_p в малоугловое рассеяние, обусловленный тепловыми флуктуациями плотности. Для определения постоянного фона использована методика, основанная

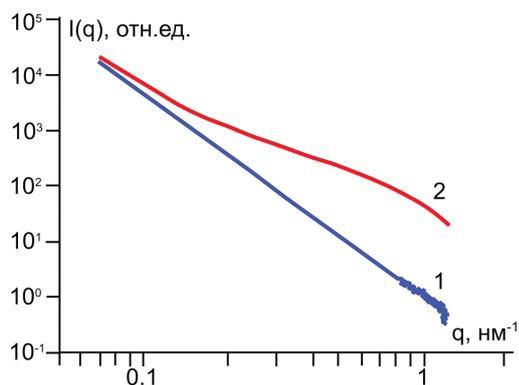


Рис. 1. Кривые малоуглового рассеяния синхротронного рентгеновского излучения в двойном логарифмическом масштабе в относительных единицах по оси ординат.

Здесь и на рис. 2: 1 – первичное УВ; 2 – метаморфизованное УВ.

Fig. 1. Curves of small-angle scattering of synchrotron X-Ray radiation in a double logarithmic scale with arbitrary Y scaling.

Here and in Fig. 2: 1 – primary carbonaceous substance; 2 – metamorphosed carbonaceous substance.

на построении зависимости $q^4 I$ от q^4 (Василевская, Антропова, 2009). Кривые малоуглового рассеяния и графики зависимости Кратки построены с вычетом из исходных данных компоненты I_p .

На рис. 1 представлены экспериментальные зависимости интенсивности рассеяния от модуля вектора рассеяния, ударно преобразованного и первичного УВ в двойных логарифмических координатах. Для оценки доступных к исследованию размеров неоднородностей используется соотношение между модулем вектора рассеяния и размерами неоднородности $qR = 2\pi$. В проведенных экспериментах рассеяние определяется неоднородностями с размерами в интервале R от 1 до 90 нм.

Зависимости $K(q) = q^2 \cdot I$ от волнового вектора q показаны на рис. 2. Максимумы на зависимости Кратки формируются за пределами влияния области межчастичной интерференции, и по их положению q_m можно более корректно оценивать размеры рассеивающих объектов, оценивая радиус инерции R_g по выражению (3) (Glatter, Kratky, 1982; Василевская, Антропова, 2009).

Формы кривых на графике Кратки двух образцов отличаются, у образца метаморфизованного УВ наблюдается сглаженная куполообразная зависимость с выраженным одним максимумом $q_m = 0.53 \text{ nm}^{-1}$. Это свидетельствует о присутствии в образце полидисперсных систем рассеивающих объектов, на фоне которых выделяются объекты преимущественного размера. Для образца первичного

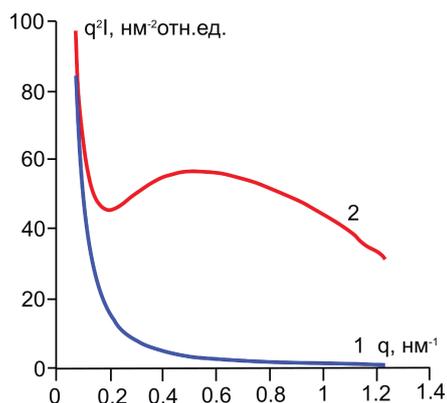


Рис. 2. Зависимости Кратки для образцов в относительных единицах по оси ординат.

Fig. 2. Kratky correlations for samples with arbitrary Y scaling.

УВ характерен равномерный спад без явно выраженного максимума. Это свидетельствует об отсутствии рассеивающих объектов с выделенным размером в данном диапазоне векторов рассеяния.

При определении радиуса инерции R_g методом Гинье систематическая ошибка в определении радиуса инерции зависит от максимального значения q_{max} , до которого наблюдается прямолинейная зависимость в координатах $\ln(I)$ от q^2 . При $q_{max} \cdot R_g < 1$ ошибка составляет несколько процентов, а при значениях $q_{max} \cdot R_g = 1.5-2$ она возрастает до 20–30%. В случае, когда $q_{max} \cdot R_g > 2$, расчеты являются некорректными (Свергун, Фейгин, 1986) и не могут быть использованы. Результаты расчетов размеров рассеивающих объектов для обоих методов определения R_g приведены в таблице.

Характер кривых МУР и графики Кратки указывают на полидисперсность размеров рассеивающих объектов. Поэтому при интерпретации данных МУР использована модель логнормального распределения рассеивающих объектов. В данной модели удалось получить стабильное решение только для метаморфизованного УВ, описываемого одной фракцией рассеивающих объектов. Для первичного УВ решение нестабильно и центр логнормального распределения определяется с большой ошибкой. На рис. 3 приведено логнормальное распределение по размерам рассеивающих объектов для ударно-метаморфизованного УВ. Основной вклад в распределение вносят рассеивающие объекты в диа-

Таблица

Геометрические параметры рассеивающих объектов в УВ, определенные методами Гинье, Кратки и по данным программы SAXSFit

Table

Geometric parameters of scattering objects of carbonaceous material analyzed by Guinier and Kratky methods and in program SAXSFit

Тип вещества	Размер рассеивателя по Гинье, 2R, нм	Размер рассеивателя по Кратки, 2R, нм	Размер рассеивателя по программе SAXSFit, 2R, нм
Метаморфизованное УВ	5.8	5.9	6.6
Первичное УВ	Не определен	Не определен	Не определен

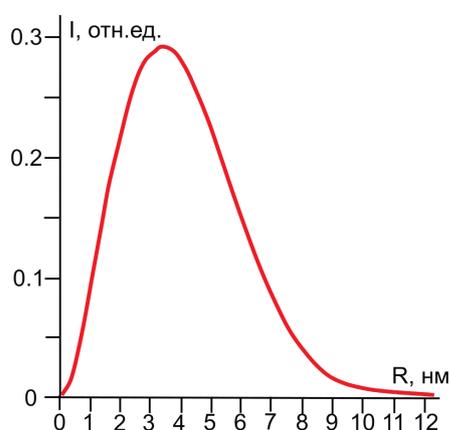


Рис. 3. Логнормальное распределение рассеивающих объектов по размерам для метаморфизованного УВ.

Fig. 3. Lognormal size distribution of scattering objects for metamorphosed carbonaceous substance.

пазонах радиусов (R) 2–6 нм с максимумом около 3.6 нм, что соответствует среднему размеру рассеивающих объектов ($2R$) 7.2 нм.

Обсуждение

Величины рассеивающих объектов ударно-метаморфизованного УВ, полученные независимым анализом графиков Кратки и Гинье, а также функцией распределения полидисперсных сфер при помощи программы SAXSFit, практически совпадают для малых объектов. Отсутствие резких перегибов (плавный спуск) на графике Гинье указывает на отсутствие дискретности в размерах полидисперсных рассеивающих объектов. При этом может наблюдаться разброс (до 20 %) размеров рассеивателей, рассчитанных по методу Гинье, с данными методов Кратки и функцией распределения. Этот разброс может быть связан со сложностью выделения прямолинейных участков на графике Гинье для сильно полидисперсных распределений и, соответственно,

с высокой ошибкой получаемых значений. Оценки радиуса инерции при анализе зависимости Кратки и функции распределения по размерам являются значительно более устойчивыми к наличию примеси полидисперсных частиц (Свергун и др., 2011).

В случае первичного УВ нам не удалось определить параметры рассеивателей ни одним из методов. Отсутствие характеристических признаков для методов Кратки и Гинье свидетельствует о том, что в образце нет доминирующих рассеивающих объектов с радиусом от 1 до 90 нм, определяемых с помощью малоуглового рассеяния. Видимо, распределение рассеивателей по размерам в этом диапазоне существенно отличается от логнормального, а вклад в рассеяние от структурных элементов атомарного размера является преобладающим в этой области.

При анализе малоуглового рассеяния уровень структурной информации определяется, главным образом, природой рассеивающих объектов. Для полидисперсных соединений за счет разных факторов частиц метод дает усредненные общие характеристики и распределение рассеивающих частиц по размерам, форме и строению (Свергун и др., 2011). В основном рассеяние происходит на неоднородностях электронной плотности, т.е. существенный вклад имеет величина контраста рентгеновской плотности между рассеивающими объектами и вмещающей их матрицей. При сильном отличии плотности частицы от матрицы ($\Delta\rho = \rho - \rho_o$) их форма четко проявляется на основном фоне. При слабом контрасте ($\rho \sim \rho_o$) основной вклад в кривую МУР вносят уже не столько форма рассеивающих объектов, сколько неоднородности их строения. Поэтому контраст является одной из важнейших характеристик образцов при исследованиях МУР. В нашем случае углеродистые вещества, имеющие не более нескольких процентов примесей,

в данном контексте могут быть отнесены к фазо-однообразным веществам. Слабый контраст наноструктурных элементов углеродных веществ в рентгеновском излучении затрудняет получение структурной информации. Следовательно, и поры, и частицы могут давать одинаковые кривые рассеяния (Glatter, Kratky, 1982).

Таким образом, вопрос о том, рассеяние на каких объектах мы наблюдаем для слабоупорядоченных УВ, можно корректно решить только с привлечением данных независимых методов. К методам, позволяющим наблюдать структурные элементы в нанометровом диапазоне размеров, относится высокоразрешающая просвечивающая электронная микроскопия. Результаты применения ВРПЭМ при изучении наноструктур углеродных веществ опубликованы во многих работах (Zhao et al., 2014; Уляшев и др., 2018; Shumilova et al., 2018).

Прямые наблюдения наноструктурных особенностей ударно-метаморфизованного УВ методом ВРПЭМ показывают, что в качестве рассеивающих объектов размерами до десятка нанометров могут рассматриваться как частицы, сформированные пакетами графеновых слоев, так и их внутренние поры и внешние (межчастичные) полости (рис. 4). На ВРПЭМ изображениях видны отличия в форме и размере внутренних полостей (нанопор), однако оценить форму частиц в данном диапазоне размеров затруднительно, т.к. мы наблюдаем многочисленные хаотические пересечения слоев. По ним невозможно корректно отследить, имеются ли у данного рассеивающего объекта границы раздела с соседними объектами, без чего не будет соблюдаться условие для рассеяния излучения на неоднородностях. Можно предположить, что в качестве границы раздела может выступать фазовая граница между пачками графитоподобных слоев и связующими (межглобулярными) слоями турбостратного углерода.

Судя по ВРПЭМ изображениям, в ударно-метаморфизованном УВ рассеивающими объектами с размерами около 5 нм являются поры (см. рис. 4). Поровое пространство ограничивается графеноподобными структурами и наблюдается между их пачками. При этом нельзя исключать вероятность того, что в качестве рассеивающих объектов здесь могут выступать сами графеновые пачки, излучение может отражаться также от границы раздела структурированной и неструктурированной фаз УВ. Размеры пачек составляют преимущественно около 4–6 нм, что хорошо согласуется с рассчитанными нами размерами рассеивающих объектов по МУР (7.2 нм).

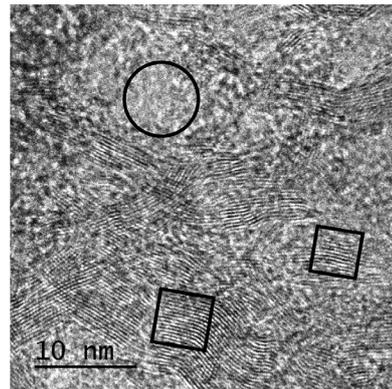


Рис. 4. ВРПЭМ изображение образца ударно-метаморфизованного УВ. Выделены потенциальные рассеивающие объекты: поры (круги) и пачки слоев (квадраты).

Fig. 4. HRTEM images of shock-metamorphosed carbon substance sample. The possible scattering objects are pores (circles) and graphene multilayer packs (squares).

Заключение

Применительно к ударно-метаморфизованному МУВ использование модели логнормального распределения сфер по размерам для расчета параметров рассеивающих объектов позволило определить вклад агрегации пор и графеновых пачек в малоугловое рассеяние синхротронного излучения и установить характерный размер рассеивателей, который хорошо согласуется с полученными данными ВРПЭМ и составляет около 7 нм. Применительно к первичному УВ наноструктурные особенности не выявляются, что, скорее всего, связано с отсутствием нанометровых рассеивающих объектов в диапазоне размеров, приемлемых для анализа с использованием МУР. По всей видимости, для его описания будет более корректно применение фрактальной модели. На основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что основная масса УВ осадочных пород при импактном метаморфизме претерпевает интенсивные преобразования на наноуровне с образованием нанопористой структуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-05-00516) и частичной поддержке Министерства образования и науки РФ ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (соглашение № 14.619.21.0007, проект RFMEFI61917X0007) с использованием уникальной научной установки Курчатowski

источник синхротронного излучения в НИЦ «Курчатовский институт» и программы НИР ГР № АААА-А17-117121270036-7.

Литература

Василевская Т.Н., Антропова Т.В. (2009) Изучение структуры стеклообразных нанопористых матриц методом рентгеновского малоуглового рассеяния. *Физика твердого тела*, **51**(12), 2386–2393.

Ковалевский В.В. (1994) Структура шунгитового углерода. *Журнал неорганической химии*, **39**(1), 28–32.

Масайтис В.Л., Гневушев М.А., Шафрановский Г.И. (1979) Минеральные ассоциации и минералогические критерии генезиса астроблем. *Записки ВМО*, **108**(3), 257–253.

Свергун Д.И., Фейгин Л.А. (1986) Рентгеновское и нейтронное малоугловое рассеяние. М., Наука, 279 с.

Свергун Д.И., Штыкова Э.В., Волков В.В., Фейгин Л.А. (2011) Рентгеновское малоугловое рассеяние, синхротронное излучение и структура био- и наносистем. *Кристаллография*, **56**(5), 777–804.

Уляшев В.В., Шумилова Т.Г., Кульницкий Б.А., Пережогин И.А., Бланк В.Д. (2018) Наноструктурные особенности углеродных полифазных агрегатов апоугольных продуктов импактного метаморфизма. *Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН* № 8. Сыктывкар 2018. 20–25. DOI: 110.19110/2221-1381-2018-8-20-25

Юшкин Н.П. (1994) Глобулярная надмолекулярная структура шунгитов: данные растровой туннельной микроскопии. *Доклады академии наук*, **337**(6), 800–803.

Avdeev M.V., Tropin T.V., Aksenov V.L., Rosta L., Garamus V., Rozhkova N.N. (2006) Pore structures in shungites as revealed by small-angle neutron scattering. *Carbon*, **44**, 954–961.

Glatter O., Kratky O. (1982) Small-angle X-ray scattering. London, Academic Press Inc., 515 p.

Huang T., Toraya H., Blanton T., Wu Y. (1993) X-ray powder diffraction analysis of silver behenate, a possible low-angle diffraction standard. *Journal of Applied Crystallography*, **3**, 180–184.

Ingham B., Li H., Allen E.L., Toney M.F. (2008) SAXSFit: A program for fitting small-angle X-ray and neutron scattering data. <https://arxiv.org/pdf/0901.4782.pdf>.

Jurkiewicz K., Duber S., Fischer H.E., Burian A. (2017) Modelling of glass-like carbon structure and its experimental verification by neutron and X-ray diffraction. *Journal of Applied Crystallography*, **50**, 36–48.

Korneev V.N., Ariskin N.I., Shishkov V.I., Gorin V.P., Sergienko P.M., Matyushin A.M., Shlektarev V.A., Vazina A.A., Sheromov M.A., Aul'chenko V.M., Zabelin A.V., Stankevich V.G., Yudin L.I. (2005) Current status of the small-angle station at Kurchatov center of synchrotron radiation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **543**(1), 368–374.

Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, **543**(1), 368–374.

Melosh H.J. (1989) Impact cratering, a geological process. New York, Oxford Univ. Press, 245 p.

Nishikawa K., Fukuyama K., Nishizawa T. (1998) Structure change of glass-like carbon with heat treatment, studied by small angle X-ray scattering: I. Glass-like carbon prepared from phenolic resin. *Journal of Applied Physics*, **37**(1), 6486.

Shumilova T.G., Isaenko S.I., Ulyashev V.V., Kazakov V.A., Makeev B.A. (2018) After-coal diamonds: An enigmatic type of impact diamonds. *European Journal of Mineralogy*, **30**, 61–76.

Zhao Y.X., Liu S.M., Derek E., Jiang Y., Zhu J. (2014) Pore structure characterization of coal by synchrotron small-angle X-ray scattering and transmission electron microscopy. *Energy Fuels*, **28**, 3704–3711.

References

Avdeev M.V., Tropin T.V., Aksenov V.L., Rosta L., Garamus V., Rozhkova N. N. (2006) Pore structures in shungites as revealed by small-angle neutron scattering. *Carbon*, **44**, 954–961.

Glatter O., Kratky O. (1982) Small-angle X-ray scattering. London: Academic Press Inc., 515 p.

Huang T., Toraya H., Blanton T., Wu Y. (1993) X-ray powder diffraction analysis of silver behenate, a possible low-angle diffraction standard. *Journal of Applied Crystallography*, **3**, 180–184.

Ingham B., Li H., Allen E.L., Toney M.F. (2008) SAXSFit: A program for fitting small-angle X-ray and neutron scattering data. <https://arxiv.org/pdf/0901.4782.pdf>.

Jurkiewicz K., Duber S., Fischer H.E., Burian A. (2017) Modelling of glass-like carbon structure and its experimental verification by neutron and X-ray diffraction. *Journal of Applied Crystallography*, **50**, 36–48.

Korneev V.N., Ariskin N.I., Shishkov V.I., Gorin V.P., Sergienko P.M., Matyushin A.M., Shlektarev V.A., Vazina A.A., Sheromov M.A., Aul'chenko V.M., Zabelin A.V., Stankevich V.G., Yudin L.I. (2005) Current status of the small-angle station at Kurchatov center of synchrotron radiation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **543**(1), 368–374.

Kovalevsky V.V. (1994) [The structure of shungite carbon]. *Zhurnal neorganicheskoy khimii [Journal of Inorganic Chemistry]*, **39**(1), 28–32. (in Russian)

Masaytis V.L., Gnevushev M.A., Shafranovskiy G.I. (1979) [Mineral assemblages and mineralogical criteria for genesis of astroblemes]. *Zapiski vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva [Proceedings of All-Union Mineralogical Society]*, **108**(3), 257–253. (in Russian)

Melosh H.J. (1989) Impact cratering, a geological process. New York, Oxford Univ. Press, 245 p.

- Nishikawa K., Fukuyama K., Nishizawa T.** (1998) Structure change of glass-like carbon with heat treatment, studied by small angle X-ray scattering: I. Glass-like carbon prepared from phenolic resin. *Journal of Applied Physics*, **37**(1), 6486.
- Shumilova T.G., Isaenko S.I., Ulyashev V.V., Kazakov V.A., Makeev B.A.** (2018) After-coal diamonds: An enigmatic type of impact diamonds. *European Journal of Mineralogy*, **30**, 61–76.
- Svergun D.I., Feigin L.A.** (1986) [X-ray and neutron small-angle scattering]. Moscow, Nauka, 279 p. (in Russian)
- Svergun D.I., Shtykova E.V., Volkov V.V., Feigin L.A.** (2011) [X-ray small-angle scattering, synchrotron radiation and structure of bio- and nanosystems]. *Kristallografiya [Crystallography]*, **56** (5), 777–804. (in Russian)
- Ulyashev V.V., Shumilova T.G., Kulnitsky B.A., Perezhogin I.A., Blank V.D.** (2018) [Nanostructural features of carbon polyphase aggregates of apogonal products of impact metamorphism]. *Vestnik instituta geologii Komi NTS UrO RAN [Bulletin of Institute of Geology of Komi Science Center UB RAS]* (8). Syktyvkar 2018. 20-25. DOI: 110.19110/2221-1381-2018-8-20-25.
- Vasilevskaya T.N., Antropova T.V.** (2009) [Study of structure of vitreous nanoporous matrices by X-ray small-angle scattering]. *Fizika tverdogo tela [Physics of Solid Body]*, **51**(12), 2386–2393. (in Russian)
- Yushkin N.P.** (1994) [Globular supramolecular structure of schungites: data from raster tunnel microscopy]. *Doklady Akademii Nauk [Doklady Earth Sciences]*, **337**(6), 800–803. (in Russian)
- Zhao Y.X., Liu S.M., Derek E., Jiang Y., Zhu J.** (2014) Pore structure characterization of coal by synchrotron small-angle X-ray scattering and transmission electron microscopy. *Energy Fuels*, **28**, 3704–3711.

Статья поступила в редакцию 18 июня 2018 г.