

Использование морфометрических величин при изучении рельефа поверхности рентгенооптических элементов

© А.А. Дедкова,^{1,2} И.В. Флоринский,² А.К. Чернышев³

¹ Национальный исследовательский университет „МИЭТ“,
124498 Зеленоград, Москва, Россия

² Институт математических проблем биологии РАН — филиал Института прикладной математики
им. М. В. Келдыша РАН,
142290 Пущино, Россия

³ Институт физики микроструктур РАН,
607680 Нижний Новгород, Россия
e-mail: dedkova@ckp-miet.ru, iflor@mail.ru

Поступило в Редакцию 13 апреля 2023 г.

В окончательной редакции 13 апреля 2023 г.

Принято к публикации 13 апреля 2023 г.

Рассмотрено применение морфометрических величин (кривизны максимальной, минимальной, средней, топографического индекса и др.) при исследовании поверхности рентгенооптических элементов. Расчеты проведены на цифровых моделях рельефа сферических вогнутых подложек: изначальных и сглаженных цифровых моделях рельефа, до и после технологических обработок (механического притира, осесимметричной обработки, локальной обработки). Продемонстрирована наглядная визуализация слабовыраженных неоднородностей, в том числе не отображаемых на картах исходных цифровых моделей рельефа. Рассмотрение включало изучение как исследуемых образцов, так и погрешностей формирования цифровых моделей рельефа (артефактов от регистрирующей системы и от неоднородности среды), а также особенности масштабной декомпозиции при использовании универсального спектрально-аналитического метода.

Ключевые слова: поверхность, рельеф, цифровая модель рельефа, ЦМР, многоуровневый анализ, формообразование, асферизация, интерферометрия, рентгеновская оптика, многослойное интерференционное зеркало, кривизна, морфометрическая величина, геоморфометрия, дефект, артефакт измерений.

DOI: 10.21883/JTF.2023.07.55770.89-23

Введение

При изготовлении рентгеновской оптики большое внимание уделяется контролю формы изготавливаемых отражательных элементов. Точность формы изготовленной поверхности определяет разрешение рентгеновских зеркал [1].

Большое число работ различных научных групп [1–8] посвящено вопросам формирования поверхности заданного профиля, или, иначе говоря, управления локальной кривизной поверхности оптических элементов [1–17]. Процесс коррекции формы является итерационным и требует на каждой стадии коррекции измерения и анализа формы поверхности [2]. По сформированной карте поверхности рассчитываются конкретные требуемые объемы технологического воздействия, например, параметры ионного пучка (размер, ток, энергия, локальный угол падения ионов на поверхность, скорость травления и др.) для разработки оптимального алгоритма травления, позволяющего сформировать требуемую форму поверхности [2].

Вопросам, связанным с подходами к изучению рельефа и формы объектов, посвящены многие сотни работ. Однако отдельно следует выделить направление, по-

священное многоуровневому анализу поверхности (масштабной декомпозиции). Такая методика может быть полезна для выделения объектов заданного размера, например, выявления расположения частиц наполнителя в среде при обработке данных атомно-силовой микроскопии (АСМ) [18,19]. В работе [18] при исследовании полученной посредством АСМ цифровой модели рельефа (ЦМР) поверхности — она представлялась суммой двух рельефов: медленно меняющегося рельефа малой кривизны (поверхность макроуровня материала) и рельефа высокой кривизны (поверхность наноуровня материала) — разделение проводилось с помощью интегрального фильтра. В работе [19] также для полученной посредством АСМ ЦМР поверхности по аналогии рассмотрено разделение исходного изображения рельефа поверхности на три составляющих с кривизной разного масштаба. С другой стороны, масштабная декомпозиция может быть использована для более широких задач, связанных с изучением технологических процессов, приведших к итоговой форме изучаемого объекта. Например, в исследовании [20] методом двухмерного анализа сингулярного спектра выполнена масштабная декомпозиция рельефной поверхности шельфа (Японское море) с целью сопоставления с тектоническими осо-

бенностями региона на длительном временном периоде для интерпретации стадий и масштабов тектонических процессов, определяемых геометрией и протяженностью выделенных складчатых деформаций.

Одним из наиболее эффективных методов изучения особенностей рельефа поверхности является использование морфометрических величин, широко распространенное при изучении поверхности Земли в геоморфометрии. Геоморфометрия — научная дисциплина с развитой физико-математической теорией и мощным аппаратом вычислительных методов, предметом которой является математическое моделирование и анализ рельефа, а также взаимосвязей между ним и другими компонентами геосистем [21]. Международный опыт исследований в области геоморфометрии обобщен в серии аналитических обзоров и книг [21–31]. Исходными данными для моделирования являются цифровые модели рельефа.

Морфометрической величиной называют однозначную функцию двух переменных, описывающую свойства топографической поверхности. Каждая морфометрическая величина характеризует определенную особенность локальной геометрии исследуемой поверхности, т.е. имеет свой физико-математический смысл. Морфометрические величины рассчитываются из ЦМР конечно-разностными методами или с использованием специализированных алгоритмов. Достаточно полный список морфометрических величин, а также расчетные формулы и алгоритмы приведены в [21,32,33].

Ранее частью авторов настоящей работы были рассмотрены вопросы применения опыта геоморфометрии для изучения формы пластин и структур на их основе [34–37], в том числе круглых тонкопленочных мембран [34]. Обработывались ЦМР, полученные посредством оптической профилометрии [34–36] и АСМ [37]. Настоящая работа включает дальнейшее развитие этого направления и применение геоморфометрических подходов для изучения формы элементов рентгеновской оптики.

Задача исследования — изучение особенностей поверхности деталей рентгеновской оптики с использованием морфометрических величин; определение перечня сведений, которые могут быть получены при таком анализе по сравнению со стандартными методиками анализа карт рельефа поверхности.

1. Материалы и методы

В качестве исследуемых рентгенооптических элементов выступали:

- сферическая вогнутая подложка диаметром 160 mm, радиусом кривизны 297.4 mm, изготовленная из плавного кварца марки КВ (далее по тексту именуется „образец № 1“) (рис. 1–3);
- сферическая вогнутая подложка диаметром 66 mm, радиусом кривизны 345.4 mm, изготовленная из плав-

ного кварца марки КВ (далее по тексту именуется „образец № 2“) (рис. 4).

Исследуемые образцы были изготовлены с использованием технологий механического притира и ионно-пучкового травления. Методом механического притира формировалась заготовка с минимально достижимыми отклонениями полученной формы от расчетной сферы, а затем производилось доведение формы поверхности до требуемых параметров ионно-пучковым травлением. Ионно-пучковое травление проводилось в два этапа. На первом этапе осуществлялась коррекция осесимметричных ошибок формы поверхности широкоапертурным ионным источником через маску. На втором этапе проводилась финишная коррекция локальных ошибок формы поверхности малоразмерным ионным пучком с помощью источника с фокусирующей ионно-оптической системой.

Механический притир осуществлялся на полировально-доводочном станке ЗПД-350 с использованием нескольких видов суспензии на основе водного раствора микрочастиц оксида церия (CeO_2) с последовательным уменьшением размера зерна до 20 nm. Контроль радиуса кривизны производился на сферометре SuperSpherotronic HR.

Для осесимметричной коррекции применялся широкоапертурный ионный источник КЛАН-163М. Перед началом обработки из ЦМР выделялась осесимметричная часть, по которой рассчитывалась обрезаящая ионный пучок диафрагма. Обработка проводилась по схеме, показанной на рис. 5, b. Между широкоапертурным источником ускоренных ионов и заготовкой устанавливалась фигурная диафрагма, обрезаящая пучок ионов таким образом, чтобы при вращении обрабатываемой детали позади нее с поверхности детали удалялся материал с требуемой зависимостью глубины травления от радиуса.

Локальная коррекция производилась при помощи ионного источника КЛАН-12М с ионно-оптической фокусирующей системой. Данный источник формировал пучок ускоренных ионов со следующими параметрами: распределение плотности ионного тока в плоскости обрабатываемого образца близко к гауссовому, ширина на полувысоте $d \approx 3.3$ mm, максимальная плотность ионного тока до 95 mA/cm^2 . Обработка выполнялась нейтрализованными ионами Ar^0 с энергией $E_{\text{ion}} = 1000 \text{ eV}$.

Образец № 2 исследовался на различных технологических стадиях: после обработки по методике механического притира [15] (рис. 4, a, d), затем после осесимметричной коррекции широкоапертурным ионным источником (рис. 4, b, e) через специальную маску для травления (рис. 5, c), затем после локальной коррекции малоразмерным ионным пучком (рис. 4, c, f–i) [16].

Для формирования цифровых моделей рельефа использовался интерферометр с дифракционной волной сравнения (ИДВС) [17]. Особенностью данного интерферометра является использование источника сферических опорных волн на основе одномодового оптического волокна с субволновой выходной апертурой. Данный

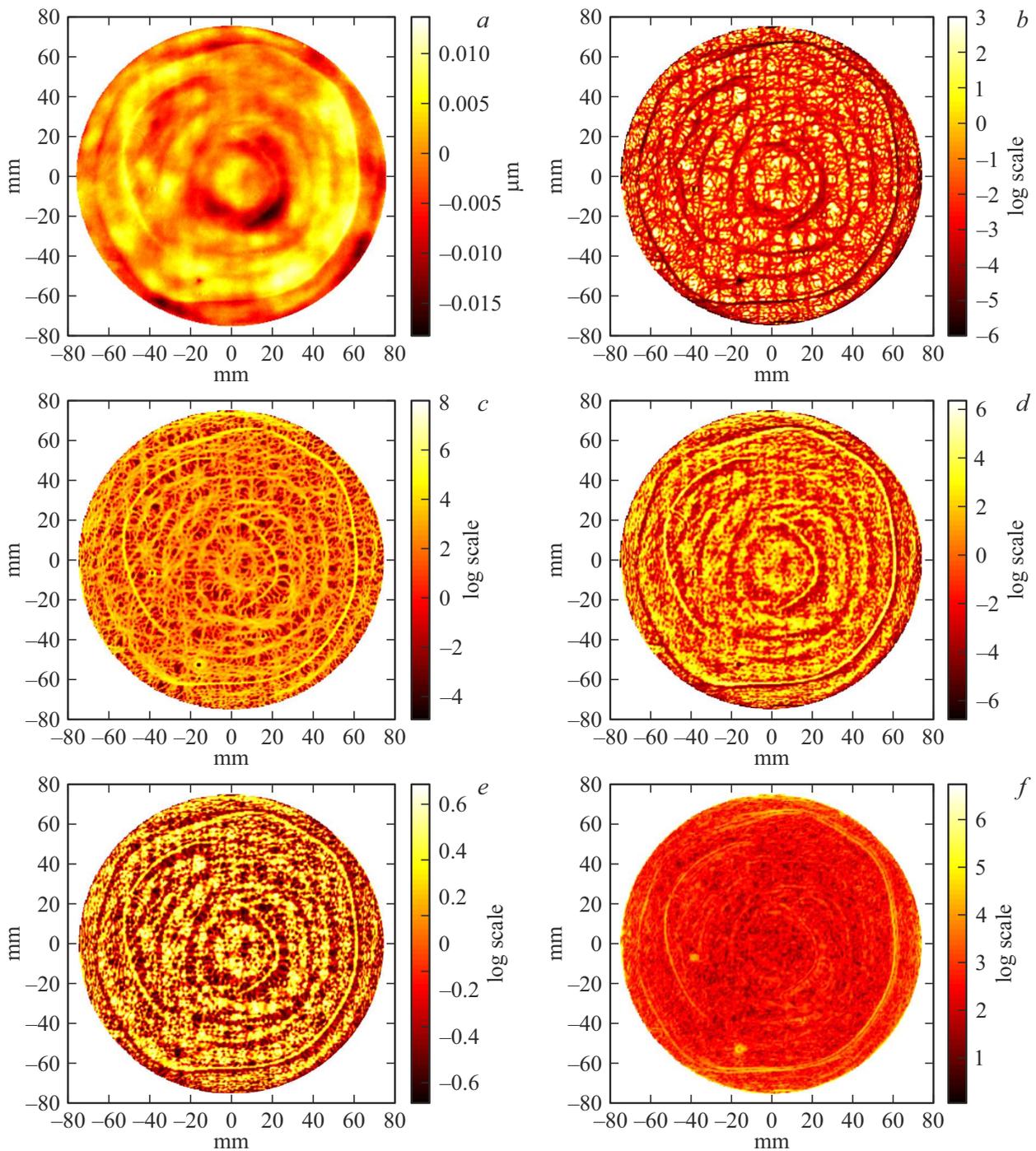


Рис. 1. Образец № 1 (сферическая вогнутая подложка): ЦМР (a) и рассчитанные морфометрические величины (b–f): минимальная кривизна k_{\min} (b), максимальная кривизна k_{\max} (c), средняя кривизна H (d), индекс формы ShI (e), несферичность M (f). Число коэффициентов разложения при аппроксимации: $n = 300$.

прибор обеспечивает субнанометровую, $RMS < 1$ nm, точность измерений отклонения формы поверхности оптических деталей от сферы с числовой апертурой до $NA = 0.28$.

Измерения образца № 1 проводились при закреплении его на поворотном столике в 12 положениях (угол поворота между измерениями $30 \pm 0.5^\circ$).

Для ускорения расчетов проводилось уменьшение разрешения ЦМР (размеров ЦМР) посредством линейной интерполяции.

Размер ЦМР для образца № 1 составил 1036×1036 , шаг сетки (разрешение ЦМР) 0.145 mm для случая изначальных (несглаженных) ЦМР; 267×267 , шаг сетки 0.563 mm — для ЦМР после уменьшения

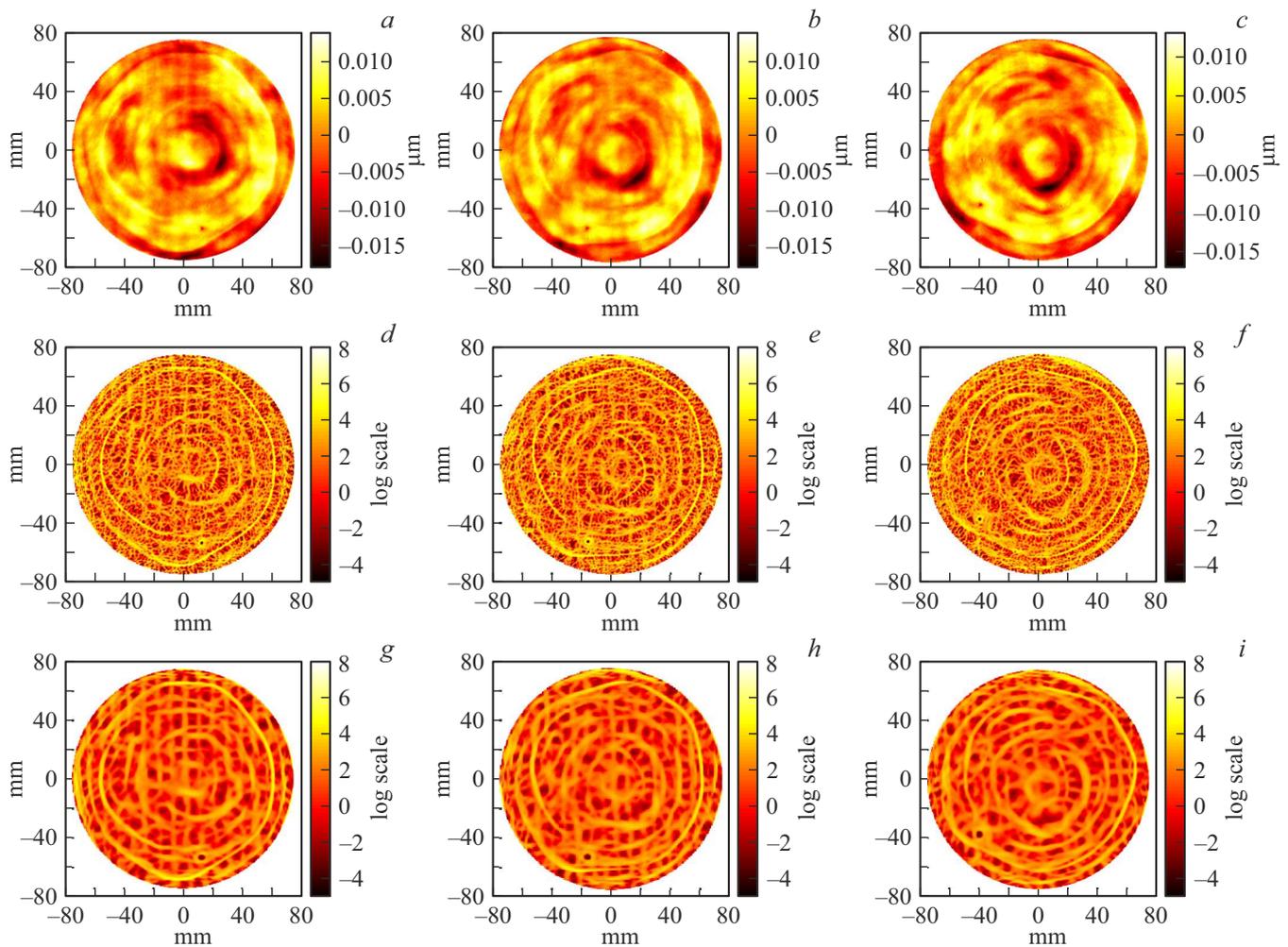


Рис. 2. Образец № 1 (сферическая вогнутая подложка): ЦМР ($a-c$) и рассчитанная максимальная кривизна k_{\max} ($d-f$): угол поворота 210° (a, d, g), 240° (b, e, h), 270° (c, f, i). Число коэффициентов разложения при аппроксимации: $n = 300$ ($d-f$), $n = 100$ ($g-i$).

разрешения. Перепад высот (PV) и средняя квадратичная шероховатость (RMS) составляли $PV = 35.5 \text{ nm}$, $RMS = 4.5 \text{ nm}$.

Для образца № 2: после обработки по методике механического притира размер ЦМР составил 374×374 , шаг сетки — 0.176 mm ; после осесимметричной обработки размер ЦМР составил 377×377 , шаг сетки — 0.175 mm ; после локальной обработки размер ЦМР составил 369×369 , шаг сетки — 0.174 mm . Перепад высот (PV) и средняя квадратичная шероховатость (RMS) составляли $PV = 137.8 \text{ nm}$, $RMS = 18.3 \text{ nm}$ после обработки по методике механического притира, $PV = 78.5 \text{ nm}$, $RMS = 9.9 \text{ nm}$ после осесимметричной обработки, $PV = 41.2 \text{ nm}$, $RMS = 3.8 \text{ nm}$ после локальной обработки. Для образца № 2 проводились расчеты только для ЦМР с уменьшенным разрешением.

Для расчета морфометрических величин использовался универсальный спектрально-аналитический метод с использованием полиномов Чебышева I рода и суммирования Фейера [38]. В отличие от широко используемых

для обработки данных о ЦМР рентгеновской оптики полиномов Цернике [39], преимуществом использования которых является взаимосвязь с основными типичными абберационными искажениями, этот метод при обработке ЦМР сохраняет важные для разработчиков особенности рельефа, такие, как кольцевые структуры и „горизонтальные полосы“, подробно обсуждаемые далее. Кроме того, метод менее затратен по длительности расчета. Универсальный спектрально-аналитический метод предназначен для обработки регулярных ЦМР в рамках единой схемы, включающей глобальную аппроксимацию ЦМР, генерализацию и подавление шума в ЦМР, а также расчет морфометрических характеристик на основе аналитического вычисления частных производных. Расчеты проводились в программной среде Matlab с использованием авторской программы. Использовались от 100 до 600 коэффициентов разложения исходной функции высоты по полиномам Чебышева.

Поскольку морфометрические величины обычно характеризуются широким динамическим диапазоном зна-

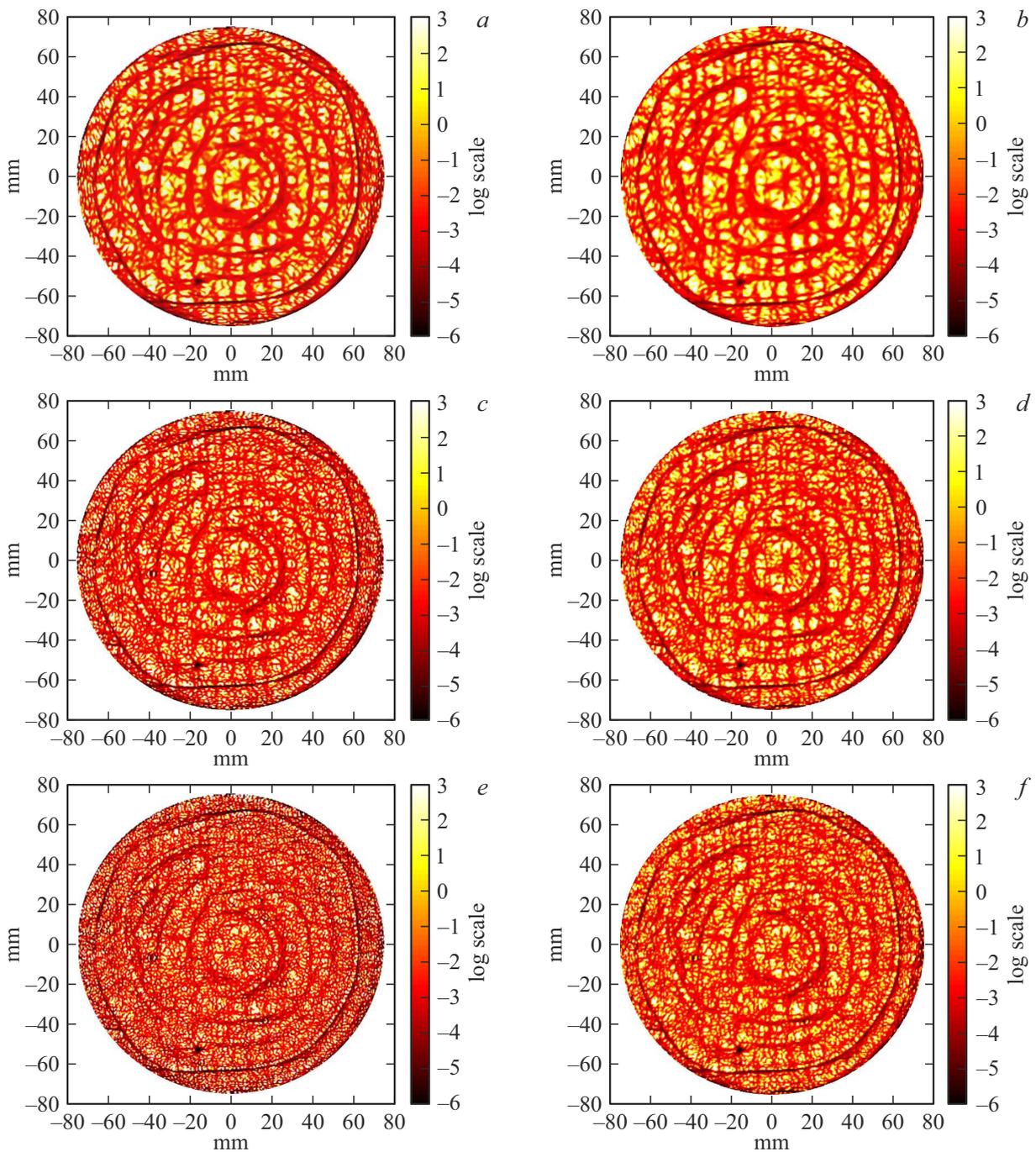


Рис. 3. Рассчитанная минимальная кривизна k_{\min} для образца № 1 (рис. 1, *a*): расчет по изначальной (несглаженной) ЦМР (*a, c, e*), расчет по сглаженной ЦМР (ЦМР после уменьшения разрешения) (*b, d, f*). Число коэффициентов разложения при аппроксимации: $n = 200$ (*a, b*), 300 (*c, d*), 400 (*e, f*).

чений, то, чтобы избежать потерь информации об их пространственном распределении, при отображении используется логарифмический масштаб [21,33].

2. Результаты и обсуждение

На рис. 1–4 представлены примеры карт рассчитанных морфометрических величин для объектов рентге-

новской оптики. Каждая морфометрическая величина отображает особенности локального рельефа исследуемых объектов по-своему, в соответствии с ее физико-математическим смыслом.

Положительные значения минимальной кривизны k_{\min} (рис. 1, *b, 3, 4 d–f, h*) выделяют локальные выпуклые элементы рельефа, а отрицательные — вытянутые вогнутые формы рельефа.

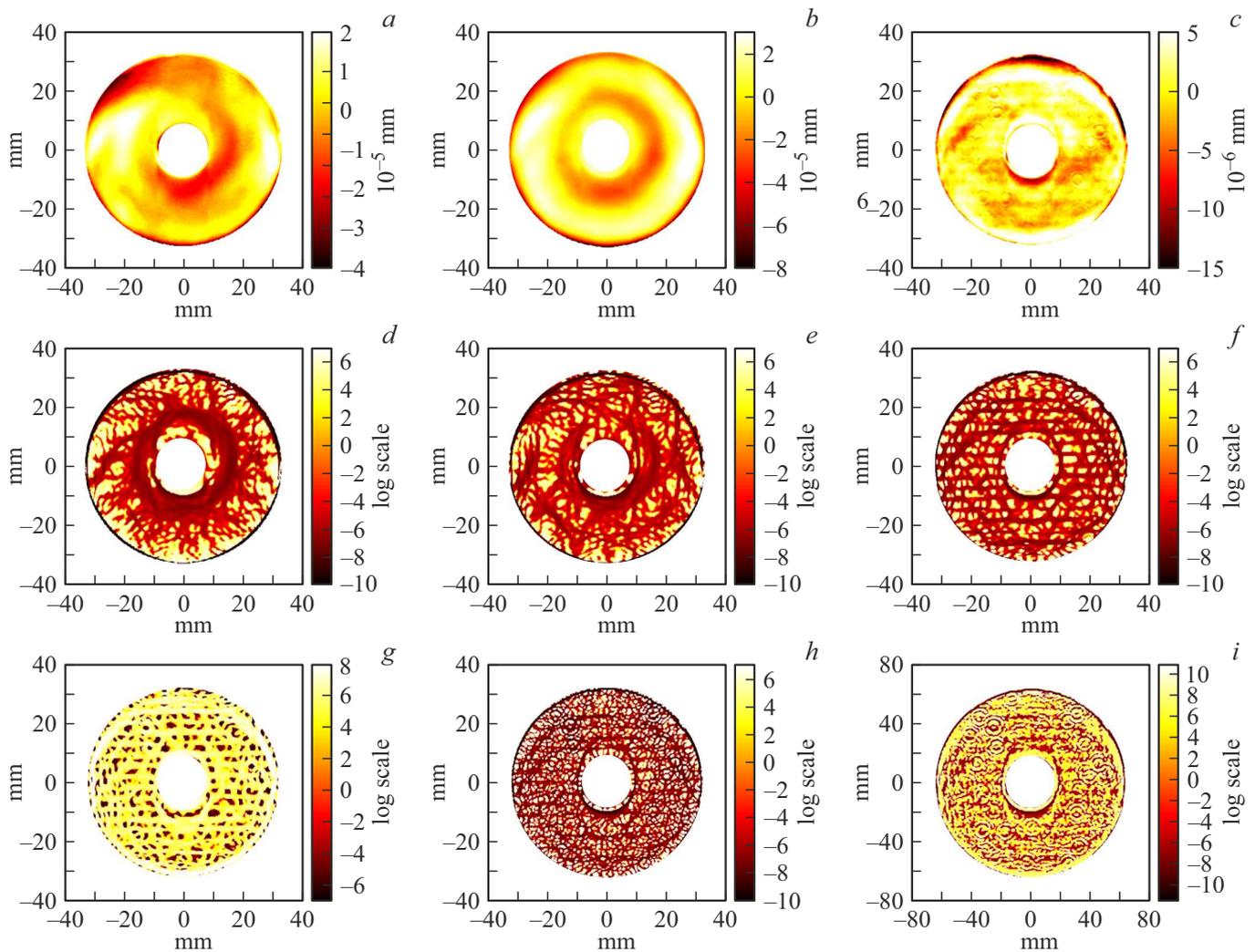


Рис. 4. ЦМР (*a–c*) и рассчитанные морфометрические величины (*d–i*) для образца № 2 (сферическая вогнутая подложка) на различных этапах технологической обработки: после обработки по методике механического притира (*a, d*), после осесимметричной обработки (*b, e*), после локальной обработки (*c, f–i*). Морфометрические величины: k_{\min} (*d–f, h*), k_{\max} (*g*), H (*i*). Число коэффициентов разложения n при аппроксимации: $n = 100$ (*d–g*), 200 (*h, i*).

Положительные значения максимальной кривизны k_{\max} (рис. 1, *c*, 2, 4, *g*) выделяют вытянутые выпуклые формы рельефа, а отрицательные значения — локальные вогнутые структуры.

Средняя кривизна H (рис. 1, *d*) определяет преимущественное направление изгиба. Для выпуклых локальных участков поверхности $H > 0$, для вогнутых $H < 0$, для локальных участков уплощения $H = 0$.

Несферичность M (рис. 1, *f*) показывает, насколько форма элемента рельефа отклоняется от сферической. На поверхности сферы $M = 0$. Несферичность эффективно используется для оценки дефектов, подобных трещинам [36,40].

Индекс формы ShI (рис. 1, *e*) является континуальным выражением дискретной гауссовой классификации форм поверхности. Его положительные значения относятся к выпуклым формам рельефа, а отрицательные — к вогнутым формам; его абсолютные значения от 0.5 до 1

соответствуют эллиптическим поверхностям (холмы и замкнутые впадины), а от 0 до 0.5 — гиперболическим (седла) [37].

Рассчитанные данные для образца № 1 на рис. 1 демонстрируют применимость морфометрических величин для оценки особенностей рельефа рентгенооптических элементов и показывают возможности наглядного обнаружения неоднородностей рельефа (локальных бугров, впадин и др.) в соответствии с перечисленными выше физико-математическим смыслом использованных морфометрических величин. Например, небольшой дефекта в левой нижней части рисунка соответствует отрицательным значениям минимальной кривизны k_{\min} , максимальной кривизны k_{\max} , средней кривизны H . Как этот дефект, так и в целом области наибольшего изменения рельефа хорошо видны на карте несферичности M (наибольшие значения M).

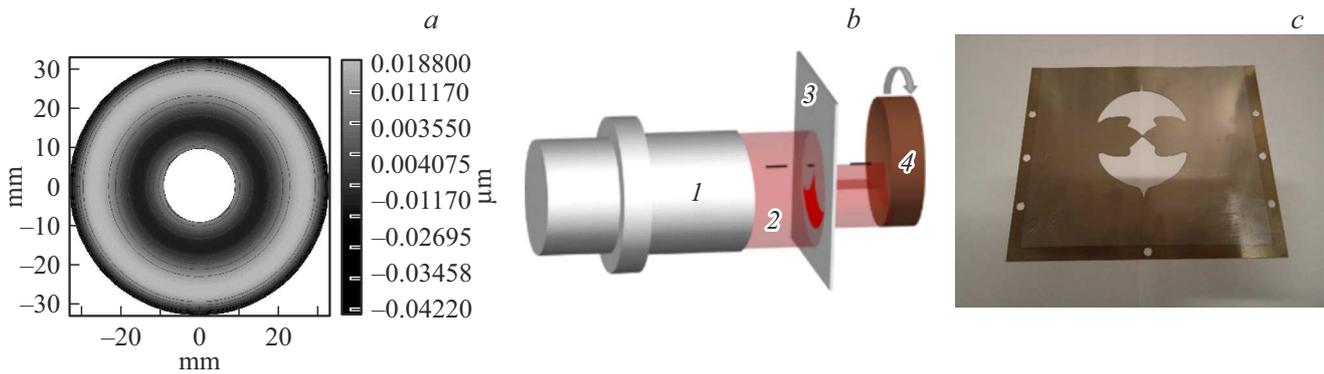


Рис. 5. Осесимметричная часть карты поверхности (а); схема эксперимента осесимметричной обработки поверхности: 1 — широкоапертурный ионный источник, 2 — квазипараллельный ионный пучок, 3 — фигурная диафрагма, 4 — обрабатываемая заготовка (b); маска для проведения осесимметричной обработки (c).

Аналогично рис. 4 показывает эффективность применения этой методики для обработки ЦМР образца № 2 на различных этапах технологической обработки. На рис. 4, d по наименьшим значениям на карте минимальной кривизны k_{\min} можно видеть расходящиеся от центра образца „лучи“, соответствующие достаточно протяженным вогнутым областям, которые при должном опыте можно частично разглядеть и на карте ЦМР (рис. 4, a; например, самый большой „луч“ ближе к левой границе образца). Однако очевидно, что на карте k_{\min} визуализация гораздо более наглядна. На карте k_{\min} на рис. 4, e также видны протяженные вогнутые области (соответствующие их положению на рис. 4, b — в данном случае для протяженных областей можно визуально проследить корреляцию), кроме того, можно проанализировать и расположение локальных вогнутых областей на протяженных выпуклых областях (например, на массивном бугре на левой стороне образца), которые на карте ЦМР (рис. 4, b) не видны. Однако наиболее интересен рис. 4, f — в этом случае можно видеть, что наименьшие значения минимальной кривизны k_{\min} образуют „горизонтальные линии“. Эти же линии видны и на карте максимальной кривизны k_{\max} (рис. 4, g). Однако определить их наличие по карте ЦМР (рис. 4, c) практически невозможно.

В целом в связи с достаточно большой протяженностью неровностей рельефа образца № 1 (рис. 1, a) важные особенности рельефа, необходимые для определения требуемых параметров технологического процесса на начальных этапах, можно оценить и непосредственно из ЦМР (рис. 1, a), не прибегая к возможностям геоморфометрии. Действительно, карты на рис. 1, b–f демонстрируют большое число неоднородностей рельефа меньшего размера, которые не видны на фоне общей формы структуры по ЦМР, однако на текущем этапе обработок они не столь важны. По аналогии ЦМР на рис. 4, a использовалась преимущественно для выделения осесимметричной составляющей с целью расчета требуемой маски для травления (рис. 5).

Однако ближе к завершению технологических обработок подложек и достижению ими требуемой формы уже становятся важны все оставшиеся несоответствия. В этом случае, например, зная положение локальных бугров, их можно будет учесть при разработке процедуры локального травления этого образца и впоследствии добиться большей ровности поверхности. В этом случае показателен пример рассчитанных карт морфометрических величин для образца № 2 после локальной обработки (рис. 4, f, g), на которых видны нетипичные особенности рельефа „горизонтальные полосы“, незаметные на ЦМР (рис. 4, c).

Важно отметить, что, поскольку для расчетов использовался универсальный спектрально-аналитический метод, перед расчетом морфометрических величин проводится аппроксимация ЦМР с использованием полиномов Чебышева I рода. Расположение и размеры паттернов рельефа, отображаемых на картах морфометрических величин, существенно различается в зависимости от используемой глубины разложения исходной ЦМР (т. е. от количества коэффициентов разложения n , используемого при восстановлении аппроксимированной ЦМР). Чем меньше значение n , тем сильнее степень генерализации (сглаживания) ЦМР. Поэтому использование разного числа полиномов для аппроксимации позволяет выявлять паттерны рельефа, относящиеся к разным уровням пространственной иерархии (масштаба). Фактически это проведение разномасштабного анализа, подобного описанному в [18–20] методикам. Это приводит к тому, что на практике при изучении ЦМР структур необходимо использовать разное число полиномов для выявления различных особенностей рельефа поверхности. В частности, при $n = 200$, в связи с большей детальностью изображения (рис. 4, h), „горизонтальные полосы“ становятся уже практически не видны (по сравнению со случаем $n = 100$, рис. 4, f). Однако на картах с рис. 4, h, i при $n = 200$ хорошо визуализируется серия концентрических окружностей, которые сливаются с общей картиной на рис. 4, f при $n = 100$.

Эти кольцевые структуры являются артефактом проведения измерений и вызваны наличием пылинок на регистрирующей системе интерферометра. Можно видеть, что их расположение на различных картах совпадает. Например, для образца № 1 на рис. 2 наиболее четко видна окружность, расположенная посередине между центром образца и его левым краем, что на картах максимальной кривизны k_{\max} (рис. 4, $d-f$) соответствует ее малым значениям. Положение этого дефекта не меняется при повороте образца (рис. 2). При этом положение другого небольшого дефекта, что обсуждался ранее (небольшой дефект-яма в левой нижней части рис. 2, b) изменяется соответственно ожидаемому (рис. 2). При уменьшении степени сглаживания (увеличении степени полиномов n) кольцевые структуры становятся более четко визуализирующимися (рис. 3, e).

Продолжая обсуждение особенностей проведения разномасштабного анализа и артефактов в ЦМР, стоит отметить, что обрабатываемые экспериментально полученные ЦМР реальных структур включают:

- 1) сведения об исследуемых образцах;
- 2) относительно постоянные погрешности и артефакты, вызванные регистрирующей системой (пылинки и др.);
- 3) переменные погрешности и артефакты, вызванные неоднородностью среды (воздушные потоки, вибрации и др.).

Это приводит к тому, что сами карты ЦМР для одного и того же образца не идентичны для различных измерений (например, ЦМР на рис. 2 не идеально соответствуют повернутым на угол 30°). Поэтому при анализе неоднородностей рельефа с использованием морфометрических величин следует помнить, что получаемые результаты могут быть как индикаторами особенностей исследуемого образца, так и следствием привнесенных погрешностей, в том числе случайных (не систематических). В случае изучения объектов рентгеновской оптики, обладающих ЦМР с перепадом высот порядка сотни нанометров и менее, этот эффект проявляется на различных уровнях пространственной иерархии (рис. 2).

Это означает, что в общем случае нет необходимости использовать для расчетов изначальные (несглаженные) карты ЦМР вместо более удобных с точки зрения длительности расчетов сглаженных ЦМР. На рис. 3 показаны результаты расчета минимальной кривизны k_{\min} образца № 1 для изначальной и сглаженной ЦМР. Можно видеть, что при $n = 200$ рассчитанные карты k_{\min} практически неотличимы (рис. 3, a, b). Естественно, при меньшей степени полинома n ситуация подобна. С увеличением степени полинома n увеличивается уровень детализации, и при $n = 300$ уже можно разглядеть различия (рис. 3, c, d), а начиная с $n = 400$ они становятся уже весьма ощутимыми (рис. 3, e, f).

Завершая данный раздел, стоит отметить, что, кроме описанных морфометрических величин, также были рассчитаны и проанализированы: гауссова кривизна, разностная кривизна, лапласиан, индекс изогнутости, водо-

сборная площадь, дисперсионная площадь, топографический индекс и др. (для последних трех использовалась программа LandLord 4.0 [41]). Было обнаружено, что наиболее наглядно кольцевые структуры визуализируются именно на картах топографического индекса; во всем остальном результаты повторяют полученные в Matlab.

Заключение

Предложен подход к изучению особенностей рельефа поверхности рентгенооптических элементов на базе использования морфометрических величин. Подход апробирован на двух сферических вогнутых подложках: диаметром 66 мм и радиусом кривизны 345.4 мм, диаметром 160 мм и радиусом кривизны 297.4 мм.

Продемонстрировано, что данные подходы полезны для:

- более наглядной визуализации неоднородностей рельефа (локальных бугров, впадин и др.), что потенциально становится наиболее актуально ближе к завершению технологических этапов обработки;
- обнаружения „тонких“ неоднородностей рельефа, которые не отображаются на картах изначальных ЦМР, в частности, были обнаружены „горизонтальные полосы“ на картах кривизн;
- визуализации артефактов проведения измерений (для последующего устранения их из ЦМР), в частности, были четко проявлены вызванные наличием пылинок на регистрирующей системе интерферометра кольцевые структуры.

Указанная информация необходима разработчикам рентгенооптических элементов для контроля подводимых технологических операций и процессов с целью достижения требуемой формы деталей.

Также, резюмируя проведенные исследования, можно сделать вывод, что для проведения оценки особенностей рельефа объектов рентгеновской оптики необходимо проведение нескольких измерений одного и того же образца. Это необходимо для:

- 1) подтверждения того, что наблюдаемые особенности рельефа не являются следствием случайных погрешностей;
- 2) определения систематических погрешностей (например, артефактов наподобие кольцевых структур) и удаления их из рассматриваемой ЦМР.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 22-21-00614. Использовалось оборудование ЦКП „МСТ и ЭКБ“ (МИЭТ).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.А. Ахсахалиян, А.Д. Ахсахалиян, Д.Г. Волгунов, М.В. Зорина, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, **7**, 93 (2015). DOI: 10.7868/S0207352815070033
- [2] Е.Б. Ключенков, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашченко, Н.И. Чхало. Известия РАН. Сер. физ., **72** (2), 205 (2008). [E.B. Klyuenkov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, N.I. Chkhalo. Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys., **72** (2), 188 (2008).]
- [3] В.В. Грибко, А.С. Маркелов, В.Н. Трушин, Е.В. Чупрунов. Приборы и техника эксперимента, **1**, 136 (2018). DOI: 10.7868/S0032816218010196 [V.V. Gribko, A.S. Markelov, V.N. Trushin, E.V. Chuprunov. Instruments and Experimental Techniques, **61** (1), 148 (2018). DOI: 10.1134/S0020441218010165]
- [4] А.А. Ахсахалиян, А.Д. Ахсахалиян, С.А. Гарахин, Н.Ф. Ерхова, А.С. Кириченко, С.В. Кузин, Н.Н. Салашченко, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало. ЖТФ, **89** (11), 1770 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2019.11.48342.124-19 [A.A. Akhsakhalyan, A.D. Akhsakhalyan, S.A. Garakhin, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov, N.I. Chkhalo, N.F. Erkhova, A.S. Kirichenko, S.V. Kuzin. Tech. Phys., **64** (11), 1680 (2019). DOI: 10.1134/S1063784219110033]
- [5] А. Худолей, Г. Городкин, Л. Глеб, А. Александронец. Наука и инновации, **6** (148), 20 (2015).
- [6] Д.Г. Денисов, О.С. Агеева. Контенант, **19** (4), 10 (2020).
- [7] А.П. Семенов, А.Н. Игнатов, А.Б. Никонов, В.Е. Патрикеев, А.Б. Морозов, А.Ю. Папаев, М.А. Лаухин, В.Н. Пышнов, А.О. Ляховец, Е.С. Голубев, А.В. Смирнов. Контенант, **20** (3), 7 (2021).
- [8] А.П. Семенов, М.А. Абдулкадыров, Н.С. Добриков, А.Н. Игнатов, В.Е. Патрикеев, А.Ю. Папаев, А.В. Поляничков, В.В. Придня. Оптик. журн., **84** (11), 62 (2017). [A.P. Semenov, M.A. Abdulkadyrov, N.S. Dobrikov, A.N. Ignatov, V.E. Patrikeev, A.Yu. Papaev, A.V. Polyanshchikov, V.V. Pridnya. J. Opt. Technol., **84** (11), 767 (2017). DOI: 10.1364/JOT.84.000767]
- [9] Н.И. Чхало, Н.Н. Салашченко. Известия РАН. Сер. физ., **83** (2), 150 (2019). DOI: 10.1134/S0367676519020078 [N.I. Chkhalo, N.N. Salashchenko. Bulletin of the Russian Acad. Sci.: Phys., **83** (2), 105 (2019). DOI: 10.3103/S1062873819020072]
- [10] В.В. Грибко, А.С. Маркелов, В.Н. Трушин, Е.В. Чупрунов. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, **5**, 28 (2017). DOI:10.7868/S0207352817050079 [V.V. Gribko, A.S. Markelov, V.N. Trushin, E.V. Chuprunov. J. Surf. Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques, **11** (3), 505 (2017). DOI: 10.1134/S1027451017030077]
- [11] В.В. Грибко, А.С. Маркелов, В.Н. Трушин, Е.В. Чупрунов. Приборы и техника эксперимента, **5**, 119 (2019). DOI: 10.1134/S0032816219040256 [V.V. Gribko, A.S. Markelov, V.N. Trushin, E.V. Chuprunov. Instruments and Experimental Techniques, **62** (5), 703 (2019). DOI: 10.1134/S0020441219040183]
- [12] Н.Н. Салашченко, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало. Известия РАН. Сер. физ., **74** (1), 62 (2010). [N.N. Salashchenko, M.N. Toropov, N.I. Chkhalo. Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys., **74** (1), 53 (2010). DOI: 10.3103/S1062873810010144]
- [13] А.К. Чернышев, И.В. Малышев, А.Е. Пестов, Н.И. Чхало. ЖТФ, **89** (11), 1650 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2019.11.48323.133-19 [A.K. Chernyshev, I.V. Malyshev, A.E. Pestov, N.I. Chkhalo. Tech. Phys., **64** (11), 1560 (2019). DOI: 10.1134/S1063784219110069]
- [14] М.В. Зорина, И.М. Нefeldов, А.Е. Пестов, Н.Н. Салашченко, С.А. Чуринов, Н.И. Чхало. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, **8**, 9 (2015). DOI: 10.7868/S0207352815080193 [M.V. Zorina, I.M. Nefedov, A.E. Pestov, N.N. Salashchenko, S.A. Churin, N.I. Chkhalo. J. Surf. Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques, **9** (4), 765 (2015). DOI: 10.1134/S1027451015040394]
- [15] М.Н. Торопов, А.А. Ахсахалиян, М.В. Зорина, Н.Н. Салашченко, Н.И. Чхало, Ю.М. Токунов. ЖТФ, **90** (11), 1958 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.11.49990.127-20 [M.N. Toropov, A.A. Akhsakhalyan, M.V. Zorina, N.N. Salashchenko, N.I. Chkhalo, Yu.M. Tokunov. Tech. Phys., **65** (11), 1873 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220110262]
- [16] А. Чернышев, Н. Чхало, И. Малышев, М. Михайленко, А. Пестов, Р. Плешков, Р. Смертин, М. Свечников, М. Торопов. Precis. Eng., **69**, 29 (2021). DOI: 10.1016/j.precisioneng.2021.01.006
- [17] А.А. Ахсахалиян, Н.И. Чхало, Н. Kumar, И.В. Малышев, А.Е. Пестов, Н.Н. Салашченко, М.Н. Торопов, В.А. Уласевич, С.В. Кузин. Precis. Eng., **72**, 330 (2021). DOI: 10.1016/j.precisioneng.2021.05.011
- [18] О.К. Гаришин, Р.И. Изюмов, А.Л. Свистков. Вестник Пермского ун-та. Физика, **1** (39), 36 (2018). DOI: 10.17072/1994-3598-2018-1-36-45
- [19] Н.И. Ужегова, А.Л. Свистков. Вычислительная механика сплошных сред, **9** (3), 366 (2016). DOI: 10.7242/1999-6691/2016.9.3.30
- [20] Р.А. Коротченко, А.Н. Самченко, И.О. Ярошук. Океанология, **54** (4), 538 (2014). DOI: 10.7868/S0030157414030046 [R.A. Korotchenko, A.N. Samchenko, I.O. Yaroshchuk. Oceanology, **54** (4), 497 (2014). DOI: 10.1134/S0001437014030047]
- [21] I.V. Florinsky. *Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology*. 2-nd ed. (Elsevier Academic Press, Amsterdam, 2016)
- [22] Y. Deng. Progress in Physical Geography, **31** (4), 405 (2007). DOI: 10.1177/0309133307081291
- [23] T. Hengl, H.I. Reuter (eds.) *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications* (Elsevier, Amsterdam, 2009)
- [24] Z. Li, Q. Zhu, C. Gold. *Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology* (CRC Press NY., 2005)
- [25] G. Lv, L. Xiong, M. Chen, G. Tang, Y. Sheng, X. Liu, Z. Song, Y. Lu, Z. Yu, K. Zhang, M. Wang. J. Geograph. Sci., **27** (11), 1389 (2017). DOI: 10.1007/s11442-017-1442-0
- [26] J. Minár, J. Krcho, I.S. Evans. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences* (2016), DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10260-X
- [27] I.D. Moore, R.B. Grayson, A.R. Ladson. Hydrological Processes, **5** (1), 3 (1991). DOI: 10.1002/hyp.3360050103
- [28] R.J. Pike. Progr. Phys. Geogr., **24** (1), 1 (2000). DOI: 10.1177/030913330002400101
- [29] J.P. Wilson. Geomorphology, **137** (1), 107 (2012). DOI: j.geomorph.2011.03.012
- [30] J.P. Wilson *Environmental Applications of Digital Terrain Modeling* (Wiley-Blackwell Chichester, 2018)

- [31] J.P. Wilson, J.C. Gallant (eds.) *Terrain Analysis: Principles and Applications* (Wiley NY., 2000)
- [32] P.A. Shary. *Mathem. Geology*, **27** (3), 373 (1995). DOI: 10.1007/BF02084608
- [33] P.A. Shary, L.S. Sharaya, A.V. Mitusov. *Geoderma*, **107** (1/2), 1 (2002). DOI: 10.1016/S0016-7061(01)00136-7
- [34] A.A. Дедкова, И.В. Флоринский, Н.А. Дюжев. *УФН*, **192** (7), 754 (2022). DOI: 10.3367/UFN.2021.10.039076 [A.A. Dedkova, I.V. Florinsky, N.A. Djuzhev. *Phys. Usp.*, **65**, 706 (2022). DOI: 10.3367/UFNe.2021.10.039076]
- [35] A.A. Дедкова, И.В. Флоринский, Н.А. Дюжев. *ЖТФ*, **92** (8), 1113 (2022). DOI: 10.21883/JTF.2022.08.52771.101-22 [A.A. Dedkova, I.V. Florinsky, N.A. Djuzhev. *Tech. Phys.*, **67** (8), 933 (2022). DOI: 10.21883/TP.2022.08.54553.101-22]
- [36] A.A. Дедкова, И.В. Флоринский, Е.Э. Гусев, Н.А. Дюжев, М.Ю. Фомичев, М.Ю. Штерн. *Дефектоскопия*, **11**, 41 (2021). DOI: 10.31857/S0130308221110051 [A.A. Dedkova, E.E. Gusev, N.A. Dyuzhev, M.Y. Fomichev, M.Y. Shtern, I.V. Florinsky. *Russ. J. Nondestructive Testing*, **57** (11), 1000 (2021). DOI: 10.1134/S1061830921110073]
- [37] A.A. Дедкова, И.В. Флоринский. В сб.: *Математическая биология и биоинформатика*. Доклады IX Международной конференции (Пушино, 2022), 231 с, DOI: 10.17537/icmbb22.26
- [38] I.V. Florinsky, A.N. Pankratov. *Intern. J. Geograph. Inform. Sci.*, **30** (12), 2506 (2016). DOI: 10.1080/13658816.2016.1188932
- [39] V. Lakshminarayanan, A. Fleck. *J. Modern Optics*, **58** (7), 545 (2011). DOI: 10.1080/09500340.2011.554896
- [40] M. Foroutan, S.J. Marshall, B. Menounos. *J. Glaciology*, **65** (254), 971 (2019). DOI: 10.1017/jog.2019.71
- [41] Электронный ресурс. Режим доступа: <http://iflorinsky.impb.ru/ll-ru.htm>