

DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-04-12-22

УДК 535.015

Повышение точности определения волновых aberrаций оптической системы по распределению интенсивности фокусируемого светового пучка

Владимир Сабитович Сиразетдинов^{1✉}, Игорь Юрьевич Дмитриев²,
Павел Михайлович Линский³, Николай Витальевич Никитин⁴

Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор,
Ленинградская обл., Россия

¹v.sirazet@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-0133-5182>

²dmitrieviy@nioep.ru <https://orcid.org/0000-0003-4426-8191>

³nnw19@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-9133-6719>

⁴NikitinNV@nioep.ru <https://orcid.org/0000-0003-3826-3765>

Аннотация

Предмет исследования. Представлен метод повышения точности определения волновых aberrаций оптической системы по изображению поперечного сечения фокусируемого системой светового пучка в присутствии амплитудных искажений изображения. **Метод.** Процедура измерений включает в себя определение волновых aberrаций оптической системы отдельно по каждому из изображений поперечного сечения пучка, зарегистрированных по разные стороны от фокальной плоскости, и усреднение полученных значений волновых aberrаций. **Основные результаты.** В основе используемого метода определения волновых aberrаций оптической системы лежит анализ и обработка искажённого aberrациями распределения интенсивности в изображении поперечного сечения фокусируемого светового пучка, зарегистрированном либо в плоскости перед фокальной, либо за ней. Очевидно, что присутствие неоднородностей интенсивности в сечении светового пучка, не обусловленных волновыми aberrациями, неизбежно будет порождать погрешности измерений. Многократно ослабить влияние таких амплитудных помех на точность измерений удаётся, если дополнительно зарегистрировать и обработать ещё одно изображение поперечного сечения пучка, расположенное на специально выбранном расстоянии по другую сторону от плоскости фокусировки и усреднить значения волновых aberrаций, полученных по каждому из изображений. Если в одной из плоскостей регистрации амплитудные и aberrационные искажения распределения интенсивности имеют сходный профиль, то они, складываясь, усиливают степень неоднородности суммарного распределения интенсивности. При этом, в другой плоскости профили амплитудных и aberrационных искажений распределения интенсивности будут взаимно противоположны, что снизит степень неоднородности распределения. Этот эффект и позволяет скомпенсировать вызванные амплитудными помехами погрешности измерения путём арифметического усреднения значений волновых aberrаций, полученных отдельно по каждому из изображений. Показано, что таким методом разброс измеренных значений СКО волнового фронта пучка величиной до 20–30%, полученный при отдельных измерениях волновых aberrаций в присутствии помех, удаётся снизить до нескольких процентов. **Практическое значение.** Амплитудные искажения изображения поперечного сечения пучка, не связанные с aberrациями, широко распространены, поскольку присутствуют, например, в светосильных, аподизированных или внеосевых оптических системах. Измерения волновых aberrаций подобных оптических систем известным методом по одному изображению фокусируемого пучка не даёт точного результата. Предложенное в настоящей работе усовершенствование этого метода измерений позволяет расширить сферу его применения и на такие системы, сохраняя присущую ему точность измерений на уровне $\lambda/20$.

Ключевые слова: волновые aberrации, оптическая система, световой пучок, волновой фронт, распределение интенсивности

Ссылка для цитирования: Сиразетдинов В.С., Дмитриев И.Ю., Линский П.М., Никитин Н.В. Повышение точности определения волновых aberrаций оптической системы по распределению интенсивности фокусируемого пучка // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 4. С. 12–22. DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-04-12-22

Коды OCIS: 120.0120, 260.0260.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрены возможности повышения точности предложенного в [1, 2] метода определения волновых aberrаций (ВА) оптической системы (ОС) по распределению интенсивности некогерентного светового пучка, фокусируемого системой. Регистрацию распределения интенсивности светового пучка выполняют в плоскости, расположенной либо перед, либо за плоскостью фокусировки на расстоянии L от последней. При этом расстояние L определяют из условия справедливости геометрооптического приближения для распространения искажённого ВА сфокусированного пучка. Волновые aberrации ОС определяют из полученного в рамках геометрооптического приближения линейного дифференциального уравнения, связывающего явным образом значения интенсивности в точках сечения светового пучка в плоскости регистрации с величиной aberrационных искажений волнового фронта (ВФ) пучка в соответствующих точках его сечения на выходе ОС.

Этот метод имеет определённые преимущества перед другими способами измерения ВА в некогерентном свете. Так, по сравнению с методом Шэка–Гартмана, включая его современные модификации [3, 4], он более прост в реализации. В измерительной схеме по методу Шэка–Гартмана применяют специально рассчитанный под конкретную ОС прецизионный элемент, формирующий растр из световых пятен, смещение которых и даёт информацию о величине искажений ВФ пучка. При этом точность измерений даже в отсутствие шума ограничивается и выборочным характером получаемых данных об искажениях ВФ по сечению пучка, и неизбежными погрешностями определения центров световых пятен растра [5]. Свою роль играют и неточности изготовления элементов, формирующих растр.

В настоящее время широко распространены и быстро развиваются методы восстановления ВФ искажённого пучка на выходе ОС по распределению интенсивности в функции рассеяния точки (ФРТ) [6–9], сформированной

системой. При этом искомая функция, представляющая искажения ВФ, связана с распределением интенсивности в зарегистрированном изображении ФРТ сильно нелинейной зависимостью. Поэтому для определения этой функции приходится решать методами многократных итераций сложную обратную задачу [6, 7]. Присутствие шумового фона в изображении ФРТ, большой перепад интенсивности от центра к «крыльям» ФРТ, несущим основную информацию об отклонениях ВФ, во многих случаях не позволяют найти решение такой задачи. Эти факторы, а также неоптимальный выбор начальных данных для итерационного расчёта в отсутствие априорной информации о ВА ОС, могут привести либо к неверному решению, либо к затягиванию и прекращению вычислительного процесса. Для преодоления подобных ситуаций усложняют условия измерений, дополнительно модулируя ВФ исследуемого пучка [8, 9], последовательно масштабируя его размеры [10, 11] или обрабатывая расфокусированные изображения ФРТ [12, 13].

Благодаря развитию специализированных программных средств и возросшей вычислительной мощности компьютеров, повысить эффективность решения таких обратных задач удаётся на основе алгоритмов машинного обучения и нейронных сетей [12–14]. Однако и в этом случае возникают трудности быстрого получения хороших результатов, связанные с неоднозначностью и невысокой точностью вычисления величины искажений ВФ пучка или даже с остановкой расчёта по программе. Это может происходить при не вполне корректном предварительном обучении и тестировании используемой программы расчёта, ориентированной, как правило, на определённый вид модели ВФ и ФРТ, связанных между собой сильно нелинейной зависимостью. Выбор и создание программных средств, реализующих алгоритмы машинного обучения и нейронных сетей для вычисления искажений ВФ по ФРТ, является трудоёмким процессом, требующим больших временных затрат и компьютерных мощностей [12–14]. Отмеченные

трудности расчёта в основном обусловлены сложностью нелинейной зависимости распределения интенсивности в ФРТ от вида искажений ВФ.

Выполнение измерений ВА методом [1, 2] во многом свободно от указанных недостатков, поскольку распределение интенсивности в изображении светового пучка связано с его ВФ более простой явной зависимостью.

Наиболее близкий к [1, 2] метод описан в [15, 16]. Он основан на измерении распределений интенсивности светового пучка в двух плоскостях, расположенных перед и за фокальной плоскостью ОС на одном и том же расстоянии от последней. При этом функцию ВА определяют из дифференциального уравнения, связывающего алгебраическую комбинацию измеренных распределений интенсивности в упомянутых плоскостях с искажениями ВФ светового пучка на выходе ОС. Необходимая алгебраическая комбинация распределений интенсивности содержит разность и сумму яркости в каждом пикселе зарегистрированных распределений. На практике в присутствии аберраций изображения поперечных сечений пучка неидентичны по размеру, форме или положению в кадре и поэтому невозможно осуществить точное наложение одного изображения на другое. Как следствие, алгебраические операции выполняются с погрешностями, что ограничивает точность вычисления отклонений ВФ.

В методе [1, 2] такого рода погрешности исключены, поскольку, следуя ему, ВА определяют из дифференциального уравнения, связывающего ВФ светового пучка на выходе ОС с его распределением интенсивности только в одной плоскости регистрации, выбранной либо перед фокальной плоскостью, либо за ней. Вместе с тем, этому методу присущи погрешности измерений ВФ, связанные с крупномасштабными неоднородностями распределения интенсивности светового пучка на выходе ОС, обусловленными присутствием ВА. Такие амплитудные помехи или, иначе говоря, искажения изображения пучка, несвязанные с аберрациями, широко распространены, поскольку присутствуют в светосильных, аподизированных или внеосевых оптических системах.

Настоящая работа выполнена с целью устранения указанного недостатка метода [1, 2]. Расчётным путём и экспериментально показа-

но, что точность измерений ВА, ограниченную влиянием амплитудных помех, удаётся существенно повысить путём усреднения результатов обработки двух изображений, зарегистрированных в плоскостях, расположенных по разные стороны от плоскости фокусировки пучка на специально выбранных дистанциях. При этом оба изображения обрабатывают методом [1, 2] независимо одно от другого.

В разделе 2 описаны результаты имитационных численных экспериментов по моделированию метода определения ВА ОС по изображению сечения светового пучка, выполненных для оценки величины погрешности измерений ВА при разном уровне амплитудных помех.

В разделе 3 представлены результаты экспериментальных исследований, подтвердившие возможность повышения точности определения ВА ОС путём усреднения результатов отдельной обработки двух изображений.

2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВА В ПРИСУТСТВИИ АМПЛИТУДНЫХ ПОМЕХ

Имитационное численное моделирование предложенного способа определения ВА ОС было выполнено с целью количественной оценки погрешности определения ВА по отдельно взятому изображению в зависимости от уровня амплитудных помех и поиска возможностей компенсации таких погрешностей.

Численный имитационный эксперимент построен на основе расчёта интеграла Френеля, связывающего комплексную амплитуду поля пучка в плоскости P_0 на выходе ОС с искомыми распределениями амплитуды поля и интенсивности в плоскостях регистрации P_1 или P_2 , расположенных на расстояниях L_1 и L_2 перед плоскостью фокусировки пучка и за ней, соответственно. Функцию волновых аберраций $W_m(x, y)$, определяющую искажения фазы комплексной амплитуды поля светового пучка в плоскости P_0 , моделируют зависимостью вида:

$$W_m(x, y) = D_{3x}(x^2 + y^2)x + D_{3y}(x^2 + y^2)y + D_4(x^2 + y^2)^2, \quad (1)$$

которая включает в себя кому и сферическую аберрацию [16]. Коэффициентам D_{3x} , D_{3y} , D_4 ,

которые мы будем называть аберрационными, присваивают заранее заданные значения.

Крупномасштабные неоднородности распределения амплитуды поля излучения, обусловленные несовершенством облучающего ОС пучка или свойствами самой системы имитируют, умножая комплексную амплитуду поля в плоскости P_0 на коэффициент $\tau^{1/2}(x, y)$, где $\tau(x, y) = 1 - g_1(x/b) - g_2(x^2 + y^2)/b^2$ — функция, характеризующая линейную и квадратичную неоднородность распределения интенсивности пучка на выходе ОС с апертурой радиуса b . Значения коэффициента g_1 , определяющего равномерный перепад интенсивности вдоль горизонтальной оси поперечного сечения пучка на выходе ОС, в расчётах задавались в пределах от 0 до 0,1. Значения коэффициента g_2 , задающего для квадратичной неоднородности величину перепада интенсивности от центра к краю пучка на выходе ОС, варьировались в диапазоне от 0 до 0,3. Для примера, значения $g_2 \approx 0,2$ можно наблюдать при исследовании объектива с относительным отверстием порядка 1:2.

Полученные путём расчёта интеграла Френеля распределения интенсивности в поперечном сечении пучка в плоскостях P_1 и P_2 , включающие в себя вариации интенсивности аберрационного и дифракционного происхождения, вышеуказанные амплитудные искажения и добавленный высокочастотный шум на уровне до 3% от осевого уровня интенсивности, имитируют экспериментальные данные. По этим распределениям, рассчитанным для различных дистанций L_1 и L_2 , определяют соответствующие функции ВА $W_1(x, y)$ и $W_2(x, y)$, решая согласно методу [1, 2] уравнение, имеющее для случая, например, $W_1(x, y)$, вид:

$$\begin{aligned} &(\partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2)W_1(x, y) = \\ &= [L_1/(L_1 - F)F] \ln[I_1(x, y)/I_1(0, 0)], \end{aligned} \quad (2)$$

где $I_1(x, y)$ — распределение интенсивности светового пучка в плоскости P_1 , приведённое к координатам плоскости P_0 ; $I_1(0, 0)$ — значение интенсивности на оси пучка, F — дистанция фокусировки пучка. Величины F , L_1 и L_2 отсчитывают от плоскости фокусировки пучка в соответствии с правилом знаков, принятым в оптике. При этом значения F и L_1 , от-

считываемые против хода пучка, будут отрицательными.

Решают уравнение методом Галеркина или Ритца, основанного на поиске минимума функционала, отвечающего уравнению данного вида [17]. При этом функцию ВА представляют в виде суммы базовых функций с неопределёнными аберрационными коэффициентами. В нашем случае функция ВА, включающая в себя по условиям имитационного эксперимента функции, описывающие кому и сферическую аберрацию, имеет вид:

$$\begin{aligned} W_1(x, y) = &A_{3x}(x^2 + y^2)x + \\ &+ A_{3y}(x^2 + y^2)y + A_4(x^2 + y^2)^2, \end{aligned} \quad (3)$$

где A_{3x} , A_{3y} и A_4 — искомые аберрационные коэффициенты функции ВА $W_1(x, y)$, определяемой по изображению светового пучка в плоскости P_1 .

Аналогично по изображению пучка в плоскости P_2 из уравнения вида (2), но с заменой L_1 на L_2 , определяют аберрационные коэффициенты B_{3x} , B_{3y} и B_4 для функции ВА $W_2(x, y)$:

$$\begin{aligned} W_2(x, y) = &B_{3x}(x^2 + y^2)x + \\ &+ B_{3y}(x^2 + y^2)y + B_4(x^2 + y^2)^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Такой численный эксперимент моделирует способ измерения ВА [1, 2] с учётом влияния на точность результатов основных факторов помех, искажающих изображение пучка: амплитудных помех, геометрических искажений, дифракции и шума ПЗС-матрицы.

Параметры пучка в имитационном эксперименте были выбраны следующими: диаметр пучка на выходе объектива $2b = 20$ мм, дистанция фокусировки пучка $|F| = 200$ мм, $\lambda = 0,55$ мкм. Параметры g_1 и g_2 функции $\tau(x, y)$ варьировались в пределах, указанных выше, а заранее заданные значения аберрационных коэффициентов функции ВА (1) отвечали искажениям волнового фронта на уровне нескольких длин волн.

После определения функций ВА $W_1(x, y)$ и $W_2(x, y)$ производились вычисления отклонений значений этих функций от изначально заданной во френелевской модели расчёта $W_m(x, y)$. Количественную оценку отклонений даёт среднеквадратическое значение разности

найденной функции, например, $W_1(x, y)$ и заданной $W_m(x, y)$:

$$Q_1 = \sqrt{\frac{1}{S} \iint_S [W_1(x, y) - W_m(x, y)]^2 dx dy}, \quad (5)$$

где S — площадь поперечного сечения светового пучка на выходе ОС.

Величину волновой aberrации, включающей в себя несколько aberrационных компонент, обычно в целом характеризуют среднеквадратическим значением. Поэтому осуществлялось вычисление и сравнение среднеквадратического значения функции ВА, заданной изначально в этом цикле имитационных экспериментов:

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{1}{S} \iint_S [W_m(x, y)]^2 dx dy}, \quad (6)$$

со значениями σ_1 и σ_2 , полученными по формуле (6) для функций ВА $W_1(x, y)$ и $W_2(x, y)$, соответственно.

Сравнение показало, что отклонения среднеквадратических значений ($\sigma_1 - \sigma_m$) и ($\sigma_2 - \sigma_m$) в присутствии амплитудных помех имеют противоположные знаки. В связи с этим были определены средние значения aberrационных коэффициентов $C_{3x} = (A_{3x} + B_{3x})/2$, $C_{3y} = (A_{3y} + B_{3y})/2$ и $C_4 = (A_4 + B_4)/2$, а по ним и усреднённая функция ВА:

$$W(x, y) = C_{3x}(x^2 + y^2)x + C_{3y}(x^2 + y^2)y + C_4(x^2 + y^2)^2. \quad (7)$$

Среднеквадратическое значение σ вычислялось для функции $W(x, y)$ также по формуле (6).

На рис. 1а представлены рассчитанные зависимости нормированных на длину волны значений σ_1/λ , σ_2/λ и σ/λ от величины g_2 , характеризующей уровень амплитудной помехи, определяемой функцией $\tau(x, y)$. В приведённом примере численного эксперимента значения коэффициента квадратичной неоднородности g_2 варьировались в диапазоне от 0 до 0,3, а значение коэффициента g_1 было задано равным 0,1. Сплошной линией показано значение $\sigma_m/\lambda = 0,56$, вычисленное для заданной в модели функции ВА (1). Расположение плоскостей регистрации P_1 и P_2 относитель-

но плоскости фокусировки P_{\max} было симметричным. Величина дистанции регистрации $L = |L_1| = L_2 = 15$ мм была выбрана по изложенной в [1, 2] методике, учитывающей, что при распространении aberrированного светового пучка от выхода ОС до плоскости регистрации приближение геометрической оптики не должно нарушаться.

Из рис. 1а видно, что при наличии амплитудных помех вычисленные в имитационном эксперименте значения σ_1/λ и σ_2/λ отклоняются от изначально заданной величины σ_m/λ в противоположных направлениях. Объясняется это следующим. В симметричных относительно плоскости фокусировки

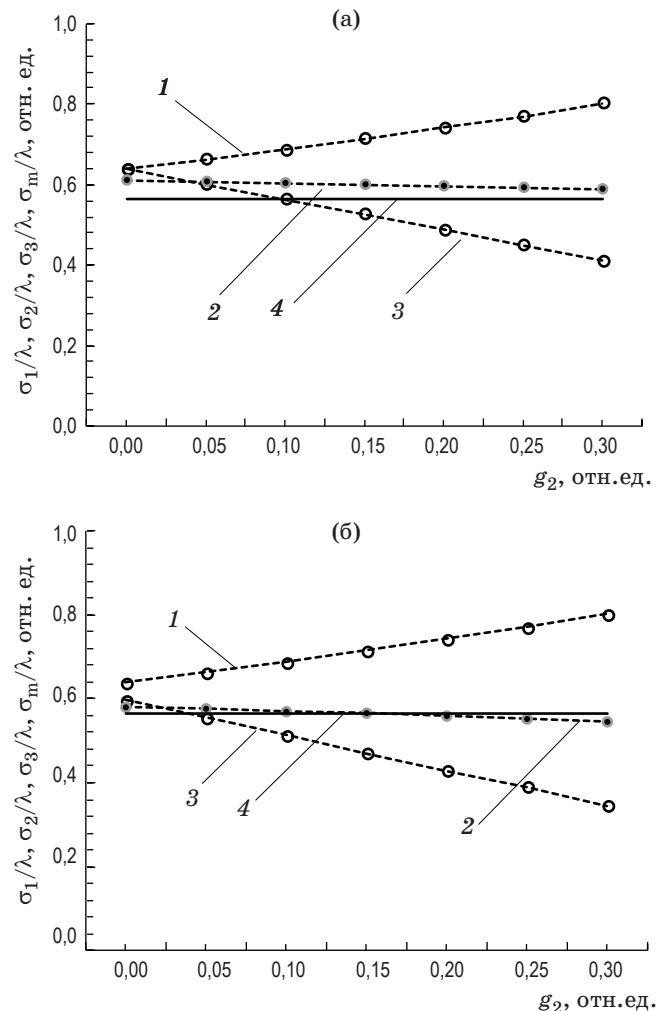


Рис. 1. Зависимость нормированного среднеквадратического значения ВА от уровня амплитуды неоднородной световой помехи: (а) — при $|L_1| = L_2 = 15$ мм; (б) — при $|L_1| = 15$ мм и $L_2 = 17,65$ мм. σ_1/λ — прямая 1, σ/λ — прямая 2, σ_2/λ — прямая 3, σ_m/λ — прямая 4.

парах изображений пучка, т.е. зарегистрированных при условии $L_2 = |L_1|$, одна и та же ВА формирует взаимно противоположный профиль распределения интенсивности. Например, если в предфокальном изображении сферическая аберрация формирует параболический профиль распределения интенсивности с максимумом в центре пучка, то в изображении за фокусом профиль распределения интенсивности, имеет вид параболы с минимумом интенсивности в центре пучка. Если же пучок изначально искажён амплитудной помехой, т.е. сразу на выходе ОС имеет, например, параболический профиль распределения интенсивности не аберрационного происхождения, то в условиях справедливости геометрооптического приближения и отсутствия аберраций этот же профиль распределения сохраняется и в предфокальной плоскости регистрации, и за фокусом. Эти особенности формирования распределения интенсивности в искажённом аберрациями и амплитудными помехами сфокусированном световом пучке были отмечены и в выполненных имитационных экспериментах, и в работе [15]. Если световой пучок искажён одновременно и ВА, и амплитудными помехами, то в одной из плоскостей регистрации — той, где амплитудные и аберрационные искажения распределения интенсивности имеют сходный профиль, они накладываются друг на друга и усиливают степень неоднородности суммарного распределения интенсивности. А в другой, где профили амплитудных и аберрационных искажений распределения интенсивности противоположны по отношению друг к другу, степень неоднородности распределения снижается. В обоих случаях это приводит к получению значений ВА, отличающихся от действительных: в первом случае — в сторону увеличения величины ВА и на рис. 1а видим, что $\sigma_1/\lambda > \sigma_m/\lambda$, а во втором — в сторону уменьшения ВА и поэтому $\sigma_2/\lambda < \sigma_m/\lambda$. Этот эффект позволяет взаимно скомпенсировать вызванные амплитудными помехами погрешности расчёта функций ВА $W_1(x, y)$ и $W_2(x, y)$, если выполнить их арифметическое усреднение, т.е. вычислить $W(x, y) = [W_1(x, y) + W_2(x, y)]/2$. Подтверждает это ход зависимости нормированной СКО волнового фронта σ/λ на рис. 1а. Видно, что с увеличением амплитуды помех отклонение значений σ_1/λ и σ_2/λ от σ_m/λ

также нарастает, в то время как величина σ/λ , вычисленная по усреднённой функции ВА $W(x, y)$, хоть и отличается немного от заданного значения σ_m/λ , но практически не зависит от уровня помехи. Эта погрешность измерения, составляющая величину $(\sigma - \sigma_m) \approx 0,04\lambda$ и имеющая вид систематической, обусловлена, как выяснилось, выбором положения плоскостей регистрации из условия симметрии, т.е. $|L_1| = L_2$. Чтобы устранить эту погрешность, необходимо при уже выбранной длине дистанции $|L_1|$ дистанцию L_2 выбрать из условия:

$$L_2 = -L_1 F / (F - 2L_1), \quad (8)$$

Это условие обеспечивает равенство по абсолютной величине численных коэффициентов в правой части уравнений вида (2), записанных для вычисления функций ВА $W_1(x, y)$ и $W_2(x, y)$, что приводит к более точной компенсации влияния амплитудной помехи на результат.

На рис. 1б представлены результаты расчётов σ/λ , σ_1/λ и σ_2/λ при выполнении условия (8), т.е. при $L_1 = -15$ мм и $L_2 = -L_1 F / (F - 2L_1) = 17,65$ мм. Видно, что на этом графике практически отсутствует систематическая погрешность вычисленных значений σ/λ , присутствующая на рис. 1а.

На рис. 2 представлены рассчитанные зависимости нормированных на длину волны

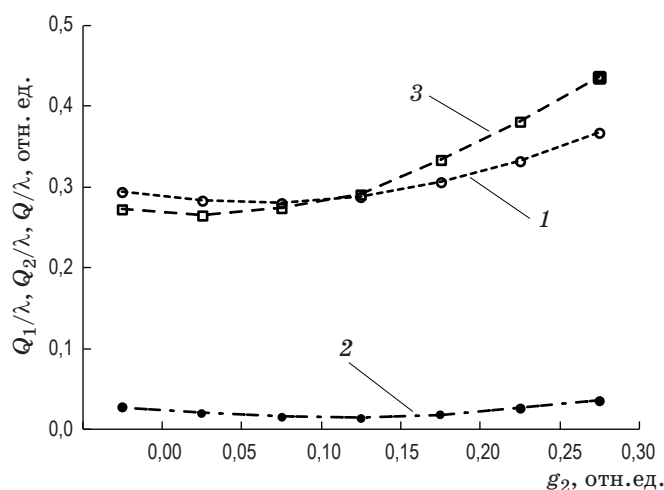


Рис. 2. Зависимость нормированного среднеквадратического значения разности рассчитанной ВА $W(x, y)$ и заданной в модели $W_m(x, y)$ от уровня амплитуды неоднородной световой помехи. Q_1/λ — кривая 1, Q_2/λ — кривая 2, Q/λ — кривая 3.

значений Q/λ , Q_1/λ и Q_2/λ от уровня такой же амплитудной помехи. Видно, что вычисленные по изображениям пучка в плоскости P_1 и P_2 значения среднеквадратической разности функции ВА Q_1 и Q_2 составляют не менее $0,3\lambda$ и нарастают с увеличением коэффициента квадратичной неоднородности g_2 . При этом важно отметить, что при всех уровнях амплитудной помехи, т.е. во всем диапазоне изменений g_2 , значения среднеквадратической разности усреднённой функции ВА Q остаются близки к нулю и не превышают величины $\lambda/25$. Этот результат подтверждает факт, что амплитудные помехи дают разнонаправленный вклад в погрешность определения абберационных коэффициентов функций ВА $W_1(x, y)$ и $W_2(x, y)$, а при усреднении значений абберационных коэффициентов внесённые амплитудной помехой погрешности взаимно компенсируются.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 3 представлена оптическая схема эксперимента, отвечающая условиям измерений ВА ОС методом [1, 2]. Излучение от лампы накаливания 1 проецируется конденсором 2 на отверстие микродифрагмы 4 диаметром 50 мкм через узкополосный светофильтр 3 с максимумом пропускания на длине волны 0,55 мкм. За отверстием микродифрагмы, имитирующей точечный источник излучения, формируется сферический пучок с однородным распределением интенсивности в пределах апертуры исследуемой ОС — объектива 5. Микродифрагма 4 была установлена на расстоянии 870 мм от первой оптической поверхности объектива 5 с некоторым смещением преимущественно в горизонтальном направлении

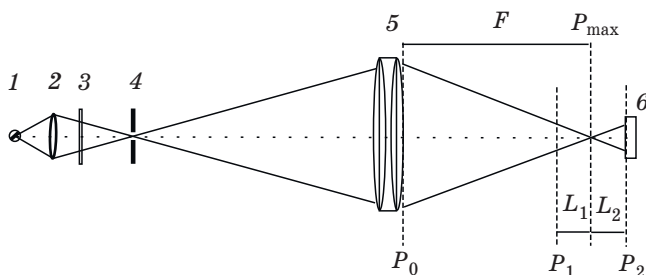


Рис. 3. Оптическая схема установки для определения ВА оптической системы.

относительно центра поля зрения объектива. В такой геометрии эксперимента прошедший ОС световой пучок приобретал ВА в основном типа комы и сферической. Амплитудные помехи, рассмотренные в предыдущем разделе, на первом этапе отсутствовали.

Эксперимент был организован таким образом, чтобы геометрия облучения исследуемой ОС сформированным сферическим световым пучком была неизменной в ходе цикла измерений. Соответственно, неизменным остаётся и прошедший ОС искажённый абберациями световой пучок, изображения поперечных сечений которого регистрировались на различных расстояниях от выхода ОС.

В соответствии с [1], путём перемещения ПЗС-матрицы 6 вдоль каустики фокусируемого пучка, было определено местоположение плоскости фокусировки P_{\max} , в котором пиковая интенсивность излучения имеет максимальное значение. Расстояние $|F|$ от плоскости P_{\max} до плоскости P_0 , отвечающей положению последней оптической поверхности ОС, составило $200 \pm 0,5$ мм. В эксперименте регистрация ПЗС-матрицей распределения интенсивности светового пучка осуществлялась по очереди в плоскостях P_1 и P_2 , показанных на рис. 3. Плоскость P_1 расположена до плоскости фокусировки пучка P_{\max} на некотором расстоянии $|L_1|$ от последней, а плоскость P_2 — за плоскостью P_{\max} на расстоянии L_2 . В этом эксперименте были зарегистрированы изображения поперечного сечения пучка в плоскостях P_1 и P_2 при значениях $|L_1| = L_2 = 5$ мм, 10 мм, 15 мм, 20 мм, 25 мм и 30 мм.

С использованием этих изображений сечения пучка, путём решения уравнения (2) были вычислены функции ВА $W_1(x, y)$ и $W_2(x, y)$, аппроксимированные, как и в имитационном численном эксперименте, функциями вида (3) и (4), соответственно. Затем были найдены средние значения абберационных коэффициентов $C_{3x} = (A_{3x} + B_{3x})/2$, $C_{3y} = (A_{3y} + B_{3y})/2$ и $C_4 = (A_4 + B_4)/2$, а по ним — усреднённая функция ВА $W(x, y)$ вида (5).

На рис. 4. представлены нормированные на $\lambda = 0,55$ мкм среднеквадратические значения ВА σ_{w1} , σ_{w2} и σ_w , отвечающие вычисленным по данным эксперимента функциям $W_1(x, y)$, $W_2(x, y)$ и $W(x, y)$. На кривой 1 лежат значения σ_{w1}/λ , на кривой 2 — σ_w/λ и на кривой 3 — σ_{w2}/λ .

Из рис. 4 видно, что σ_{w1}/λ , σ_{w2}/λ и σ_w/λ , вычисленные по изображениям пучка на дистанциях $L = 20, 25$ и 30 мм, близки по величине и составляют в среднем величину $\langle \sigma_w \rangle = 0,74\lambda$. В то же время, полученные значения σ_{w1}/λ и σ_{w2}/λ на дистанциях $L \leq 15$ мм даже в отсутствие неоднородностей распределения интенсивности на выходе объектива заметно отличаются друг от друга. Это различие, нарастающее по мере приближения плоскости регистрации к фокальной и отсутствующее при регистрации вдали от последней, объясняется искажениями поперечных размеров пучка под влиянием aberrаций по отношению к геометрическим размерам чисто сферического сходящегося пучка. Свою роль играет и развитие дифракционных явлений вблизи плоскости фокусировки.

Действительно, в этих экспериментах в пространстве перед плоскостью фокусировки поперечный размер искажённого сферической aberrацией и комой пучка несколько увеличивается, а за этой плоскостью — уменьшается, что не учитывает расчёт, выполняемый в сферической геометрии. Разницу размеров пучка можно увидеть на рис. 6, сравнивая диаметры изображений поперечного сечения пучка, приведённых к координатам плоскости P_0 . Представленные изображения зарегистрированы на дистанции $L_1 = -10$ мм (рис. 5а и рис. 6а) и $L_2 = 10$ мм (рис. 5б и рис. 6б). По оценкам влияние дифракции должно сказываться на результатах при дистанции регистрации $L < |L_{\min}| \approx 15$ мм. На рис. 4

это влияние демонстрирует общее снижение значений σ_{w1}/λ , σ_{w2}/λ и σ_w/λ , полученных при $L = 5$ мм. Оценка значения $|L_{\min}|$, при котором

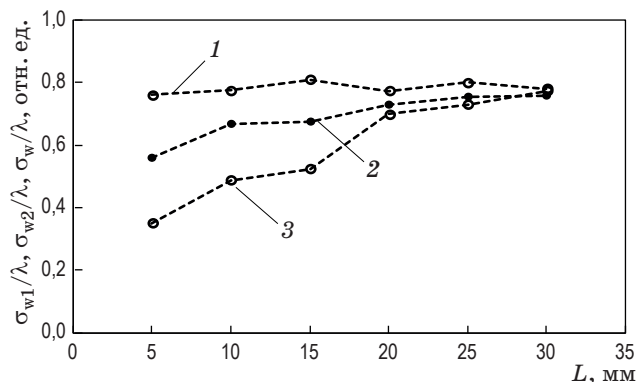


Рис. 4. Нормированные среднеквадратические значения ВА, вычисленные по экспериментальным изображениям светового пучка на разных дистанциях регистрации $L = |L_1| = L_2$: σ_{w1}/λ — линия 1, σ_w/λ — линия 2, σ_{w2}/λ — линия 3.

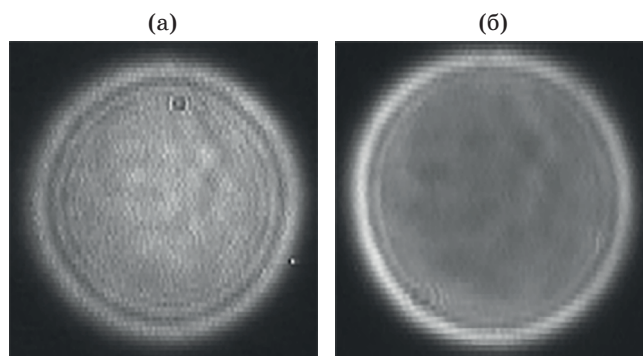


Рис. 5. Изображения поперечного сечения светового пучка: (а) — в плоскости P_1 , (б) — в плоскости P_2 .

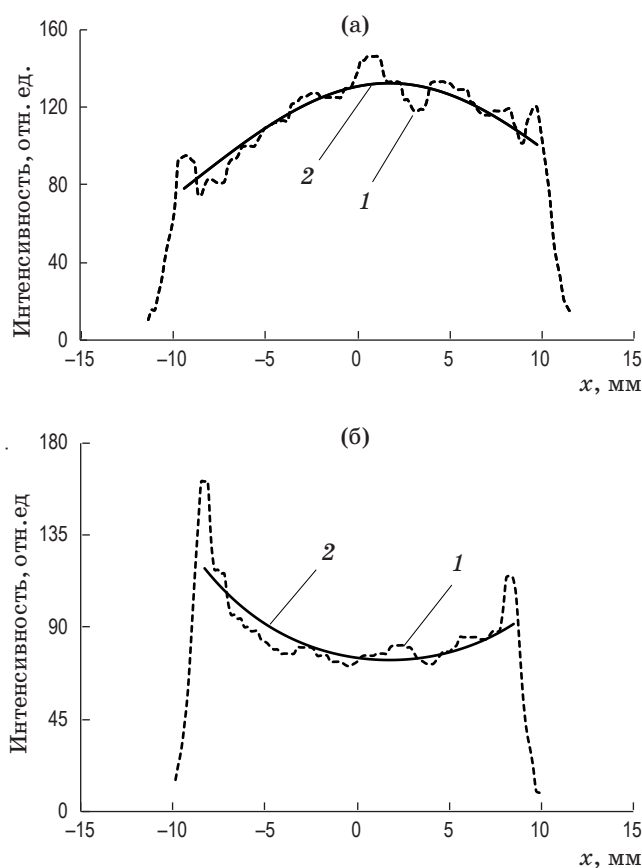


Рис. 6. Графики профиля распределения интенсивности в поперечном сечении светового пучка вдоль горизонтального диаметра, приведённые к координатам в плоскости P_0 : (а) — распределение в плоскости P_1 , (б) — распределение в плоскости P_2 . Экспериментальный профиль распределения интенсивности — кривая 1, расчёт профиля по найденной функции ВА $W(x, y)$ — кривая 2.

ещё можно рассматривать распространение aberrированного пучка в геометрооптическом приближении выполнялась по методике, представленной в [1, 2]. Несмотря на то, что отмеченные факторы, которые тоже можно считать помехами, проявляют себя уже при $L \leq 15$ мм, из рис. 4 видно, что значения σ_w/λ для усреднённой ВА $W(x, y)$, полученные при $L = 10$ и 15 мм мало отличаются от значения $\langle \sigma_w \rangle / \lambda$, отвечающего дистанциям 20, 25 и 30 мм. Так, например, при $L = 15$ мм это отличие, характеризующее погрешность измерения ВА, составляет величину $|\sigma_w - \langle \sigma_w \rangle| \approx 0,07\lambda$, в то время как без усреднения aberrационных коэффициентов получаем втрое большую величину $|\sigma_{w2} - \langle \sigma_w \rangle| \approx 0,22\lambda$. Можно сказать, что при усреднении значений ВА происходит существенная компенсация погрешностей расчётов ВА, выполненных по отдельным изображениям в присутствии описанных геометрических искажений пучка. Из рис. 4 также видно, что наиболее точные результаты измерения ВА методом [1, 2] получены при выборе дистанции регистрации изображения пучка $|L_1| \approx 2|L_{\min}|$. В этом случае $\sigma_{w1} \approx \sigma_{w2} \approx \sigma_w$.

На втором этапе эксперимента были определены ВА ОС, а по ним и среднеквадратические значения σ_{w1} , σ_{w2} , σ_w в присутствии амплитудной помехи и с учётом условия (8) для выбора дистанции L_2 . Результаты приведены в таблице. В левой графе таблицы указаны условия эксперимента в каждом из трёх циклов измерений, выполненных при следующих комбинациях дистанций регистрации: $L_1 = -17$ мм и $L_2 = 20$ мм; $L_1 = -20$ мм и $L_2 = 25$ мм; $L_1 = -25$ мм и $L_2 = 33$ мм.

В пучке, искажённом, как и прежде, волновыми aberrациями типа сферической и комы, присутствовала амплитудная помеха в виде равномерного перепада интенсивности по сечению пучка, характеризуемая величиной $g_1 \approx 0,05$. Поскольку в приближении геометрической оптики aberrация типа комы проявляется в сфокусированном пучке также в виде почти равномерного перепада распределения интенсивности по его сечению [2], то наложение указанной амплитудной помехи на сходное aberrационное искажение распределения интенсивности неизбежно приводит к погрешности измерения ВА. Поскольку при этом, как уже отмечалось, амплитудные помехи дают разнонаправленный вклад в по-

Нормированные среднеквадратические значения волновых aberrаций

Дистанции регистрации изображений сечения пучка в плоскостях P_1 и P_2	σ_{w1}/λ , отн. ед.	σ_{w2}/λ , отн. ед.	σ_w/λ , отн. ед.
$L_1 = -17$ мм $L_2 = 20$ мм	0,926	0,65	0,744
$L_1 = -20$ мм $L_2 = 25$ мм	0,854	0,712	0,753
$L_1 = -25$ мм $L_2 = 33$ мм	0,905	0,686	0,756

грешность измерения aberrационных коэффициентов функций ВА $W_1(x, y)$ и $W_2(x, y)$, то получение усреднённой функции ВА $W(x, y)$ позволяет скомпенсировать внесённые помехой погрешности.

Это подтверждают результаты эксперимента. Из таблицы видно, что значения σ_{w1} и σ_{w2} , полученные в одном цикле измерений, сильно отличаются: их разница лежит в диапазоне $0,15\lambda \div 0,27\lambda$, т.е. составляет 20–30% от измеренного значения. Значения σ_{w1} , отвечающие разным дистанциям регистрации L_1 , тоже неравны друг другу. Это же можно сказать и о значениях σ_{w2} , отвечающих разным L_2 , их разброс — на уровне 10%. В противоположность этому разброс значений σ_w , вычисленных в каждом экспериментальном цикле, не превышает 2% от средней величины $\langle \sigma_w \rangle \approx 0,75\lambda$.

Здесь следует отметить, что в каждом из трёх циклов эксперимента, отвечающих разным парам значений L_1 и L_2 , реализуется своя независимая суперпозиция вкладов амплитудных и aberrационных искажений в неоднородности распределения интенсивности в изображениях пучка. А поскольку результаты каждого из трёх измерений волновых aberrаций, оцениваемых величиной среднеквадратической погрешности, оказываются чрезвычайно близки, то это говорит о высокой степени их достоверности и точности.

Таким образом, полученные экспериментальные результаты подтвердили возможность компенсации погрешностей измерений, обусловленных помехами в виде амплитудных и геометрических искажений изображений сечения пучка. Предложенное усовершенствование

известного метода измерений волновых aberrаций [1, 2] позволяет и в присутствии помех сохранить присущую ему погрешность измерений на уровне $\lambda/20$. Отметим, что основные результаты настоящей работы защищены патентом РФ на изобретение [18].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В основе предложенного ранее метода определения ВА ОС [1, 2] лежит анализ и обработка по созданной методике искажённых aberrациями распределений интенсивности в изображении поперечного сечения фокусируемого светового пучка. Очевидно, что амплитудные помехи, т.е. неоднородности интенсивности в сечении светового пучка, необусловленные ВА, неизбежно увеличат погрешности измерений. Имитационное численное моделирование метода определения ВА ОС в присутствии амплитудных помех, выполненное для разных вариантов расположения плоскости регистрации изображения поперечного сечения aberrированного пучка, позволило найти метод компенсации погрешностей измерений, обусловленных амплитудными помехами. Компенсация достигается путём арифметического усреднения функций ВА W_1 и W_2 , найденных по изображениям сечения пучка, зарегистрированным в плоскостях P_1 и P_2 по разные стороны от плоскости фокусировки. Оба изображения обрабатываются методом [1, 2] независимо одно от другого, но при этом

выбор дистанций регистрации L_1 и L_2 для плоскостей P_1 и P_2 должен удовлетворять соотношению $L_2 = -L_1F/(F - 2L_1)$.

Выполненные экспериментальные исследования подтвердили возможность компенсации погрешностей измерений, обусловленных амплитудными помехами. Было также установлено, что по мере приближения плоскости регистрации к фокальной нарастают обусловленные aberrациями искажения поперечных размеров сечения пучка. Это также снижает точность измерений ВА по одному изображению пучка даже в отсутствие амплитудных помех. Эксперименты показали, что усреднение функций ВА W_1 и W_2 позволяет существенно снизить влияние таких геометрических искажений на результат и повысить точность измерения.

В целом из результатов экспериментов следует, что и в присутствии амплитудных помех, и без них более высокую точность измерений ВА по двум изображениям пучка достигают при выборе дистанции регистрации из условия $|L_1| \approx 2|L_{\min}|$. При дальнейшем увеличении дистанций L_1 и L_2 уровень амплитудных помех и случайных шумов в изображении пучка в какой-то момент превысит aberrационные искажения распределения интенсивности, которые уменьшаются с ростом $|L_1|$ и L_2 , и это снизит точность измерений ВА. Более детально исследовать влияние этого фактора на точность измерений ВА предполагается на примере конкретных оптических систем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сиразетдинов В.С., Дмитриев И.Ю., Линский П.М., Никитин Н.В. Способ определения волновых aberrаций оптической системы // Патент РФ № 2680657. 2019.
2. Сиразетдинов В.С., Дмитриев И.Ю., Линский П.М., Никитин Н.В. Метод определения волновых aberrаций оптической системы по распределению интенсивности фокусируемого пучка // Оптический журнал. 2019. Т. 86. № 8. С. 5–13.
3. Guo H., Korablinova N., Ren Q., Bille J. Wavefront reconstruction with artificial neural networks // Optics Express. 2006. V. 14. № 14. P. 6456–6460.
4. Ляхов Д.М., Шанин О.И., Щипалкин В.И. Модифицированный метод Гартмана для измерения характеристик широкоапертурных адаптивных зеркал // Автометрия. 2011. Т. 48. № 2. С. 86–91.
5. Антошкин Л.В., Лавринов В.В., Лавринова Л.Н., Лукин В.П. Особенности применения фотоприемных устройств в датчиках волнового фронта Шэка–Гартмана // Автометрия. 2011. Т. 48. № 2. С. 92–102.
6. Southwell W.H. Wave-front analyzer using a maximum likelihood algorithm // J. Optical Society of America. 1977. V. 67. № 3. P. 396–399.
7. Maeda J., Murata K. Retrieval of wave aberration from point spread function or optical transfer function data // Applied Optics. 1981. V. 20. № 2. P. 274–279.

8. Gonsalves R.A. Phase retrieval and diversity in adoptive optics // *Optical engineering*. 1982. V. 21. № 5. P. 829–832.
9. Berlich R., Stallinga S. Image based aberration retrieval using helical point spread functions // *Applied Optics*. 2020. V. 59. № 22. P. 6557–6572.
10. Iglesias I., Berrio E., Artal. P. Estimates of the ocular wave aberration from pairs of double-pass retinal images // *J. Optical Society of America. A*. 1998. V. 15. № 9. P. 2466–2476.
11. Iglesias I. Parametric wave-aberration retrieval from point-spread function data by use of a pyramidal recursive algorithm // *Applied Optics*. 1998. V. 37. № 23. P. 5427–5430.
12. Nishizaki Y., Valdivia M., Horisaki R., Kitaguchi K., Saito M., Tanida J., Vera E. Deep learning wavefront sensing // *Optical Express*. 2019. V. 27. № 1. P. 240–251.
13. Ju G., Qi X., Ma H., Yan C. Feature-based phase retrieval wavefront sensing approach using machine learning // *Optical Express*. 2018. V. 26. № 24. P. 31767–31783.
14. Paine S.W., Fienup J.R. Machine learning for improved image-based wavefront sensing // *Optics Letters*. 2018. V. 43. № 6. P. 1235–1238.
15. Roddier F. Wave-front reconstruction from defocused images and testing of ground-based optical telescopes // *Applied Optics*. 1988. V. 27. № 7. P. 1223–1225.
16. Malacara D., Servin M., Malacara Z. Interferogram analysis for optical testing. N.Y., London.: Taylor & Francis, 2005. 546 p.
17. Калиткин Н.Н. Численные методы. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 592 с.
18. Сиразетдинов В.С., Дмитриев И.Ю., Линский П.М., Никитин Н.В. Способ определения волновых aberrаций оптической системы // Патент РФ № 2753627. 2021.

АВТОРЫ

Владимир Сабитович Сиразетдинов — доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, 188540, г. Сосновый Бор, Ленинградская обл., Россия; Scopus ID: 6701424147; <https://orcid.org/0000-0002-0133-5182>; v.sirazet@mail.ru

Игорь Юрьевич Дмитриев — доктор техн. наук, начальник отдела, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения», 188540, г. Сосновый Бор, Ленинградская обл., Россия, <https://orcid.org/0000-0003-4426-8191>; dmitrieviy@nioep.ru

Павел Михайлович Линский — начальник лаборатории, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, 188540, г. Сосновый Бор, Ленинградская обл. Российская Федерация. <https://orcid.org/0000-0002-9133-6719>; nnw19@mail.ru

Николай Витальевич Никитин — старший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, 188540, г. Сосновый Бор, Ленинградская обл., Россия, Scopus ID: 16510618000; <https://orcid.org/0000-0003-3826-3765>; nikitinnv@nioep.ru

AUTHORS

Vladimir S. Sirazetdinov — Dr.Sc., Leading Researcher, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, 188540, Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia, Scopus ID: 6701424147; <https://orcid.org/0000-0002-0133-5182>; v.sirazet@mail.ru

Igor Yu. Dmitriev — Dr.Sc., Head of department, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, 188540, Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-4426-8191>; dmitrieviy@nioep.ru

Pavel M. Linsky — Head of laboratory, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, 188540, Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-9133-6719>; nnw19@mail.ru

Nikolay V. Nikitin — Senior Researcher, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, 188540, Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia, Scopus ID: 16510618000; <https://orcid.org/0000-0003-3826-3765>; nikitinnv@nioep.ru