

УДК 535.4; 681.787

ЦИФРОВАЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНАЯ ГОЛОГРАФИЯ

© С. Г. Каленков¹, Г. С. Каленков²

¹НТЦ «Оптоэлектроника» Московского политехнического университета,
107023, Москва, ул. Большая Семёновская, 38

²Институт динамики геосфер РАН,
119334, Москва, ул. Академика Зелинского, 38 корп. 1
E-mail: kalenkov@mail.ru

Рассмотрены способ и оптическая схема регистрации цифровых гиперспектральных голограмм в свете некогерентного источника. В состав оптической схемы входит интерферометр со сканирующим зеркалом для генерации опорных волн. Набор комплексных амплитуд объектного поля вычисляется путём фурье-преобразования интерферограмм в каждом пикселе матрицы регистрации. Приведены экспериментальные результаты голографических изображений микрообъектов, полученных на различных оптических схемах: на просвет и на отражение. Рассмотрена схема интерферометра общего пути, в которой опорная волна является частью объектного поля.

Ключевые слова: голография, интерферометрия, фурье-спектроскопия, гиперспектральная голографическая микроскопия.

DOI: 10.15372/AUT20200206

Введение. Цифровые гиперспектральные голограммы были получены впервые в работах [1–4]. Само название гиперспектральные голограммы непосредственно связано с фурье-спектрометрией, точнее, с применением фурье-спектрометра с матричным приёмником в качестве фурье-видеоспектрометра. Как известно, видеоспектрометры — это приборы, предназначенные для одновременного анализа как пространственных, так и спектральных характеристик оптического изображения объектов в широком спектральном диапазоне. Спектр сфокусированного изображения в каждой точке (пикселе) вычисляется в результате фурье-преобразования интерферограммы — зависимости интенсивности от величины перемещения сканирующего зеркала интерферометра. Согласно установившейся классификации гиперспектральными принято считать видеоспектрометры с числом каналов (а это, по сути, число спектральных компонент, разрешаемых прибором) от 100 до 1000 при разрешающей способности $R = \lambda/\Delta\lambda = [100 - 500]$. Изображающий фурье-спектрометр соответствует таким характеристикам. Поэтому совокупность изображений объекта, другими словами, цифровой массив пространственных распределений сфокусированного изображения объекта для различных длин волн, получаемых на нём, называется гиперспектральным изображением. Подчеркнём, что речь идёт, в сущности, о спектральном анализе интенсивности оптического поля в каждом пикселе матрицы регистрации фурье-спектрометра. Оптическая схема изображающего фурье-спектрометра принципиально совпадает со схемой записи спектра образца, расположенного в фурье-спектрометре в сведённых вместе пучках. Интерферограммы, записанные по такой схеме, называют симметричными [5]. Если же образец в фурье-спектрометре помещён на место неподвижного зеркала, то такая интерферограмма называется несимметричной. Известно, что фурье-преобразование несимметричной интерферограммы позволяет получить комплексную амплитуду волнового поля исследуемого образца и таким образом определить, например, зависимость комплексного коэффициента для отражающего образца или соответственно

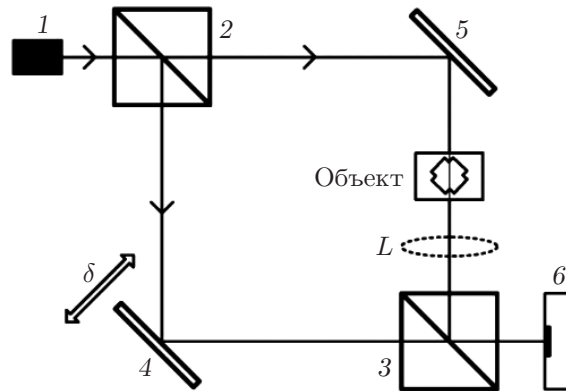


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема записи гиперспектральных голограмм: 1 — источник некогерентного света, 2, 3 — светоделительные кубики, 4, 5 — зеркала, 6 — матричный приёмник, L — объектив

комплексного коэффициента преломления для прозрачного образца. Особый интерес представляет схема записи несимметричной интерферограммы. Несложно заметить, что формально эта схема совпадает со схемой записи голограммы. Действительно, в этой схеме волновое поле, прошедшее через объект (или отражённое от объекта), можно рассматривать как объектное поле, а поле, отражённое от подвижного зеркала, — как опорную волну. В этом случае, как показано в работах [2–4], фурье-преобразование интерферограммы в каждом пикселе матрицы даёт комплексную амплитуду объектного поля на каждой спектральной частоте, т. е. гиперспектральную голограмму как френелевского типа, когда дифракционное поле объекта непосредственно падает на приёмную матрицу (объектив L убран), так и фокусированного изображения, когда объектив строит изображение объекта на матрице. Поскольку в основе метода записи гиперспектральных голограмм лежат принципы и техника фурье-спектроскопии, то он естественным образом наследует все сильные стороны этих принципов: беспрецедентно высокое отношение сигнала к шуму и, как следствие, высокое пространственно-спектральное разрешение голографического изображения по сравнению, например, с гиперспектральными голограммами, получаемыми с помощью перестраиваемого по частоте лазера [6]. Одним из перспективных направлений предложений техники гиперспектральной голографии является построение датчиков волнового фронта [7]. В работах [4, 8–11] экспериментально исследовались продольная и поперечная разрешающие способности метода, глубина регистрируемой сцены, подтверждена возможность существенного подавления спекл-шума и численного синтеза гиперспектрального (цветного) изображения — точной цветопередачи.

Регистрация гиперспектральных голограмм сканирующим интерферометром. Сканирующий интерферометр с матричным приёмником, схема которого представлена на рис. 1, и источником белого света был использован для регистрации гиперспектральных голограмм. Серия интерферограмм записывалась в процессе движения подвижного (сканирующего) зеркала, при этом параллельный опорный пучок света, отражённый от зеркала, приобретал для каждой спектральной компоненты света $\sigma = 1/\lambda$ (λ — длина волны) фазовый набег $\varphi(\delta) = 2\pi\sigma\delta$, где δ — смещение зеркала от положения нулевой разности хода. Поскольку зеркало перемещалось на расстояние $\pm L$, то фаза опорного пучка сканировалась в пределах $\varphi(L) = \pm 2\pi\sigma L$. Интерферограмма $G(\theta, \delta) = G_0 + G_{\text{int}}$ — зависимость интенсивности интерференционного поля от переменной δ — содержит фон $G_0 = |A|^2 + r^2$ и интерференционное слагаемое G_{int} . Фон не зависит от δ , представляет

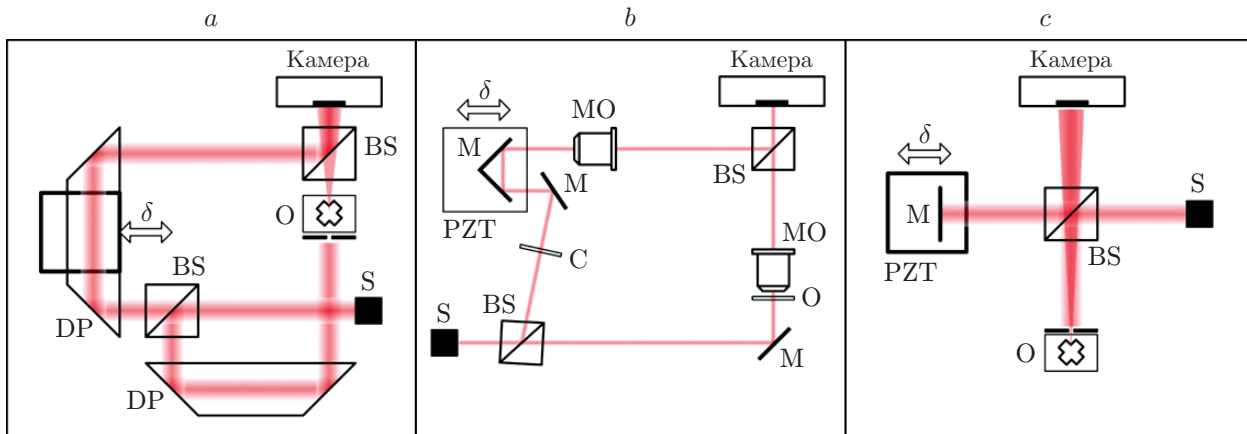


Рис. 2. Оптические схемы записи гиперспектральных голограмм микрообъектов: френелевских голограмм (а); голограмм сфокусированного изображения (b) на пропускание; запись френелевских голограмм на отражение (с) (Обозначения: S — источник света, DP — призма Дове, BS — светоделительный кубик, O — объект, PZT — трансляционный пьезостол, C — компенсатор, M — зеркало, MO — микрообъектив)

интерес только интерференционное слагаемое, которое имеет вид

$$G_{\text{int}}(\theta, \delta) = \int S(\sigma)[A(\sigma, \theta) r e^{-2\pi i \sigma \delta} + A^*(\sigma, \theta) r e^{2\pi i \sigma \delta}] d\sigma. \quad (1)$$

Здесь $r e^{2\pi i \sigma \delta}$ — опорная волна с амплитудой r ; $A(\sigma, \theta)$ — комплексная амплитуда предметного поля, поступающего на матрицу регистрации; $\theta = \xi/z$, где ξ — координата в плоскости регистрации, z — расстояние между плоскостью регистрации и объектом; $S(\sigma)$ — спектральная плотность мощности источника. Интегрирование в (1) ведётся по интервалу $\Omega = \sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}}$, где $A(\sigma)$ отлична от нуля. Как показано в [2], преобразование Фурье на спектральной частоте σ интерферограммы $G_{\text{int}}(\theta, \delta)$ по переменной δ даёт комплексную амплитуду $A(\sigma, \theta)$ на каждой спектральной частоте σ , т. е. гиперспектральную голограмму объектного поля. Более точно: комплексная амплитуда предметного поля вычислялась в результате интегрального преобразования

$$A(\sigma, \theta) = \frac{1}{S(\sigma)} \int_{-L/2}^{L/2} G_{\text{int}}(\theta, \delta) e^{2\pi i \sigma \delta} d\delta, \quad (2)$$

где L — длина хода сканирующего зеркала, и только при $L \rightarrow \infty$ это преобразование переходит в преобразование Фурье. Как известно, конечная величина L задаёт спектральное разрешение объектного поля: $\Delta\sigma \sim 1/L$. Это, в частности, означает, что число возможных разрешённых спектральных компонент объектного поля $M = \Omega/\Delta\sigma = \Omega L$. Таким образом, интегральное преобразование (2) определяет конечный набор M комплексных функций, комплексных амплитуд предметного поля $A(\sigma_m, \xi)$, $m = 0, 1, 2, \dots, M$, которое представляет гиперспектральную голограмму объектного поля.

Оптические схемы записи гиперспектральных голограмм микрообъектов в схеме на просвет и на отражение приведены на рис. 2. Многократное сканирование позволяет повысить отношение сигнал/шум, что типично для техники фурье-спектроскопии (рис. 3, а, b). Гиперспектральные голограммы обладают свойством точной цветопередачи [8]. Еще одна

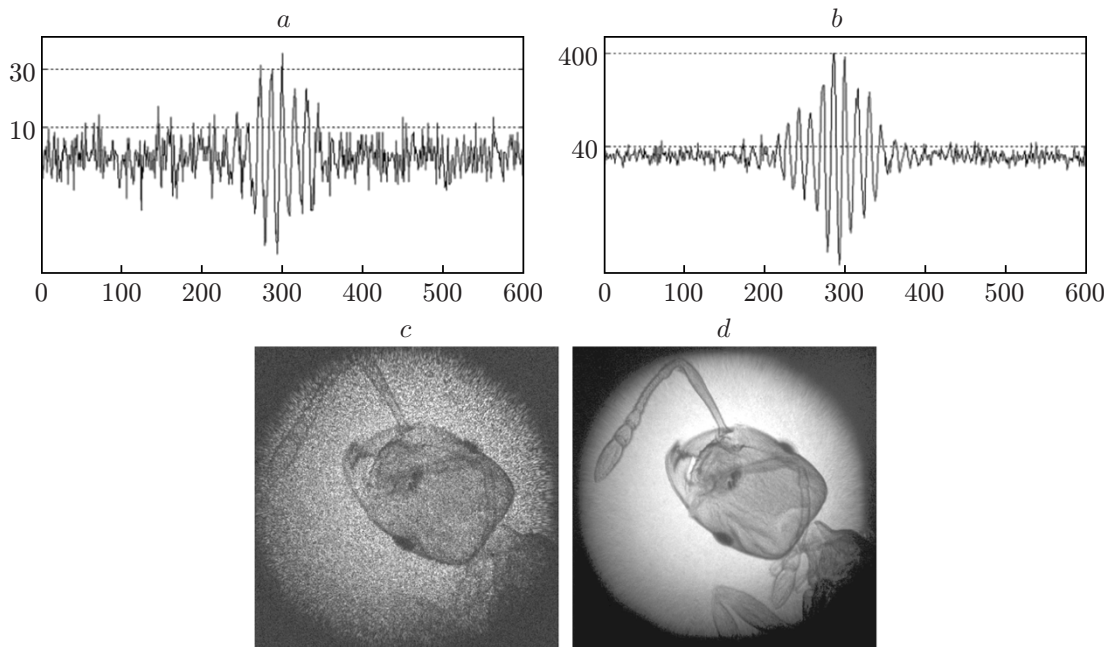


Рис. 3. Подавление шумов: *a* — интерферограмма, полученная за один проход зеркала; *b* — усреднённая по 14 сканам интерферограмма; *c* — изображение объекта на одной из спектральных компонент; *d* — сумма 145 спектральных компонент. Объект — голова муравья, поле зрения 1 мм

важная особенность — подавление спекл-шума. Каждая из голограмм на произвольной спектральной компоненте содержит спекл-шум, однако сумма всех голограмм гиперспектрального набора его существенно снижает (рис. 3, *c*, *d*).

Самореферентные гиперспектральные голограммы. В вышерассмотренных схемах записи голограмм использовался источник света с высокой пространственной когерентностью, с помощью которого сканирующее зеркало интерферометра формировало плоские опорные волны вида $re^{2\pi i\sigma\delta}$. В [9] предложена оптическая схема записи голограмм в свете протяжённого источника. Такая схема известна как интерферометр общего пути. Помимо снижения требований к пространственной и временной когерентности при регистрации интерферограмм, эта схема позволяет значительно снизить шумы, связанные с вибрацией. На рис. 4 представлена принципиальная схема регистрации гиперспектральной голограммы с опорной волной, выделенной из объектного поля, т. е. опорной волной, являющейся частью объектного поля. Источник белого света *1*, представляющий собой диск диаметром *D*, освещает кольцевую маску, установленную в фокальной плоскости *2* линзы *3*. Объект *5* установлен в передней фокальной плоскости линзы *6*. Свет проходит через объект и линзу *6*, затем через делитель *7*, одна часть которого — опорная волна — отражается от зеркальной кольцевой маски *8* (радиуса *R* и толщины $\Delta R \sim r_c$), установленной на подвижном столике *9*. Другая часть — объектная волна — падает на неподвижное зеркало *10*, отражается от него и вместе с опорной волной, проходя через линзу *11*, поступает на матрицу регистрации *12*. Зеркало *10* и маска *8* находятся в фокальной плоскости линз *6* и *11*. Кольцевая маска *8* выполняет роль фильтра пространственных частот. При перемещении зеркала *9* в каждой точке *x* (в каждом пикселе) матрицы регистрации записывается интерферограмма $G(\delta, x)$, представляющая собой зависимость интенсивности интерференционного поля объектной и опорной волн от величины перемещения зеркала δ . В интерферограмме представляет интерес только интерференционное слагаемое $G_{\text{int}}(\delta, x)$,

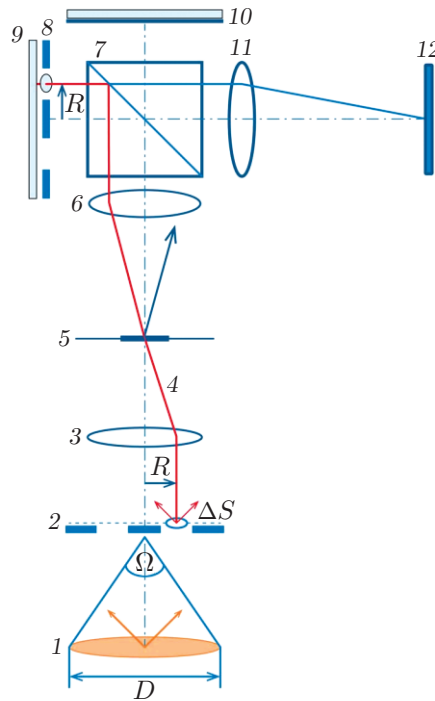


Рис. 4. Принципиальная оптическая схема записи гиперспектральных само-согласованных голограмм: D и Ω — линейный и угловой размеры источника освещения, ΔS — элемент светящейся площадки, R — радиус кольцевой маски

имеющее вид

$$G_{\text{int}}(\delta, x) = \sum_m W_m(\sigma_m) a(\sigma_m, x) \bar{a}_m^* e^{-2\pi i \sigma_m \delta} + \text{КС}, \quad (3)$$

где $W_m(\sigma_m) = \Omega R \lambda_m |E(\sigma_m)|^2$; КС — комплексно-сопряжённое; \bar{a}_m — комплексная амплитуда опорной волны, равная $\frac{1}{d^2} \int a(\sigma_m, x) dx = \text{const} = |\bar{a}_m| e^{i\varphi}$. Преобразование Фурье по переменной δ выражения (3) даёт комплексную амплитуду гиперспектрального объекта-транспаранта на спектральной частоте σ_m :

$$a(\sigma_m, x) = \frac{1}{\bar{a}_m^* d^2 W(\sigma_m)} \int G_{\text{int}}(\delta, x) e^{2\pi i \sigma_m \delta} d\delta.$$

При малых значениях R мощность незначительна, поэтому полезный сигнал слабый и может быть ниже уровня шума матрицы регистрации. Это является существенным обстоятельством, поскольку использование фильтрующей маски достаточно большого радиуса даёт возможность существенно увеличить световую энергию, содержащуюся в интерференционном слагаемом, и поднять, в частности, уровень полезного сигнала. Экспериментальные результаты, приведённые в работе [10], хорошо согласуются с теоретической моделью.

Регистрация гиперспектральных голограмм на интерферометре Линника.

Интерферометр Линника по оптической схеме представляет собой интерферометр Майкельсона, в обоих плечах которого установлены микрообъективы. Микрообъектив рабочего плеча сфокусирован на поверхность исследуемого отражающего объекта. В фокусе микрообъектива опорного плеча находится плоское зеркало. Интерферограмма, получаемая на

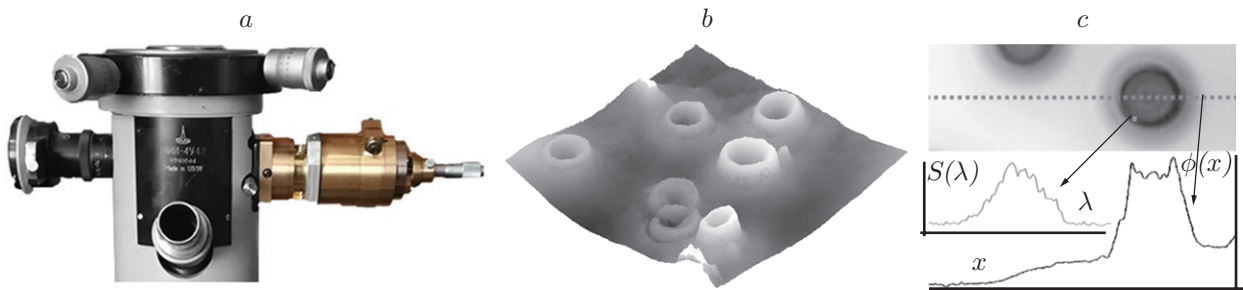


Рис. 5. Гиперспектральные голограммы микрообъектов, полученные на интерферометре Линника: *a* — модифицированный интерферометр (в опорное плечо установлен блок модуляции); *b* — гиперспектральный фазовый профиль эритроцитов; *c* — пространственный спектральный и фазовый анализ

выходе интерферометра, отображает профиль поверхности микрообъекта. Разность оптических длин плеч делают близкой к нулю, что позволяет использовать в интерферометре источник полихроматического излучения. Интерферометр Линника предназначен для профилометрии отражающих микрообъектов. Чтобы с помощью интерферометра Линника записывать гиперспектральные голограммы, в оптическую схему и конструкцию были внесены изменения: разработан оптоэлектронный блок фазовой модуляции опорной волны, установлен суперлюминисцентный светодиод. Изменение длины опорного плеча осуществляют с помощью прецизионного линейного перемещения блока, в состав которого входит микрообъектив, идентичный микрообъективу рабочего плеча, и зеркало, установленное в фокальной плоскости этого объектива. Перемещение модуля осуществляется моторизованным устройством трансляции с постоянной скоростью 5 мкм/с в пределах 100 мкм. Устройство трансляции выполнено на основе линейного магнитного двигателя voice coil. В ходе движения модуля каждый пиксель матрицы (2048×2560) регистрирует интерферограмму с частотой 200 кадров/с. Образец — сухой мазок крови — нанесён на зеркало. На рис. 5, *b* представлен гиперспектральный фазовый профиль эритроцитов, полученный в результате суммирования фазовых профилей набора спектральных компонент. Таким образом, модифицированный интерферометр Линника позволяет проводить как пространственно-спектральный анализ образцов, так и построить их фазовый профиль (рис. 5, *c*). Отметим, что в микроинтерферометре Линника за счёт освещения объектов на отражение луч дважды проходит образец, что приводит к удвоению набега фазы, т. е. к увеличению полезного сигнала [11].

Заключение. Показана возможность записи гиперспектральных голографических изображений в некогерентном свете с использованием схемы фурье-спектрометра с матричным приёмником. Поскольку в основе метода лежат принципы и техника фурье-спектроскопии, то он естественным образом наследует все сильные стороны этих принципов: беспрецедентно высокое отношение сигнала к шуму и, как следствие, высокое пространственно-спектральное разрешение голографического изображения по сравнению, например, с гиперспектральными голограммами, получаемыми с помощью перестраиваемого по частоте лазера.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 18-19-00450).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каленков С. Г., Каленков Г. С., Штанько А. Е. Фурье-спектрометр, как система голо-

- графического изображения микрообъектов в низкокогерентном свете // Измерительная техника. 2012. № 11. С. 21–25.
2. **Kalenkov S. G., Kalenkov G. S., Shtanko A. E.** Spectrally-spatial fourier-holography // Opt. Express. 2013. **21**, N 21. P. 24985–24990.
 3. **Каленков Г. С., Каленков С. Г., Штанько А. Е.** Гиперспектральная голографическая фурье-микроскопия // Квантовая электроника. 2015. **45**, № 4. С. 333–338.
 4. **Kalenkov S. G., Kalenkov G. S., Shtanko A. E.** Hyperspectral holography: an alternative application of the Fourier transform spectrometer // JOSA B. 2017. **34**, N 5. P. B49–B55.
 5. **Bell R. J.** Introductory Fourier Transform Spectroscopy. New York: Academic Press, 1972. 382 p.
 6. **Hillmann D., Luhrs C., Bonin T. et al.** Hologscopy holographic optical coherence tomography // Opt. Lett. 2011. **36**, N 13. P. 2390–2392.
 7. **Бобринев В. И., Галкин М. Л., Ковалев М. С. и др.** Исследование синтезированных голограмм Френеля для датчиков волнового фронта // Автометрия. 2018. **54**, № 1. С. 31–37. DOI: 10.15372/AUT20180105.
 8. **Kalenkov S. G., Kalenkov G. S., Shtanko A. E.** Hyperspectral digital holography of microobjects // Proc. SPIE. 2015. **9386**. 2085259. DOI: 10.1117/12.2085259.
 9. **Kalenkov S. G., Kalenkov G. S., Shtanko A. E.** Holographic Fourier transform spectroscopy of biosamples // Light, Energy and the Environment (OSA Technical Digest). 2016. FTu2E.7.
 10. **Kalenkov S. G., Kalenkov G. S., Shtanko A. E.** Self-reference hyperspectral holographic microscopy // JOSA A. 2019. **36**, N 2. P. A34–A38.
 11. **Kalenkov G. S., Kalenkov S. G., Meerovich I. G. et al.** Hyperspectral holographic microscopy of bio-objects based on a modified Linnik interferometer // Laser Phys. 2018. **29**, N 1. 016201. DOI: 10.1088/1555-6611/aaf228.

Поступила в редакцию 22.11.2019

После доработки 27.12.2019

Принята к публикации 10.01.2020