

УДК 535.8 + 004.93

## ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОЗЕРКАЛЬНОГО МОДУЛЯТОРА СВЕТА ДЛЯ ОПТИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ С ВРЕМЕННЫМ ИНТЕГРИРОВАНИЕМ

© Н. Н. Евтихийев, В. В. Краснов, Д. Ю. Молодцов, В. Г. Родин,  
Р. С. Стариков, П. А. Черёмхин

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
115409, Москва, Каширское шоссе, 31  
E-mail: holo\_mephi@mail.ru*

Рассмотрена возможность применения микрозеркального модулятора при реализации операции оптического кодирования с временным интегрированием в квазимонохроматическом пространственно-некогерентном свете. Представлена экспериментальная установка для оптической регистрации закодированных изображений на цифровую камеру. Проведено кодирование изображений, содержащих текстовую и графическую информацию; методом инверсной фильтрации осуществлено успешное декодирование зарегистрированных изображений. Применение временного интегрирования при оптическом кодировании позволило снизить шумы, возникающие из-за бинаризации выводимых на модулятор голограмм, которые содержат ключи кодирования, и повысить дифракционную эффективность процесса кодирования.

*Ключевые слова:* микрозеркальный модулятор, оптическое кодирование, некогерентное излучение, временное интегрирование.

DOI: 10.15372/AUT20200203

**Введение.** Быстродействующие оптические корреляторы уже давно утвердились в качестве устройств, перспективность и конкурентоспособность которых не вызывает сомнений, во многом благодаря возможности оперативного ввода информации с помощью пространственно-временных модуляторов света (ПВМС) [1, 2]. В основе функционирования корреляторов лежит принцип пространственной фильтрации, позволяющий среди вводимой информации выделять объекты с заданными характеристиками. Для реализации фильтров используются дифракционные оптические элементы (ДОЭ), такие как голограммы или киноформы с заранее синтезированными импульсными откликами [3, 4]. В большинстве реализованных систем применяется когерентное излучение, поэтому недостатками таких устройств, как правило, являются наличие спекл-шума, строгие требования к точности юстировки оптических элементов и другие. Эти недостатки устраняются при применении в оптических системах квазимонохроматического пространственно-некогерентного излучения [5, 6]. Такие системы с использованием ДОЭ успешно применяются не только в криптографических целях [7], но и для увеличения глубины резкости [8], устранения хроматических aberrаций [9], снижения массы и габаритов оптических систем [10] и т. д.

При построении систем оптического кодирования часто прибегают к принципу пространственной фильтрации [11]. Процесс кодирования в таких системах осуществляется при прохождении излучения от кодируемого объекта через дифракционный оптический элемент, в результате которого оптически реализуется операция свёртки кодируемого изображения с импульсным откликом объекта, являющегося кодирующим ключом системы. Достоинствами методов оптического кодирования с использованием ДОЭ являются высокое быстродействие и простота аппаратной реализации за счёт применения ПВМС

как управляемого компьютером динамического ДООЭ. В большинстве устройств для этого служат жидкокристаллические ПВМС [12]. Однако существенным недостатком таких ПВМС является наличие флуктуаций фазы [13, 14], причём не только для фазовых, но даже для амплитудных жидкокристаллических ПВМС. Несмотря на сообщения о разработке модуляторов на основе смектических жидких кристаллов [15] с быстродействием до 4 кГц, коммерчески доступные жидкокристаллические ПВМС имеют скорость отображения кадров порядка сотен герц при относительно низкой контрастности выводимых изображений.

В последние годы стремительно развиваются технологии создания микрозеркальных модуляторов [15, 16], их скорость значительно (на два-три порядка) превышает быстродействие жидкокристаллических ПВМС. В этих устройствах осуществляется амплитудная модуляция за счёт отражения светового потока от матрицы микрозеркал, поэтому излучение не подвергается паразитной фазовой модуляции. Благодаря этому микрозеркальные модуляторы успешно используются для оперативного ввода изображений в оптическую систему [16], с их помощью можно с высокой точностью формировать профили световых пучков [17], осуществлять генерацию изображений в инфракрасном диапазоне [18], они перспективны при разработке голографических 3D-дисплеев [19]. Микрозеркальные модуляторы также используются для записи и воспроизведения цифровых [20] и синтезированных [21–22] голограмм.

В работе [23] была реализована система оптического кодирования с временным интегрированием с применением жидкокристаллического ПВМС, при котором свёртка происходит за счёт временного интегрирования перемещающегося изображения кодируемого объекта на фотосенсоре по некоторой траектории, задаваемой ориентацией выводимых на модулятор дифракционных решёток. Так как дифракционная эффективность решёток выше, чем у голограмм с записанными на них изображениями кодирующих ключей, следовательно, излучение более эффективно будет использовано в процессе кодирования.

Таким образом, целью данной работы является создание быстродействующей системы оптического кодирования с временным интегрированием. Для оперативного формирования кодирующего отклика системы будет использован микрозеркальный модулятор света.

**Описание процесса оптического кодирования с временным интегрированием.** Математически процесс оптического кодирования с временным интегрированием изображения  $f$  можно записать в виде:

$$g(i, j) = \sum_{k=1}^i \sum_{l=1}^j f(k, l)h(i - k, j - l), \quad (1)$$

где  $g(i, j)$  — значение отсчёта кодированного изображения с координатами  $(i, j)$ ;  $h(i - k, j - l)$  — значение элемента матрицы траектории с координатами  $(i - k, j - l)$ , задаваемой при осуществлении процесса кодирования.

Кодированное изображение, как и в случае с кодированием при использовании ДООЭ, описывается свёрткой кодируемого изображения и кодирующей траектории, а значит, может быть восстановлено цифровыми методами инверсной фильтрации:

$$F(u, v) = G(u, v)Y(u, v), \quad (2)$$

где  $F(u, v)$  и  $G(u, v)$  — фурье-спектры функций  $f$  и  $g$ ;  $(u, v)$  — обозначения координат в фурье-плоскости;  $Y(u, v)$  — восстанавливающий инверсный фильтр. Поэлементное перемножение фурье-спектра кодированного изображения и восстанавливающего фильтра позволяет получить фурье-спектр исходного изображения.

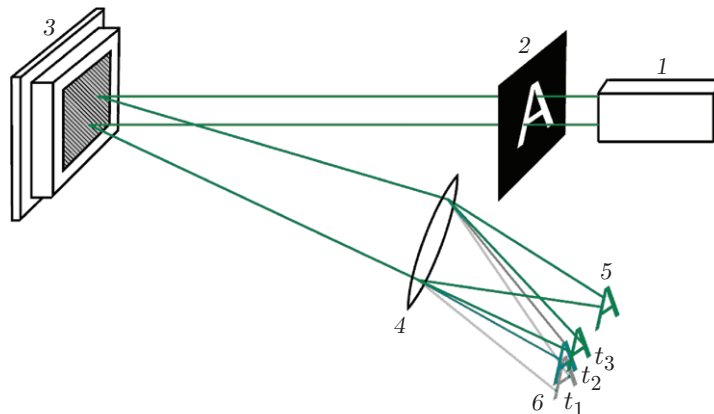


Рис. 1. Принципиальная схема устройства оптического кодирования с использованием микрозеркального модулятора при работе в режиме временного интегрирования

Для кодирования с временным интегрированием действуют те же ограничения на спектр кодирующей траектории, что и при кодировании в пространственно-некогерентном монохроматическом излучении с использованием ДОЭ, т. е. идеальным ключом кодирования (траекторией перемещения кодируемого изображения на фотосенсоре камеры) является ключ с постоянным по всем частотам распределением амплитуд фурье-спектра [24]. Также во избежание потерь информации при кодировании ключ не должен содержать в своём фурье-спектре нулевых и близких к нулю значений. К достоинству метода оптического кодирования с временным интегрированием можно отнести возможность оперативного изменения кодирующей траектории.

Для экспериментального оптического кодирования с временным интегрированием в пространственно-некогерентном свете подходит однолинзовая схема (рис. 1), подобные схемы были применены для корреляционного анализа изображений в пространственно-некогерентном корреляторе с реализацией фурье-голограмм с помощью микрозеркального модулятора [25]. Эта схема отличается от классической 4F-схемы, использованной при осуществлении оптического кодирования с временным интегрированием в [23], наличием только одного объектива, что позволяет реализовать процесс кодирования в более компактной экспериментальной установке.

Принципиальная схема такой оптической системы включает источник излучения 1, входной объект 2, микрозеркальный модулятор 3 и фурье-объектив 4. Отражённое излучение можно наблюдать в нулевом порядке дифракции 5; первый порядок дифракции 6 в разные моменты времени содержит в себе кодируемые изображения входного объекта, суммируемые с помощью регистрирующего устройства в течение времени экспозиции, за которое на фотосенсор нужно подать несколько изображений входного объекта, подвергшихся линейному переносу в разные моменты времени. Таким образом, модулятор играет роль меняющего свою ориентацию зеркала, которое перемещает изображение объекта в первом порядке дифракции (область 6 на рис. 1).

Зарегистрированное камерой закодированное изображение может быть восстановлено цифровыми методами. Задача восстановления изображений в общем случае является некорректной, а дефекты оптических систем и шумы фотосенсоров камеры могут значительно усложнить поиск восстанавливающего фильтра  $Y(u, v)$ .

При наличии шумов уравнение (1) в фурье-плоскости примет вид

$$G(u, v) = F(u, v)H(u, v) + N(u, v), \quad (3)$$

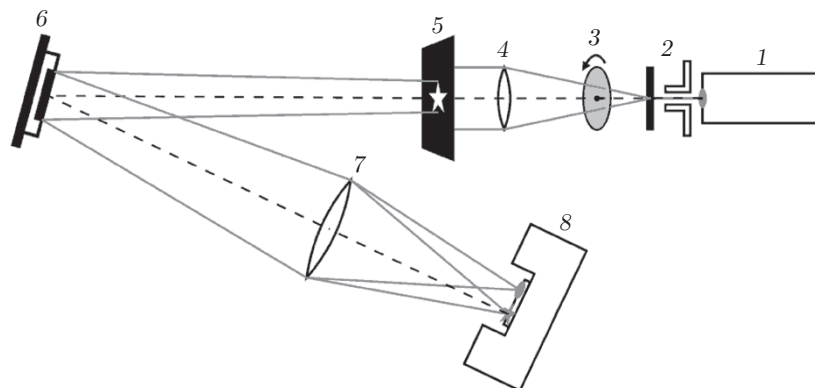


Рис. 2. Схема экспериментальной установки оптического кодирования в пространственно-некогерентном свете с временным интегрированием на основе микрозеркального модулятора

где  $G(u, v)$  и  $N(u, v)$  — фурье-спектры кодирующего ключа и шумовых искажений.

Решение таких обратных задач может быть достигнуто методами регуляризации, наиболее известный из них — метод регуляризации Тихонова [26], который показывает хорошие результаты, вычислительно эффективен и сравнительно прост в реализации. Версия инверсного фильтра, используемая в данной работе, описывается в частотной области как

$$Y(u, v, \alpha) = \frac{|H(u, v)|}{|H(u, v)|^2 + \alpha \max(|H(u, v)|^2)}, \quad (4)$$

где  $\alpha$  — параметр регуляризации, который связан со среднеквадратическим отношением сигнал/шум, определяемым экспериментально. Этот метод является действенным средством стабилизации некорректной задачи цифрового восстановления изображений, позволяющим подбирать параметр регуляризации в зависимости от условий решаемой задачи.

**Результаты экспериментов по оптическому кодированию изображений с временным интегрированием.** Схема экспериментальной установки показана на рис. 2. Свет от источника когерентного излучения 1 проходит через систему, состоящую из объектива с диафрагмой 2, вращающегося матового рассеивателя 3 и коллимирующего объектива 4. Таким образом формируется пространственно-некогерентное освещение транспаранта с изображением кодируемого объекта 5. На микрозеркальный модулятор 6 выводятся последовательно сменяющиеся дифракционные решётки, свет на каждой дифрагирует под определённым углом в зависимости от её периода и угла поворота. Модулятор при этом можно рассматривать как зеркало с двумя степенями свободы, но без каких-либо перемещающихся деталей. Объектив 7 формирует изображение кодируемого объекта на фотосенсоре камеры 8. В результате смены решёток на микрозеркальном модуляторе происходит перемещение изображения объекта на фотосенсоре камеры в процессе регистрации кадра. Кодированное изображение регистрировалось цифровой фотокамерой Canon EOS 400D, фотосенсор которой содержит 10,5 млн пикселей, размер пикселя  $5,7 \times 5,7$  мкм.

В данной работе были проведены эксперименты по кодированию изображений, для восстановления (декодирования) кодированных изображений применялась инверсная фильтрация. Для расчёта восстанавливающего фильтра использовался импульсный отклик, зарегистрированный камерой, реализованной с помощью ПВМС в той же оптической схеме (см. рис. 2) синтезированной на компьютере бинаризованной амплитудной фурье-голограммы, которая содержит изображение траектории перемещения объекта. Параметр

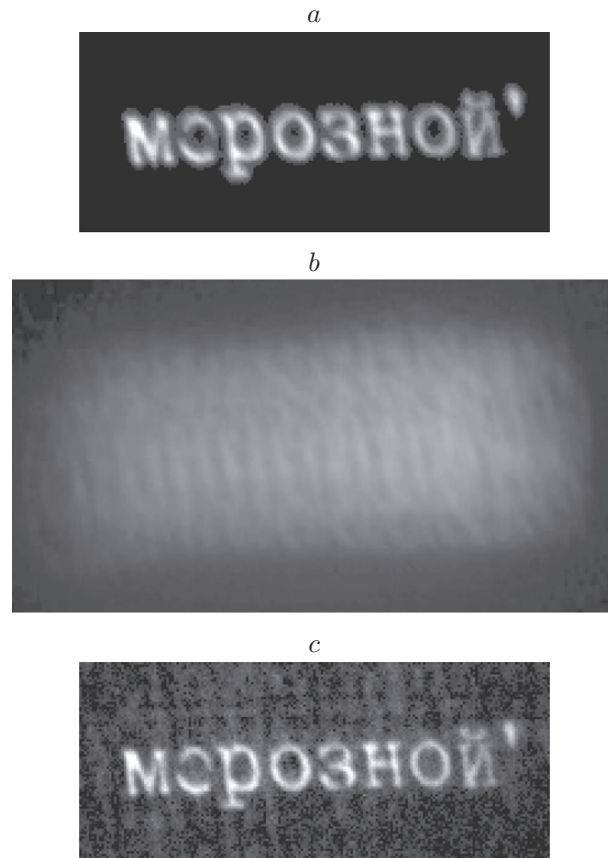


Рис. 3. Экспериментальные результаты кодирования текстовой информации: кодируемое (а), закодированное (b), декодированное (с) изображения

регуляризации фильтра  $\alpha$  варьировался в пределах от 1 до  $10^{-7}$ . Для количественной оценки качества восстановления вычислялись нормированные среднеквадратические отклонения восстановленного изображения от зарегистрированного камерой исходного изображения.

В качестве тестовых объектов при экспериментах использовались транспаранты, содержащие текстовую (рис. 3, а) и графическую (рис. 4, а) информацию. Закодированные изображения этих объектов, зарегистрированные цифровой фотокамерой, приведены на рис. 3, b и 4, b. Видно, что закодированные изображения содержат суперпозицию наложенных друг на друга входных изображений, сформированных дифракционными решётками, выводимыми на модулятор, при этом становится неразличимым общий характер зарегистрированного изображения.

Декодированное изображение текстовой информации представляет собой визуально различимый текст (рис. 3, с), декодированное изображение графической информации (рис. 4, с) имеет форму, схожую с формой входного изображения. Нормированные среднеквадратические отклонения декодированных изображений от исходного изображения находились в диапазоне 0,2–0,3, наилучший результат декодирования был достигнут при параметре регуляризации 0,004.

По сравнению с оптическим кодированием, осуществляемым при выводе на модулятор голограмм, содержащих ключи кодирования, применение временного интегрирования позволило снизить зашумлённость декодированных изображений, которая возникает из-за бинаризации выводимых на ПВМС голограмм и неидеальности отражающей поверхности

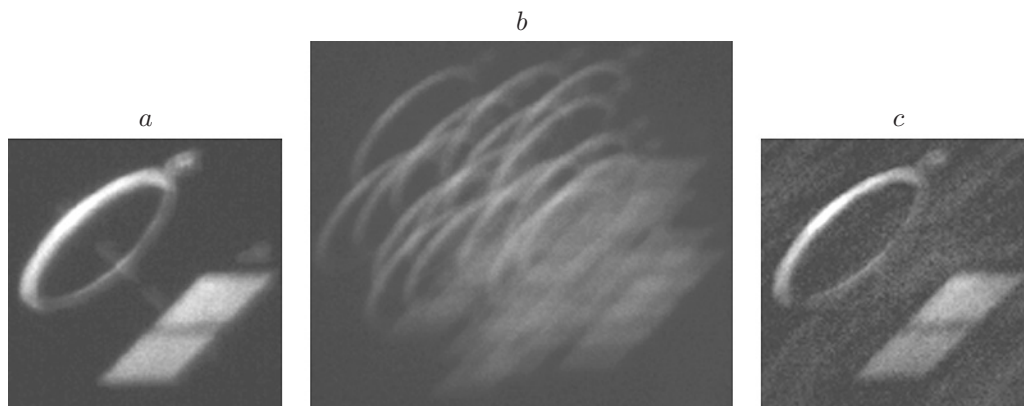


Рис. 4. Экспериментальные результаты кодирования графической информации: кодируемое (a), закодированное (b), декодированное изображения (c)

микрзеркальных модуляторов [27–28], почти в 2 раза (исходя из оценки нормированных среднеквадратических отклонений от исходных изображений).

Проведённые эксперименты подтверждают работоспособность реализованной схемы оптического кодирования с временным интегрированием на базе микрзеркального модулятора, позволившую как улучшить качество декодированных изображений, так и более эффективно использовать световое излучение в процессе кодирования.

**Заключение.** В представленной работе была реализована система оптического кодирования с временным интегрированием в квазимонохроматическом пространственно-некогерентном свете с применением микрзеркального ПВМС. Проведено кодирование снимков, содержащих текстовую и графическую информацию, при регистрации их перемещающихся по некоторой траектории изображений на фотосенсоре цифровой камеры. Осуществлено успешное декодирование методом инверсной фильтрации, нормированные среднеквадратические отклонения декодированных изображений от исходных изображений не превышают 0,3.

Полученные результаты подтверждают возможность использования микрзеркальных модуляторов в задачах оптического кодирования изображений с временным интегрированием. Учитывая тот факт, что микрзеркальные модуляторы осуществляют амплитудный вид модуляции, такое кодирование может быть проведено и в излучении, отражённом или испущенном непосредственно от объекта наблюдения, без необходимости преобразования его в монохроматическое.

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 19-19-00498).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Watanabe E., Kodate K.** Fast face-recognition optical parallel correlator using high accuracy correlation filter // Opt. Rev. 2005. **12**, N 6. P. 460–466.
2. **Chao T.-H., Lu T. T.** High-speed optical correlator with custom electronics interface design // Proc. SPIE. 2013. **8748**. 874803.
3. **Evtikhiev N. N., Starikov S. N., Shaulskiy D. V. et al.** Invariant correlation filter with linear phase coefficient holographic realization in 4-F correlator // Opt. Eng. 2011. **50**, N 6. 065803.
4. **Starikov S. N., Balan N. N., Rodin V. G. et al.** Pattern recognition correlator based on digital photo camera // Proc. SPIE. 2006. **6245**. 62450C.

5. **Potaturkin O. I.** Incoherent diffraction correlator with a holographic filter // *Appl. Opt.* 1979. **18**, N 24. P. 4203–4205.
6. **Краснов В. В., Стариков С. Н., Стариков Р. С., Черёмхин П. А.** Оптическое кодирование массивов двоичных чисел в пространственно-некогерентном свете // *Изв. вузов. Сер. Физика.* 2015. **58**, № 10. С. 29–36.
7. **Cheremkhin P. A., Krasnov V. V., Rodin V. G., Starikov R. S.** QR code optical encryption using spatially incoherent illumination // *Laser Phys. Lett.* 2017. **14**, N 2. 026202.
8. **Prasad S., Torgersen T. C., Pauca V. P. et al.** High-resolution imaging using integrated optical systems // *Intern. Journ. Imag. Syst. Technol.* 2004. **14**, N 2. P. 67–74.
9. **Wach H. B., Dowski E. R., Cathey W. T.** Control of chromatic focal shift through wave-front coding // *Appl. Opt.* 1998. **37**, N 23. P. 5359–5367.
10. **Kubala K., Dowski E., Cathey W. T.** Reducing complexity in computational imaging systems // *Opt. Express.* 2003. **11**, N 18. P. 2102–2108.
11. **Refregier P., Javidi B.** Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding // *Opt. Lett.* 1995. **20**, N 7. P. 767–769.
12. **Memmo P., Bianco V., Paturzo M., Ferraro P.** Numerical manipulation of digital holograms for 3-D imaging and display: an overview // *Proc. IEEE.* 2017. **105**, N 5. P. 892–905.
13. **Wu Y., Nie J., Shao L.** Method to measure the phase modulation characteristics of a liquid crystal spatial light modulator // *Appl. Opt.* 2016. **55**, N 31. P. 8676–8682.
14. **Bondareva A. P., Cheremkhin P. A., Evtikhiev N. N. et al.** Measurement of characteristics and phase modulation accuracy increase of LC SLM “holoEye PLUTO VIS” // *Journ. Phys.: Conf. Ser.* 2014. **536**, N 1. 012011.
15. **Компанец И. Н., Андреев А. Л.** Микродисплеи в системах пространственной модуляции света // *Квантовая электроника.* 2017. **47**, № 4. С. 294–302.
16. **Chao T.-H., Lu T. T., Walker B., Reyes G.** High-speed optical processing using digital micromirror device // *Proc. SPIE.* 2014. **9094**. 909402.
17. **Becker M. F., Liang J., Kohn R. N., Heinzen D. J.** High-precision laser beam shaping using binary-amplitude DLP spatial light modulators // *Proc. SPIE.* 2010. **7596**. 75960A.
18. **Гибин И. С., Козик В. И., Нежевенко Е. С.** Генерация изображений в инфракрасном диапазоне на основе микрозеркальных технологий // *Автометрия.* 2020. **56**, № 1. С. 3–12.
19. **Huebschman M. L., Munjuluri B., Garner H. R.** Dynamic holographic 3-D image projection // *Opt. Express.* 2003. **11**, N 5. P. 437–445.
20. **A-qian S., Ding-fu Z., Sheng Y. et al.** Optical scanning holography based on compressive sensing using a digital micro-mirror device // *Opt. Commun.* 2017. **385**. P. 19–24.
21. **Kreis T., Aswendt P., Höfling R.** Hologram reconstruction using a digital micromirror device // *Opt. Eng.* 2001. **40**, N 6. P. 926–933.
22. **Shaulskiy D. V., Evtikhiev N. N., Zlokazov E. Y. et al.** Variants of light modulation for MINACE filter implementation in 4-F correlators // *Proc. SPIE.* 2015. **9598**. 95980T.
23. **Evtikhiev N. N., Starikov S. N., Cheryomkhin P. A. et al.** Method of optical image coding by time integration // *Proc. SPIE.* 2012. **8429**. 84291P.
24. **Cheremkhin P. A., Evtikhiev N. N., Krasnov V. V. et al.** Generation of keys for image optical encryption in spatially incoherent light aimed at reduction of image decryption error // *Proc. SPIE.* 2014. **9131**. 913125.
25. **Molodtsov D. Yu., Rodin V. G.** Object recognition in non-coherent optical correlator based on DMD-modulator illumination // *Proc. SPIE.* 2017. **10176**. 101761A.
26. **Тихонов А. Н., Арсенин В. Я.** Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 285 с.

- 
27. **Molodtsov D. Yu., Cheremkhin P. A., Krasnov V. V., Rodin V. G.** Impact of DMD-SLMs errors on reconstructed Fourier holograms quality // Journ. Phys.: Conf. Ser. 2016. **737**, Iss. 1. 012074.
  28. **Евтихийев Н. Н., Краснов В. В., Кузьмин И. Д. и др.** Оптическое кодирование QR-кодов в схеме с пространственно-некогерентным освещением на базе двух микрзеркальных модуляторов света // Квантовая электроника. 2020. **50**, № 2. С. 195–196.

*Поступила в редакцию 22.11.2019*

*После доработки 17.12.2019*

*Принята к публикации 18.12.2019*

---