

Анализ влияния цвета объекта и спектрального состава его освещения на шумы ПЗС-матрицы видеокамеры системы технического зрения

В.А. Нурзай, Ю.М. Быковский, А.А. Халина

Севастопольский государственный университет

Аннотация: в работе рассмотрена оптическая безлазерная система экспресс анализа вибросостояния, включающая в себя специализированную подсветку и видеокамеру системы технического зрения, являющуюся датчиком перемещений. Решена задача определения степени взаимного влияния отражающих свойств поверхности и спектрального состава излучения источника освещения на уровень шумов ПЗС матрицы. С помощью дисперсионного анализа результатов натурального эксперимента определено, что спектральный состав подсветки – наиболее значащий фактор, выявлены лучшие сочетания параметров. Сравнение уровня шумов с реальным вибрационным сигналом показало решающую роль подбора сочетаний подсветки и типа отражающей поверхности.

Ключевые слова: шум ПЗС-матрицы, дисперсионный анализ, система технического зрения, контроль вибрации, оптическое измерение, отражающие свойства, спектральный состав, подсветка, вибрация.

Введение

В условиях производства, на реальных технологических площадках и в помещениях располагается различное оборудование, подверженное вибрации. Так как вибрационные процессы оказывают разрушительное действие на механизмы, опоры и другие конструкции, необходимым становится постоянный контроль вибросостояния оборудования. Существуют лазерные системы вибрационного контроля, обладающие высокими метрологическими характеристиками, однако их применение в условиях производства ограничено опасным воздействием лазерного излучения на органы зрения персонала. В данном плане интересны безлазерные оптические методы наблюдения за объектом, находящие все более широкое распространение [1]. Все безлазерные оптические методы измерения параметров вибрации предусматривают наличие оптической системы, специализированного освещения и видимых объектов вибрации. Большинство алгоритмов получения информации об измеряемом объекте из

видеоряда связаны со сравнением кадров по определенному методу, как например [2, 3]. Оценка погрешностей изображения находит широкое применение в науке, в частности в [4] рассматривается взаимное влияние шума в канале передачи и качества изображения. При этом технологические объекты на производстве обладают различными изменяющимися свойствами отражающей поверхности. Они могут быть окрашены матовой или глянцевой краской, иметь металлическую или шероховатую текстурированную поверхность. Оптические системы наблюдения за окрашенными в определенный цвет поверхностями применяется в неразрушающем контроле, например при определении адгезионных свойств лакокрасочных покрытий [5]. В то же время, искусственное освещение в помещениях может иметь различный спектральный состав излучения, взаимодействие которого с многоцветной гаммой контролируемых объектов тоже требует детального изучения. В рассматриваемом случае, сочетание цвета поверхности объекта и длины волны излучения источника, по разному воспринимаются ПЗС-матрицей цифровой видеокамеры, что ведет к изменению уровня шумов в измерительном канале. Эти факторы усложняют задачу получения объективной оптической информации о характере перемещений объекта.

Цель работы

Целью данной научной работы является определение степени взаимного влияния отражающих свойств поверхности и спектрального состава излучения источника освещения на уровень шумов ПЗС матрицы видеокамеры, используемой для фиксации процесса механической вибрации.

Суть эксперимента

Рассматривались различные материалы и цвета отражающих поверхностей, расположенных статично и одинаково в пространстве по отношению к источнику освещения и воспринимающей видеокамере.

Каждый отражающий объект по отдельности освещался серией разноцветных однотипных светодиодных источников, процесс фиксировался видеокамерой и полученные видеофрагменты обрабатывались по описанному ранее алгоритму [6] для оценки уровня шумов матрицы в различных сочетания исследуемых параметров.

Полученные уровни шумов сравнивались методом дисперсионного анализа [7], в результате чего сделан вывод о влиянии рассматриваемых параметров на уровень шумов видеосъемки и выделены лучшие сочетания параметров.

Анализ изменений отражающих свойств поверхности вибрирующего объекта

В масштабах производств и предприятий, поверхности, вибрацию которых необходимо контролировать, характеризуются относительным непостоянством оптических свойств. Это выражается в самопроизвольном, с течением времени, изменении отражающей способности, в результате воздействия неблагоприятных факторов (пыль, грязь), а также старении материалов (ржавчина, отслаивание краски). Возможны и резкие изменения свойств, вносимые человеком, как например: окрашивание поверхностей, удаление накопленных загрязнений. Таким образом, измерение параметров вибрации объекта методами видео регистрации сталкивается с проблемой идентификации текущего состояния его поверхности и адаптации к его изменениям.

Данную проблему следует рассматривать с позиции применимости оптических методов к нахождению конкретных параметров вибрации. Если, к примеру, речь идёт о частоте вибрации, то постепенное изменение отражающих свойств не приводит к существенным погрешностям до тех пор, пока практически полностью невозможно будет определить перемещение

поверхности, далее погрешность будет нарастать лавинообразно. Следует также учитывать, что изменение отражающих свойств вибрирующей поверхности несет в себе изменение погрешностей измерения вибрации лишь в случае, когда в область визирования не попадают грани, границы или отдельные элементы наблюдаемого объекта с явно выраженной текстурой. Если же эти элементы присутствуют, то вычисления будут опираться на перемещение контрастных границ объекта [6].

Если же речь идёт об измерении амплитуды вибрации, так же в отсутствии в пределах кадра контрастных элементов на вибрирующей поверхности, то даже минимальное изменение отражающих свойств может существенно влиять на результаты.

Следует рассмотреть некоторые типовые состояния отражающих поверхностей, которые могут быть представлены в условиях промышленного объекта:

- матовая отражающая поверхность (определенного цвета);
- глянцевая отражающая поверхность;
- поверхность с дефектами: выбоины, царапины расположенные хаотично, но имеющие контрастные очертания.

Для матовой гомогенной поверхности ее цвет, при определении параметров вибрации оптическим методом, имеет определяющее значение. Если цвет поверхности белый, то она способна отражать во всем цветовом диапазоне видимого спектра, что в свою очередь, при организации специализированного освещения даёт возможность диверсифицировать каналы измерения [8] и как следствие уменьшить время на автоматизированный поиск частоты [9], либо повысить надежность результатов измерения. Если же поверхность окрашена в другой цвет, то она способна отражать, лишь в узком цветовом спектре, что влечет за собой нарастание погрешности и определенные трудности в организации

измерений. Черный цвет, обладая минимальным коэффициентом отражения, является наихудшим в данном плане.

При проведении опытов выявлено, что если поверхность глянцевая, то при достаточно сильном освещении она отражает объекты окружающего пространства (в особенности источники освещения) подобно зеркалу, что делает влияние ее собственного цвета минимальным. Однако с уменьшением освещенности поверхности влияние цвета поверхности нарастает. При перемещении поверхности, отраженные в ней объекты будут геометрически смещаться или искажаться, следовательно, они могут служить опорными точками для измерений.

Если поверхность имеет хаотически расположенные контрастные элементы, то оптической системе легче произвести пассивную автофокусировку, что упрощает процесс измерения по сравнению с матовой гомогенной поверхностью [10]. Однако, если поверхность периодически подвергается механическим воздействиям, приводящим к изменению рельефа, то с течением времени из-за совокупности суммарных повреждений, отражающие свойства изменятся в больших пределах, что не может не повлиять на результат измерения.

Описание эксперимента

Для решения поставленной задачи была собрана экспериментальная установка, приведенная на рисунке 1.

Она включала в себя неподвижно закрепленный люксметр **1**, для измерения освещенности светоотражающей поверхности, находящейся на расстоянии 14 см. В качестве источников освещения применялись светодиодные сборки из девяти светодиодов (СИД) **3**, с регулируемым стабилизированным питанием.

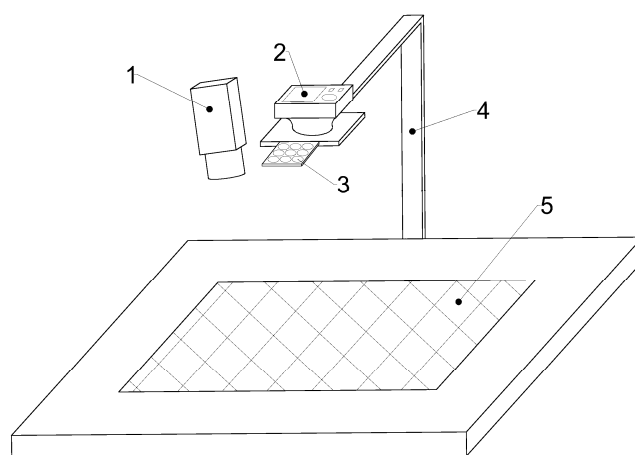


Рис. 1. – Схема экспериментальной установки

Воспринимающая отраженный свет камера **2** модели Nikon Coolpix L310 (параметры камеры указаны в таблице №1) была неподвижно закреплена на штативе **4**, ортогонально отражающей поверхности **5**.

Таблица № 1

Предустановки камеры Nikon Coolpix L310

Разрешение	1280*720 (0,92 Мп)
Скорость съемки	30 кадров/сек
ZOOM	нет
Подавление вибрации	Отключено
Улучшенное разрешение	Отключено
Режим автофокуса	Покадровый
Режим видео	PAL
Формат видео	*.MOV

Светодиодные сборки крепились под небольшим углом к нормали на одном уровне с объективом камеры, таким образом, чтобы поверхность была освещена строго по центру. В качестве светоотражающей поверхности применялись матовые листы цветной бумаги основных цветов радуги, также белый матовый лист и полированный металлический лист (см. таблицу 2).

В ходе эксперимента были записаны 36 видеофрагментов длительностью 9 секунд, т.е. 270 кадров. С помощью разработанного программного обеспечения из видеоряда обрабатывалась только равномерно

освещенная центральная область отражающей поверхности с границами в пикселях: $X_1=300$, $Y_1=50$, $X_2=1000$, $Y_2=600$, т.е. 0,385 Мп. С учётом статичности физического процесса, логично сделать вывод, что ненулевые значения интегральной межкадровой яркости возникают из-за шумов ПЗС матрицы камеры. И эти значения различаются в зависимости от сочетания вариантов света излучения и цвета отражающей поверхности. Дополнительный опыт также показал близкие к нулевым значения шумов матрицы при съёмке в абсолютной темноте.

Напряжение питания светодиодных панелей было выбрано различным, с целью добиться одинаковой освещённости поверхности.

Дисперсионный анализ опытных результатов

Полученные средние значения шумов, сведены в таблицу №2. Их единицы измерения представляют собой яркости пикселей в формате 24-bit BMP фактически можно сказать, что это биты яркости.

Имеем типичный двухфакторный комплекс параметров с повторностью опыта $m=1$ [7, с. 206-222.]. Под цветом излучения понимается спектральный состав света. Средняя величина показателей по каждому варианту фактора «цвет излучения» и «вид поверхности» (т.е. средняя величина показателей в j -том столбце или в i -той строке комбинационной таблицы) равна:

$$H_j = \frac{1}{b}(X_{1j} + X_{2j} + \dots + X_{bj}) ; L_i = \frac{1}{a}(X_{i1} + X_{i2} + \dots + X_{ia}) ;$$

где: a, b – количество столбцов и строк соответственно.

Общая средняя по всему комплексу равна:

$$M = \frac{1}{N} \sum X = \frac{1}{a \cdot b} \sum_i \sum_j X_{ij} = 42722 ;$$

Общее число показателей $N = a \cdot b = 36$.

Таблица №2

Комбинационная

Цвет Излучения Вид и цвет поверхности	Белый	Красный	Зеленый	Синий	Средние по строкам (L_i)
Белый матовый	37706,4	34707,4	18466,0	22668,1	28387,0
Красный матовый	57639,6	40024,4	37566,0	31181,8	41602,9
Оранжевый матовый	43684,9	34325,0	30874,2	32596,8	35370,2
Жёлтый матовый	33447,3	39466,5	20742,6	35116,6	32193,3
Зелёный матовый	47666,3	76911,4	32562,6	37406,3	48636,7
Синий матовый	56597,9	75490,7	34913,5	36979,0	50995,2
Фиолетовый матовый	61779,6	58535,0	42197,6	38664,4	50294,1
Чёрный матовый	59985,2	81205,4	39422,1	30858,3	52867,8
Полированный металл	22952,8	74441,6	28050,0	51160,0	44151,1
Средние по столбцам (H_j)	46828,9	57234,2	31643,8	35181,2	42722,0

Производим разложение общего варьирования на три слагаемых:

$$S = S_A + S_B + S_Z,$$

где:

$$S_A = b \sum_{j=1}^a (H_j - M)^2 = 3663517966$$

есть варьирование по вариантам фактора «цвет излучения», а

$$S_B = a \sum_{i=1}^b (L_i - M)^2 = 2549576427$$

варьирование по вариантам фактора «вид поверхности».

$$S_Z = S_{AB} = \sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^a (X_{ij} - L_i - H_j + M)^2 = 3137406262$$



Учтём, что, как и для любого двухфакторного комплекса, числа степеней свободы равны:

$$k_A = a - 1 = 3 ; k_B = b - 1 = 8 ; k_Z = (a - 1) \cdot (b - 1) = 24 ; k_A + k_B + k_Z = N - 1 = 35 .$$

Варьирование по комбинации факторов А и В принимаем за случайное с соответствующей дисперсией:

$$\sigma^2_Z = \frac{S_Z}{k_Z} = 130725261$$

Сравним дисперсии

$$\sigma^2_A = \frac{S_A}{k_A} = 1221172655 ; \sigma^2_B = \frac{S_B}{k_B} = 318697053 .$$

Показатели достоверности:

$$\Theta_A = \frac{\sigma^2_A}{\sigma^2_Z} = 9,34 ; \Theta_B = \frac{\sigma^2_B}{\sigma^2_Z} = 2,44 . \quad (1)$$

Данные показатели (1) сопоставим с таблицей значений пограничных показателей вероятности (таблица №3) [7, с. 206-222.].

Таблица №3

Пограничные показатели вероятности

Пограничная достоверность	0,95	0,99	0,999
k_A=3; k_Z=24	3,01	4,72	7,55
k_B=8; k_Z=24	2,36	3,36	4,99

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы: испытанные 4 варианта цвета излучения существенно различно влияют на шум воспринимающей ПЗС матрицы камеры, с вероятностью более 0,999 можно утверждать, что спектральный состав излучения является значащим фактором. Тем самым мы получили возможность выделить лучший вариант – зеленое освещение. Самым худшим с точки зрения шумов является красный свет. Такое распределение складывается в результате воздействия света на определенные участки RGB матрицы. Так, например, красный свет

излучения воздействует в основном на красные составляющие пикселей, совсем немного на зеленые и практически не оказывает влияния на синие. В то время, как зеленый свет излучения оказывает сильное воздействие и на синюю составляющую пикселей, и в меньшей степени на красную [8]. Следовательно, он более широко охватывает весь диапазон цветов, воспринимаемых ПЗС структурой, и вызывает меньше помех.

С вероятностью 95% можно утверждать, что значащим фактором является вид отражающей поверхности. Наименьшее среднее значение погрешностей показал белый матовый лист. На технологическом объекте его аналогом может служить любая оштукатуренная поверхность (потолок или стена помещения). Наибольшую среднюю погрешность проявил черный матовый лист, ввиду оговоренной выше, наименьшей отражательной способности. Этот факт делает применение чёрной матовой краски малопригодным для измерения параметров вибрации, при наблюдении камерой объектов без контрастных границ. Наибольший разброс величин погрешностей наблюдается у полированного металла, ввиду того, что он отражает падающий свет подобно зеркалу, значит, решающую роль играет угол падения освещения и попадание отраженного света в объектив камеры.

Также был проведен, аналогичный описанному в статье, эксперимент, но без учета уровня освещенности поверхности. При этом все светодиодные панели запитывались от одинакового напряжения, работая при номинальном протекающем токе в 20мА. По его результатам показатели достоверности составили: $\Theta_A = 8,69$; $\Theta_B = 1,25$.

Сравнение их со значениями в таблице 3, подтверждает значимость фактора цвета освещения.

Средний уровень абсолютных значений сигнала при регистрации колебаний диффузора динамика, работающего на частоте 8 Гц, составляет 72826 бит (по выборке из 150 кадров с той же областью в 0,385 Мп).

Диффузор имеет глянцевую чёрную отражающую поверхность и был освещён солнечным светом (Рис. 2).



Рис. 2. – Съемка диффузора динамика

Сравним средние значения шумов при различных спектральных составах освещения с вибрационным сигналом, созданным диффузором динамика (Таблица №4).

Таблица №4

Сравнение цветов излучения

Цвет излучения	Среднее значение погрешности, бит	Отношение погрешности к вибрационному сигналу, %
Белый	46828,9	64,3%
Красный	57234,2	78,6%
Зеленый	31643,8	43,5%
Синий	35181,2	48,3%
Зеленый свет белый матовый лист (лучшее сочетание)	18466,0	25,4%

Очевидно, что выбор длины волны освещения имеет решающее значение, влияющее на саму возможность проведения измерения.

В работе [11] на основе экспериментальных данных было выявлено, что кривая изменения освещённости, при изменении угла наклона излучателя

к поверхности, от красных светодиодов максимально близка к теоретической (Рис.3).

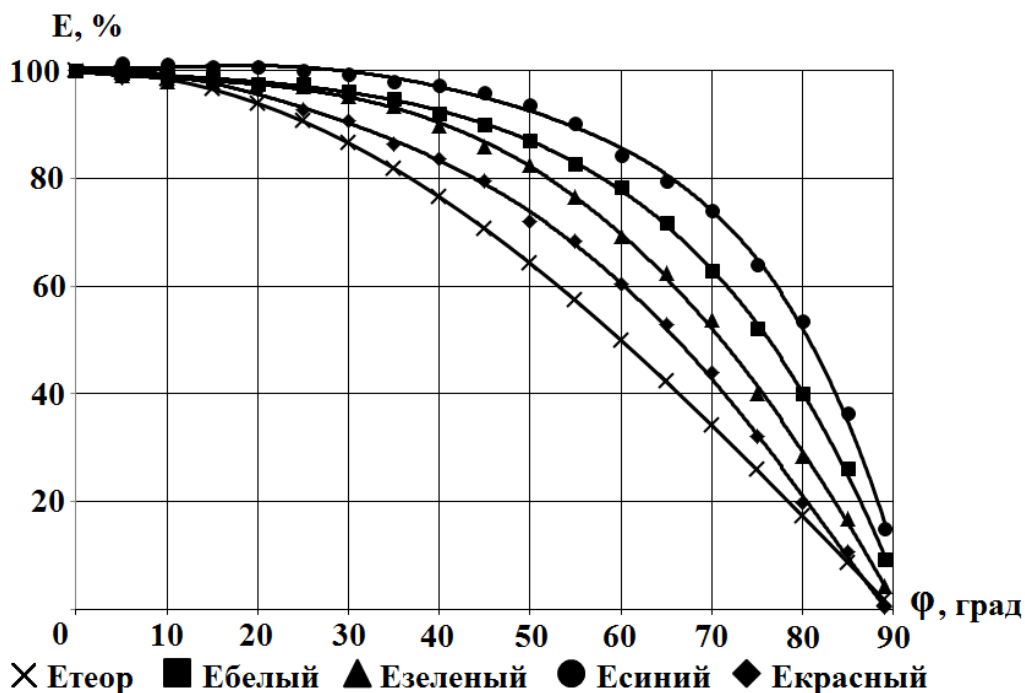


Рис. 3. – Зависимость освещённости поверхности от угла падения света для разных подсветок

Как видно из графиков, при освещении красным светом появляется возможность проводить измерения вибрации в широком диапазоне яркостей освещения, что является важным при организации специализированной подсветки. Однако в виду огромных значений погрешностей в данном спектре освещения, его применение нецелесообразно. Зелёная подсветка, вызывающая наименьшие значения погрешностей ПЗС-матрицы, также имеет удовлетворительные характеристики по отклику матрицы на изменение интенсивности освещения. Следовательно, применение зелёных светодиодов для подсветки предпочтительнее.

Данная работа выполнена в рамках и при финансовой поддержке РФФИ и города Севастополь (проект № 18-42-920002 p_a).

Литература

1. Скляренко М.С. Оценка точности методов трекинга для определения 2D-координат и скоростей механических систем по данным цифровой фотосъемки // Компьютерная оптика. 2015. Т. 39, №1. С. 125-135.
2. Fursov V.A., Gavrilov A.V., Goshin Ye.V., Pugachev K.G. Conforming identification of the fundamental matrix in the image matching problem // Computer Optics, 2017, Vol. 41(4), pp. 569-563.
3. Bulatov K.M., etc. Multi-spectral image processing for the measurement of a spatial temperature distribution on the surface of a laser-heated microscopic object // Computer Optics, 2017, Vol. 41(6), pp. 864-868.
4. Скороход С.В., Скороход Д.С., Оценка интенсивности зашумления в канале при передаче изображений в формате JPWL на основе экспериментальной модели // Инженерный вестник Дона, 2018, №4 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2018/5305/.
5. Антонова Н.М., Зиновьев И.А., Хаустова Е.Ю., Болдырев Ф.М., Лисниченко И.А. Определение адгезии путем цифровой обработки изображений поверхности покрытий // Инженерный вестник Дона, 2019, №1 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2019/5549/.
6. Быковский, Ю.М., Нурзай В.А. Обработка видеосигнала для измерения параметров вибрации объектов, расположенных на разных расстояниях от наблюдателя // Сборник научных трудов НУК им. Макарова. 2015. Вып.1. С. 58-62.
7. Длин А.М. Математическая статистика в технике. - М.: Советская наука, 1958. 466 с.
8. Петров Н.В. Восстановление волновых полей и анализ изображений при спектрально-широкополосной регистрации цифровых спекл-картин: дис. ... канд. физ-мат. наук: 01.04.05. СПб, 2011. 108 с.

9. Пронин С.П., Зрюмов Е. А., Юденков А. В. Патент на изобретение № 2395792 РФ. Способ измерения параметров вибрации объекта // Бюл. -2010. № 6.

10. Волков Ю., Капустина Н., Коротков В. Системы автоматической фокусировки // Советское фото, ISSN 0371-4284, 1986. № 11. С. 42.

11. Быковский Ю. М., Нурзай В.А., Халина А.А. Исследование реакции ПЗС-матрицы на изменение освещённости // Энергетические установки и технологии ISSN 2413-5526, 2017. Т.3. №4. С. 42-46. URL: sevsu.ru/images/nauka/pechat/2017/en-2017-4.pdf

References

1. Sklyarenko M.S. Komp'yuternaya optika. 2015. Vol. 39, №1. pp. 125-135.
2. Fursov V.A., Gavrilov A.V., Goshin Ye.V., Pugachev K.G. Computer Optics, 2017, Vol. 41(4), pp. 569-563.
3. Bulatov K.M., etc. Computer Optics, 2017, Vol. 41(6), pp. 864-868.
4. Skorohod S.V., Skorohod D.S. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2018, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2018/5305/.
5. Antonova N.M., Zinov'ev I.A., Haustova E.YU., Boldyrev F.M., Lisnichenko I.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2019, №1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2019/5549/.
6. Bykovskij, YU.M., Nurzaj V.A. Sbornik nauchnyh trudov NUK im. Makarova. 2015. Iss.1. P. 58-62.
7. Dlin A.M. Matematicheskaya statistika v tekhnike [Mathematical statistics in engineering]. Moscow: Sovetskaya nauka, 1958. 466 p.
8. Petrov N.V. Vosstanovlenie volnovykh polej i analiz izobrazhenij pri spektral'no-shirokopolosnoj registracii cifrovyyh spekl-kartin: dis. ... kand. fiz-mat. nauk: 01.04.05. [Restoration of wave fields and image analysis with spectral-wideband registration of digital speckle-pictures: dissertation of the candidate of physical and mathematical sciences: 01.04.05]. St. Petersburg, 2011. 108 p.



9. Pronin S.P., Zryumov E. A., YUdenkov A. V. Patent na izobretenie № 2395792 RF. Sposob izmereniya parametrov vibracii ob"ekta [Patent for invention №2395792RF. Method of measuring vibration parameters of an object]. Newsletter. 2010. № 6.

10. Volkov YU., Kapustina N., Korotkov V. Sovetskoe foto, ISSN 0371-4284, 1986. № 11. P. 42.

11. Bykovskij YU. M., Nurzaj V.A., Halina A.A. EHnergeticheskie ustanovki i tekhnologii ISSN 2413-5526, 2017. Vol.3. №4. pp. 42-46. URL: sevsu.ru/images/nauka/pechat/2017/en-2017-4.pdf.