

УДК 528.722

DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-3-82-95

РАЗРАБОТКА СТЕНДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ШТОРНО-ЩЕЛЕВЫХ ЗАТВОРОВ

Вячеслав Николаевич Никитин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. (913)712-37-50, e-mail: vslav.nikitin@gmail.com

Дмитрий Николаевич Раков

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, ассистент кафедры геоматики и инфраструктуры недвижимости, тел. (952)907-21-08, e-mail: rd.bpla@gmail.com

Андрей Владимирович Семенов

ООО Беспилотные технологии, 630008, Россия, г. Новосибирск, ул. Кирова, 29, офис 305, начальник отдела геодезии и аэрофотосъемки, тел. (983)136-42-31, e-mail: sav.bpla@gmail.com

Станислав Андреевич Арбузов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. (383)361-08-66, e-mail: s.a.arbuzov@sgugit.ru

Елена Павловна Хлебникова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. (383)361-08-66, e-mail: e.p.hlebnikova@sgugit.ru

В ходе выполнения аэрофотосъемочных работ возможно нарушение геометрии формируемых изображений (ортоскопии) из-за особенностей работы затворов фотоаппаратов. Особенно этому подвержены цифровые зеркальные и беззеркальные фотоаппараты, оснащенные шторно-щелевыми затворами. В процессе лабораторной калибровки камеры такие искажения выявить нельзя, так как они возникают только при перемещении объекта фотографирования и камеры относительно друг друга.

Целью данной работы является разработка нового метода определения параметров шторно-щелевых затворов, что позволит учитывать возникающие искажения ортоскопии в ходе обработки результатов измерений по материалам аэрофотосъемки.

Основой предлагаемого метода является специализированный измерительный стенд, состоящий из нескольких светодиодных лент, переключающихся по принципу бегущей волны. Фотографирование данного стенда позволяет определить эффективную и фактическую выдержку шторно-щелевого затвора, а также его КПД. Прототип стенда был разработан, собран и опробован на примере определения параметров затвора камеры Sony NEX-3.

Результаты эксперимента показали принципиальную работоспособность предлагаемого метода определения параметров шторно-щелевых затворов. Он относится к лабораторным методам, таким образом, является эффективным дополнением к традиционным лабораторным методам калибровки цифровых камер.

Ключевые слова: цифровая неметрическая камера, шторно-щелевой затвор, щель экспонирования, исследование затвора, фактическая выдержка, эффективная выдержка, измерительный стенд, ортоскопия изображения.

Введение

В последние годы в связи с бурным развитием цифровых технологий неуклонно видоизменяется и фотографическая техника [1]. Известно, что цифровые камеры общего назначения, называемые также неметрическими, способны в некоторых случаях заменить профессиональное аэрофотосъемочное оборудование при аэрофотосъемке с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [2–12], а также малой авиации (легкие самолеты, вертолеты, парашюты, мотодельтапланы) [13, 14].

При выборе неметрической камеры для аэрофотосъемки имеется ряд особенностей, которые необходимо учесть. Для аэрофотосъемки больше всего подходят камеры с центральным затвором, так как он обеспечивает равномерное перекрытие светового потока при экспонировании. Однако конструкция такого затвора достаточно сложна, а физические особенности его механизма не позволяют выставить короткие выдержки. Из-за перечисленных недостатков для любительской съемки применяют цифровые зеркальные и гибридные беззеркальные камеры, укомплектованные шторно-щелевыми затворами.

Устройство такого затвора сравнительно простое: он состоит из открывающей и закрывающей шторки, а экспонирование происходит через щель между ними. Управление выдержкой осуществляется изменением скорости шторок и расстояния между ними (рис. 1) [15].

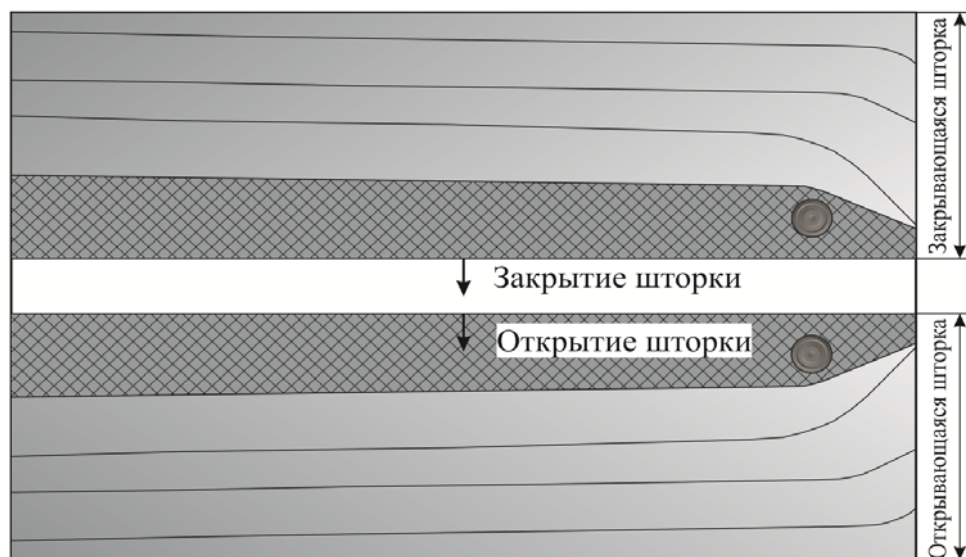


Рис. 1. Фазы работы шторно-щелевого затвора

Для учета систематических и случайных искажений геометрии формирования изображения необходимо иметь точную информацию о режиме работы шторно-щелевого затвора. В таких затворах определяют характеристики фаз открытия и закрытия, задержку срабатывания, стабильность характеристик.

При работе шторно-щелевого затвора возникают искажения, которые условно можно разделить на два вида: оптические и геометрические. Оптические искажения возникают вследствие неравномерности движения шторок [16]. Геометрические же искажения возникают по причине того, что экспонирование различных точек местности щелью происходит в разные моменты времени.

В зависимости от направления движения шторки относительно направления полета искажение, называемое нарушением ортоскопии изображения, может иметь различные виды. На рис. 2 схематично показаны искажения в изображении квадрата, зависящие от направления движения затвора v и направления полета W [17].

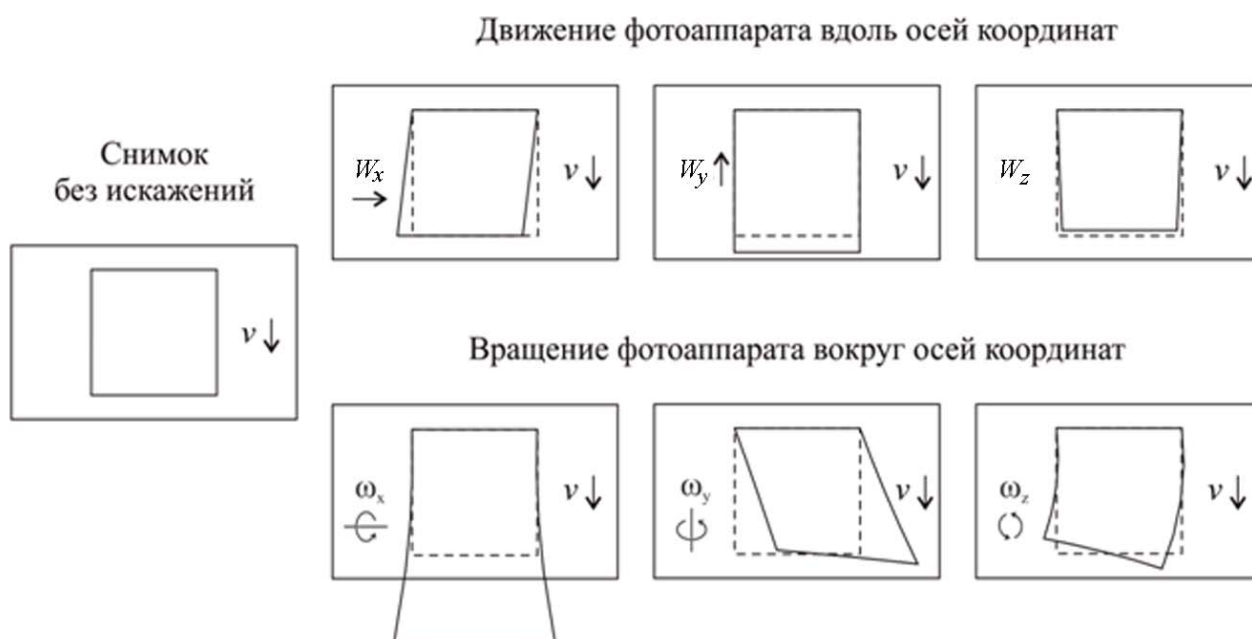


Рис. 2. Нарушения ортоскопии изображения фотоаппаратов со шторно-щелевым и ламельным затворами при собственном движении камеры

Для обеспечения минимальной нерезкости съемочную камеру целесообразно устанавливать таким образом, чтобы направление движения шторки было противоположно направлению полета [17].

При нарушении ортоскопии изображения смещение точек, вызванных поступательным движением летательного аппарата, на скорости 100 км/ч может достигать 5–6 мкм, что значительно снижает точность фотограмметрической обработки [14].

При выполнении крупномасштабной съемки линейное перемещение летательного аппарата способно вызвать систематические искажения геометрии формирования изображения, а вращательное движение – случайные.

Существует несколько методов исследования шторно-щелевых затворов с целью определения их параметров, разработанных с появлением таких затворов: оптико-механический, метод скоростного фотографирования, метод светометок, запись на осциллограф. При помощи этих методов возможно определение таких характеристик, как коэффициент полезного действия, диапазон изменения продолжительности экспонирования, стабильность характеристик, способность не нарушать ортоскопию изображения, надежность и износостойчивость [16].

Однако в 1950-е гг. в аэрофотосъемке произошел сравнительно быстрый переход к использованию центральных затворов [18], и приборы для определения характеристик шторно-щелевых затворов стали неактуальны. Возврат к использованию шторно-щелевых затворов в цифровой фотографической технике привел к необходимости воссоздания инструментальных средств для их исследования. Предлагаемый метод можно рассматривать как современный аналог метода скоростного фотографирования или метода светометок.

Метод определения характеристик шторно-щелевого затвора

Основой разработанного метода является измерительный стенд, состоящий из нескольких светодиодных лент, переключающихся по принципу бегущей волны (рис. 3). Необходимость использования светодиодных лент обуславливается их чрезвычайно малой инерционностью включения/выключения, многократно превосходящей скорость работы затвора фотоаппарата [19].

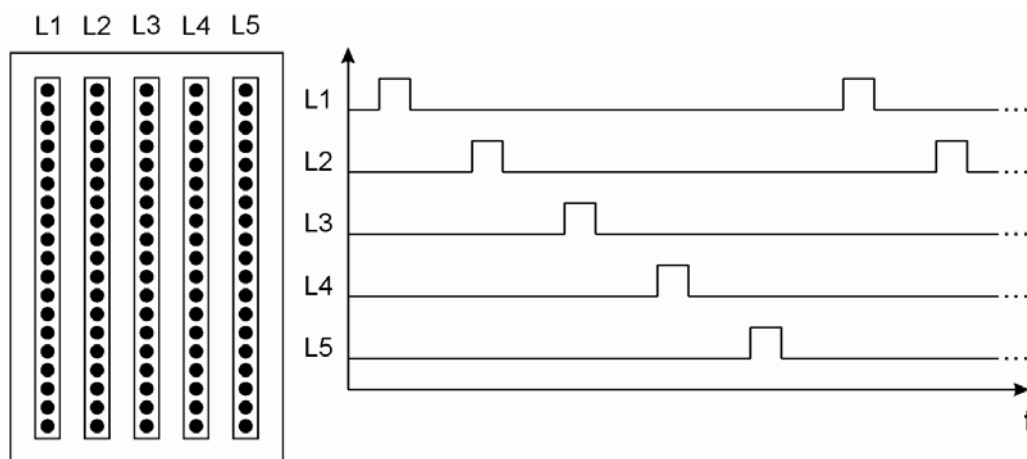


Рис. 3. Принцип работы измерительного стенда для исследования шторно-щелевых затворов

При фотографировании стенда необходимо обеспечить выполнение следующих условий:

1) оптическая ось объектива должна была перпендикулярна плоскости стенда;

2) светодиодные ленты должны располагаться вдоль вектора движения шторок и полностью перекрывать кадр от края до края.

Основным параметром работы стенда является τ – время между переключением светодиодных лент. Данный параметр должен находиться в диапазоне, рассчитанном по формуле

$$\begin{aligned} \tau_{\min} &= \frac{t_{\text{эф}}}{n}; \\ \tau_{\max} &= \frac{t_{\text{ф}}}{2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $t_{\text{ф}}$ – фактическая выдержка;

$t_{\text{эф}}$ – эффективная выдержка;

n – количество лент.

Из-за того, что фактическая выдержка значительно превышает эффективную выдержку, на снимке измерительного стенда будет изображена «волна» из горящих светодиодов.

Согласно формуле (1) увеличение количества лент расширяет диапазон допустимых значений τ , что позволит исследовать различные режимы работы шторно-щелевых затворов без перенастройки стенда.

Приближенное значение фактической выдержки $t_{\text{ф}}$ определяется умножением количества групп горящих светодиодов n на время переключения между ними τ :

$$t_{\text{ф}} \approx n \cdot \tau. \quad (2)$$

Для точного определения режима работы шторно-щелевого затвора необходимо выполнить анализ фронта переключения светодиодов непосредственно по зафиксированному изображению. Для этого на снимке проводятся линии, отделяющие фронт между горящими и негорящими светодиодами, как показано на рис. 4.

Угол наклона фронта переключения α будет зависеть от времени переключения между светодиодными лентами τ , расстояния между ними $l_{\text{лин}}$ и скоростью движения шторок v :

$$\text{tg } \alpha = \frac{\tau \cdot v}{l_{\text{лин}}}. \quad (3)$$

Продолжительность фазы открытия/закрытия шторки $t_{\text{шторки}}$ зависит от высоты снимка H и скорости движения открывающей/закрывающей шторки v :

$$t_{\text{шторки}} = \frac{H}{v} \quad (4)$$

или, выразив v из формулы (3), получим:

$$t_{\text{шторки}} = \frac{H \cdot \tau}{\text{tg } \alpha \cdot l_{\text{лин}}} \quad (5)$$

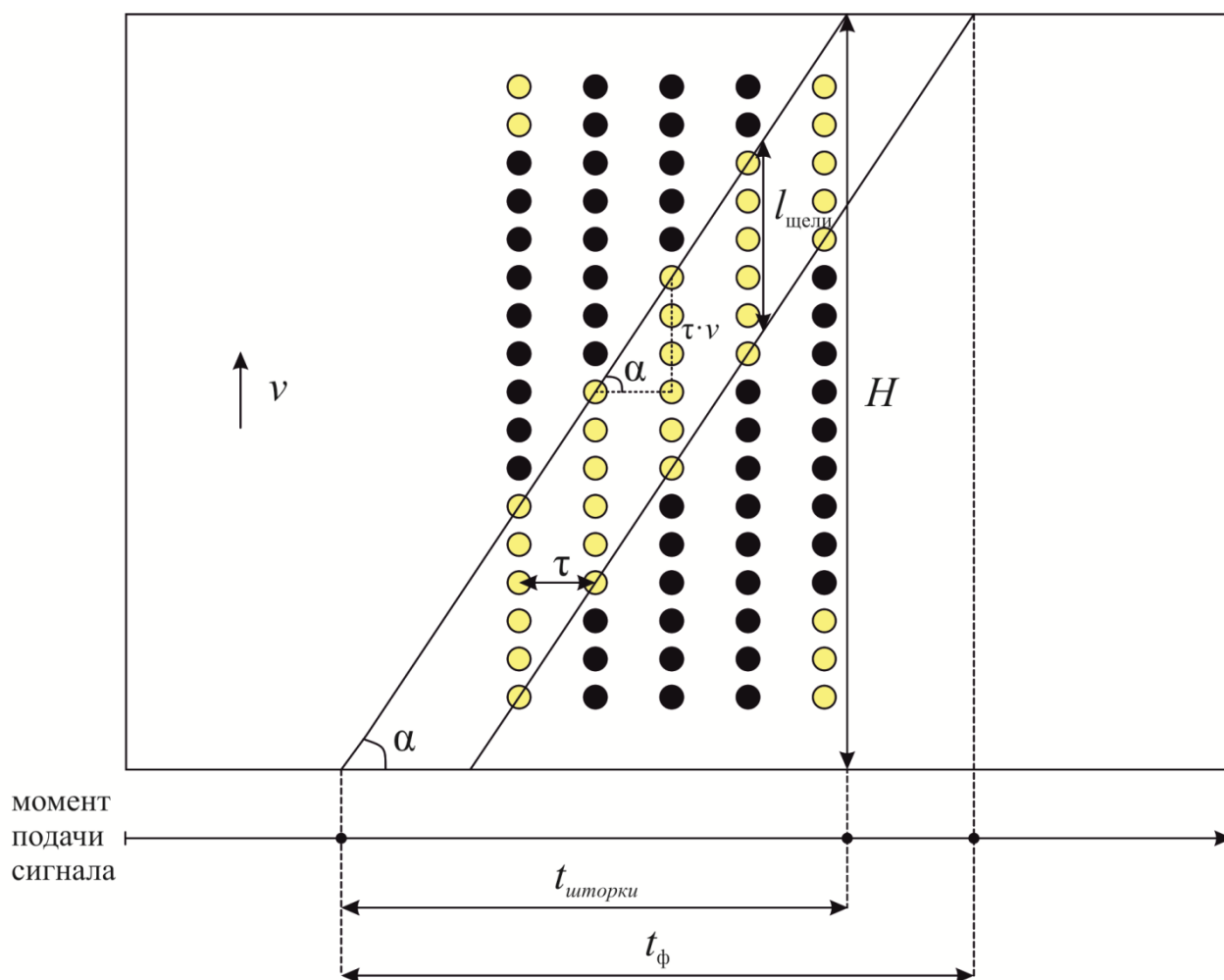


Рис. 4. Выделение фронтов между изображениями горящих и негорящих светодиодов

Эффективная выдержка $t_{\text{эф}}$ будет определяться задержкой между фазами работы открывающей и закрывающей шторок, или размером экспонирующей щели и скоростью движения шторок:

$$t_{\text{эф}} = \frac{l_{\text{щели}}}{v} \quad (6)$$

Подставляя значение ν из формулы (4), получим:

$$t_{\text{эф}} = \frac{l_{\text{щели}}}{H} \cdot t_{\text{шторки}}. \quad (7)$$

С учетом формулы (3)

$$t_{\text{эф}} = \frac{l_{\text{щели}}}{\text{tg } \alpha \cdot l_{\text{лин}}} \cdot \tau. \quad (8)$$

Фактическая выдержка $t_{\text{ф}}$ будет вычисляться как сумма продолжительности фазы открытия шторки $t_{\text{шторки}}$ и эффективной выдержки $t_{\text{эф}}$:

$$t_{\text{ф}} = t_{\text{шторки}} + t_{\text{эф}} = \frac{H + l_{\text{щели}}}{\text{tg } \alpha \cdot l_{\text{лин}}} \cdot \tau. \quad (9)$$

Экспериментальные работы

Исходя из описанных выше принципов был сконструирован измерительный стенд для исследования шторно-щелевых затворов (рис. 5).

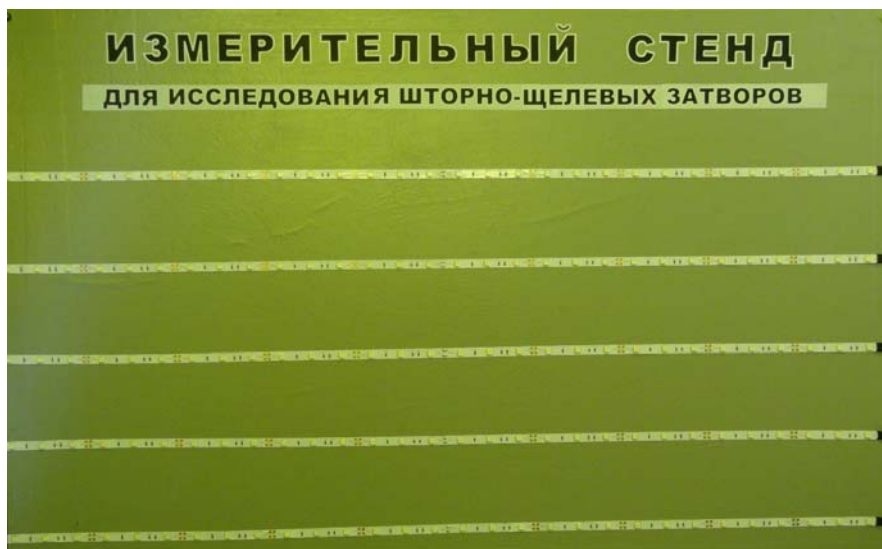


Рис. 5. Измерительный стенд для исследования шторно-щелевых затворов

Принципиальная схема реализации стенда показана на рис. 6. В качестве управляющего ядра используется микроконтроллер PIC12F675 от компании Microchip. Программа контроллера задает частоту переключения и время свечения светодиодных линеек L1–L5. Транзисторы VT1–VT5 работают в режиме

ключа и осуществляют усиление сигнала, подаваемого с выводов микроконтроллера. Время переключения между светодиодными линейками 500 мкс, а время горения каждой линейки 50 мкс. В схеме предусмотрена кнопка SA1 для изменения режимов переключения светодиодных линеек.

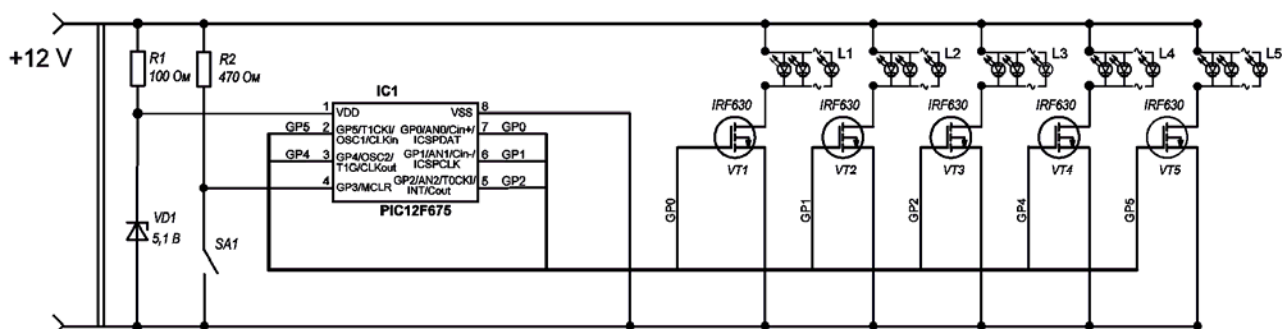


Рис. 6. Принципиальная схема стенда

При съемке включенного стенда на снимках будет наблюдаться эффект «волна» из горящих светодиодов (рис. 7). В зависимости от варьирования выдержки количество горящих светодиодов на изображении светодиодных лент изменяется.

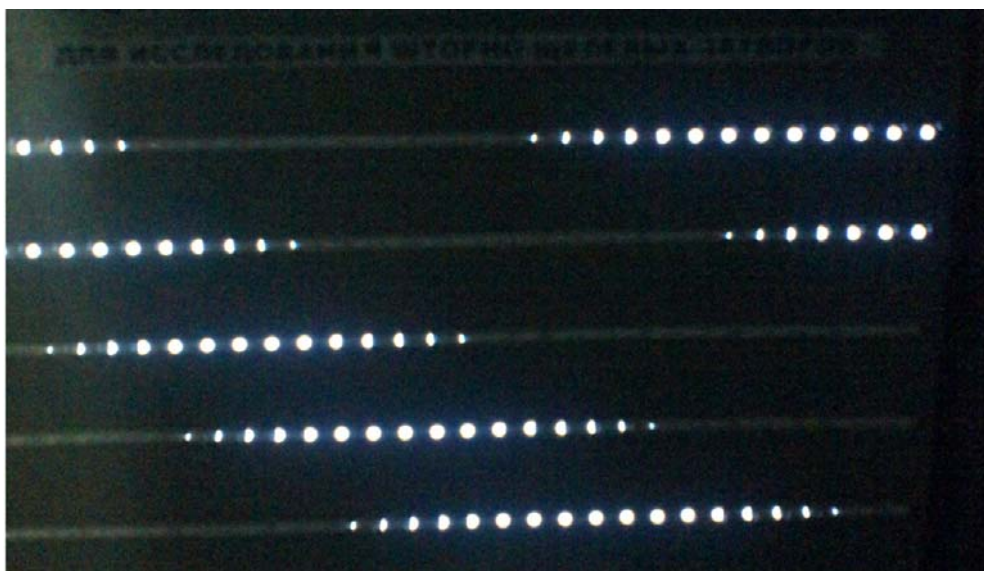


Рис. 7. Изображение работающего стенда

Работа шторно-щелевого затвора может быть представлена в виде графика фаз открытия и закрытия шторок (рис. 8).

Расстояние по вертикали между кривыми графика соответствует размеру экспонирующей щели, а по горизонтали – эффективной выдержке.

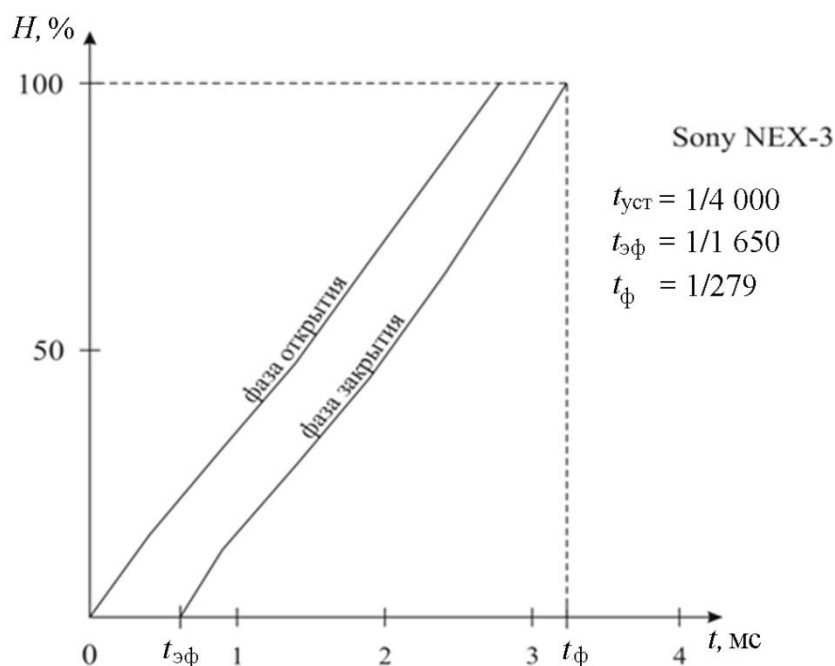


Рис. 8. График фаз открытия и закрытия шторок фотоаппарата Sony NEX-3

В процессе тестирования разработанного стенда были определены характеристики работы шторно-щелевого затвора цифровой фотокамеры Sony NEX-3 (таблица). Математическая обработка результатов измерений осуществлялась при помощи программы MS Excel.

Характеристики шторно-щелевого затвора камеры Sony NEX-3

Выдержки, секунд			КПД, %
установленная	эффективная	фактическая	
1 : 1 000	1 : 750	1 : 224	30
1 : 2 000	1 : 1 200	1 : 272	23
1 : 4 000	1 : 1 650	1 : 279	17

Во время проведения экспериментов было замечено, что часть горящих светодиодов имеет усеченную форму. Предположительно это связано с частичным экранированием светового потока шторками. В связи с тем, что данный вопрос не изучен в полном объеме, расчеты эффективной выдержки были проведены без учета плавного нарастания и убывания освещенности светочувствительной матрицы на краях шторок.

При построении графика линии, отделяющие фронты горящих и негорящих светодиодов, оказались несколько искривленными. По нашему мнению, это объясняется тем, что скорость движения шторок неравномерна и нарастает по мере их перемещения.

Полученные значения эффективной выдержки позволяют использовать данный фотоаппарат для выполнения аэрофотосъемки только при одновременном учете линейных и угловых перемещений фотоаппарата в момент фотографирования.

Заключение

Проблемы, связанные с нарушением геометрии формирования изображения, актуализировались в связи с распространением беспилотных аэрофотосъемочных систем, оснащенных цифровыми фотоаппаратами, обеспечивающими получение снимков с высоким фотографическим качеством, но разработанными без учета специфики проведения аэрофотосъемочных работ.

Основным способом борьбы с данным явлением стало использование моделей дисторсии цифровых камер, включающих элементы для учета взаимного смещения объекта съемки и цифровой камеры. Параметры таких моделей определяются в процессе самокалибровки, поскольку зависят от воздушной скорости летательного аппарата, направления и силы ветра. Вращательное движение камер в таких моделях не учитывается.

Предложенный метод определения параметров шторно-щелевого затвора позволяет построить математически строгую модель формирования фотографического изображения и, следовательно, выполнять уравнивание материалов аэрофотосъемки, опираясь на результаты лабораторных исследований и сертификации цифровых камер.

Работоспособность данного метода подтверждена наличием функционирующего измерительного стенда и комплексом проведенных исследований по определению характеристик шторно-щелевого затвора камеры Sony NEX-3.

В качестве направления дальнейших исследований можно обозначить задачу определения задержки срабатывания затвора от момента поступления соответствующей команды. Также интерес представляет временная диаграмма сигнала о срабатывании затвора (при наличии) с привязкой к фазам его работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Милчев М. М. Цифровые фотоаппараты. – СПб. : Питер, 2004. – 249 с.
2. Геодезическое обеспечение археологических работ с применением БПЛА и методов стереофотограмметрии / А. Л. Быков, А. С. Костюк, В. Л. Быков, Л. В. Быков, Л. В. Татаурова, П. В. Орлов, П. М. Погарский // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 1. – С. 41–45.
3. Бабаев С. Н. Технология мониторинга открытых горных работ с применением беспилотного летательного аппарата // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 3. – С. 151–154.

4. Петров М. В. Практический опыт использования БПЛА SWINGLET производства компании SENSEFLY (Швейцария) // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 1. – С. 152–157.

5. Применение малых беспилотных летательных аппаратов для съемки местности и подготовки геоинформационного контента в чрезвычайных ситуациях / В. К. Барбасов, П. Р. Руднев, П. Ю. Орлов, А. В. Гречищев // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 2 – С. 158–163.

6. Шрайнер К. А., Макаров И. В. Использование возможностей беспилотных летательных аппаратов для дистанционного зондирования на примере открытых горных работ // Вестник СГГА. – 2012. – Вып. 2 (18). – С. 47–50.

7. Эпов М. И., Злыгостев И. Н. Применение беспилотных летательных аппаратов в аэрогеофизической разведке // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 2. – С. 22–27.

8. Костюк А. С., Быков А. Л., Быков Л. В. Методика калибровки и предварительной обработки снимков, полученных трехкамерной фотографической системой с беспилотного летательного аппарата // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 1. – С. 28–31.

9. Деришев Д. С., Деришев С. Г. Беспилотные авиационные комплексы для геофизических исследований и мониторинга земной поверхности // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 4, ч. 1. – С. 46–50.

10. Костюк А. С. Расчет параметров и оценка качества аэрофотосъемки с БПЛА [Текст] // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 4, ч. 1. – С. 83–87.

11. Оценка точности 3D-моделей, построенных с использованием беспилотных авиационных систем / Е. И. Аврунев, Х. К. Ямбаев, О. А. Оприцова, А. В. Чернов, Д. В. Гоголев // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 3. – С. 211–228.

12. Хлебникова Т. А., Оприцова О. А. Экспериментальные исследования точности построения плотной цифровой модели по материалам беспилотной авиационной системы // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 22, № 2. – С. 119–129.

13. Никитин В. Н., Семенцов А. В. Опыт построения ортофотоплана по данным крупномасштабной аэрофотосъемки, выполненной с использованием неметрической цифровой камеры // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 1. – С. 12–18.

14. Михайлов А. П., Монтель Андраде Э. Р., Мануэль Де Хесус П. В. О применении цифровых фотокамер со шторно-щелевым затвором для выполнения аэрофотосъемки с легкомоторных и беспилотных летательных аппаратов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 4. – С. 30–32.

15. Аржанов Е. П., Ильин В. Б. Аэрофотосъемочное оборудование. – М. : Недра, 1972. – 184 с.

16. Лаврова Н. П., Стеценко А. Ф. Аэрофотосъемка. Аэрофотосъемочное оборудование : учебник для вузов. – М. : Недра, 1981. – 296 с.
17. Кучко А. С. Аэрофотография (Основы и метрология). – М. : Недра, 1974. – 272 с.
18. Антипов И. Т. Развитие фотограмметрии в России // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. научн. конгр. : Пленарное заседание : сб. материалов (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. – С. 97–132.
19. Раков Д. Н., Никитин В. Н., Шевчук С. О. Определение задержки срабатывания затворов фотоаппаратов в аэрофотосъемочных комплексах // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 1. – С. 61–66.

Получено 05.06.2019

© В. Н. Никитин, Д. Н. Раков, А. В. Семенцов,
С. А. Арбузов, Е. П. Хлебникова, 2019

DEVELOPMENT OF A TEST BENCH FOR DETERMINATION OF CHARACTERISTICS OF A CURTAIN SHUTTER

Vyacheslav N. Nikitin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Photogrammetry and Remote Sensing, phone: (913)712-37-50, e-mail: vslav.nikitin@gmail.com

Dmitry N. Rakov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Assistant, Department of Geomatics, Property and Infrastructure, phone: (952)907-21-08, e-mail: rd.bpla@gmail.com

Andrey V. Sementsov

Unmanned Technologies, 29, Kirova St., Novosibirsk, 630008, Russia, office 305, Head of Geodesy and Aerial Survey Department, phone: (983)136-42-31, e-mail: sav.bpla@gmail.com

Stanislav A. Arbuzov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Photogrammetry and Remote Sensing, phone: (383)361-08-66, e-mail: s.a.arbuzov@sgugit.ru

Elena P. Khlebnikova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Photogrammetry and Remote Sensing, phone: (383)361-08-66, e-mail: e.p.khlebnikova@sgugit.ru

The geometry of image of aerial photo survey in most of cases has deviations from the orthoscopy that cause camera shutter properties. This problem is especially common for digital mirrorless and SLR photocameras equipped with focal plane curtain shutter. The image distortions caused by shutter effects appear in motion only (when object and camera relatively move around each other) and cannot be found during laboratory calibration.

The goal of the article is to show the new method of focal plane curtain shutter parameters determination developed by the authors. The parameters accounting can further provide the orthoscopy deviations corrections for aerial survey images processing.

The main feature of the method being developed is the specialized measuring test bench which consists of several led strips according to the “flowing wave” principle. The shooting of the test bench allows determining the effective and total exposure time of the focal plane shutter and also its coefficient of efficiency. The test bench prototype was projected, made and proven with the Sony NEX-3 shutter parameters determination.

The experiment’s results showed the proposed method efficiency for focal plane curtain shutters parameters determination. The method can be applied in laboratory conditions in addition to traditional laboratory digital camera calibration methods.

Key words: digital nonmetric camera, curtain shutter, exposure gap, studding of shutter, total exposure time, effective exposure time, measuring test bench, orthoscopy of image.

REFERENCES

1. Milchev, M. M. (2004). *Tsifrovye fotoapparaty [Digital photocaleras]*. SPb: Piter Publ., 249 p. [in Russian].
2. Bykov, A. L., Kostyuk, A. S., Bykov, V. L., Bykov, L. V., Tataurova, L. V., Orlov, P. V., & Pogarskij, P. M. (2014). Geodetic maintenance of archeological works using UAVs and stereometric techniques. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2014: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1 Distancionnye metody zondirovaniya Zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchej sredy, geoekologiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2014: International Scientific Conference: Vol. 1. Earth Remote Sensing and Photogrammetry, Environmental Monitoring, Geo-ecology]* (pp. 41–45). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
3. Babaev, S. N. (2013). Technology of monitoring of open mining operations with the use of unmanned aerial vehicle. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2013: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 3. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, markshejderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2013: International Scientific Conference: Vol. 3. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 151–154). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
4. Petrov, M. V. (2013). Practical experience of using UAV SWINGLET by SENSEFLY company (Swiss). In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2013: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, markshejderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2013: International Scientific Conference: Vol. 1. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 152–157). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
5. Barbasov, V. K., Rudnev, P. R., Orlov, P. Yu., & Grechishchev, A. V. (2013). Unmanned aerial vehicles using for surveying geoinformational content in emergency situations. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2013: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 2. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, markshejderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2013: International Scientific Conference: Vol. 2. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 158–163). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
6. Shrainer, K. A., & Makarov, I. V. (2012) Using the capabilities of unmanned aerial vehicles for remote sensing on the example of open mining. *Vestnik SGGa [Vestnik SSGA]*, 2(18), 47–50 [in Russian].
7. Epov, M. I. (2012). Application of unmanned aerial vehicles in airborne geophysical exploration. In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2012: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 2 Distancionnye metody zondirovaniya Zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchej sredy, geoekologiya [Proceedings of GEO-Siberia-2012: International Scientific Conference: Vol. 2. Earth Remote Sensing and Photogrammetry, Environmental Monitoring, Geoecology]* (pp. 22–27). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].

8. Kostyuk, A. S., Bykov, A. L., & Bykov, L. V. (2012). Methods of calibration and pre-processing of images obtained by a three-camera photographic system with an unmanned aerial vehicle. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2012: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1 Distancionnye metody zondirovaniya Zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchej sredy, geoekologiya* [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2012: International Scientific Conference: Vol. 1. Earth Remote Sensing and Photogrammetry, Environmental Monitoring, Geoecology] (pp. 28–31). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
9. Derishev, D. S., & Derishev, S. G. (2010). Unmanned aircraft systems for geophysical research and monitoring of the earth's surface. In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2010: T. 4, ch. 1* [Proceedings of GEO-Siberia-2010: Vol. 4. Part I] (pp. 28–31). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
10. Kostyuk, A. S. (2010). Calculation of parameters and assessment of the quality of aerial photography with UAVs. In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2010: T. 4, ch. 1* [Proceedings of GEO-Siberia-2010: Vol. 4. Part I] (pp. 83–87). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
11. Avrunev, E. I., Yambaev, H. K., Opritova, O. A., Chernov, A. V., & Gogolev, D. V. (2018). Assessment of the accuracy of 3D models built using unmanned aircraft systems. *Vestnik SGUGiT* [Vestnik SSUGT], 23(2), 211–228 [in Russian].
12. Khlebnikova, T. A., & Opritova, O. A. (2018) Experimental studies of the accuracy of the construction of a dense digital model based on the materials of an unmanned aircraft system. *Vestnik SGUGiT* [Vestnik SSUGT], 23(2), 119–129 [in Russian].
13. Nikitin, V. N., & Sementsov, A. V. (2013). Experience of orthophotoplan construction based on large-scale aerial photography data, performed using a non-metric digital camera. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2013: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1 Distancionnye metody zondirovaniya Zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchej sredy, geoekologiya* [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2013: International Scientific Conference: Vol. 1. Earth Remote Sensing and Photogrammetry, Environmental Monitoring, Geo-ecology] (pp. 12–18). Novosibirsk: SUGGT Publ. [in Russian].
14. Mikhailov, A. P., Montel Andrade, E. R., & Manuel de Jesus, P. V. (2013). Application of digital cameras with the storm slit shutter for performance of aerial photography from light-engine and unmanned aerial vehicles. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka* [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography], 4, 30–32 [in Russian].
15. Arjanov, E. P., & Il'in, V. B. (1972). *Aerofotos"emochnoe oborudovanie* [Aerial survey equipment]. Moscow: Nedra Publ., 184 p. [in Russian].
16. Lavrova, N. P., & Stecenko, A. F. (1981). *Aerofotos"emka. Aerofotos"emochnoe oborudovanie* [Aerial photography. Aerial survey equipment]. Moscow: Nedra Publ., 296 p. [in Russian].
17. Kuchko, A. S. (1974). *Aerofotografiya (Osnovy i metrologiya)* [Aerial photography (Basics and Metrology)]. Moscow: Nedra Publ., 272 p. [in Russian].
18. Antipov, I. T. (2010). Development of photogrammetry in Russia. In *Sbornik materialov Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa GEO-Sibir'-2010: Plenarnoe zasedanie* [Proceedings of GEO-Siberia-2010: Plenary Meeting] (pp. 97–132). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
19. Rakov, D. N., Nikitin, V. N., & Shevchuk S. O. (2014). Definition of delay of actuation of a camera shutter in aerial survey complexes. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2014: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1 Distancionnye metody zondirovaniya Zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchej sredy, geoekologiya* [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2014: International Scientific Conference: Vol. 1. Earth Remote Sensing and Photogrammetry, Environmental Monitoring, Geoecology] (pp. 61–66). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].

Received 05.06.2019

© V. N. Nikitin, D. N. Rakov, A. V. Sementsov,
S. A. Arbuzov, E. P. Khlebnikova, 2019