

УДК: 575.317; 681.7.066.6

DOI: 10.53816/23061456_2023_5-6_47

**ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ НОРМАТИВНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ,
ОПРЕДЕЛЯЮЩЕЙ ТРЕБОВАНИЯ К ПРОЗРАЧНОЙ БРОНЕ**

**PROBLEMS OF DEVELOPMENT OF NORMATIVE DOCUMENTATION
DEFINING REQUIREMENTS FOR TRANSPARENT ARMOR**

*Д-р техн. наук С.В. Солк¹, канд. техн. наук Ю.Ю. Меркулов²,
канд. техн. наук Н.М. Сильников²*

D.Sc. S.V. Solk, Ph.D. Yu.Yu. Merkulov, Ph.D. N.M. Silnikov

¹АО «НИИ ОЭП», ²АО «НПО Спецматериалов»

Рассмотрены области применения прозрачной брони. Показано, что необходимость защищать оптико-электронные приборы, работающие в различных спектральных диапазонах, при помощи защитных иллюминаторов, вызвала изменения требований к оптическим характеристикам. Приведены результаты экспериментов, доказывающие, что оптические свойства оптико-электронных приборов могут значительно ухудшиться, даже если пробития иллюминатора нет. Показано, что оптические свойства прозрачной брони изменяются под действием ультрафиолетового излучения и воздействия внешних климатических факторов. Даны предложения по разработке нормативной документации.

Ключевые слова: прозрачная броня, оптические характеристики, оптико-электронные приборы, нормативные документы, спектральное пропускание, качество изображения.

The areas of application of transparent armor are considered. It is shown that the demand for protection of optoelectronic devices operating in various spectral ranges with protective windows caused a change in the requirements for optical characteristics. Experimental results are presented proving that the optical properties of the optoelectronic devices can significantly deteriorate, even if the window is not punched. At the same time, the punching of the protective element does not always result in significant degradation in the image quality. It is shown that the optical properties of transparent armor change under the exposure to ultraviolet radiation and the influence of external climatic factors. Proposals for preparation of normative documentation for transparent armor are given.

Keywords: transparent armor, optical characteristics, optoelectronic devices, normative documents, spectral transmission, image quality.

В настоящее время все более широкое применение получает прозрачная противоосколочная и противопульная броня. Она широко используется в местах выдачи денег и пунктов обмена валюты, рабочих местах кассиров банков, внутренних постах охраны, ювелирных

магазинах, тирах, рабочих местах сотрудников дежурных частей [1]. Также она применяется при изготовлении забрал для защитных шлемов и смотровых окон бронещитов, защиты кабин самолетов и вертолетов, автомобилей VIP-класса и бронетехники [2, 3].

Все указанные области применения прозрачной брони объединяет одно — броня должна обеспечивать комфортную работу человека. Требования к ней определяются оптическими характеристиками глаза как оптического прибора. Основные характеристики глаза — это рабочий спектральный диапазон и разрешающая способность. У разных людей они могут значительно различаться, но, как правило, чувствительность глаза лежит в диапазоне длин волн от 0,38 до 0,76 мкм, а его разрешающая способность в среднем составляет от 1 до 2 угловых минут. Также следует учитывать, что при этом задачами являются наблюдение, обнаружение, распознавание, но не проведение измерений. Поэтому производители и исследователи прозрачной брони к ее механическим характеристикам относят плотность, предел прочности на разрыв и на сжатие, а к оптическим — светопропускание и оптические искажения [4], не конкретизируя условия их измерения.

В последнее время возникла необходимость в защите не только людей, но и оптико-электронных приборов (ОЭП) от пуль и осколков при помощи защитных иллюминаторов [5]. Так как ОЭП работают не только в видимом, но и в ближнем, среднем и дальнем инфракрасном (ИК) диапазонах, то защитные иллюминаторы должны обеспечивать требуемые оптические характеристики в данных рабочих спектральных диапазонах.

В качестве материалов для изготовления прозрачной брони наиболее широко используются неорганические стекла и прозрачные полимеры (органические стекла). Более высокими защитными свойствами обладают прозрачные керамические материалы: лейкосапфир (монокристаллический оксид алюминия Al_2O_3), поликристаллический оксинитрид алюминия $Al_{23}O_{27}N_5$ (ALON), магнийалюминиевая шпинель $MgAl_2O_4$ [2]. Причем эти материалы прозрачны в широком спектральном диапазоне, охватывая область от ближнего ультрафиолета до среднего инфракрасного диапазона. Однако их существенным недостатком является высокая стоимость.

Прозрачная броня должна обладать максимальным пропусканием в рабочем спектральном диапазоне, не вызывать дополнительных искажений получаемых изображений и обеспечивать требуемый уровень защиты от высокоскоростных поражающих элементов.

В зависимости от прочности стекло может подразделяться на несколько групп. По мере роста защищенности можно выделить следующие группы: антивандальные, бронестекла, препятствующие взлому, и стекла, обеспечивающие защиту от пуль стрелкового оружия. Антивандальные стекла относятся к международной классификации А1–А3. Стекла такого типа называются триплексом и применяются для изготовления лобового остекления автомобилей. В типовой конструкции предусматривается прозрачная пленка на полимерной основе, и при ударах антивандальное стекло разбивается, но осколки не разлетаются и держатся на пленке. Взломоустойчивые стекла в отличие от антивандальных способны выдерживать многократные механические воздействия (удары кувалдой, таран автомобилем). Применяются в качестве витрин в банковских учреждениях, а также ювелирных магазинах и аптеках. Пулестойкие (или пуленепробиваемые) стекла по устойчивости к попаданиям пуль различных масс и калибров делятся на шесть классов от Бр1 до Бр6 [6]. Изделия из пулестойкого стекла также защищают от поражения пулями и осколками противоосколочной пленкой на полимерной основе. Бронестекла применяются при защите пунктов обмена валюты и выдачи денежных средств, рабочих мест операторов, имеющих наличные денежные средства, автомобилей служб инкассации или для перевозки высокопоставленных лиц, а также пропускных постов в учреждениях МВД, ФСБ и т.п.

Однако стоит отметить, что в случае попадания в иллюминатор пули или осколка пробития может и не быть, но возникшие сколы, каверны и трещины в иллюминаторе приведут к недопустимым ухудшениям оптических характеристик.

На рис. 1 показана тестовая таблица, полученная с помощью матричного фотоприемного устройства (ФПУ) и объектива с защитным иллюминатором в видимом спектральном диапазоне. На рис. 2 та же таблица, но после попадания в иллюминатор двух метательных снарядов массой 5 г, имитирующих осколки. На рис. 3 показан результат дополнительного воздействия имитаторов осколков в количестве 20 штук массой порядка 0,5 г. Во всех случаях пробоя защитного иллюминатора не было, но качество изображения в случае, изображенном на рис. 3, следует признать неприемлемым.

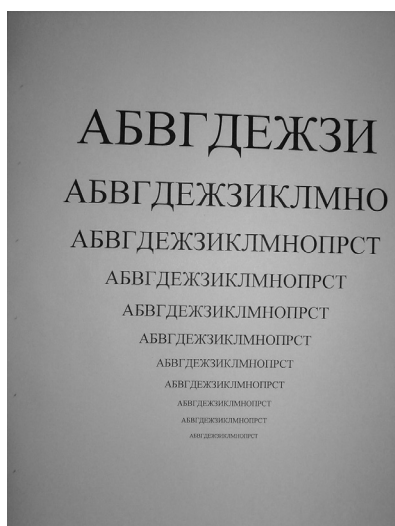


Рис. 1. Изображение тестовой таблицы без воздействия имитаторов осколков

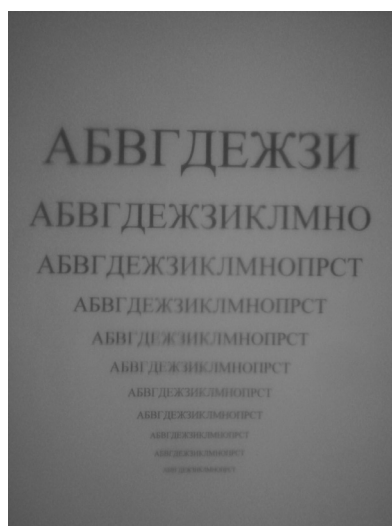


Рис. 2. Изображение тестовой таблицы после попадания в иллюминатор двух метательных снарядов массой 5 г

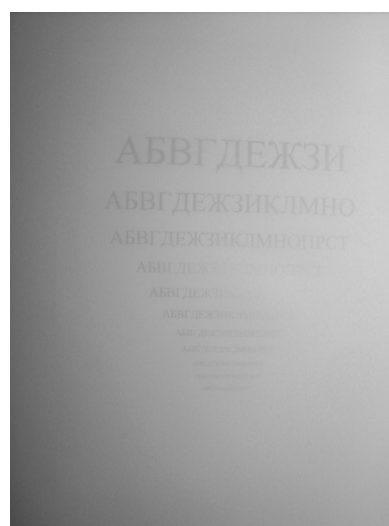


Рис. 3. Изображение тестовой таблицы при дополнительном воздействии имитаторов осколков в количестве 20 штук массой порядка 0,5 г

В таком случае иллюминатор должен быть «отброшен» при помощи специального устройства, а ОЭП получить «вторую жизнь». В работе [5] рассмотрена возможность использования нескольких последовательно отбрасываемых иллюминаторов.

Дополнительные иллюминаторы неизбежно увеличат массу ОЭП и ухудшат пропускание и качество изображения. Поэтому в ряде случаев для ОЭП целесообразно предусматривать «оперативное бронирование» [5]. Под оперативным бронированием понимается установка на ОЭП защитных устройств только в период непосредственной опасности его повреждения или уничтожения. Для этого необходимо предусмотреть возможность их быстрой установки без нарушения юстировки всей системы.

Проведенные эксперименты показали, что возможна и другая ситуация. На рис. 4 показаны два светофильтра из полимерного материала, подвергшиеся воздействию имитаторов осколков. В одном случае произошло пробитие фильтра и незначительное повреждение первой линзы объектива, каверна диаметром порядка 0,1 мм и глубиной 30–40 мкм, установленного за светофильтром. При этом ухудшение качества изображения оказалось незначительным. Во втором случае пробития не было и объектив не был поврежден. Но образовалась трещина, и фильтр

разломился на две части, которые оказались смещены друг относительно друга. При этом качество изображения заметно ухудшилось.

Известные методики контроля оптических характеристик прозрачной брони рассчитаны на ее использование для визуального наблюдения, но не для ОЭП. В то же время в оптической промышленности накоплен большой опыт контроля, как отдельных оптических элементов, так и оптических систем в целом. Оптотехнические лаборатории предприятий и научно-исследовательских институтов, как правило, располагают необходимыми методиками, оборудованием и специалистами. В то же время измерение ряда парамет-

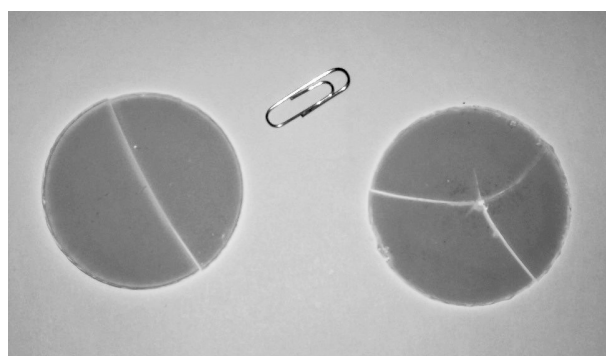


Рис. 4. Поврежденные имитаторами осколков фильтры. Слева — без пробития справа — с пробитием

тров, особенно в ИК-диапазоне, может вызвать серьезные затруднения, например измерение интегрального коэффициента рассеяния излучения.

Не все лаборатории располагают интерферометрами, работающими в ближнем, среднем и дальнем ИК-диапазонах. Поэтому, на наш взгляд, при контроле прозрачной брони необходимо контролировать лишь следующие параметры:

1. Спектральный коэффициент пропускания излучения в рабочем спектральном диапазоне, который определяется спектральной чувствительностью (ФПУ). В ряде случаев может допускаться контроль интегрального коэффициента;

2. Параметры, характеризующие искажение волнового фронта излучения, прошедшего через защитный иллюминатор в рабочем спектральном диапазоне. Это может быть разрешающая способность, концентрация энергии в пятне рассеяния, функция рассеяния линии или точки, среднеквадратичная деформация волнового фронта или другие параметры [7, 8].

В работе [9] рассмотрена установка и методика оценки деформации волнового фронта с использованием зеркального коллиматора, что позволяет проводить измерения в широком спектральном диапазоне, используя несложную аппаратуру.

Следует отметить, что с течением времени оптические параметры броневых стекол меняются. Так, в работе [10] на испытуемых образцах броневых стекол класса защиты 3ХЛ было выявлено снижение пропускания в спектральном диапазоне от 300 до 1000 нм образцов, находящихся

в эксплуатации (или хранении) длительное время, а в работах [11] и [12] более детальные измерения на специальных установках с применением источников лазерного излучения и приемника излучения высокой чувствительности выявили селективный характер изменения спектрального коэффициента пропускания в диапазонах от 405 до 450 нм и от 750 до 808 нм, а также в ближнем ИК-диапазоне от 808 до 980 нм. Наиболее заметные изменения в пропускании наблюдаются в «фиолетовой» области спектра, что связано с естественным старением полимерных составов [13, 14], склеивающих между собой стеклянные пластины, и противоосколочной пленки, зачастую наносимой на лицевую сторону прозрачной брони. В работе [15] рассмотрено влияние коротковолнового ультрафиолетового (УФ) излучения (УФ-излучения) на изменение спектрального коэффициента пропускания броневых стекол класса защиты 3ХЛ. Постепенное облучение вызвало разрушение слабых химических связей в составе полимеров, тем самым спровоцировав значительное ухудшение пропускания в «фиолетовой» области спектра. Все вышперечисленные изменения в пропускании броневых стекол, вызванные теми или иными внешними и внутренними факторами, напрямую связаны с ухудшением их баллистических свойств.

ОЭП, как правило, работают в сложных климатических условиях. Это большой рабочий температурный диапазон, температурные перепады, воздействие влажной и, зачастую, соляной

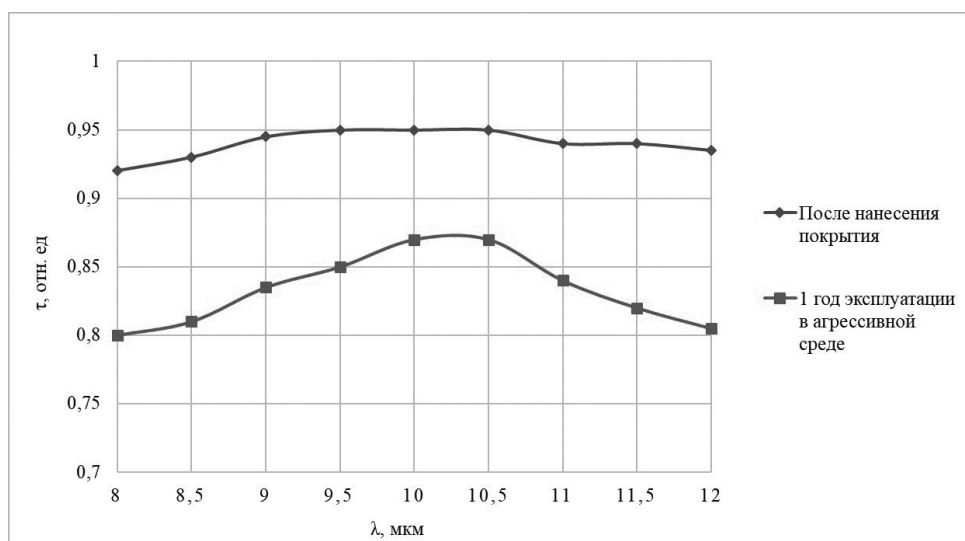


Рис. 5. График спектрального пропускания иллюминатора из просветленного монокристаллического германия

среды, динамическое воздействие пыли. В тех же самых условиях соответственно работают и защитные иллюминаторы из броневых стекол. Практика показала, что наиболее слабым местом оптических элементов являются вакуумные покрытия, в частности просветляющие [16]. В ряде случаев разработчики вообще отказываются от нанесения просветляющих покрытий на иллюминаторы, работающие в видимом спектральном диапазоне. К сожалению, для ИК-иллюминаторов это невозможно, если они изготавливаются из материалов с высокими показателями преломления, что вызывает необходимость их просветления из-за высоких потерь на отражение (Френелевские потери).

В качестве примера воздействия внешней окружающей среды на ухудшение пропускания на рис. 5 приведен график спектрального пропускания иллюминатора из просветленного монокристаллического германия.

Выводы

1. В настоящее время назрела потребность в доработке имеющихся нормативных документов, определяющих требования к прозрачной броне. Такая необходимость связана с возникшей необходимостью в защите ОЭП, работающих в различных (видимом, ближнем, среднем и дальнем ИК) спектральных диапазонах и строящих изображения с высоким разрешением.

2. Требования к оптическим параметрам броневых стекол должны быть минимально достаточными, а их контроль простым и не требовать сложного и уникального оборудования.

Литература

1. Филатова А.О., Бородай В.В., Сильников Н.М., Борисов Д.В. Физические свойства и сравнительные характеристики прозрачной брони // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2018. № 9–10 (123–124). С. 162–167.

2. Кобылкин И.Ф., Селиванов В.В. Материалы и структуры легкой бронезащиты / Учебник для вузов. — М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 161 с.

3. Васильева С.Н., Гук И.В., Сильников Н.М., Юрченко Н.М. Полиметилметакрилат как мате-

риал для светопрозрачных бронеконструкций // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2021. № 9–10 (159–160). С. 155–166.

4. Ивановский В.С., Макаренко Н.Г., Яковлев Ю.С. Прозрачная броня в изделиях военной техники // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2021. № 1 (116). С. 133–138.

5. Солк С.В., Меркулов Ю.Ю., Лебедев О.А. Проблемы защиты оптико-электронных приборов от высокоскоростных поражающих элементов // Сб. тр. Междунар. конф. «Прикладная оптика–2016». — СПб, 2016. Т. 2. С. 144–148.

6. ГОСТ 30826–2014 Стекло многослойное. Технические условия. — М.: Стандартинформ, 2015. 24 с.

7. Креопалова Г.В., Лазарев Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения. — М.: Машиностроение, 1987. 264 с.

8. Афанасьев В.А. Оптические измерения: учебник для вузов. 3-е изд. перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 1981. 229 с.

9. Merkulov Yu.Yu., Solk S.V., Lebedev O.A. Protection of orbital station optics against high-speed damaging elements // Acta Astronautica. 2017. V. 135. Pp. 21–25.

10. Меркулов Ю.Ю., Солк С.В., Добряков Б.Н. и др. Исследование зависимости оптических характеристик броневых стекол от времени их эксплуатации // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2017. № 11–12 (113–114). С. 58–62.

11. Меркулов Ю.Ю., Солк С.В., Добряков Б.Н., Сильников Н.М. Исследование зависимости изменения спектрального коэффициента пропускания броневых стекол класса защиты ЗХЛ от времени эксплуатации // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2021. № 7–8 (157–158). С. 157–162.

12. Добряков Б.Н., Меркулов Ю.Ю., Солк С.В., Сильников Н.М. Зависимость изменения спектрального коэффициента пропускания броневых стекол класса защиты ЗХЛ от времени эксплуатации в ближнем ИК-диапазоне // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2022. № 1–2. С. 133–138.

13. Сабинин В.Е., Солк С.В. Проблемы проектирования и изготовления оптики из полимерных материалов // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 1. С. 48–50.

14. Черезова Е.Н., Мукаменева Н.А., Архиреев В.П. Старение и стабилизация полимеров // Учебное пособие, часть 1. — Казань: Издательство КНИТУ, 2012. 140 с.

15. Добряков Б.Н., Меркулов Ю.Ю., Солк С.В., Сильников Н.М. Оценка влияния коротковолнового УФ-облучения броневых стекол класса защиты ЗХЛ на изменение спектрального пропускания // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2022. № 7–8. С. 128–134.

16. Солк С.В. Обеспечение показателей качества инфракрасных оптико-механических систем. — СПб: Политехника–сервис, 2014. 143 с.

References

1. Filatova A.O., Borodai V.V., Silnikov N.M., Borisov D.V. Physical properties and comparative characteristics of transparent armor. // *Voprosy Oboronnoi Tekhniki. Series 16. Tekhnicheskie sredstva protivodeistviia terrorizmu.* 2018. No 9–10 (123–124). Pp. 162–167.

2. Kobylkin I.F., Selivanov V.V. Materials and structures of light armor protection. / *Textbook for universities* — M.: Publishing House of Bauman University, 2014. 161 p.

3. Vasilyeva S.N., Guk I.V., Silnikov N.M., Yurchenko N.M. Polymethyl methacrylate as a material for translucent armored structures // *Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism.* 2021. No 9–10 (159–160). Pp. 155–166.

4. Ivanovskii V.S., Makarenko N.G., Yakovlev Yu.S. Transparent armor in military products // *Izvestiya Rossiiskoi akademii raketnykh i artelleriiskikh nauk.* 2021. No 1 (116). Pp. 133–138.

5. Solk S.V., Merkulov Yu.Yu., Lebedev O.A. Problems of protection of optoelectronic devices against high-speed damaging elements // *Proc. of International Conference «Applied Optics – 2016».* — SPb, 2016. V. 2. Pp. 144–148.

6. GOST 30826–2014. Multilayer glass. Technical specifications. — M.: Standartinform, 2015. 24 p.

7. Kreopalova G.V., Lazarev N.L., Puriaev D.T. *Optical Measurements.* — M.: Mechanical Engineering, 1987. 264 p.

8. Afanasiev V.A. *Optical Measurements: Textbook for universities. Third edition revised and supplemented.* — M.: Vysshaia shkola, 1981. 229 p.

9. Merkulov Yu.Yu., Solk S.V., Lebedev O.A. Protection of orbital station optics against high-speed damaging elements // *Acta Astronautica.* 2017. V. 135. P. 21–25.

10. Merkulov Yu.Yu., Solk S.V., Dobriakov B.N. et al. Study on dependence of optical characteristics of armored glasses on the time of their operation // *Voprosy Oboronnoi Tekhniki. Series 16. Tekhnicheskie sredstva protivodeistviia terrorizmu.* 2017. No 11–12 (113–114). Pp. 58–62.

11. Merkulov Yu.Yu., Solk S.V., Dobriakov B.N., Silnikov N.M. Study on dependence of change in spectral transmittance of armor glasses of 3HL protection class on the operating time // *Voprosy Oboronnoi Tekhniki. Series 16. Tekhnicheskie sredstva protivodeistviia terrorizmu.* 2021. Issues 7–8 (157–158). Pp. 157–162.

12. Dobriakov B.N., Merkulov Yu.Yu., Solk S.V., Silnikov N.M. Dependence of change in spectral transmittance of armor glasses of 3HL protection class on the operating time in the near IR range // *Voprosy Oboronnoi Tekhniki, Series 16. Tekhnicheskie sredstva protivodeistviia terrorizmu.* 2022. No 1–2. Pp. 133–138.

13. Sabinin V.Ye., Solk S.V. Problems of designing and manufacturing optics of polymer materials // *Opticheskii Zhurnal.* 2002. V. 69. No 1. Pp. 48–50.

14. Cherezova E.N., Mukameneva N.A., Arkhиреев V.P. Ageing and stabilization of polymers // *Tutorial, Part 1.* — Kazan: KNIU Publishing house. 2012. 140 p.

15. Dobriakov B.N., Merkulov Yu.Yu., Solk S.V., Silnikov N.M. Estimation of the effect of short-wave UV irradiation of armor glasses of 3HL protection class on the change in spectral transmission // *Voprosy Oboronnoi Tekhniki. Series 16. Tekhnicheskie sredstva protivodeistviia terrorizmu.* 2022. Issues 7–8. Pp. 128–134.

16. Solk S.V. Assurance of the quality indicators of infrared optical-mechanical systems. — SPb.: Politekhniko-servis, 2014. 143 p.