

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

### МЕТОДИКА ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ АЛЬБЕДО СНЕЖНО-ЛЕДОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

© 2021 г. Д. М. Журавский<sup>а</sup>, Б. В. Иванов<sup>а, б, \*</sup>

<sup>а</sup>Государственный научный центр «Арктические и антарктический научно-исследовательский институт»,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>б</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

\*E-mail: b\_ivanov@aari.ru

Поступила в редакцию 05.05.2021 г.

В статье рассматриваются новые направления совершенствования оригинальной методики оценки альbedo снежно-ледовых поверхностей, использующей данные наземных измерений приходящей солнечной радиации, фотограмметрическую информацию и метаданные параметров съемки (Журавский и др., 2018). Первая версия методики была использована для оценки альbedo естественных и искусственных снежно-ледовых поверхностей (припай, зона ледниковых трещин, взлетно-посадочная полоса ледового аэродрома) в районе российской антарктической станции «Прогресс» (Журавский и др., 2019). Однако применение методики для оценки альbedo в условиях повышенной изменчивости условий освещенности поверхности и при ограниченности исходных данных не всегда возможно. Новая методика позволяет более корректно оценивать альbedo в экстремальных условиях.

*Ключевые слова:* дистанционные методы, альbedo, солнечная радиация, экспонометрия, фотограмметрия

**DOI:** 10.31857/S0205961421050110

#### ВВЕДЕНИЕ

Альbedo подстилающей поверхности – безразмерная величина, характеризующая ее диффузную отражательную способность (Российский Гидрометеорологический энциклопедический словарь, 2008). Эта величина необходима при вычислении энергетического баланса поверхности и моделировании процессов энергомассообмена в полярных широтах. На сегодняшний день, не смотря на усовершенствование актинометрических датчиков, сбор данных об этой величине выполняется в основном при помощи стандартных методов, описанных в соответствующих Руководствах и Наставлениях Росгидромета. Имеются в виду так называемые “*ground true measurements*” (стационарные наблюдения на метеорологических станциях, площадных и профильных маршрутах). Развитие методов дистанционного зондирования поверхности с помощью искусственных спутников Земли (ИСЗ) позволяет получать данные об этой величине, но сильно зависит от сочетания благоприятных погодных условий и местоположения ИСЗ, а также предоставляет данные ограниченного пространственного разрешения (Бондур, 2014; Бондур, Воробьев, 2015). По этой причине развитие оригинальных методик оценки альbedo, позволяющих быстро получать большое

количество данных с высоким пространственным разрешением, представляется важной задачей. В работе (Журавский и др., 2018) был предложен способ оценки фотограмметрических данных, позволивший получить значения альbedo поверхности льда Онежского озера, исходя из данных о приходящей солнечной радиации, характеристик фотооборудования, параметрической информации съемки и характеристик получаемого изображения. При этом было показано, что для получения оценок альbedo возможно применение даже простых фоторегистрирующих устройств. В 2018 г. в ГНЦ РФ «АНИИ» был изготовлен опытный образец портативного измерительного комплекса для проведения полевых измерений. Выполненные с помощью БПЛА натурные эксперименты в районе российской антарктической станции «Прогресс» (Журавский и др., 2019) позволили уточнить требования к технической составляющей методики. В первую очередь к проблеме, связанной с ограниченностью технических возможностей простых фоторегистрирующих устройств, и выявить возможные направления для ее усовершенствования. В первую очередь это относится к проблеме получения корректных оценок величин альbedo при ограниченном количестве исходных данных и нерегулярных изменениях условий

освещенности (изменчивость приходящей солнечной радиации) в широком диапазоне.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДИКИ

Теоретические основы методики базируются на современных способах оценки экспонетрии и зависимости параметров съемки и яркости снимаемого объекта (снежно-ледовой поверхности) – или, обобщенно, снимаемой сцены (Ильинский, 1998; [http://www.iso.org/iso/ru/home/store/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=37777](http://www.iso.org/iso/ru/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=37777); [http://www.iso.org/iso/ru/home/store/catalogue\\_ics/catalogue\\_detail\\_ics.htm?csnumber=21020](http://www.iso.org/iso/ru/home/store/catalogue_ics/catalogue_detail_ics.htm?csnumber=21020)). Для расчета альbedo ( $A$ ) мы используем уравнение множественной регрессии:

$$A = \alpha L + \beta Q + \gamma, \quad (1)$$

где  $L$  – исчисленная яркость снимаемой поверхности;  $Q$  – приходящая солнечная радиация;  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – эмпирические коэффициенты. Более подробное преобразование (вид) этого уравнения уже обсуждалось в работе (Журавский и др., 2018).

Предложенный нами подход (методика) связывает рассчитываемую зависимую переменную  $A$  с рядом независимых переменных, данные о которых известны из измерений или полученных путем вычислений. “Уязвимость” методики заключается в том, что величины  $Q$  и  $L$  (последняя косвенно характеризует отраженную радиацию), которые могут изменяться кратно, связаны простым математическим действием сложения (см. формулу 1) и это, как мы продемонстрируем ниже, может негативно сказываться на точности вычислений. Эта неопределенность может проявляться в условиях построения уравнения множественной регрессии на основании выборки с невысокой изменчивостью величин  $Q$  и  $A$ , при последующих наблюдениях в других условиях освещенности. Таким образом, исходные данные (параметры фоторегистрирующего оборудования и данные о приходящей и отраженной радиации), лежащие в основе вывода коэффициентов уравнения множественной регрессии, являются важнейшими составляющими предлагаемого нами решения. Смоделируем ситуацию, при которой условия освещенности изменяются существенно, а характеристики подстилающей поверхности остаются неизменными. Именно такие условия сопутствовали нашим экспериментам на льду Онежского озера в марте 2016 г. Подстилающая поверхность была представлена ровным льдом толщиной порядка 50 см. Снежный покров полностью стаял. Измерения  $Q$  и отраженной солнечной радиации ( $R$ ), а также фотосъемка референтных участков подстилающей поверхности с помощью фотографического оборудования (камеры смартфона iPhone) и последующий расчет  $A$  согласно разработанной методике, были выпол-

нены с дискретностью равной 5 м на полигоне  $30 \times 30$  м (49 точек). Указанная выборка данных была получена в течение короткого промежутка времени – менее одного часа. Естественно, столь короткий интервал получения исходных данных не позволяет выявить возможные ошибки методики расчетов, возникающие при существенных изменениях во времени условий освещенности. Таким образом небольшая длина выборки (49 членов ряда) и малая изменчивость  $Q$  делает полученный массив данных идеальной тестовой основой для оценки возможных ошибок методики.

Измерения  $Q$  и  $R$  производились малоинерционными пиранометрами LQ-192SA (США) в диапазоне фотосинтетической активной радиации (ФАР) равном 400–700 нм. Этот диапазон практически соответствовал видимому диапазону, в котором работало упомянутое выше фоторегистрирующее устройство. Наблюдения выполнялись в истинный полдень, при максимальной высоте Солнца над горизонтом (около  $25^\circ$ ).

На основании полученных данных о  $Q$  и  $R$  были рассчитаны величины альbedo ( $A = R/Q$ ) для контрольных точек (“*in situ*”). В совокупности с нормированными величинами исчисленной яркости это позволило рассчитать коэффициенты уравнения множественной регрессии (1). В нашем случае их величины составили:  $\alpha = 0.0046$ ;  $\beta = -0.0706$ ;  $\gamma = 29.50$ , а уравнение регрессии приобрело следующий вид:

$$A = 0.0046L - 0.0706Q + 29.50. \quad (2)$$

С помощью полученного уравнения, используя измеренные величины  $Q$  и параметры фотоснимков, были рассчитаны значения альbedo для всех точек полигона.

Для иллюстрации возможного влияния изменений условий освещенности рассмотрим два случая, когда  $Q$  изменяется в 0.75 и 1.25 раза. Помимо этого, будем оставаться в ситуации, когда отражательная способность подстилающей поверхности остается неизменной (условия эксперимента на льду Онежского озера). В этом случае величина  $A$  останется неизменной как для оригинального, так и искусственно измененных рядов данных. Это означает, что  $R$  изменяется пропорционально  $Q$ . Также примем, что изменение яркости  $L$  подстилающей поверхности эквивалентно изменению  $R$ . Результаты представлены на рис. 1.

Коэффициент корреляции между рядами величин  $A$ , полученных стандартным (“*in situ*”) и оригинальным (по формуле 3) методами, составляет 0.97 (стандартное отклонение оценки и коэффициент детерминации равны 1.03 и 0.94 соответственно). Среднее квадратическое отклонение (СКО) для рядов с освещенностью, измененной в 0.75 и 1.25 раз равно 3.2 и 3.1 соответственно. Из-

менение (увеличение) величин СКО указывает на существенное ухудшение точности расчетов при использовании уравнения (3) в условиях изменения условий освещения.

Проведенные расчеты дают наглядное представление о “слабом месте” методики, при этом ошибка расчетов будет тем больше, чем сильнее изменятся условия освещенности. Это является основанием для поиска усовершенствования разработанной методики.

### УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ

Очевидным усовершенствованием предложенной методики представляется приведение уравнения (1) для расчета альбедо ( $A$ ) к виду, позволяющему учитывать изменение условий освещенности и соответствующее ему эквивалентное изменение яркости снимаемой сцены. Фактически эта идея присутствует в канонической формуле расчета альбедо поверхности:

$$A = \frac{R}{Q}. \quad (3)$$

Поскольку с помощью фотограмметрического оборудования мы определяем значение яркости снимаемой поверхности ( $L$ ), попробуем рассчитать величину отраженной радиации  $R$ , связав ее с параметрами экспонометрии через независимую, в нашем случае, переменную  $L$ :

$$R = \varepsilon L + \zeta, \quad (4)$$

где  $\varepsilon, \zeta$  – это эмпирические коэффициенты.

В этом случае уравнение (3) приобретает следующий вид:

$$A = \frac{R}{Q} = \frac{\varepsilon L + \zeta}{Q}. \quad (5)$$

Однако наличие свободного члена  $\zeta$ , не изменяющегося кратно изменению освещенности в числителе уравнения (5) не позволяет учитывать ошибки расчетов, связанные с изменениями условий освещенности. Вклад этого коэффициента в расчет будет тем весомее, чем сильнее понижается освещенность. При изменении освещенности и пропорциональном изменении  $L$ , коэффициент  $\zeta$  остается неизменным, а значит, при увеличении освещенности его влияние на величину числителя дроби сильнее, а при уменьшении освещенности – слабее. Для демонстрации этого факта произведем следующие расчеты. Используя имеющийся ряд данных (тестовый), мы оценили значения коэффициентов  $\varepsilon, \zeta$  для условий эксперимента на льду Онежского озера в марте 2017 г. и получили уравнение линейной регрессии (4), описывающее зависимость  $R$  от  $L$ .

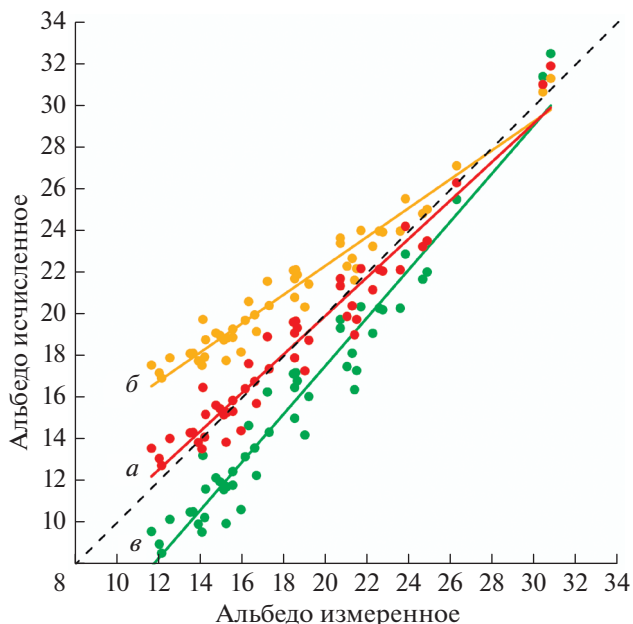


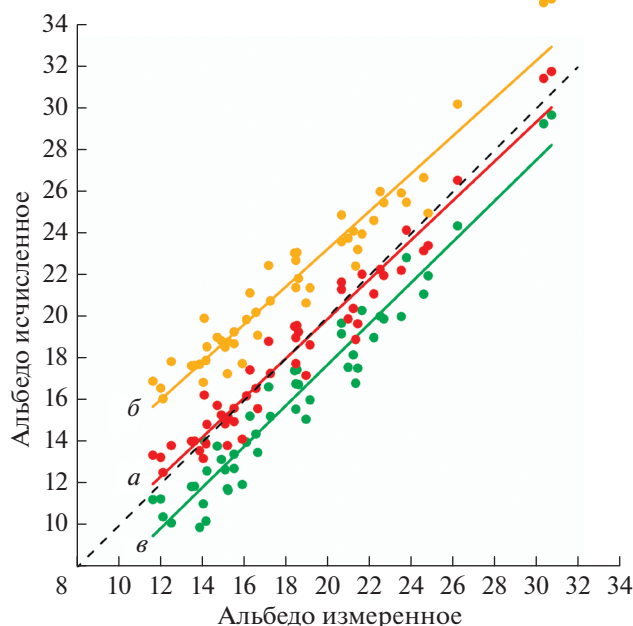
Рис. 1. Соотношение величин альбедо, измеренных “in situ” и исчисленных по разработанной методике (а), при уменьшении освещенности в 0.75 раза (б), при увеличении освещенности в 1.25 раза (в).

Подставив полученную зависимость в уравнение (5), имеем для расчета  $A$  следующее уравнение:

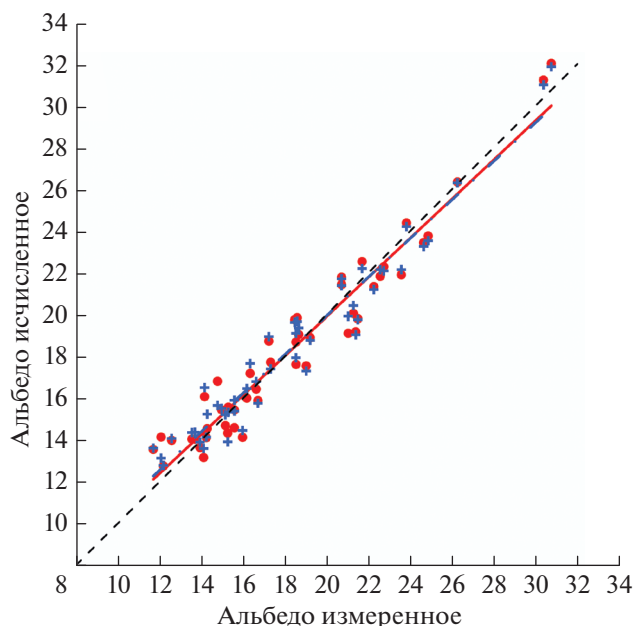
$$A = \frac{0.0123L + 28.09}{Q}. \quad (6)$$

При этом коэффициент корреляции для уравнения регрессии (6), описывающего зависимость  $A$  от  $L$ , составляет 0.97, коэффициент детерминации и стандартная ошибка равны 0.94 и 2.8 соответственно. Однако изменение условий освещенности по-прежнему оказывает существенное влияние на точность расчетов, и вклад  $\zeta$  становится заметнее при ее уменьшении. Количественно это выражается в изменении СКО до величин 3.62 и 2.51 для рядов с изменением освещенности в 0.75 и 1.25 раза соответственно. Результаты представлены на рис. 2.

Другая очевидная возможность устранить влияние изменчивости условий освещенности на точность вычислений  $A$  заключается в построении такого регрессионного соотношения, в котором  $L$  и  $Q$  (величины, в действительности характеризующие яркость снимаемой сцены и освещенность) будут объединены дробным соотношением (являться числителем и знаменателем дроби). В этом случае при изменении освещенности (суммарной радиации  $Q$ ), яркость снимаемой сцены ( $L$ ) будет изменяться в кратном соотношении. В этом случае регрессионное соотношение, связывающее  $A$  с одной стороны с



**Рис. 2.** Соотношение величин альbedo, измеренных “*in situ*” и рассчитанных по усовершенствованной методике (а), при уменьшении освещенности в 0.75 раза (б), при увеличении освещенности в 1.25 раза (е).



**Рис. 3.** Соотношения величин А, полученных по измерениям “*in situ*” и рассчитанных по разработанной методике – оригинальным (+) и усовершенствованным (●) способом.

величинами  $L$  и  $Q$  с другой, примет следующий вид:

$$A = \eta \frac{L}{Q} + \theta, \quad (7)$$

где  $\eta$ ,  $\theta$  – эмпирические коэффициенты.

Подобное упрощение, тем не менее, не приводит к ухудшениям точности расчета  $A$ . Для рассматриваемого массива тестовых данных предложенное уравнение регрессии (7) принимает следующий вид:

$$A = 1.22 \frac{L}{Q} + 10.76. \quad (8)$$

Коэффициент корреляции между рассчитанными величинами альbedo и наблюдаемыми (“*in situ*”) остался на прежнем уровне – 0.96, коэффициент детерминации составил величину равную 0.93, а СКО – 1.3. На рис. 3 представлены результаты, демонстрирующие соотношения величин  $A$ , полученных по измерениям “*in situ*” с рассчитанными по первоначально предложенной оригинальной методике и усовершенствованным способом.

## ВЫВОДЫ

Представленные результаты демонстрирует принципиальную возможность усовершенство-

вания разработанной нами ранее методики (Журавский и др., 2018). Это позволило сохранить требуемую точность оценки альbedo и исключить влияние на результаты конечных расчетов изменчивости условий освещенности. Использование усовершенствованной методики позволяет не выполнять верификацию условий освещенности непосредственно при сборе натурных данных, используя какую-либо условную тестовую выборку. Как было показано выше, даже такие незначительные (в 1.25 и 0.75 раз) изменения условий освещенности могут оказывать серьезное влияние на точность первоначального подхода (Журавский и др., 2018). Предполагается, что с увеличением количества исходных данных (увеличение длины тестовой выборки на референтных участках в разных условиях освещенности), разница между результатами расчетов в условиях изменения условий освещенности по оригинальной методике и усовершенствованному варианту должна сократиться, но этот тезис нуждается в подтверждении и дополнительных натурных экспериментах.

Применение предложенной методики при использовании беспилотных летательных аппаратов, имеющих, как правило, собственное, конструктивно встроенное, фотографическое устройство (фотокамеру) с известными параметрами, позволит оценивать альbedo значительных

по площади участков снежно-ледовых покровов с требуемой точностью, за короткие промежутки времени, в местах, где проведение стандартных наземных измерений невозможно с точки зрения безопасности (дрейфующие льды, торосы, краевые зоны ледников).

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках раздела 5.1.4 “Мониторинг состояния и загрязнения природной среды, включая криосферу, в Арктическом бассейне и районах научно-исследовательского стационара “Ледовая база Мыс Баранова”, Гидрометеорологической обсерватории Тикси и Российского научного центра на архипелаге Шпицберген” (проект 24 НИТР/ОПР Росгидромета).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Бондур В.Г.* Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и мультиспектральной аэрокосмической информации // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 1. С. 4–16.  
<https://doi.org/10.7868/S0205961414010035>

*Бондур В.Г., Воробьев В.Е.* Космический мониторинг импактных районов Арктики // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 4. С. 4–24.  
<https://doi.org/10.7868/S0205961415040028>

*Журавский Д.М., Иванов Б.В., Кашин С., Куприков Н.М.* Способ дистанционной оценки альбедо при помощи фоторегистрирующего оборудования // Исслед. Земли из космоса, 2018. № 1. С. 52–59.  
<https://doi.org/10.7868/S0205961418010050>

*Журавский Д.М., Прохорова У.В., Иванов Б.В., Янжура А.С., Куприков Н.М., Курапов М.В.* Полевые испытания методики фотограмметрической оценки альбедо снежно-ледниковых поверхностей // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 4. С. 18–28.  
<https://doi.org/10.31857/S0205-96142019418-28>

*Ильинский И.В.* Зонная система экспонирования // Изд. “Фотомагазин”. 1998. № 1–2. С. 94–98.

Российский Гидрометеорологический энциклопедический словарь / Под ред. А.И. Бедрицкого. СПб.: Изд. “Летний сад”, 2008.

ISO 12232:2006 Photography – Digital still cameras – Determination of exposure index, ISO speed ratings, standard output sensitivity, and recommended exposure index: [http://www.iso.org/iso/ru/home/store/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=37777](http://www.iso.org/iso/ru/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=37777)

ISO 12232:1998 Photography – Electronic still-picture cameras – Determination of ISO speed: [http://www.iso.org/iso/ru/home/store/catalogue\\_ics/catalogue\\_detail\\_ics.htm?csnumber=21020](http://www.iso.org/iso/ru/home/store/catalogue_ics/catalogue_detail_ics.htm?csnumber=21020)

## Technique for Photogrammetric Estimation of Albedo of Snow-Ice Surfaces

**D. M. Zhuravsky<sup>1</sup> and B. V. Ivanov<sup>1, 2</sup>**

<sup>1</sup>State science center “Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

The article discusses new directions for improving the original technique for assessing the albedo of snow-ice surfaces, using data from ground measurements of incoming solar radiation, photogrammetric information and metadata of survey parameters (Zhuravsky et al., 2018). The first version of the technique was used to assess the albedo of natural and artificial snow-ice surfaces (fast ice, glacial cracks zone, ice airfield runway) in the area of the Russian Antarctic station Progress (Zhuravsky et al., 2019). However, it is not always possible to use the technique for assessing albedo under conditions of increased variability of surface illumination conditions and with limited initial data. The new technique makes it possible to more correctly estimate the albedo under extreme conditions.

*Keywords:* remote methods, albedo, solar radiation, exposure metering, photogrammetry

#### REFERENCES

*Bondur V.G.* Sovremennye podhody k obrabotke bolshih potokov giperspectralnoi i mnospektralnoi informatsii (Modern Approaches to Processing Large Hyperspectral and Multispectral Aerospace Data Flows) // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2014. V. 50. № 9. P. 840–852. DOI: 10.1134/S0001433814090060

*Bondur V.G., Vorobev V.E.* Sputnikovy monitoring impactnuyh arcticheskikh regionov (Satellite Monitoring of Impact Arctic Regions) // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2015. V. 51. № 9. P. 949–968. DOI: 10.1134/S0001433815090054

*Zhuravskiy D.M., Ivanov B.V., Kaschin S.V., Kuprikov N.M.* Distantionnaya otsenka albedo s ispolzovaniem fotoregistrirueshego oborudovaniya (Remote Evaluation of Albedo

Using Photorecording Equipment) // Atmosphere and Oceanic Physics, 2018. № 1. P. 52–59. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0205961418010050>

*Zhuravskiy D.M., Prokhorov U.V., Ivanov B.V., Janjura A.S., Kuprikov N.M., Kurapov M.V.* Polevie isputaniya protseduri fotogrammetricheskoi otsenki albedo snejno-lednikovoi poverhnosti (Field Tests of the Procedure for a Photogrammetric Estimation of Snow-Glacial Surface Albedo) // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2019. 56. № 4. P. 18–28. DOI: 10.31857/S0205-96142019418-28

*Ilinsky I.V.* Zonnaya sistema eksponirovaniya (Zone exposure system) // Publishing house “Photo shop” 1998. № 1–2. P. 94–98.

Rossiyskiy gidrometeorologicheskii entsiklopedicheskiy slovar (Russian Hydrometeorological Encyclopedic Dictionary) / Ed. A.I. Bedritsky. SPb.: Publishing house. “Summer Garden”, 2008.

ISO 12232:2006 Photography – Digital still cameras – Determination of exposure index, ISO speed ratings, standard output sensitivity, and recommended exposure index: [http://www.iso.org/iso/ru/home/store/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=37777](http://www.iso.org/iso/ru/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=37777)

ISO 12232:1998 Photography – Electronic still-picture cameras – Determination of ISO speed: [http://www.iso.org/iso/ru/home/store/catalogue\\_ics/catalogue\\_detail\\_ics.htm?csnumber=21020](http://www.iso.org/iso/ru/home/store/catalogue_ics/catalogue_detail_ics.htm?csnumber=21020)