

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

ПОЛЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ МЕТОДИКИ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ
ОЦЕНКИ АЛЬБЕДО СНЕЖНО-ЛЕДНИКОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

© 2019 г. Д. М. Журавский¹, У. В. Прохорова¹, Б. В. Иванов^{1,2,*}, А. С. Янжура¹,
Н. М. Куприков^{3,4}, М. В. Курапов³

¹ Государственный научный центр РФ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»,
Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³ АНО НИЦ «Полярная инициатива», Москва, Россия

⁴ Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия
*E-mail: b_ivanov@aari.ru

Поступила в редакцию 06.05.2019 г.

В статье обсуждаются результаты применения в Антарктиде оригинальной методики оценки альбедо по фотограмметрическим данным и экспозиционным параметрам с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Рассматриваются сложности проведенных фотограмметрических наблюдений в экстремальных условиях, делаются выводы о путях усовершенствования регистрирующей аппаратуры и направлении усовершенствования методики расчета величин альбедо на основе фотограмметрических материалов и метаданных.

Ключевые слова: альбедо, дистанционные методы, солнечная радиация, экспонометрия, фотограмметрия

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019418-28>

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы усовершенствования приемов получения оценок альбедо — безразмерной величины, характеризующей диффузную отражательную способность поверхностей, представляют важный практический интерес. Наиболее ранние исследования, описывающие методы дистанционных оценок альбедо с помощью пилотируемой авиации, представлены в ряде работ специалистов Арктического и антарктического научно-исследовательского института — ААНИИ (Коптев, 1962). Однако, с тех пор, несмотря на развитие и совершенствование средств измерения (СИ) и регистрации (СР) данных, серьезного развития методы дистанционной оценки альбедо подстилающей поверхности не получили. Несмотря на важность корректной оценки величин альбедо при вычислении энергетического баланса поверхности и моделировании процессов энергообмена подстилающей поверхности с атмосферой, расчеты интегрального и спектрального альбедо «*in-situ*», как правило, выполняются с использованием рутинных наземных наблюдений и лишены возможности оперативных и массовых измерений на больших площадях и за короткий промежуток времени.

Расчеты альбедо с помощью искусственных спутников Земли (ИСЗ) предоставляют данные

о среднем по некоей площади альбедо, и сильно зависят от сочетания благоприятных погодных условий и времени нахождения ИСЗ над конкретным участком исследуемой поверхности.

Нами была разработана методика анализа фотограмметрических данных, позволяющая получать оценки альбедо поверхности на основании сведений о приходящей на горизонтальную поверхность солнечной радиации и параметрических характеристик используемого фотооборудования (Журавский и др., 2017, 2018). Было показано, что для получения приемлемых результатов возможно использование простейших фоторегистрирующих устройств. К сильным сторонам методики можно отнести малую инерционность подобных СИ, потенциал непрерывного усовершенствования методики и уточнения уже полученных результатов, относительно невысокую стоимость СИ и СР данных, оперативность сбора данных на больших площадях и за малые промежутки времени. Специалистами ААНИИ был изготовлен опытный образец устройства для выполнения измерений с использованием вышеуказанной оригинальной методики (Журавский и др., 2018). Первые полевые испытания были проведены в Антарктиде в районе российской станции «Прогресс», в ходе сезонных работ 63-й Российской Антарктической Экспедиции — РАЭ (Прохорова и др., 2018).

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДИКИ

Теоретические основы базируются на современных методиках экспонетрии, и зависимости параметров съемки и яркости снимаемого объекта — или, обобщенно, снимаемой сцены (Ильинский, 1998; ISO 12232:2006).

Оригинальная методика основывается на решении простого алгебраического уравнения (Журавский и др., 2017, 2018):

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

где L — исчисленная яркость снимаемой поверхности, Q — известная (измеренная) приходящая солнечная радиация ($Вт/м^2$), α , β , γ — эмпирические коэффициенты.

С учетом приемов расчета L (Журавский и др., 2018) эта формула имеет следующий вид:

$$A = \alpha \frac{GN^2}{qtS} \frac{I_n}{I_{128}} + \beta Q + \gamma = \alpha \frac{GN^2}{\frac{\pi}{4} T_v(\theta) \cos^4 \theta t S} \frac{I_n}{I_{128}} + \beta Q + \gamma \quad (2),$$

где G — коэффициент, равный 10 для методики «стандартной выходной чувствительности определения экспозиционного индекса» или равный 78 для методики «точки насыщения», или имеет иное значение для других методик, выбранных производителем фотооборудования (ISO 12232:2006); N — «диафрагменное число»; q — коэффициент объектива; t — выдержка (сек); S — эквивалентная светочувствительность, единицы ISO; I_n — яркость снимка в пространстве RGB; I_{128} — средняя яркость снимка в пространстве RGB, равная 128; α , β , γ — эмпирические коэффициенты, вычисленные расчетом уравнения множественной регрессии для выбранного оборудования и условий съемки.

ОПЫТНОЕ УСТРОЙСТВО

Для дальнейшей проверки и усовершенствования разработанной методики было сконструировано и изготовлено мобильное устройство на базе микропроцессора Raspberry Pi (рис. 1) с модулем камеры PiCamV2.0 и квантового датчика LI-190SA (Quantum Sensor instruction Manual, 2008). Выбор данных элементов комплекса был связан с гибкостью микропроцессорной архитектуры Pi, совпадением спектральных охватов камеры и датчика (400–700 нм), а также типичностью камеры, являющейся достаточно обычным образцом фоторегистрирующего устройства хорошего качества.



Рис. 1. Микропроцессорное устройство Raspberry Pi, на базе которого был сконструирован опытный образец мобильного устройства (снимок производителя).

Устройство было исполнено в компактном корпусе и предназначалось для применения на БПЛА. Автономность до нескольких суток непрерывной работы обеспечивалась встроенной аккумуляторной батареей. Данные о пространственном расположении поступали от встроенного приемника GPS/ГЛОНАСС. Регистрация данных выполнялась в соответствии с задаваемым оператором устройства интервалом времени. При полевых испытаниях использовался интервал между измерениями от 2 до 10 секунд. При полевых измерениях, устройством одновременно исполнялось несколько действий:

- регистрация показаний квантового датчика ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$);
- фотографирование подстилающей поверхности с сохранением снимка во внутреннюю память устройства;
- запись параметрической информации (время, координаты, данные снимка и экспозиции).

Таким образом, «на выходе» мы получали массив синхронных данных об отражательных и экспозиционных характеристиках подстилающей поверхности, предоставляющий большие возможности для научного анализа, а снятые фотоматериалы позволяли выполнять отбраковку нерепрезентативных материалов и качественную оценку морфометрических характеристик снимаемой поверхности. Собранная информация копировалась на персональный компьютер при помощи Wi-Fi соединения. Анализ полученных данных и расчет альбедо поверхности выполнялся при помощи лицензионных программных продуктов. После накопления новых данных и усовершенствования методик измерений, в новых устройствах предполагается выполнять расчеты альбедо в автоматическом режиме.

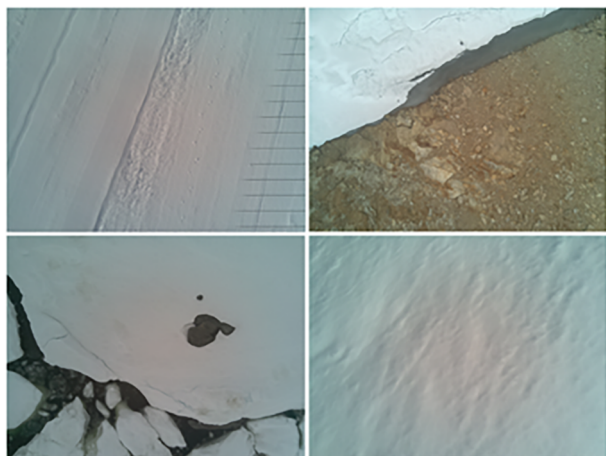


Рис. 2. Характерные примеры подстилающих поверхностей (снимки камеры устройства). (верхний ряд — ВПП, краевая зона ледникового купола, нижний — припай)

a



б

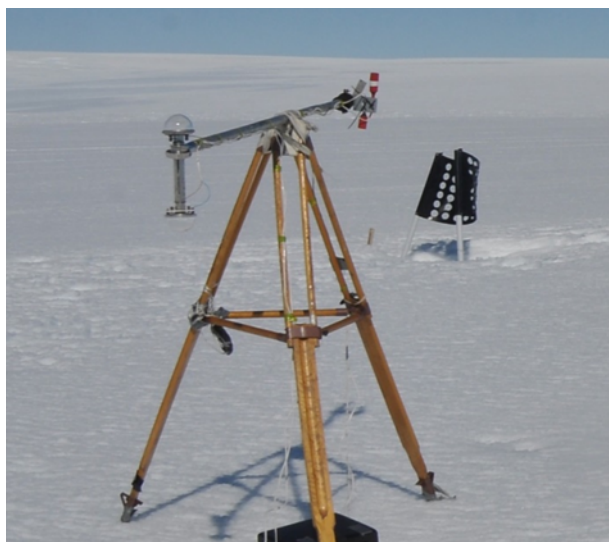


Рис. 3. Квадрокоптер DJI MAVIC PRO (*a*) и наземная актинометрическая установка (*б*).

ПОЛЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Полевые испытания происходили 04–24.01.2018 в районе Российской антарктической станции «Прогресс» на типовых площадках, характеризующихся различными свойствами подстилающей поверхности: неподвижный морской лед (припай), взлетно-посадочная полоса (ВПП) снежно-ледового аэродрома станции Прогресс, краевая зона ледникового купола в районе станции (см. рис. 2).

Сбор данных выполнялся с высоты 1.5–2 м, соответствующей стандартным наземным актинометрическим измерениям (Гущина и др., 1998), и далее на высотах 3, 5, 10, 20 м. Для получения необходимого массива данных в районе выполнения работ организовывался наземный (стационарный) пункт наблюдений, где синхронно с БПЛА выполнялся сбор данных о проходящей и отраженной солнечной радиации на с использование датчиков, аналогичных установленному на БПЛА (см. рис. 3б).

В качестве БПЛА использовался квадрокоптер DJI MAVIC PRO, технические характеристики которого представлены в табл. 1 и фото на рис. 3а.

Для валидации экспериментальных данных (величины альбедо), получаемых БПЛА, мы произвели синхронные измерения с помощью наземной актинометрической установки над пространственно однородными участками снежно-ледниковой поверхности. В нашем случае это были участки ВПП или ледникового купола.

Таблица 1. Технические характеристики БПЛА

Вес (вместе с аккумулятором)	800 г
Размер по диагонали (без пропеллеров)	350 мм
Масса полезной нагрузки	300 г
Максимальная высота полета над точкой взлета	500 м
Время полета	около 25 мин
Поддерживаемые системы спутниковой навигации	GPS и GLONASS
Камера	1" CMOS; эффективные пиксели: 20 мП
Рабочая частота	2.400–2.483 ГГц и 5.725–5.825 ГГц
Рабочая температура	от 0° до 40 °С
Аккумуляторная батарея	6000 мА/ч LiPo 2S
Рабочий ток	1.2 А при 7.4 В
Тип аккумулятора	LiPo 4S (литий-полимерный)

В результате были получены оценки альbedo, рассчитанные с помощью наземной установки (стандартная методика: два датчика, фиксирующие приходящую на горизонтальную поверхность и отраженную солнечную радиацию) и рассчитанные с помощью датчика установленного на БПЛА (отраженная радиация) и датчика, фиксирующего приходящую солнечную радиацию на актинометрической установке. Сравнение величин альbedo рассчитанных по стандартной методике и полученных с помощью БПЛА показал, что их различие не превышает 5%, что соответствует точности определения величины альbedo по данным наземных измерений (Радионов и др., 1996).

Одной из проблем, связанной с использованием фоторегистрирующего оборудования, является отсутствие информации о выбранном производителем фотокамеры методе определения экспозиционного индекса. Наиболее вероятными являются использование или методики REI, или стандартной выходной чувствительности (ISO 12232:2006). Для удобства было сделано допущение, что производителем применяется последняя из упомянутых методик. Возможные последствия использования такого допущения могут привести к некорректным расчетам яркости снимаемой сцены, однако, этот промежуточный расчет, в целом, не влияет на итоговую точность расчета альbedo (Журавский и др., 2018). Помимо этого, был принят за усредненный коэффициент объектива q , равный 0.65.

Основная сложность, выявленная во время полевых испытаний в Антарктиде, связана с экстремально высокими показателями яркости подстилающей поверхности. Нижний порог светочувствительности фоторегистратора равен 100 единицам ISO, самая короткая выдержка, обрабатываемая затвором $\sim 1/5600$ с. Достаточно высокая светосила объектива фоторегистрирующего устройства ($f/2.9$) и отсутствие блока диафрагмы приводили к невозможности уменьшить световой поток на фотоприемник, из-за чего в ряде случаев съемка объектов разной яркости производилась на одинаковых пороговых значениях параметров экспозиции. Фактически, это выразилось в том, что рассчитанные (с учетом допущения о выбранной методике определения экспозиционного индекса) значения яркости снимаемой сцены не превышают 7229 кд/м^2 , и равны этой величине для всех более ярких объектов. Очевидным решением этой проблемы в будущем является применение нейтральных серых фильтров, равномерно сокращающих световой поток по всему спектральному диапазону светоприемника. Однако, в нашем

случае, вопреки съемке на пороговых значениях, зафиксированные кадры не были засвечены. Это указывает на то, что светочувствительная матрица обладает широким динамическим диапазоном, и сигналы от светоприемника успешно обрабатывались для построения корректного изображения. Анализ параметрической информации метаданных («exif» снимков) позволил выявить несколько параметров, которые могут потенциально корректно объяснять изменение яркости сцены сверх пороговых значений: «*Light Value*» и «*Brightness Value*». «*Light Value*» — это «*световое число*», характеризующее безотносительно экспозиции яркость снимаемой сцены. Так же как параметры и съемки (выдержка, светочувствительность, диафрагма), эта величина достигла предела технических возможностей, и не меняется выше 15.5. Учитывая технические ограничения, использование этой величины представляется невозможным. «*Brightness Value*» — собственная безразмерная величина оценки снимаемой сцены камерой, которая, вероятно, учитывает данные обработки для получения корректного изображения (коэффициенты усиления/ослабления). Исходя из этого, регистрируемые данные должны быть корректными и представляют интерес для дальнейшего анализа и обработки.

РАСЧЕТЫ

Полученные натурные данные анализировались в несколько этапов. На подготовительном этапе выполнялась:

- отбраковка данных со снимками, зафиксированными посторонними предметами, имеющие тени;
- удаление неполных (неоднородных) рядов данных (отсутствие данных о снимке или данных с наземного пункта наблюдений);
- удаление данных, при которых альbedo оказывались выше 100% (наклон БПЛА относительно горизонта и при высотах Солнца менее 10°);
- создание рабочих массивов данных.

На основании экспериментов были сформированы различные ряды данных, которые в дальнейшем использовались для расчета альbedo: обобщенный (полный ряд) и отдельные для разных высот полета БПЛА.

Полный ряд данных

Полный ряд данных составил 5335 синхронных наблюдений. В соответствии с разработанной ранее методикой (Журавский и др., 2018) были выполнены расчеты яркости снимаемой сцены L , исходя из параметрической информации:

$$L = \frac{GN^2}{qtS}, \quad (3)$$

где G — коэффициент уравнения, принятый равным 10 (для методики «стандартной выходной чувствительности определения экспозиционного индекса»); N — «диафрагменное число»; q — коэффициент объектива, принятый равным 0.65; t — выдержка, с; S — эквивалентная светочувствительность единицы ISO.

Оценка коэффициентов корреляции между измеренными с БПЛА величинами отраженной радиации (R) и значениями L и L_{BV} (обозначение упомянутого выше параметра «*Brightness Value*») выявила значимые коэффициенты, равные 0.45 и 0.46, что свидетельствует о важности параметра «*Brightness Value*» при расчетах. Исходя из этого, было принято дополнить уравнение (1) еще одним членом (L_{BV}):

$$A = \alpha L + \delta L_{BV} + \beta Q + \gamma \quad (4)$$

После расчета коэффициентов уравнение приняло следующий вид:

$$A = 0.0006 \times L + 2.51 \times L_{BV} - 0.46 \times Q + 116.49 \quad (5)$$

Рассчитанный коэффициент множественной корреляции оказался равным 0.98, коэффициент детерминации 0.96, стандартная ошибка 2.4. Коэффициент α в формуле (5) указывается с точностью до четвертого знака, поскольку значения яркости L очень высоки (1000 кд/м² и выше).

Также, был выполнен анализ отфильтрованного массива данных (из полного массива были изъяты данные с пороговым значением яркости снимаемой сцены 7229 кд/м²). Полученный ряд составляет выборку равную 398 наблюдениям. Для него был выполнен расчет с помощью нашей методики без учета переменной L_{BV} . При этом уравнение (1) приняло следующий вид:

$$A = 0.0006 \times L - 0.44 \times Q + 123.59 \quad (6)$$

Рассчитанный коэффициент множественной корреляции оказался равным 0.97, коэффициент детерминации 0.95, стандартная ошибка составила величину равную 2.68.

Ряд данных для высоты 1.5–2 м

Этот ряд данных был выделен и обработан отдельно, поскольку данная высота является общепринятой для размещения актинометрических датчиков над подстилающей поверхностью при проведении стандартных наблюдений для последующих расчетов величин альbedo (Гущина и др., 1998). Ряд включает в себя 1030 значений, полученных с дискретностью 2 и 10 с. Уравнение (4) для такого ряда имеет несколько иной вид,

поскольку получено на базе меньшей, по длине, выборке и имеет иные условия съемки:

$$A = -0.0002 \times L + 1.46 \times L_{BV} - 0.42 \times Q + 120.28 \quad (7)$$

С коэффициентами множественной корреляции и детерминации равными 0.98 и 0.97, соответственно, и стандартной ошибкой равной 1.3.

Как видно из полученных результатов, полевые испытания подтвердили возможность достаточно точной оценки альbedo на основании данных фотоснимков и параметрической информации фоторегистрирующего оборудования.

Однако, анализ полученных регрессионных уравнений и их различий в зависимости от конкретных условий экспериментов, позволили выявить «слабое место» предложенной методики. Это выражается в увеличении ошибки расчета альbedo вследствие отклонения мгновенной измеренной приходящей солнечной радиации от средних для выборки значений. Это, в определенной степени, ограничивает применимость методики в условиях быстро меняющихся характеристик облачности (количество, тип, высота, прозрачность) в период съемки. Окончательная проверка этой гипотезы и усовершенствование методики является направлением дальнейших исследований нашего коллектива.

Экспериментальные оценки альbedo различных типов подстилающей поверхности

Альbedo снежно-ледникового покрова в первую очередь зависит от структуры и состояния подстилающей поверхности, степени ее загрязненности, плотности и влагосодержания (водности). В принципе вариации альbedo снежно-ледниковых поверхностей могут быть связаны с условиями освещенности (ясное или облачное небо) и с изменением спектрального состава приходящей к поверхности солнечной радиации в зависимости от высоты солнца. Например, при пасмурном небе альbedo снежной поверхности, в среднем, может быть на 3–6% больше, чем при ясном небе (Тимерев, 1976). Экспериментальные исследования показали, что в весенний период, при преобладании ясных дней, максимальные суточные вариации альbedo могут достигать 10–15%, а в пасмурные дни дневной ход альbedo, как правило, минимален, а его амплитуда не превышает 5% (Черниговский, Маршунова, 1965). Отмечено, что величины альbedo мало меняются при изменении высоты Солнца от 10° до 35°, а наблюдаемая изменчивость не превосходит точности стандартных измерений $\pm 5\%$ (Радионон, 1996). В целом, с учетом приведенных оценок, можно сделать вывод, что влияние облачности незначительно и в среднем не превышает

точности наблюдений. Резюмируя выше сказанное, можно сделать заключение, что изменения характера и свойств подстилающей поверхности вызывают более значительные изменения альbedo по сравнению с возможными вариациями обусловленными изменчивостью облачности или высоты Солнца. Также необходимо отметить, что мы выполняли полеты, как правило, при неизменных погодных условиях (ясное небо, сплошная облачность) и анализировали данные об альbedo, полученные за относительно короткие промежутки времени, когда изменения высоты Солнца незначительны. В дальнейших наших исследованиях, которые будут проводиться в августе 2019 г. на арх. Шпицберген совместно со специалистами Института Физики Атмосферы Российской Академии наук, мы посвятим этой проблеме более детальные эксперименты.

На рис. 4 представлены сравнительные результаты расчетов альbedo **припая** (морской лед, который образуется и остается неподвижным вдоль побережья, где он прикреплен к берегу) в районе станции Прогресс (январь 2018 г.) по данным БПЛА с использованием расположенного на нем датчика отраженной солнечной радиации

и фоторегистрирующего устройства. Основные особенности антарктического припая в период максимальной инсоляции (январь) обусловлены присутствием на его поверхности **снежиц** (скопление на льду талой воды, главным образом, благодаря таянию снега, а на более поздних стадиях вследствие таяния льда), **торосистых образований** (сравнительно прямолинейные нагромождения битого льда, образовавшегося в результате сжатий в предшествующий зимний период) и участков **обсохшего льда** (участки припая, с поверхности которого исчезли снежицы в результате образования трещин и проталин, поверхность льда белеет). Рис. 4а и 4б характеризуют участки припая, где относительно ровная поверхность была занята, в основном, снежицами и участками уже обсохшего льда. При этом относительная площадь этих объектов на исследуемом участке припая менялась незначительно. Наблюдается относительно небольшой разброс оценок альbedo, полученных по методике (вычисленное) и по данным актинометрических датчиков, установленных на БПЛА и на льду (наблюденное). Обращает на себя внимание слабая зависимость обеих оценок при изменении высота полета (см. рис. 4б), что подтверждает

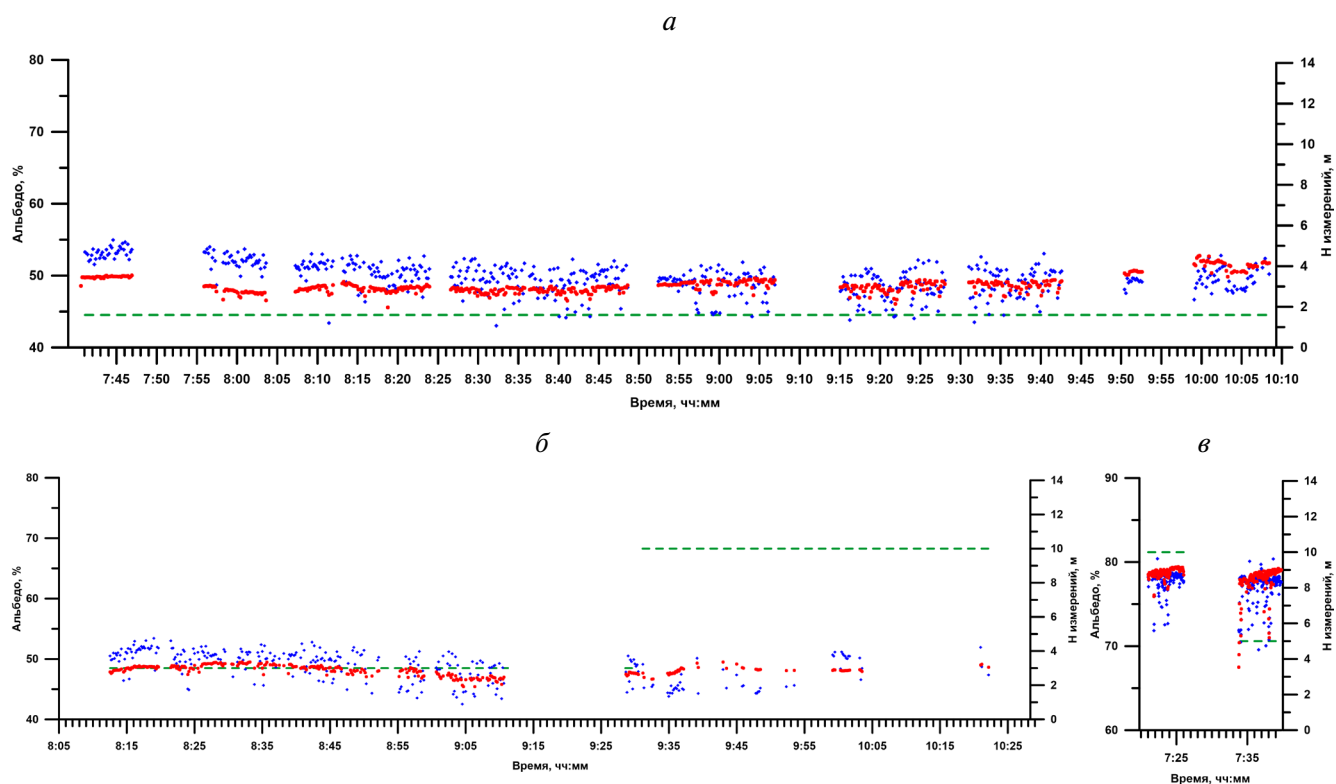


Рис. 4. Альbedo припая.

● ● ● А наблюдаемое ◆ ◆ ◆ А вычисленное — — — Высота наблюдений
 а — облачность 10 баллов; б — ясно; в — переменная облачность.

наши сведения об относительно равномерном (неизменном) по пространству распределении относительных площадей, занятых снежницами и обсохшим льдом. При этом максимальные значения (55%) соответствуют более светлым участкам (обсохший лед), а минимальные (45%) — снежницам. На рис. 4в представлен участок припая, где снежницы отсутствовали, а на поверхности присутствовал слежавшийся, плотный снег и отдельные гряды торосов. Резкие скачки (понижения альбедо) наблюдаются при пересечении таких гряд, альбедо которых, по данным наших «*in situ*» измерений в Арктике ниже, чем соседние участки ровного льда (Иванов, Андреев, 2011; Андреев и др., 2011).

Известно, что распределение снежниц и торосов на поверхности ледяного покрова может быть как «закономерным» (например, снежницы, часто

формируются вблизи гряд торосов, поскольку именно в этих зонах фиксируются наклоны поверхности льда, обусловленные сжатиями и последующим торосением), так и «случайным» (относительно ровная поверхность однолетнего или многолетнего льда). Таким образом, вклад индивидуальных участков поверхности (с повышенной или пониженной концентрацией снежниц или торосов) в средневзвешенное альбедо (рассчитанное с учетом удельного вклада таких участков) будет разным, поскольку с повышением высоты полета БПЛА будет изменяться относительная (в сравнении с общей площадью обзора датчиком) доля таких участков. Эти методические работы будут предметом наших ближайших запланированных исследований в Арктическом бассейне.

Результаты измерений альбедо ВПП и ледникового купола представлены на рис. 5.

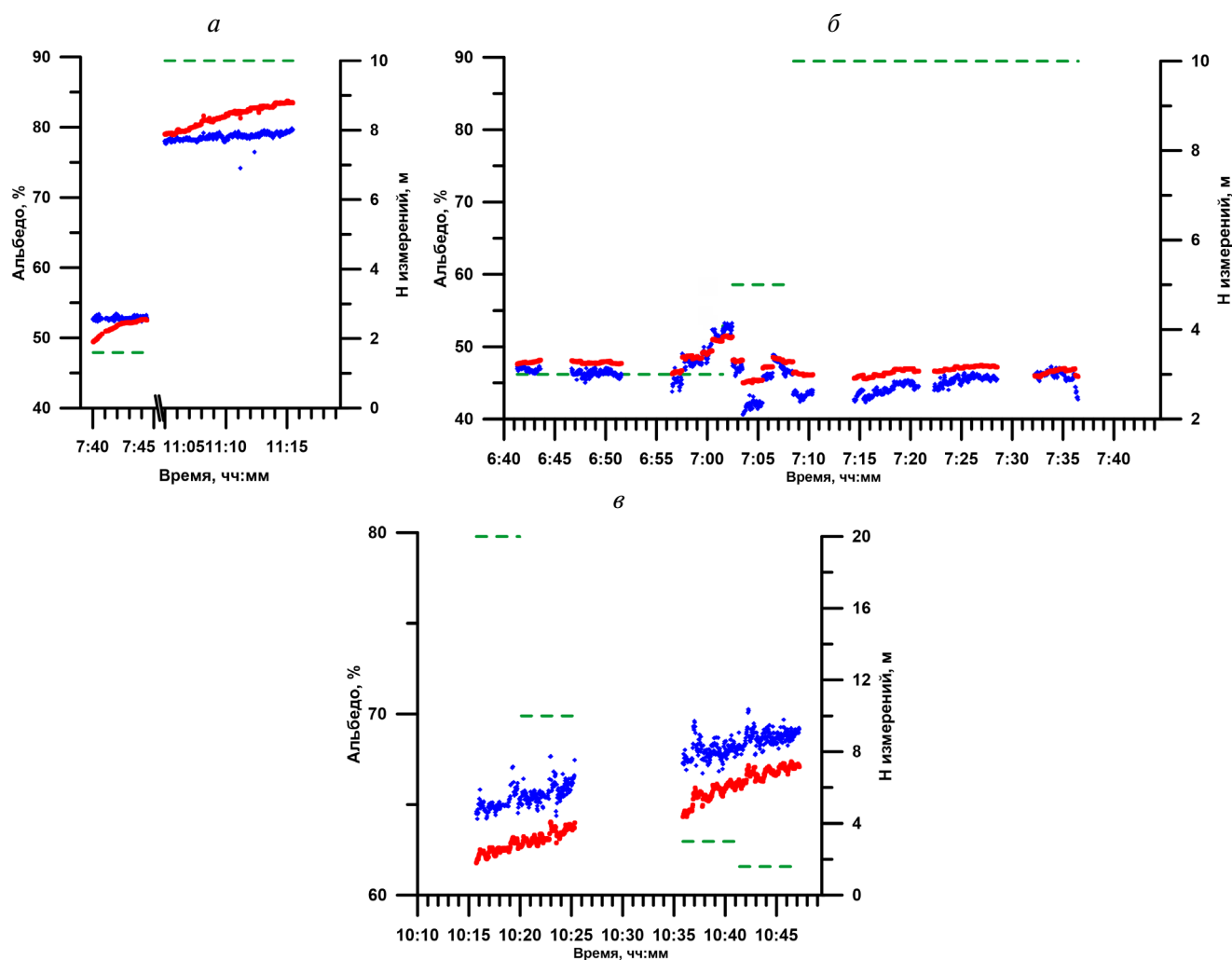


Рис. 5. Альбедо ВПП и невозмущенного участка ледникового купола.

● ● ● А наблюдаемое ◆ ◆ ◆ А вычисленное — — — Высота наблюдений

a — ясно, штиль; *b* — переменная облачность, ветер более 5 м/с; *v* — ясно, 5 м/с.

На рис. 5а представлен фрагмент полета над подготовленной ВПП (работа спецтехники по выравниванию и рыхлению полосы) в сравнении с полетом над невозмущенной поверхностью ровного ледникового купола с однородным фирновым покрытием (фирн — снег в состоянии термического метаморфизма). Как следует из полученных результатов, величины альbedo, для обоих участков, рассчитанные различными способами близки между собой. Однако альbedo ВПП значительно меньше, что обусловлено нарушением естественного микрорельефа поверхности купола, и формированием искусственной более взрыхленной поверхности. Это приводит к увеличению поглощения солнечной радиации и уменьшению доли отраженной, что и приводит к уменьшению альbedo. На рисунке 5б и 5в представлены результаты исследования альbedo ВПП, выполненные на разных высотах и при более сложных ветровых условиях. Разброс значений по сравнению с предыдущим экспериментом возрос, что обусловлено ветровыми нагрузками на БПЛА, но изменение высоты полетов, в целом, не привело к заметным изменениям величин альbedo. Интересным и важным объектом исследований являются зоны трещин, формирующиеся на окраинах ледниковых куполов. В таких зонах проведение наземных наблюдений чрезвычайно опасно и практически невозможно. Но именно трещины являются «ловушками» для наклонных солнечных лучей и альbedo таких участков, в принципе, должно быть ниже по сравнению с соседними относительно ровными

участками купола. В районе станции Прогресс в течение нескольких дней были осуществлены полеты над зонами трещин (ширина последних, порядка 10–20 см) в условиях разной освещенности и над участками купола с различным уровнем загрязнения поверхности снега естественными источниками (ветровой перенос с соседних открытых участков горных пород).

Как можно видеть из первого графика, при пролетах над трещинами, как правило, альbedo уменьшается, что может быть вызвано только уменьшением отраженной радиации при неизменной величине приходящей. Аналогичная картина наблюдалась и на следующий день при иных условиях освещения (см. рис. 6б). Некоторое увеличение значений альbedo при снижении высоты полета, связано с нахождением БПЛА над участками менее загрязненного снега. На этом участке было зафиксировано, как минимум, пять трещин, которые практически не были заметны с уровня поверхности.

ВЫВОДЫ

1. Проведенные испытания подтвердили работоспособность разработанной ранее методики оценки альbedo (Журавский и др., 2018). Фактически, зная величины приходящей солнечной радиации для заданной местности и спектрально-го диапазона фоторегистрирующего устройства, можно получать оценки альbedo подстилающей поверхности на основании только лишь данных фотоснимков.

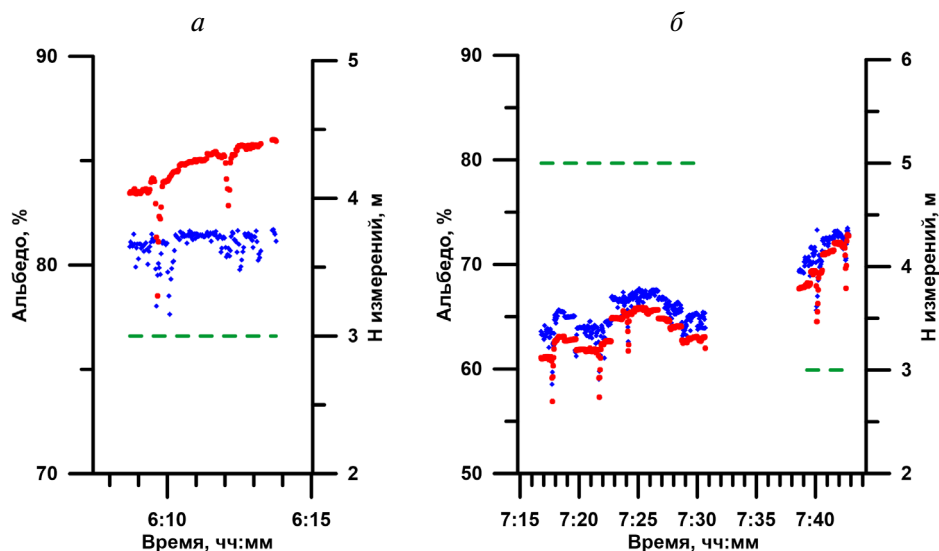


Рис. 6. Альbedo краевой зоны ледникового купола в районе трещин.

● ● ● А наблюдаемое ◆ ◆ ◆ А вычисленное — — — Высота наблюдений

а — ясно, штиль, свежий снег; б — сплошная облачность, ветер 2–4 м/с, загрязненный снег.

2. Расчеты величин альbedo двумя способами дали весьма близкие результаты, различия между которыми не превышают погрешности определения альbedo стандартным путем.

3. Использование БПЛА, одновременно оснащенного актинометрическими датчиками и фоторегистрирующими устройствами, продемонстрировало высокую производительность таких работ и перспективность подхода для исследования отражательных свойств подстилающих поверхностей, где проведение стандартных измерений практически невозможно в первую очередь из-за условий безопасности.

4. Эксперименты позволили выявить основные слабые места сконструированного авторами измерительного устройства, связанные с избыточным световым потоком, который не позволяет корректно регистрировать метаданные и оценивать яркость способом оценки экспозиционных индексов. При этом найден способ анализа сопутствующих данных, позволяющий в подобных экстремальных условиях компенсировать нехватку данных об экспозиции.

5. На основании опытной эксплуатации сделан вывод о необходимости применения нейтральных серых фильтров, сокращающих световой поток и позволяющих не достигать технических пределов оборудования при экспонировании снимков.

6. Дальнейшее направление наших исследований будет связано с разработкой методики автоматического анализа яркости самого растрового изображения и ее нормирования на среднюю яркость снимка, усовершенствованием автоматических методов сбора и обработки информации, разработкой и проведением испытаний усовершенствованного образца измерительного блока на базе квантового датчика, фотокамеры и ИК-термометра.

7. С точки зрения методики, необходимо исследовать высотную зависимость величин альbedo при сканировании неоднородных участков поверхности, когда относительный вклад отдельных структур (снежицы, торосы и т.п.) изменяется по пространству, а также возможностей масштабирования информации на основании фрагментов снимков.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую признательность руководству 63 Российской Антарктической Экспедиции и всему коллективу антарктической станции «Прогресс» (начальник А. Воеводин) за постоянную помощь и поддержку при проведении научных экспериментов.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18–05–00471_а «Термодинамика торосов — новый взгляд на теплообмен между атмосферой и ледяным покровом в Арктике. Натурные эксперименты, моделирование», в рамках ЦНТП Росгидромета 1.5.6.1 «Исследования режимно-климатических характеристик Антарктики и Южного океана».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Андреев О.М., Иванов Б.В., Безгрешнов А.М. Особенности перераспределения солнечной радиации в торосах Арктического бассейна // *Метеорология и гидрология*. 2011. № 1. С. 58–63.

Журавский Д.М., Иванов Б.В., Куприков Н.М., Доронин Д.О. Перспективы дистанционного измерения интегрального альbedo и альbedo в ФАР-диапазоне при помощи фоторегистрирующих устройств / *Международная молодежная научная конференция «Папанинские чтения». Сборник статей участников международной молодежной научной конференции САФУ. Архангельск: Изд-во САФУ, 2017, с. 863.*

Журавский Д.М., Иванов Б.В., Кашин С., Куприков Н.М. Способ дистанционной оценки альbedo при помощи фоторегистрирующего оборудования // *Исследование Земли из космоса*. 2018. № 1. С. 52–59.

Иванов Б.В., Андреев О.М. К вопросу об определении альbedo торосистого образования // *Метеорология и гидрология*. 2011. № 6. С. 78–83.

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

Каценеленбоген Э.Д. Фотокинетика: энциклопедия / Под. ред. Е.А. Иофис. М.: Советская энциклопедия, 1981. 447 с.

Коптев А.П. Методика актинометрических наблюдений с самолета в Арктике // *Тр. ААНИИ*. 1962. Т. 239. С. 25–31.

Прохорова У.В., Куприков Н.М., Журавский Д.М., Иванов Б.В. Использование БПЛА для исследования альbedo снежно-ледовых поверхностей Антарктиды / *Сборник тезисов Международной молодежной конференции по полярной геодезии, гляциологии, гидрологии и геофизики*. СПб.: ГНЦ РФ ААНИИ, 17–19.05.2018, с. 33.

Радионон В.Ф., Брызгин Н.Н., Александров Е.И. Снежный покров Арктического бассейна. СПб: Гидрометеиздат, 1996. 124 с.

Тимерев А.А. Отражательные свойства подстилающей поверхности полярных районов // *Тр. ААНИИ*. 1976. Т. 328. С. 106–115.

Черниговский Н.Т., Маршунова М.С. Климат Советской Арктики (радиационный режим) / Л.: Гидрометеиздат, 1965. 198 с.

Руководство гидрометеорологическим станциям по актинометрическим наблюдениям / Под. ред. Гушина Г.П., Барашковой Е.П. Л.: Гидрометеиздат, 1998, 265 с.

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

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

LI-190SA Quantum Sensor instruction Manual, Revision 3/08, Campbell Scientific, 2008.

<http://www.dxomark.com/Cameras/Nikon/D610---Measurements>

Field Tests of Photogrammetric Evaluation Technique of Snow-Glacial Surface Albedo

D. M. Zhuravskiy¹, U. V. Prokhorova¹, B. V. Ivanov^{1, 2}, A. S. Yanjura¹, N. M. Kuprikov^{3,4},
M. V. Kurapov³

¹ State Science Center RF "Arctic and Antarctic Research Institute", Saint Petersburg, Russia

² Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

³ Noncommercial autonomous organization "Polar Initiative", Moscow, Russia

⁴ Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

The article discusses the results of applying in Antarctica an original technique for estimating albedo from photogrammetric data and exposure parameters by an unmanned aerial vehicle (UAV). The complexities of the photogrammetric observations under extreme conditions are considered. Conclusions are drawn on ways to improve the recording equipment and the direction of improving the technique for calculating albedo values based on photogrammetric materials and metadata.

Keywords: albedo, remote methods, solar radiation, exposure metering, photogrammetric

REFERENCES

Andreev O.M., Ivanov B.V., Bezgreshnov A.M. Osobennosti pereraspredeleniya solnechnoi radiatsii v torosakh Arkticheskogo basseina [Features of the redistribution of solar radiation in the hummocks of the Arctic basin] // Meteorologiya i gidrologiya. 2011. № 1. P. 58–63. (In Russian).

Chernigovskii N.T., Marshunova M.S. Klimat Sovetskoj Arktiki (radiatsionnyi rezhim) [Climate of the Soviet Arctic (radiation regime)] / L.: Gidrometeoizdat, 1965, 198 p. (In Russian).

Il'inskii I. Zonnaya sistema eksponirovaniya [Zone exposure system] // Fotomagazin. 1998. № 1–2. P. 94–98.

Ivanov B.V., Andreev O.M. K voprosu ob opredelenii al'bedo torosistogo obrazovaniya [On the question of determining the albedo of hummock formations] // Meteorologiya i gidrologiya. 2011. № 6. P. 78–83. (In Russian).

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

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

Katsenelenbogen E.D. Fotokinotekhnika: entsiklopediya [Photo cinematographic technique: encyclopedia] / Ed. E.A. Iofis. M.: Sovetskaya ehntsiklopediya, 1981. 447 p. (In Russian).

Koptev A.P. Metodika aktinometricheskikh nablyudenii s samoleta v Arktike [Methods of actinometric observations from an airplane in the Arctic] // Tr. AANII. 1962. T. 239. S. 25–31. (In Russian).

LI-190SA Quantum Sensor instruction Manual, Revision 3/08, Campbell Scientific, 2008.

<http://www.dxomark.com/Cameras/Nikon/D610---Measurements>

Prokhorova U.V., Kuprikov N.M., Zhuravskii D.M., Ivanov B.V. Ispol'zovanie BPLA dlya issledovaniya al'bedo snezhnoledovykh poverkhnostei Antarktity / Sbornik tezisov Mezhdunarodnoi molodezhnoi konferentsii po polyarnoi geodezii, glyatsiologii, gidrologii i geofiziki [The use of UAVs for the study of the albedo of the snow-ice surfaces of Antarctica / Collection of theses of the International Youth Conference on Polar Geodesy, Glaciology, Hydrology and Geophysics]. SPb.: GNTs RF AANII, 17–19.05.2018, P. 33. (In Russian).

Radionov V.F., Bryazgin N.N., Aleksandrov E.I. Snezhnyi pokrov Arkticheskogo basseina [Snow cover of the Arctic basin]. SPb.: Gidrometeoizdat, 1996. 124 p. (In Russian).

Timerev A.A. Otrazhatel'nye svoistva podstilayushchei poverkhnosti polyarnykh raionov [The reflective properties of the underlying surface of the polar regions] // Tr. AANII. 1976. V. 328. P. 106–115. (In Russian).

Rukovodstvo gidrometeorologicheskimi stantsiyami po aktinometricheskimi nablyudeniyami [Guide to hydro-meteorological stations on actinometric observations] / Ed. Gushchin G.P., Barashkova E.P. L.: Gidrometeoizdat, 1998, 265 p. (In Russian).

Zhuravskii D.M., Ivanov B.V., Kashin S., Kuprikov N.M. Sposob distantsionnoi otsenki al'bedo pri pomoshchi fotoregistriruyushchego oborudovaniya [Method for remote estimation of albedo using photo-recording equipment] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2018. № 1. P. 52–59. (In Russian).

Zhuravskii D.M., Ivanov B.V., Kuprikov N.M., Doronin D.O. Perspektivy distantsionnogo izmereniya integral'nogo al'bedo i al'bedo v FAR-diapazone pri pomoshchi fotoregist-

riruyushchikh ustroystv / Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konferentsiya «Papaninskie chteniya». Sbornik statei uchastnikov mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii SAFU [Prospects for the remote measurement of the integral albedo and albedo in the FAR-range using photo-registering devices / International Youth Scientific Conference “Papanin Readings”. Collection of articles of participants of the international youth scientific conference NArFU]. Arkhangel'sk: Izd-vo SAFU, 2017, P. 863. (In Russian).