

---

---

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ  
ЛЕДОВОГО ПОКРОВА АРКТИКИ

---

---

АЛЬБЕДО СНЕЖНО-ЛЕДНИКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ  
АРХИПЕЛАГА ШПИЦБЕРГЕН

© 2015 г. Б. В. Иванов\*, П. Н. Священников

Государственный научный центр “Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт”,  
Санкт-Петербург, Россия

Санкт-Петербургский государственный университет, Россия

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

Поступила в редакцию 20.05.2014 г.

В статье обсуждаются результаты измерений альbedo снежно-ледниковой поверхности арх. Шпицберген на примере ледника Альдегонда (район зал. Грен-фьорд) и в окрестности российского пос. Баренцбург, выполненные в последние годы, включая полевую фазу III Международного Полярного года. Анализируются пространственная и временная изменчивость альbedo и его взаимосвязь с естественным и антропогенным загрязнением поверхности.

**Ключевые слова:** Арктика, Шпицберген, альbedo, загрязнение поверхности

**DOI:** 10.7868/S0205961415040041

Спутниковые методы дистанционного зондирования земной поверхности (ДЗЗ) основаны на анализе электромагнитного излучения, которое в случае пассивного зондирования либо излучается собственно объектом исследований, либо является отражением солнечного излучения (Смирнов, 2011). Собственное электромагнитное излучение в атмосфере частично поглощается и рассеивается водяным паром, двуокисью углерода и пр. Часть его поглощается поверхностью или теряется при отражении от нее. При дистанционном исследовании величины альbedo (от лат. *albus* — белый) как правило используются ультрафиолетовый (УФ), видимый и ближний инфракрасный (ИК) диапазоны электромагнитного спектра. При этом в УФ-области наиболее важен диапазон 320–400 нм, в котором солнечное излучение не поглощается кислородом и озоном. Наиболее часто при ДЗЗ используется видимый диапазон (400–800 нм). В то же время в полярных районах использование результатов зондирования в видимом диапазоне для изучения подстилающей поверхности (морской лед, снежно-ледниковые покровы арктических островов и архипелагов) ограничено светлым временем суток (полярный день) и относительно ясной (минимум облачности) погодой.

В климатических исследованиях и теплобалансовых расчетах используются интегральное (300–3000 нм) и спектральное альbedo, получаемое для определенной длины волны. Последнее обстоятельство чрезвычайно важно, поскольку элементы загрязнения поверхности снега и льда

антропогенного (“черный карбон” — двуокись углерода) и естественного происхождения (частицы минерального и биологического происхождения) обладают селективным характером поглощения и могут успешно определяться методами ДЗЗ. Тем более что влияние загрязнения снежной поверхности вблизи крупных хозяйственных объектов в Арктике (порты, ТЭЦ, поселки, объекты нефтегазодобывающей отрасли и пр.) распространяется на десятки километров вокруг (Демин и др., 2011).

Отражательная способность снежно-ледниковых поверхностей имеет принципиальную спектральную зависимость (Winther et al., 2003). При этом один и тот же тип поверхности (например свежеснеживший снег) будет иметь разное альbedo в различных частях спектра (Смирнов, 2011). В коротковолновой части видимой области спектра оно максимально, а в ближней ИК-области минимально. Одной из основных причин сезонных изменений альbedo в Арктике являются изменчивость метаморфической структуры снежно-ледяной поверхности (Александров и др., 1996).

Корректные оценки альbedo в полярных областях Земли, в первую очередь морских льдов и ледниковых покровов, чрезвычайно важны для оценки возможных климатических изменений. По мнению ряда отечественных и зарубежных исследователей, положительные обратные связи, такие как “альbedo–приземная температура воздуха”, генерируют и поддерживают так называемый механизм “Арктического усиления”. Таким образом, мониторинг отражательных характеристик снежно-ледниковых поверхностей на раз-

личных пространственных масштабах чрезвычайно важен и невозможен без использования средств и методов ДЗЗ. Подобные наблюдения в первую очередь необходимы для верификации снимков искусственных спутников Земли (ИСЗ) малого и среднего разрешения. К таковым относятся спутники Terra и Aqua, имеющие в качестве средства измерений спектрорадиометр MODIS, а также ИСЗ “Метеор-М № 1”, Landsat-5,7, “Ресурс-ДК” и ряд других (Смирнов и др., 2011). Упомянутые ИСЗ позволяют получать информацию об отражательных характеристиках поверхности в разных диапазонах видимой и ИК-областей спектра с пространственным разрешением от 1 до 1000 м. Для качественной верификации данных ДЗЗ необходимо проведение детальных и регулярных наземных измерений альbedo (ground true measurements) в различных спектральных диапазонах (Winther et al., 1999, 2001).

Площадь ледниковых покровов арктических островов, а также площадь их снежного покрова и продолжительность его залегания в совокупности являются значимыми индикаторами климатических изменений. В этом аспекте ледники и снежный покров арх. Шпицберген, по сравнению с другими арктическими о-вами, являются, безусловно, наиболее изученными (Winther et al., 2003). Одним из наиболее важных результатов этих исследований является заключение об устойчивом сокращении площади ледников архипелага, начиная с 30-х годов XX в. Основные причины этого процесса связаны с воздействием как адвективных, так и радиационных факторов изменения климата. По-видимому, во взаимодействии этих механизмов и следует искать причины современного состояния ледниковых и снежных покровов архипелага и тенденции их будущих изменений. При этом важную роль играет и собственно отражательная способность указанных выше поверхностей.

Как известно, радиационный баланс ледниковой поверхности определяется не только величиной приходящей коротковолновой солнечной радиации, которая определяется астрономическими факторами, влажностью атмосферы, наличием различных газовых компонент и влиянием облачности, но и собственно отражательной способностью подстилающей поверхности. Более того, альbedo является важной характеристикой для определения поглощенной коротковолновой радиации радиационно-активным слоем ледника, т.е. определяет долю абляции, обусловленную радиационными причинами.

Известно, что наиболее яркие по форме и значимые по содержанию процессы трансформации снежно-ледниковых покровов в Арктическом регионе происходят в весенне-летний период. Именно в это время, благодаря максимальной инсоляции и контактному теплообмену, наблюдается резкое уменьшение альbedo поверхности, а

процессы абляции становятся наиболее интенсивными. Уменьшение альbedo обусловлено не только процессами, происходящими непосредственно на поверхности, но и сложными процессами термического метаморфизма, протекающими в активном слое снега или льда и обусловленными проникновением солнечной радиации (Тимерев, Назаров, 1988). Альbedo такой поверхности, в течение многих месяцев оставаясь квазипостоянным и максимальным, за очень короткий интервал времени резко уменьшается по величине (Winther et al., 2003). Именно в этот период наблюдается максимальная скорость абляции, при этом вклад радиационных и адвективных факторов не остается постоянным. Кроме того, в Арктике в период таяния снега и льда особенно велики и не предсказуемы последствия естественного или антропогенного загрязнения поверхности. Однако загрязнения могут как усилить, так и ослабить процесс абляции. Уменьшение интенсивности абляции происходит при превышении уровня загрязнения поверхности определенной критической величины (поверхностной концентрации). В этом случае слой загрязнений на поверхности играет роль своеобразного защитного экрана (протектора), существенно замедляющего таяние (Песчанский, 1969; Ivanov et al., 2004).

Как известно (Александров и др., 1996), альbedo подстилающей поверхности зависит от ее структуры, времени суток, а также от ряда метеорологических факторов. На арх. Шпицберген долговременные наблюдения за альbedo поверхности суши (тундры) проводятся на научной станции Норвежского Полярного института в пос. Нью-Алесун (Winther et al., 2003). Однако наблюдения, выполненные на метеорологических площадках станций, дают представление о величинах альbedo, характерных для ограниченных (постоянных) участков поверхности в различные сезоны года. Маршрутные (профильные или площадные) наблюдения позволяют получить средние величины альbedo, характеризующие отражательные способности больших площадей.

Пространственные измерения альbedo (так называемые площадные съемки) до недавнего времени на арх. Шпицберген не проводились. Впервые это удалось осуществить на примере небольшого ледника Альдегонда, расположенного на западном побережье зал. Грен-фьорд (о-в Западный Шпицберген) в апреле 2005 г.

В отечественной практике для измерения альbedo естественной поверхности в полевых условиях использовался походный альбедометр, сконструированный на базе термоэлектрического пиранометра М-115М (Янишевский, 1957), измеряющего интенсивность солнечной радиации в диапазоне длин волн, равном, примерно, 300–3000 нм. При измерениях на склонах (ледники, склоны холмов, гор и т.п.) использовалась методика, предложенная в Арктическом и Ан-

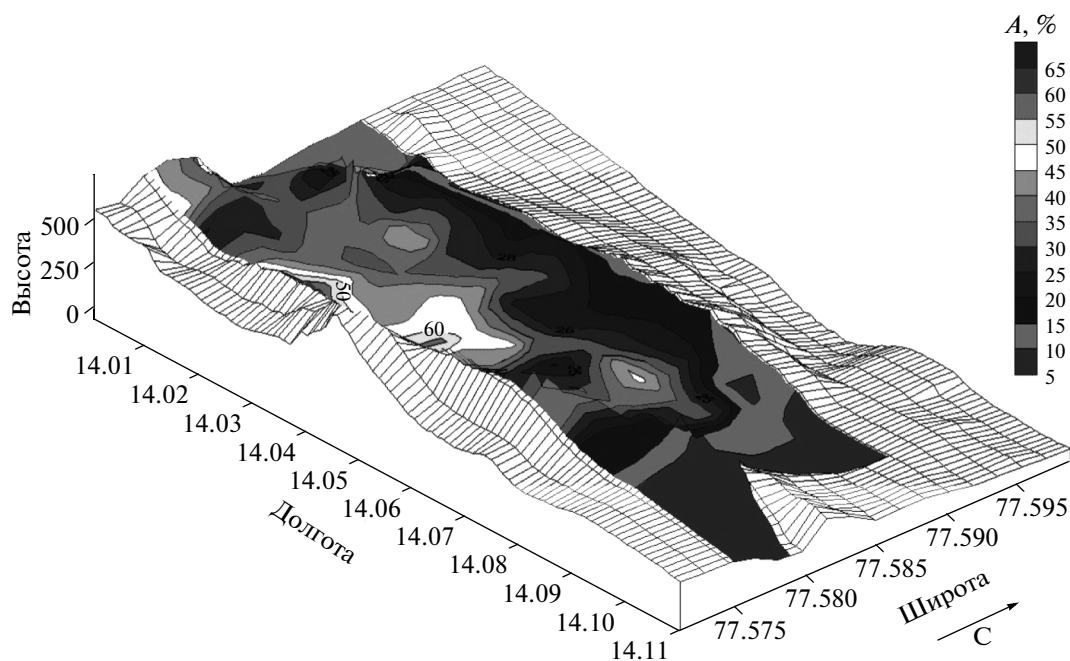


Рис. 1. Альbedo снежной поверхности ледника Альдегонда в период 16.04.2005–21.04.2005.

тарктическом научно-исследовательском институте (ААНИИ) (Иванов, Поляков, 2013). При исследовании взаимосвязи альbedo и искусственно загрязненных участков поверхности мы воспользовались практическими и методическими рекомендациями, изложенными в работе (Песчанский, 1967).

Площадные измерения альbedo, впервые проведенные на леднике Альдегонда, показали существенную пространственную и временную изменчивость этой характеристики. В апреле альbedo поверхности изменялось в пределах от 58 до 84% (рис. 1). Ледник в это время года полностью покрыт снегом, а признаки таяния снежного покрова, как правило, отсутствуют. Пространственное распределение альbedo в данном случае определяется рельефом поверхности ледника (азимутом склона), высотой окружающих ледник горных хребтов (как следствие, постоянное или временное затенение отдельных частей ледника), а также характером прихода солнечной радиации (изменение высоты солнца в течение суток).

В июле–августе пространственные изменения альbedo поверхности ледника были более значительны и составили порядка 5–65%. Причины заключаются в практически повсеместном таянии снежного покрова, вплоть до полного его исчезновения в нижней части ледника.

Как видно из рис. 2, минимальные величины альbedo (5%) наблюдаются в нижней части ледника, которая примыкает к конечной морене, где отмечается наибольшее загрязнение его поверхности обломочным материалом горных пород.

Также на величину альbedo влияют боковые морены на северной периферии ледника. Здесь сказывается не только присутствие значительного количества обломочного материала на поверхности льда, но и дополнительное отражение солнечной радиации от боковых поверхностей морены. Альbedo поверхности зависит от времени суток (высота солнца, затенение отдельных участков поверхности). Например, в околополуденное время альbedo открытых участков поверхности ледника на 20–40% меньше аналогичных величин, зафиксированных на затененных участках поверхности. На этих участках снежный покров в меньшей степени подвержен деструктивному термическому метаморфизму, обусловленному таянием (Грей, Мэйл, 1986). Здесь альbedo может достигать 65%.

Таким образом, альbedo поверхности ледника испытывает значительную пространственную и временную изменчивость в весенне-летний период, и это обстоятельство имеет большое значение для корректного расчета радиационного баланса поверхности, доли энергии солнца, затрачиваемой на нагрев и таяние на поверхности, а также на внутрислойное таяние, что непременно должно учитываться в современных математических моделях различного уровня разрешения.

Как уже указывалось выше, загрязнение снежно-ледниковых поверхностей оказывает существенное влияние на величину альbedo. В арктических условиях большое значение приобретает антропогенное (искусственное) загрязнение участков поверхности, – в особенности в окрест-

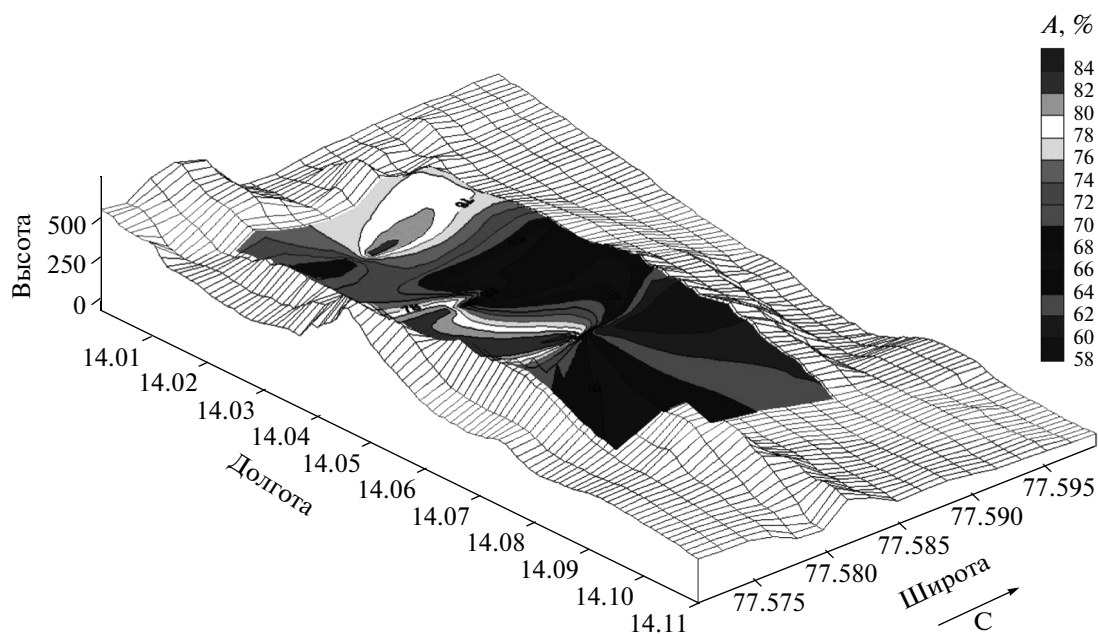


Рис. 2. Альbedo поверхности ледника Альдегонда в период 26.07.2005–15.08.2005.

ности поселков, где осуществляются в той или иной степени хозяйственная (добыча полезных ископаемых, строительство и т.п.) и другая деятельность (например туризм). Рассмотрим эти обстоятельства на примере российского шахтерского пос. Баренцбург, расположенного на восточном берегу зал. Грен-фьорд (о-в Западный Шпицберген). Известно (Песчанский, 1967; Иванов, 2003; Ivanov et al., 2004), что скорость таяния на загрязненных участках поверхности сложным образом зависит как от типа загрязняющего материала, так и от его поверхностной концентрации. Мы попытались повторить известные эксперименты (Песчанский, 1967), используя в качестве загрязняющего вещества угольную крошку, которая является основным элементом антропогенного загрязнения в окрестности шахтерского пос. Баренцбург. Площадки с различными концентрациями поверхностного напыления были подготовлены за пределами поселка, что позволило сравнить полученные результаты с альbedo фоновой (“чистой”) поверхности (см. рис. 3а).

При повышении концентрации поверхностного загрязнения альbedo закономерно уменьшается. При повторном (через 24 ч) измерении альbedo фоновое участка поверхности было зафиксировано заметное уменьшение ее отражательной способности, что свидетельствует в первую очередь об определенном изменении ее структуры. Последнее обстоятельство обусловлено известными процессами деструктивного (термического) метаморфизма кристаллов снега в результате оплавления под воздействием тепла солнечной радиации и контактного теплообмена с атмосфе-

рой (Грей, Мейл, 1986). В этих условиях нарушается правильная геометрическая форма снежных кристаллов, они приобретают округлую форму, увеличиваются в размере, между ними появляются водяные прослойки. Отражательная способность такой поверхности уменьшается. При этом основной вклад в уменьшении альbedo вносит уменьшение так называемого “альbedo толщи” (Тимерев, Назаров, 1988). Последнее определяется как отношение обратного потока рассеянной слоем снега солнечной радиации к суммарной солнечной радиации, поступающей на поверхность. При этом, как и в случае аналогичных экспериментов на припайных льдах в море Бофорта (Ivanov et al., 2004) и на Гималайских ледниках (Singh et al., 2010), абсолютные изменения (уменьшение) альbedo наиболее значительны при увеличении концентрации поверхностного загрязнения от 0 до 500 г/м<sup>2</sup>. Дальнейшее увеличение концентрации не приводит к значительному уменьшению альbedo. В нашем эксперименте максимальные изменения альbedo поверхности были зафиксированы при некоторой промежуточной, но не максимальной, концентрации угольной крошки. Величина этой критической концентрации составила 250 г/м<sup>2</sup>. Для сравнения: для условий загрязнения поверхности припая в море Бофорта (в качестве экспериментального материала использовалась прибрежная галька размером не более 5 мм), она составила 1000 г/м<sup>2</sup>, при этом дальнейшее увеличение поверхностной концентрации загрязняющих частиц способствовало уменьшению скорости таяния на поверхности припая примерно на 20% (Ivanov et al., 2004).

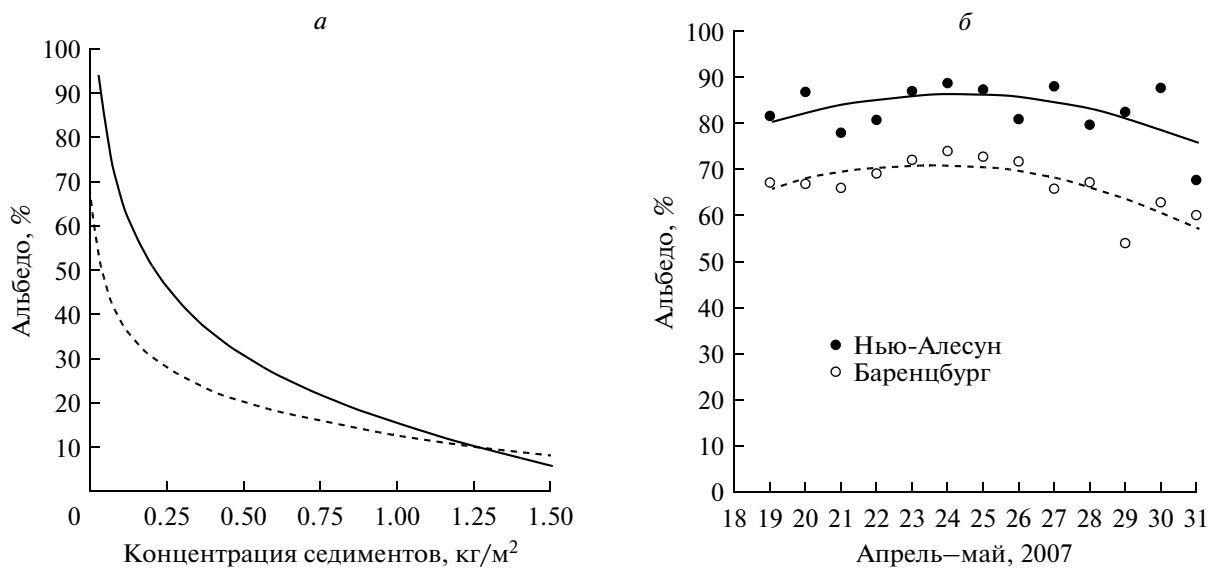


Рис. 3. Альbedo загрязненной снежной поверхности: *a* — изменение альbedo поверхности снега в зависимости от концентрации поверхностного загрязнения (сплошная линия — начальное состояние; пунктир — 24 ч спустя); *б* — альbedo снега в пос. Баренцбург и Нью-Алесун.

Качественно аналогичные результаты были получены и в работе (Песчанский, 1967). Различие в абсолютных значениях критической концентрации поверхностного загрязнения связано, в первую очередь с использованием разных по составу, цвету и размеру частиц.

Как указывалось выше, загрязнение поверхности снега в Арктике может быть обусловлено не только промышленной деятельностью, но и другими видами антропогенной нагрузки. Например, в ряде норвежских поселков архипелага в весенний период активно развивается туристическая деятельность, при которой основными источниками загрязнения выступают транспортные средства (снегоходы), и характер загрязнения поверхности (химический состав) при этом качественно меняется. На рис. 3б приводятся данные об альbedo поверхности снега в Баренцбурге (промышленное загрязнение) и Нью-Алесуне (туризм), полученные в рамках совместных измерений, выполненных в период Международного Полярного года 2007–2008 (Иванов и др., 2013). Сравнение величин альbedo снежного покрова в Баренцбурге, где активно ведется угледобывающая деятельность, с аналогичными величинами, характерными для норвежского пос. Нью-Алесун, где осуществляются, в основном, научные исследования и туризм, показало, что в среднем альbedo снега в диапазоне 300–3000 нм в Баренцбурге на 15–20% меньше, чем в Нью-Алесуне.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показали экспериментальные исследования, альbedo снежно-ледниковой поверхности испытывает значительные пространственно-вре-

менные вариации как в течение суток, так и в сезонном плане. Значительное влияние оказывает естественное загрязнение поверхности осадочным материалом, что в совокупности с суточным ходом (разный зенитный угол Солнца) и неравномерной затененностью отдельных участков ледника формирует сложную пространственно-временную картину распределения альbedo. Указанные обстоятельства необходимо учитывать при верификации снимков высокого и среднего разрешения, получаемых с ИСЗ.

Данные ИСЗ, получаемые в различных спектральных диапазонах, позволяют более детально определить ареал распространения, характер и интенсивность загрязнения снежно-ледниковых поверхностей в окрестности крупных промышленно-туристических объектов архипелага с учетом различного химического состава углеродных соединений (сажевый аэрозоль, угольные частицы с обогатительных предприятий, угольных отвалов, топливо различных типов и т.п.). Это дает возможность проводить детальный мониторинг указанных объектов.

Ледник Альдегонда можно рассматривать в качестве базового (тестового) полигона, учитывая данные, полученные на нем в течение ряда лет специалистами ААНИИ и Санкт-Петербургского государственного университета. Очевидно, что дальнейшую наблюдательскую программу необходимо расширить, концентрируя внимание на отдельных, характерных, участках ледника (зона фирнового питания, максимальной абляции, различных условий затененности, естественного загрязнения и т.п.), синхронизируя наземные наблюдения с орби-

тами, периодичностью съемок, шириной полосы обзора (съемки) соответствующих ИСЗ.

Необходимо продолжить натурные эксперименты, направленные на количественную и качественную оценки влияния антропогенного загрязнения на снежно-ледниковый покров арх. Шпицберген с учетом возможностей ИСЗ среднего и высокого разрешения. Это представляется крайне актуальным, учитывая известные драматические последствия антропогенных воздействий на хрупкую природу Арктических регионов (Загрязнение Арктики..., 1998), а также наблюдаемое современное потепление климата архипелага (Nordli et al., 2014).

Исследования выполнены при финансовой поддержке грантов РФФИ (проекты № 12-05-00780\_a, № 14-05-10065\_к), плановой тематики ЦНТП Росгидромета 1.5.3.3 и при финансовой поддержке Минобрнауки России при выполнении прикладных научных исследований и экспериментальных разработок по теме “Создание новых методов и средств мониторинга гидрометеорологической и геофизической обстановки на архипелаге Шпицберген и в Западной Арктической зоне Российской Федерации” (Соглашение о предоставлении субсидии от 20.11.2014 № 14.610.21.0006, уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI61014X0006).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александров Е.И., Брызгин Н.Н., Радионов В.Ф.* Снежный покров в Арктическом бассейне. СПб.: Гидрометеоздат, 1996. 124 с.
- Демин Б.Н., Граевский А.П., Демешкин А.С., Власов С.В., Крылов С.С., Лалетин Н.А.* Состояние тенденции загрязнения окружающей среды в местах хозяйственной деятельности российских предприятий на архипелаге Шпицберген (поселок Баренцбург и сопредельные территории) за период 2002–2010 гг. / Под ред. В.М. Шершакова. СПб.: ААНИИ, 2011. 316 с.
- Иванов Б.В.* Загрязнение морского льда и связанные с этим процессом оценки его альбедо // Тр. ААНИИ. 2003. Т. 446. С. 165–175.
- Иванов Б.В., Поляков С.П.* Некоторые результаты исследования отражательной способности торосов в центральной части Арктического бассейна // Тр. ГГО. 2013. Т. 569. С. 239–248.
- Иванов Б.В., Священников П.Н., Говорина И.А.* Влияние промышленного загрязнения окружающей среды в окрестности пос. Баренцбург (арх. Шпицберген) на радиационные свойства снежно-ледяного покрова и атмосферы // Уч. Зап. РГГМУ. 2013. № 32. С. 45–50.
- Песчанский И.С.* Ледоведение и ледотехника. Л.: Гидрометеоздат, 1967. 461 с.
- Тимерев А.А., Назаров В.Д.* Влияние метаморфизма снежно-ледяной среды на рассеивающие свойства радиационно-активного слоя ледников Северной Земли // Географические и гляциологические исследования в полярных странах / Под ред. Е.С. Короткевича. Л.: Гидрометеоздат, 1988. С. 61–69.
- Янишевский Ю.Д.* Актинометрические приборы и методы наблюдений. Л.: Гидрометеоздат, 1957. 415 с.
- Загрязнение Арктики. Доклады о состоянии окружающей среды Арктики. Программа арктического мониторинга и оценки (АМАП). СПб., 1998. 188 с.
- Снег. Справочник / Под ред. Г.М. Грея, Д.Х. Мейла (пер. с англ.). Л.: Гидрометеоздат, 1986. 752 с.
- Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова морей / Под ред. В.Г. Смирнова. СПб.: ААНИИ, 2011. 239 с.
- Ivanov B., Makshatas A., Sviashchennikov P., Andreev O.* Contamination of sea ice and related estimates of its albedo // Proc. Workshop “Arctic Climate Feedback Mechanisms”. Norw. Polar Ins., Tromsø, Norway, 17–19 November 2003. P. 57.
- Nordli Ø., Przybylak R., Ogilvie A.E.J., Isaksen K.* Long-term temperature trends and variability on Spitsbergen: the extended Svalbard Airport temperature series, 1898–2012 // Polar Res. 2014. V. 33. № 21349. <http://dx.doi.org/10.3402/polar.v33.21349>
- Singh S.K., Kulkarni A.V., Chaudhary B.S.* Hyperspectral analysis of snow reflectance to understand the effects of contamination and grain size // Ann. Glaciol. 2010. V. 51. № 54. P. 83–88.
- Winther J.-G., Bruland O., Sand K., Gerland S., Marechal D., Ivanov B., Glowacki P., Konig M.* Snow research in Svalbard – an overview // Polar Res. 2003. V. 22. № 2. P. 125–144.
- Winther J.-G., Gerland S., Orbaek J.-B., Ivanov B.V., Blanco A., Boike J.* Spectral reflectance of melting snow in a high Arctic watershed on Svalbard: some implications for optical satellite remote sensing studies // Hydrolog. Proc. 1999. V. 13. P. 2033–2049.
- Winther J.-G., Gerland S., Orbaek J.B., Ivanov B.V., Zachek A.S., Bezgreshnov A.M.* Effects on spectral reflectance from snow ageing // Memoirs Nat. Inst. Polar Res. 2001. V. 54. P. 193–201.

## Albedo of Snow-Glacier Surface of Svalbard

**B. V. Ivanov, P. N. Svyashchennikov**

*State Research Center “Arctic and Antarctic Research Institute”, Saint-Petersburg, Russia  
Saint-Petersburg State University, Russia*

The article discusses the results of albedo measurements of snow-glacier surface of Svalbard on example of Aldegonda glacier (Greenfjorden Bay) and surrounding area of Russian settlement Barentsburg, obtained in recent years including field phase of III International Polar Year. The spatial and temporal variability of the albedo and its relationship to surface contamination are analyzed.

**Keywords:** Arctic, Svalbard, albedo, surface contamination