

Спектральный состав отражённой и проникающей в глубь снежного покрова коротковолновой радиации в районе посёлка Баренцбург (Шпицберген)

© 2015 г. П.Н. Священников^{1,2}, А.В. Уразгильдеева^{1,2}, Ю.Н. Курочкин¹, Б.В. Иванов^{2,1}, К.В. Чистяков¹, D. Divin³, S. Hudson³

¹Санкт-Петербургский государственный университет; ²Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург; ³Норвежский Полярный институт, г. Тромсё
svyashchennikov@mail.ru

Spectral composition of shortwave radiation reflected and deep penetrating into snow near the Barentsburg settlement (Svalbard)

P.N. Svyashchennikov^{1,2}, A.V. Urazgildeeva^{1,2}, Y.N. Kurochkin¹, B.V. Ivanov^{2,1}, K.V. Chistyakov², D. Divin³, S. Hudson³

¹Sankt-Petersburg State University; ²Arctic and Antarctic Research Institute, Sankt-Petersburg; ³Norwegian Polar Institute, Tromsø

Статья принята к печати 19 февраля 2015 г.

*Баренцбург, спектральное альbedo снежной поверхности, Шпицберген.
Barentsburg, spectral albedo of snow surface, Svalbard.*

Представлены результаты измерений спектрального состава отражённой от снежной поверхности и проникающей вглубь коротковолновой радиации. Измерения выполнены с помощью спектрального радиометра TriOS Ramses в диапазоне длин волн 280–950 нм. Результаты измерений позволяют корректнее учитывать влияние антропогенного загрязнения на радиационные свойства снежного покрова в условиях хозяйственной деятельности, связанной с добычей и сжиганием угля в посёлке Баренцбург.

Data on spectral composition of shortwave radiation that is reflected from snow and penetrates deep into the snow cover obtained near the Barentsburg settlement (Svalbard) are discussed in the paper. Measurements were made by the use of the spectral radiometer TriOS Ramses within the wavelength range of 280–950 nm. The results will allow more proper taking account of the anthropogenic pollution effects on the radiative properties of snow cover under conditions of industrial activity related to the coal extraction and burning in Barentsburg.

Введение

Исследования спектральных свойств подстилающей поверхности крайне важны для изучения радиационного баланса поверхности, современных изменений климата, моделирования процессов энергомассообмена и ряда прикладных проблем. Данные о радиационных и теплофизических свойствах снежного покрова необходимы для разработки и верификации методов и алгоритмов дистанционного зондирования поверхности [11, 22–24]. В равной мере эти данные нужны и при моделировании радиационных процессов в климатических моделях [15]. Исследования особенностей проникновения солнечной радиации в подповерхностные слои снежного покрова имеют большое значение для изучения теплового и радиационного режима деятельного слоя снежного покрова и почвы, таяния снега и морского льда [7, 8, 12–15].

В арктическом регионе снежный покров играет важную роль при определении радиационного и теплового баланса поверхности [1]. Спектральные отражательные характеристики снежного по-

крова определяют интенсивность поверхностного и внутрислойного таяния, что приводит к «драматическому» изменению свойств подстилающей поверхности, что в свою очередь интенсифицирует процессы таяния (положительная обратная связь). Уменьшение альbedo снежного покрова в основном обусловлено процессами, происходящими непосредственно на его поверхности, включая последствия естественного и антропогенного загрязнения [5, 10, 16, 17, 19–21].

Последнее обстоятельство имеет большое значение для окружающей среды в районах активной промышленной и хозяйственной деятельности. Ярким примером могут служить территории и окрестности современных арктических посёлков. В данной статье мы рассматриваем условия, которые наблюдаются в районе российского шахтёрского посёлка Баренцбург, расположенного на архипелаге Шпицберген, где ведётся добыча угля и действует тепловая электростанция (ТЭЦ). Как показали исследования, в пос. Лонгиербюен, наряду с промышленным загрязнением, дополнительный источник углеродосодержащих частиц — увеличение числа снегоходов (туризм) [10, 19].

Данные и методы исследований

Здесь мы рассмотрим результаты, полученные в рамках двухстороннего научного сотрудничества с Норвежским Полярным институтом (НПИ) по проекту Международного полярного года 2007–2008 «Арктическое климатическое многообразие» («Arctic Climate Diversity», ARCDIV), который по инициативе норвежской стороны был продлён до 2013 г. Весной 2013 г. (с 21 апреля по 9 мая) здесь работала совместная экспедиция специалистов Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ), НПИ и Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ). Основная цель совместных исследований – оценка спектральных характеристик снежного покрова в посёлке Баренцбург и его окрестностях в зависимости от уровня и характера загрязнения снежной поверхности, а также в условиях меняющейся облачности.

Поставленная цель определила две задачи экспериментальных исследований: 1) измерение и последующий анализ спектрального состава проходящей, отражённой и проникающей в глубь снежного покрова солнечной радиации; 2) расчёт на основе полученных данных спектрального альбедо. Наблюдения за проходящей и отражённой солнечной радиацией велись в нескольких пунктах на территории посёлка и за его пределами. Пункты наблюдений выбирались в местах с различными источниками загрязнений снежного покрова. Так, точка наблюдений № 1 находилась в пос. Баренцбург на небольшом удалении от склада открытого хранения угля, точка № 2 – на окраине посёлка между метеорологической станцией и местной ТЭЦ, точка № 3 – на въезде в посёлок со стороны аэродрома. Снежный покров в окрестностях точек № 1 и 2 в основном загрязняется за счёт осадения продуктов горения угля и частиц угля, переносимых за счёт местной циркуляции воздуха со склада открытого хранения угля. В точке № 3 основной источник – осыпи горных пород на восточном склоне горы, а также осадение выбросов сжигания бензина: вдоль склона пролегает основная туристическая трасса следования снегоходов.

При исследовании использовали гиперспектральный радиометр «Ramses» (Германия), позволяющий измерять солнечную радиацию в

диапазоне 280–950 нм с разрешением 3 нм [18]. Измерения вели в соответствии с методиками, специально разработанными для гиперспектрального радиометра [18]. Наблюдения проводили комплектом из двух датчиков. Для оценки интенсивности солнечной радиации, проникающей в глубь снежного покрова, один из датчиков комплекса помещали в толщу снега на глубину от 3,5 до 7 см, а другой устанавливали над поверхностью. Датчик, установленный над поверхностью снега, при направлении вверх измерял проходящую коротковолновую радиацию, а при направлении вниз – отражённую снежной поверхностью коротковолновую радиацию. Наблюдения за коротковолновой радиацией дополнялись визуальными наблюдениями за количеством и типом облачности и состоянием диска Солнца. Это позволяло непрерывно регистрировать меняющиеся условия освещённости в зависимости от смены характеристик облачного покрова. Отметим, что установка датчика в глубь снежного покрова определялась необходимостью обеспечить прохождение коротковолновой радиации через однородный слой свежевыпавшего снега.

Для изучения влияния загрязнения снежного покрова на его отражательные характеристики проведён специальный эксперимент с искусственным загрязнением снежной поверхности частицами породы и последующей оценкой спектральных свойств этой поверхности. В результате наблюдений получены квазисинхронные серии измерений спектров суммарной, отражённой и проникающей в снег солнечной радиации при различных условиях облачности. Эти данные использованы для последующих оценок спектрального альбедо и проникающей в глубь снежного покрова радиации.

Результаты и обсуждение

Приходящая коротковолновая радиация измерялась при разных условиях облачности, что позволило оценить спектральный состав разных типов проходящей радиации: и рассеянной, и прямой. Как следует из рис. 1, спектры проходящей солнечной радиации, полученные при различных условиях облачности, имеют схожий вид и соответствуют характерным типам спектрального распределения суммарной радиации [6, 9]. Измерения показали, что изменяются только аб-

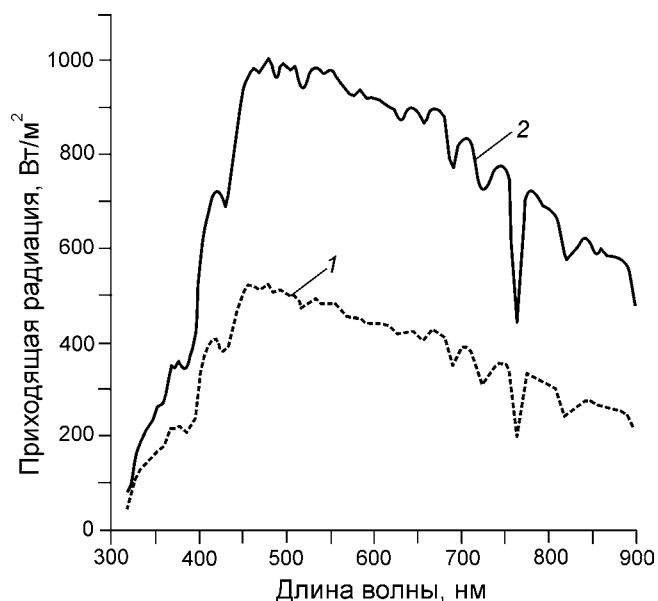


Рис. 1. Спектральный состав приходящей солнечной радиации при разных типах приходящей радиации: 1 – рассеянная радиация (облачность: 10/10 St), 2 – прямая и рассеянная радиация (облачность: 7/0 As, Cs)

Fig. 1. Spectral composition of the incoming solar radiation at various types of incoming radiation: 1 – diffuse radiation (cloudiness: 10/10 St), 2 – direct and diffuse radiation (cloudiness 7/0 As, Cs)

солютные значения приходящего излучения (в условиях прямой радиации они увеличиваются), а спектральный состав при этом не меняется. Максимальные значения у всех полученных спектров суммарной радиации приходятся на диапазон длин волн 480–500 нм. В диапазонах более коротких (320–450 нм) и более длинных (500–920 нм) волн соответствующие значения убывают. В спектре имеются два локальных минимума – на длинах волн 690 и 760 нм, соответствующих полосам поглощения кислорода [3].

Особенно интересны величины спектрального альbedo поверхности снега, рассчитанные по данным измерений приходящей и отражённой радиации. На рис. 2 представлены три кривые, описывающие спектральное альbedo снежной поверхности в условиях изменения характера приходящей солнечной радиации и при разной степени загрязнённости снежной поверхности. Кривые 1 и 2 описывают спектральное альbedo чистого свежеснежавшего снега; кривая 3 – при искусственном загрязнении снега частицами породы горного склона. Измерения, соответствующие кривой 1, вели при

плотной слоистой облачности, т.е. приходящая радиация была только рассеянная. Максимальное значение альbedo приходится на длину волны 719 нм и составляет 88%. В спектре для всех кривых присутствует локальный минимум на длине волны 800 нм, который обуславливается минимумом в спектре поглощения кислородом приходящей радиации области.

Кривая 2 характеризует альbedo в условиях приходящей рассеянной и прямой коротковолновой радиации. Максимальное значение альbedo (88%) наблюдается в ультрафиолетовой области спектра и приходится на длину волны 338 нм. Также видно монотонное, с одним локальным минимумом, уменьшение значений альbedo при изменении длины волны от ультрафиолетовой области до ближней инфракрасной области. Кривая 3 демонстрирует спектральное альbedo загрязнённой поверхности в условиях только рассеянной приходящей радиации. Ха-

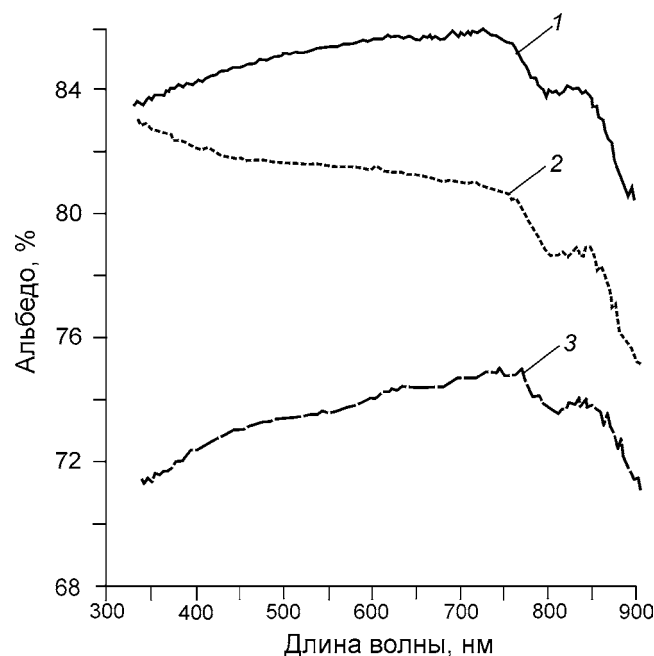


Рис. 2. Спектральное альbedo снежного покрова в зависимости от условий освещённости и степени загрязнения снежного покрова:

1 – рассеянная радиация (10/10 St; пасмурно), 2 – прямая радиация (7/0 As, Cs; ясно), 3 – загрязнённая снежная поверхность (10/10 St; пасмурно)

Fig. 2. Spectral albedo of snow cover, depending on the illumination conditions and degree of contamination of the snow cover:

1 – diffuse radiation (10/10 St; пасмурно), 2 – direct radiation (7/0 As, Cs; ясно), 3 – contaminated snow cover (10/10 St; пасмурно)

рактиер кривой аналогичен чистой снежной поверхности при данных условиях освещённости. Максимум альбедо (74%) смещён в красную область и приходится на длину волны 760 нм. Влияние загрязнения поверхности снежного покрова частицами породы приводит к монотонному уменьшению спектрального альбедо. Подобное изменение согласуется с лабораторными и модельными результатами исследования спектральных свойств углеродных частиц [2, 4]. Исследование влияния загрязнения, вызванного добычей и сжиганием угля, на интегральное альбедо, выполненное ранее, привело к аналогичным результатам [21].

Спектральное альбедо загрязнённой поверхности характеризуется монотонными изменениями величины альбедо на исследуемом участке спектра. Оптические свойства частиц, загрязняющих снежный покров, в результате своего монотонного изменения не позволяют выявить различия в типе загрязняющих частиц, будь то частицы угля антропогенного происхождения или частицы породы со склонов гор естественного происхождения. Спектральное альбедо в значительной степени зависит от морфометрических и теплофизических свойств снежного покрова. Во время спектральных измерений во всех точках наблюдался свежесвыпавший рыхлый снег, который ещё не начал таять и уплотняться. За счёт проникновения коротковолновой солнечной радиации снежный покров тает не только на поверхности, но и на глубине (внутрислоевое таяние). Исследования спектрального состава проникающей вглубь солнечной радиации позволили оценить величину ослабления проникающей радиации при различных её типах. На рис. 3 дан спектральный состав солнечной радиации, проникающей на глубину 6 см в толщу снега и отнесённой к приходящей радиации.

В данном случае поглощённая поверхностью снежного покрова приходящая радиация I_λ рассматривается как разность между приходящей и отражённой радиацией:

$$I_\lambda = (S_\lambda + D_\lambda) - R_\lambda,$$

где S_λ , D_λ и R_λ – соответственно прямая, рассеянная и отражённая радиация; λ – длина волны.

Таким образом, кривая 1 (см. рис. 3) описывает спектральный состав проникающей радиации в условиях отсутствия нижней облачности,

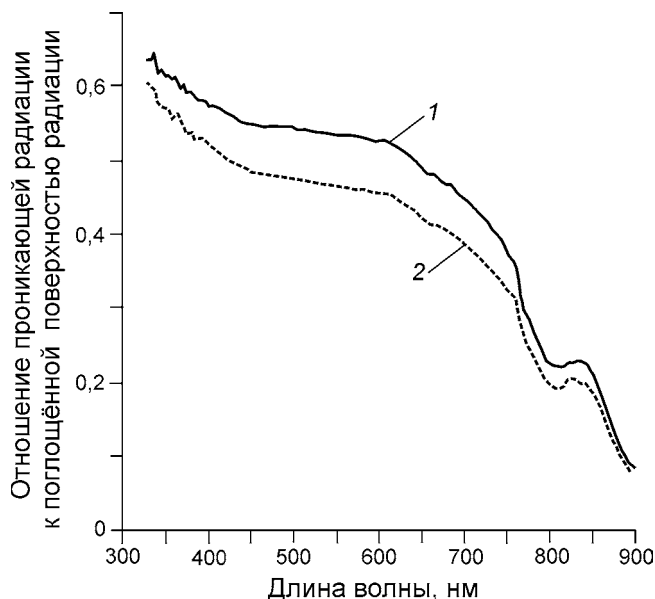


Рис. 3. Спектральный состав проникающей в снег радиации, нормированной на величину радиации, поглощённой снежной поверхностью:

1 – прямая и рассеянная радиация; 2 – рассеянная радиация

Fig. 3. The spectral composition of the radiation penetrates the snow normalized by the amount of radiation absorbed by the snow surface radiation:

1 – direct and diffuse radiation; 2 – diffuse radiation

т.е. при прямой и рассеянной радиации (облачность: 7/0 As, Cs), диск Солнца открыт; кривая 2 – при рассеянной радиации (облачность: 8/7 St), диск Солнца просвечивает сквозь облака. Как показывают результаты измерений, величина поглощённой слоем снега радиации существенно зависит от длины волны. Так, на глубину 6 см проникает более 60% ультрафиолетовой радиации, пришедшей на поверхность, тогда как в ближней инфракрасной области проникает только 10%. Отметим, что рассеянная радиация на всём исследуемом диапазоне длин волн ослабляется на 5–10% больше, чем прямая и рассеянная. Спектральная зависимость проникающей радиации позволяет корректно оценить процессы радиационного таяния снежного покрова.

Выводы

Полученные результаты представляют определённый интерес при изучении радиационных свойств снежного покрова в условиях интенсификации и расширения хозяйственной и культурной (туризм) деятельности в районе россий-

ского пос. Баренцбург. Загрязнение поверхности снежного покрова частицами породы приводит к общему уменьшению альбедо в видимой и ближней инфракрасной области спектра, одинаковому на всех длинах волн. Поскольку оптические свойства частиц антропогенного и естественного происхождения в исследуемой области спектра не имеют характерных полос поглощения, оценки антропогенного загрязнения, выполненные с помощью спектральных измерений отражённой радиации в видимой и ближней инфракрасной области, могут оказаться завышенными.

Спектральное альбедо снежной поверхности (селективные изменения) в большей степени обусловлено характером приходящей солнечной радиации при одинаковом состоянии снежного покрова, чем загрязнением его поверхности. Загрязнение поверхности вызывает уменьшение величины отражённой радиации на всех длинах волн. Интенсивность уменьшения возрастает с ростом концентрации загрязняющих частиц. Интенсивность проникновения в глубь снежного покрова солнечной радиации существенным образом зависит от длины волны. Максимальные значения (60%) наблюдаются в ультрафиолетовой части спектра, монотонно уменьшаясь до величины, равной 10% в инфракрасной части спектра. Учёт подобной зависимости, а также влияния облачности позволяет получить корректную оценку радиационного таяния снежного покрова.

Исследования выполнены при финансовой поддержке грантов РФФИ (проекты № 12-05-00780_а, № 14-05-10065_к), проекта ARCDIV (сотрудничество с Норвежским Полярным институтом), плановой тематики ЦНТП Росгидромета 1.5.3.3 и при финансовой поддержке Минобрнауки России 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).

Литература

1. Александров Е.И., Брызгин Н.Н., Радионов В.Ф. Снежный покров в Арктическом бассейне. СПб.: Гидрометеиздат, 1996. 124 с.
2. Андреев С.Д., Ивлев Л.С. Моделирование оптических характеристик аэрозолей приземного слоя атмосферы в области спектра 0,3–15 мкм. Ч. 3. Результаты моделирования // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 8. С. 1236–1243.
3. Атмосфера: Справочник / Под ред. Ю.С. Седунова, С.И. Авдюшина, Е.П. Борисенкова, О.А. Волковицкого, Н.Н. Петрова, Р.Г. Рейхтенбаха, В.И. Смирнова, А.А. Черникова. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 510 с.
4. Васильев А.В., Ивлев Л.С., Кугейко М.М., Лысенко С.А., Терехин Н.Ю. Оценка точности контрольных измерений в задачах оптической диагностики микрофизических параметров аэрозоля // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22. № 9. С. 873–881.
5. Иванов Б.В. Оценка естественного и антропогенного загрязнения морского льда // МГИ. 2007. Т. 102. С. 121–126.
6. Кондратьев К.Я. Актинометрия. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 693 с.
7. Красс М.С., Мерзликин В.Г. Радиационная теплофизика снега и льда. М.: Наука, 1987. 261 с.
8. Осокин Н.И., Самойлов Р.С., Сосновский А.В. Влияние снежного покрова на теплообмен с подстилающей поверхностью // Оледенение Северной Евразии в недавнем прошлом и ближайшем будущем / Под ред. В.М. Котлякова. М.: Наука, 2007. С. 15–54.
9. Радиационные характеристики атмосферы и земной поверхности / Под ред К.Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 564 с.
10. Священников П.Н., Иванов Б.В., Говорина И.А. Влияние промышленного загрязнения окружающей среды в окрестности пос. Баренцбург (арх. Шпицберген) на радиационные свойства снежно-ледяного покрова и атмосферы // Ученые записки РГГМУ. 2013. № 31. С. 45–50.
11. Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова морей // Под ред. В.Г. Смирнова. СПб.: изд. ААНИИ, 2011. 239 с.
12. Aamaas B., Egede B.C., Stordal F., Berntsen T., Holmen K. Elemental carbon deposition to Svalbard snow from Norwegian settlements and long-range transport // Tellus. 2011. V. 3. № 3. P. 340–351.
13. Gerland S., Winther J.-G., Orbaek J.-B., Ivanov B.V. Physical properties, spectral reflectance and thickness development of first year fast ice in Kongsfjorden, Svalbard // Polar Research. 1999. V. 18. № 2. P. 275–282.
14. Gerland S., Winther J.-G., Orbaek J.-B., Liston G., Orisland N.-A., Blanko A., Ivanov B.V. Physical and optical properties of snow covering Arctic tundra and Svalbard // Hydrological Processes. 1999. V. 13. P. 2331–2343.
15. Gerland S., Liston G.E., Winther J.-G., Orbaek J.B., Ivanov B.V. Attenuation of solar radiation in Arctic

- snow: field observation and modeling // *Annals of Glaciology*. 2000. V. 31. P. 364–368.
16. *Ivanov B.V.* New data on sea-ice albedo in the Laptev and Barents seas // *Land-ocean systems in the Siberian Arctic* / Eds. H. Kassens, H. Bauch, H. Eicken, H.-W. Huberten, M. Melles, J. Thiede. Berlin: Springer-Verlag, 1999. P. 59–63.
 17. *Marshall S., Oglesby R.J.* An improved snow hydrology for GCMs. Part 1: Snow cover fraction, albedo, grain size, and age // *Climate Dynamic*. 1994. V. 10. P. 21–37.
 18. *Nicolaus M., Hudson S., Gerland S., Munderloh K.* A modern concept for autonomous and continuous measurements of spectral albedo and transmittance of sea ice // *Cold Regions Science and Technology*. 2010. V. 62. P. 14–28.
 19. *Pedersen C.A., Gallet J.-C., Ström J., Gerland S., Hudson S.R., Forsström S., Isaksson E., Berntsen T.K.* In situ observations of black carbon in snow and the corresponding spectral surface albedo reduction // *Journ. of Geophys. Research: Atmospheres*. 2015. № 1. doi:10.1002/2014JD022407.
 20. *Singh S.K., Kulkarni A.V., Chaudhary B.S.* Hyperspectral analysis of snow reflectance to understand the effects of contamination and grain size // *Annals of Glaciology*. 2010. V. 51 (54). P. 83–88.
 21. *Sviashchennikov P.N., Ivanov B.V., Govorina I.A.* Environmental pollution impact on radiation properties of atmosphere, snow and ice cover: Study from Barentsburg (Spitsbergen Archipelago) // *Czech Polar Report*. 2014. V. 4. № 2. P. 178–184.
 22. *Stroeve J., Nolin A., Steffen K.* Comparison of AVHRR – derived and «in situ» surface albedo over the Greenland ice sheet // *Remote Sensing of Environment*. 1997. V. 62. P. 262–276.
 23. *Winther J.-G., Gerland S., Orbaek J.-B., Ivanov B.V., Blanko A., Boike J.* Spectral reflectance of melting snow in a high Arctic watershed on Svalbard: some implications for optical satellite remote sensing studies // *Hydrological Processes*. 1999. V. 13. P. 2033–2049.
 24. *Winther J.-G., Bruland O., Sand K., Gerland S., Marechal D., Ivanov B., Glowacki P., Konig M.* Snow research in Svalbard – an overview // *Polar Research*. 2003. V. 22. № 2. P. 125–144.

Summary

Snow cover in the Arctic Regions plays a great role in formation of the surface radiation balance. Studies conducted by Russian and Norwegian scientists in the Barentsburg settlement and surrounding area made possible to estimate characteristics of shortwave radiation reflected from snow and penetrating into the snow cover. The measurements were performed by spectral radiometer TriOS Ramses within the wavelength range of 280–950 nm. Influence of cloudiness on change of the spectral composition of the reflected radiation was estimated on the basis of comparison with data under the cloud-free conditions. Measurements of spectral composition of reflected and penetrating into the snow radiation made under conditions when the snow surface was polluted by particles of surrounding rocks did show that for all wavelengths within the range of measurements the attenuation is actually the same. Since similar attenuation is also caused by the soot particles of anthropogenic origins, it is hardly possible to isolate effect of the anthropogenic pollution on the snow radiative properties. So, the anthropogenic influence can be overestimated. It means that additional studies of chemical composition of the snow cover pollution in Barentsburg are needed for the purpose to separate anthropogenic and natural components of the pollution.