

О дистанционном мониторинге снежного покрова: к 60-летию разработки методов аэрогамма-съемки в России

В.А. Воробьев¹⁾, Л.С. Банщикова²⁾*

¹⁾ Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля,
Россия, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, д. 20Б

²⁾ Государственный гидрологический институт,
Россия, 199004, Санкт-Петербург, 2-ая линия В.О., д. 23

*Адрес для переписки: vvorobiev@rambler.ru

Реферат. Снежный покров является индикатором как изменения климата, так и процессов, происходящих на водных объектах.

Оценка характеристик снежного покрова, в том числе влагозапаса, является актуальной задачей. Весьма важен вопрос об условиях применимости методов измерений. В данной статье выполнен ретроспективный анализ различных методов наблюдения за состоянием снежного покрова с применением как наземной съемки, так и с использованием летательных аппаратов, и зондирование Земли из космоса. Наиболее детально рассмотрен метод измерения запасов воды в снежном покрове, основанный на аэрогамма-съемке. Разработанный еще 60 лет назад в СССР, он стал основой для более современных методов.

Ключевые слова. Снежный покров, влагозапас, аэрогамма-съемка, климат.

On remote monitoring of snow cover: to the 60th anniversary of the development of aerial gamma-shooting methodology in Russia

V.A. Vorobyev¹⁾, L.S. Bانشchikova²⁾*

¹⁾ Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,
20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russian Federation

²⁾ State Hydrological Institute,
23, 2nd line V.O., 199004, St. Petersburg, Russian Federation

*Correspondence address: vvorobiev@rambler.ru

Abstract. Snow cover is an indicator of both climate change and processes occurring in water bodies. Assessment of snow cover characteristics, including moisture storage, is a topical task. However, an issue of applicability of measurement methodologies is of high importance. This paper provides a retrospective analysis of various methods of observing the state of snow cover using both ground-based monitoring and unmanned aerial vehicles and remote

sensing techniques. The methodologies for measuring the moisture storage in snow cover based on aerial gamma-photography are considered in the most detail. Developed 60 years ago in the USSR, they became the basis for numerous modern methods.

Keywords. Snow cover, moisture storage, aerial gamma-survey, climate.

Для разработки сценарных прогнозов изменения климата и его последствий для природных и социально-экономических систем необходимо иметь достаточно надежные данные об основных метеорологических величинах и иных параметрах климатической системы Земли, в частности, о динамике снежного покрова на больших территориях. Это необходимо в том числе для корректной оценки настоящего и будущего состояния российского севера, включая Сибирь и Арктический регион, его состоянии и динамике, пространственном распространении и влагозапаса. Эти сведения являются весьма востребованными и для научного обоснования разделов региональных и отраслевых планов адаптации (Липка и др., 2020) в области транспорта, строительства, развития туризма, кормовой базы для оленей, влияния опасных природных явлений на здоровье людей.

Исследование и мониторинг снежного покрова являются неотъемлемой частью в изучении гидрологических и гидрофизических процессов на водосборах. Учитывая, что характер формирования весеннего половодья во многом связан с влагозапасами в снеге, вопрос мониторинга снежного покрова является особенно актуальным.

Целесообразность и эффективность при выборе метода наблюдения за состоянием снежного покрова зависит от поставленной задачи и требуемой точности, доступности снегомерного участка и других факторов. Существующие методы можно подразделить на следующие группы:

- методы, основанные на наземной инструментальной съемке;
- методы, использующие беспилотные летательные аппараты (БПЛА);
- самолетные методы, использующие гамма-съемку;
- методы, основанные на данных, полученных в результате дистанционного зондирования Земли (спутниковые методы).

В настоящее время наземная инструментальная съемка производится как на метеорологических станциях Росгидромета, (архив данных этих наблюдений за 1966-2021 гг. приведен на сайте Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (ВНИИГМИ МЦД), см. (Данные, 2022).), так и при выполнении различного рода изыскательских работ. Измерения проводятся на основании РД 52.08.730 (РД, 2010), которое устанавливает правила организации, производства и обработки наблюдений за интенсивностью снеготаяния и водоотдачей из снежного покрова для практических работ. Определение влагозапасов основано на использовании снегомерных реек и взвешивании проб снега плотномером, и дальнейшей экстраполяции на значительные по площадям территории. Последнее, учитывая пространственную изменчивость

снежного покрова, и погрешность измерений (в жидкой фазе и в ледяных корках), может приводить к значительным ошибкам.

Для труднодоступных, но сравнительно небольших участков территории, съемка высоты снежного покрова может вестись с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Однако, несмотря на доступность этого метода, для получения достоверных результатов и для последующего построения цифровой модели снежного покрова с помощью фотограмметрии, требуется предварительная высокоточная съемка рельефа участка без снежного покрова, а затем и со снегом. Кроме того, определённые погодные условия, такие как осадки и облачность, существенно снижают качество съёмки, т.е. при решении оперативных задач данный метод имеет ряд ограничений. Дальнейший расчёт влагозапасов в снеге выполняется с помощью математических моделей и – в отличие от инструментальной съёмки – учитывают площадную изменчивость (Энтин и др., 2018).

Характеристики снежного покрова также могут быть определены на основе данных, полученных с помощью дистанционного зондирования Земли с помощью искусственных спутников Земли (ИСЗ). Несомненным преимуществом такого подхода является возможность оценки состояния значительных по площади территорий. Это позволяет анализировать пространственные особенности снежного покрова и вклад различных факторов в его формирование в целом и влагозапаса в частности.

В настоящее время для измерения водного эквивалента снега (Snow Water Equivalent, SWE) развиваются методы спутниковой микроволновой радиометрии, использующие измерения радиояркостной температуры заснеженных территорий. Например, использование данных радиометров MODIS, MCY-Э, ETM+; LISS-III позволяет получать карты альбедо земной поверхности с пространственным разрешением от 20 до 1000 м в пикселе. Продукты с разрешением до 250 м являются весьма доступными для пользователей. Они имеют хорошую временную повторяемость – минимум 1 раз в сутки для конкретной спутниковой платформы и радиометра на ней. Главный недостаток – зависимость от облачности – при ее наличии метод не работает.

В работе (Тихонов и др., 2021) анализируется возможность применения алгоритмов восстановления толщины и влагозапаса снежного покрова, построенных на основе спутниковых микроволновых радиометров спутников Landsat-8, PROBA-5 и SMOS. Утверждается, что публикуемые NASA, NCDC и ESA определения водного эквивалента снега носят больше «рекламный» характер, неприменимый для конкретных нужд.

Для оценки состояния снежного покрова разрабатываются также методы применения лидаров на воздушных носителях. Они работают с помощью импульсной, фазовой и частотной модуляции зондирующих сигналов (Дмитриев, Дмитриев, 2014).

Дистанционные методы мониторинга состояния снежного покрова несомненно перспективны. Однако из-за относительно невысокой точности и надежности этих методов, достигнутых к настоящему времени, в Ежегодных Докладах Росгидромета данные о влагозапасе в снеге даются только по дан-

В течение нескольких лет проводилась отработка этой методики. После экспериментальных работ, проведённых Государственным гидрологическим институтом ГГИ в 1964 году аэро-гамма метод был успешно внедрен в практику работы Гидрометслужбы.

На рис. 2 представлена копия приказа «Об Экспериментальных аэроснегомерных исследованиях зимой 1965-1964гг» (Коган и др., 1964).

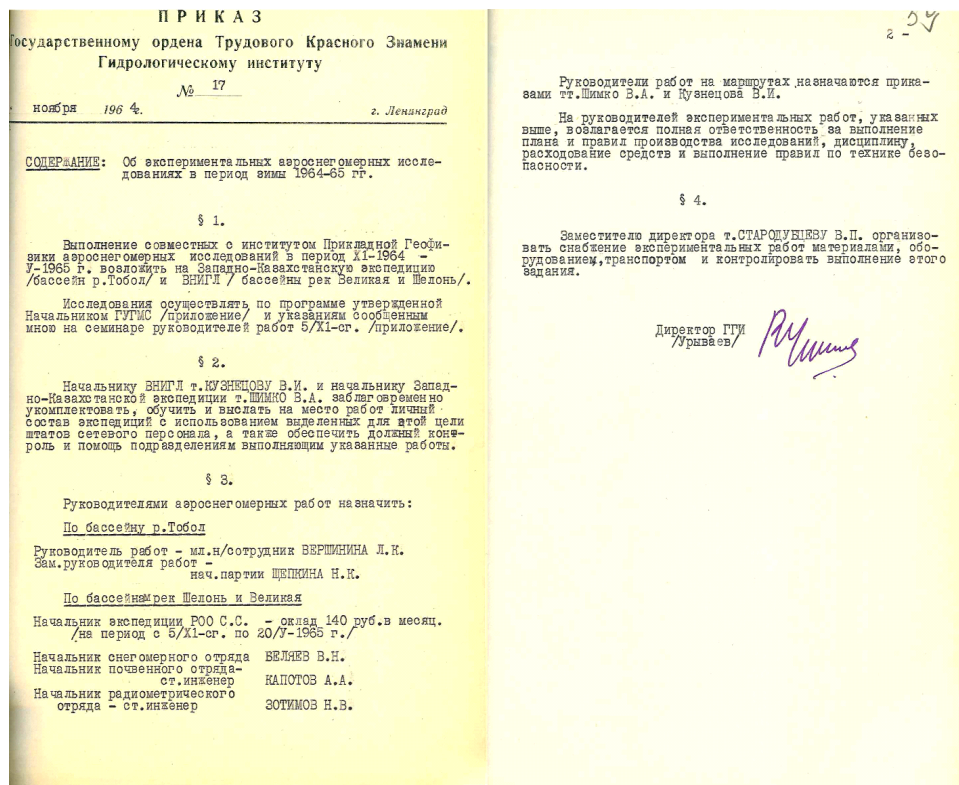


Рисунок 2. Копия приказа института «Об Экспериментальных аэроснегомерных исследованиях зимой 1965-1964 гг.» (Коган и др., 1964)

Figure 2. A copy of the order of the institute "On Experimental Aerosnow Measurement Research in the Winter of 1965-1964" (Kogan et al., 1964)

Было разработано «Наставление по обработке и анализу авиационной гамма-съемки снежного покрова» (Наставление, 1982). Основные преимущества метода самолётной гамма-съёмки влагозапасов заключается в учёте влаги в твёрдой и жидкой фазах на поверхности и в самых верхних слоях (1-2 см) почв и высокая инструментальная точность (± 7 мм воды с осреднением влагозапаса на маршруте протяжённостью 20-40 км (Труды ГГО, 1969)).

Хотя указанный метод обладает большой точностью, он в то же время имеет и ряд существенных недостатков, среди которых следующие:

1. Необходимость проведения подготовительной летней съёмки с той же детальностью, что и зимней;

2. Высокие требования к точности совмещения повторных маршрутов с исходными, особенно в районах со сложной геологической обстановкой, где

возможны значительные вариации содержания радиоэлементов в приповерхностном слое пород;

3. Необходимость идентичности параметров летнего и зимнего комплекта аппаратуры (постоянство геометрических характеристик, эффективности, спектральной чувствительности детектора);

4. Трудности автоматизации обработки.

Было очевидно, что необходимо создавать однопролетные методы измерения. Р.М. Коганом и др. было предложено измерение интенсивности двух моноэнергетических гамма-линий одного радиоизотопа. Так как использовался вариант, в котором эти линии имели разный коэффициент поглощения, то по соотношению излучения на этих линиях можно было определить влагозапас в снеге.

При практическом применении такого метода встречается ряд трудностей, связанных с идентификацией и выделением интересующих фотопиков на сложном фоне прямого и рассеянного гамма-излучения пород. Был выделен большой ресурс машинного времени на очень дефицитных в то время скоростных ЭВМ, и впервые в СССР рассчитаны спектрально-угловые структуры гамма-полей для естественных и искусственных радиоизотопов в природной среде. В частности, получены детальные спектрально-угловые характеристики для радиоактивно-загрязненных территорий (Воробьев, 1964).

В результате были предложены еще два однопролетных метода для определения влагозапаса в снеге и влажности почв:

1. Одновременное измерение интенсивности гамма-излучения с помощью двух детекторов с разной диаграммой направленности;

2. Измерение интенсивности одной моноэнергетической гамма-линии и рассеянного излучения с энергией близкой к первичной (Воробьев, Фридман, 1971).

Для измерений предлагалось использовать изотоп тория ThC с первичной энергией $E_0 = 2.62$ МэВ. Жесткая область спектра с энергиями близкими к E_0 образована гамма-квантами, испытавшими рассеяние на малые углы. Вследствие этого к ним применимо так называемое лучевое приближение, т.е. можно считать, что для них эффект генерации и поглощения определяются лишь количеством вещества, распределенного вдоль луча, соединяющего источник и детектор.

Все изложенное выше не требует сведений о содержании радиоактивных элементов в почве, и поэтому указанные методы могут быть применены при однократном пролете над произвольной территорией, если только чувствительность детектора достаточна. К сожалению, энергетическое разрешение и чувствительность использовавшихся в то время сцинтилляционных детекторов не позволили эффективно применить однопролетные способы измерения запасов воды в снеге с помощью самолетов. В результате, до сих пор в РФ для измерения запасов снега применяются только наземные методы, а из дистанционных очень ограничено – метод повторных залетов.

Несмотря на то, что с начала 1990-х годов самолетный метод исследования влагозапасов в снеге с помощью гамма-съемки практически перестали использовать, в настоящее время он вновь начинает применяться в различных областях. Так, в Башкортостане с 2015 года для прогнозирования развития половодной обстановки возобновлено применение авиагамма-съемки снежного покрова перед весенним снеготаянием (<https://ecology.bashkortostan.ru>, 2015).

Поскольку продуктивность лесов зависит в значительной степени от запасов влаги, гамма-съемка снежного покрова применяется и в лесном хозяйстве для оценки продуктивности лесов, (Хабиров и др., 2017).

Последние десятилетия за рубежом для разведки радиационной обстановки, а также в поисковой геофизике стали применяться беспилотные летательные аппараты БПЛА, оснащенные гамма-спектрометрами с детекторами на основе теллурида кадмия. В частности, они использовались в Японии при аварии на АЭС Фукусима. Они имели массу 60 г, мощность 0.25 Вт, размеры 10x10x10 мм, энергетическое разрешение – 2% по линии 661 кэВ. Недостаток эффективности регистрации кристаллов малого объема компенсировался малыми высотами полета БПЛА – до 1.5 м, малыми скоростями – до 3.5 км/ч, густой сетью опробования – до 1.5 м. между профилями (Воробьев, Керцман, 2020). Возможно, что их применение может оказаться особенно полезным для однопролетного измерения снежных заносов на автотрассах в условиях сильно пересеченной местности. В этом могут быть заинтересованы службы МЧС и Росгидромета.

Использование аналогичных детекторов с большей эффективностью на самолетах позволит получать карту влагозапаса в снеге на больших территориях, что особенно важно для Арктики и Сибири, в частности, для использования при предсказании опасных природных явлений, например, наводнений.

Применение того или иного из приведённых в работе методов наблюдения за влагозапасами в снеге во многом определяются не только сложностью поставленной задачи, но и доступностью приборной базы.

Заключение

Трудоемкость выполнения наземных работ для оценки влагозапаса в снежном покрове и сложность в получении данных дальнего зондирования земли требует разработки новых и совершенствования существующих методов.

Использование в мониторинге состояния климатической системы и для решения различных водохозяйственных задач метода измерения запасов воды в снежном покрове, основанного на аэрогамма-съемке, показало, что несмотря на свою более чем полувековую историю, он и сейчас вполне эффективен и может быть с успехом использован.

Одна из идей В.А. Урываева – определение влагозапасов в снежном покрове с помощью аэрогамма-съемки на всей снегомерной сети – может быть реализована и в настоящее время при модернизации наблюдательной сети Росгидромета.

Список литературы

Воробьев, В.А. (1964) Структура гамма-поля плоского изотропного источника Cs-137, *Атомная энергия*, т. 16, вып. 1, с. 69-71.

Воробьев, В.А., Фридман, Ш.Д. (1971) О возможности определения толщины источников гамма-излучения и поглощающих сред по деформации жесткой части энергетического спектра, *Атомная энергия*, № 4, с. 385.

Воробьев, В.А. Керцман, В.М. (2020) Аэрогамма-съёмке – 75 лет, *Eurasian Scientific Association*, № 5, с. 582-583.

Данные маршрутных... 1966-2021 гг., URL: <http://meteo.ru/data/166-snow-surveys>.

Дмитриев, А.В., Дмитриев, В.В. (2014) Аппроксимационный алгоритм картирования снежного покрова по спутниковым данным, *Актуальные вопросы современной науки*, № 36, с. 40-51.

Дмитриев, А.В., Фридман, Ш.Д. (1979) *Основы дистанционных методов измерения влагозапасов в снеге и влажности почв по гамма-излучению Земли*, Л., Гидрометеиздат, 304 с.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год (2022), Москва, 104 с.

Коган, Р.М., Никифоров, М.В., Урываев, В.А., Фридман, Ш.Д., Чирков, В.П., Яковлев, А.Ф. (1964) Способ определения водных запасов в верхнем слое почвы и на ее поверхности, *Авторское свидетельство № 160876 от 28.11.1963 г.*, *Бюллетень комитета по делам изобретений и открытий при СМ СССР*, № 5, с. 11.

Коган, Р.М., Назаров, И.М., Фридман, Ш.Д. (1976) *Основы гамма-спектрометрии природных сред*, 2-е изд., перераб. и доп, Москва, Атомиздат, 366 с.

Липка, О.Н., Романовская, А.А., Семенов, С.М. (2021) Прикладные аспекты адаптации к изменениям климата в России, *Фундаментальная и прикладная климатология*, № 1, с. 65-90, URL: <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2020-1-65-90>.

Наставление по обработке и анализу авиационной гамма-съёмки снежного покрова (1982), Обнинск, 38 с.

Об экспериментальных аэроснегомерных исследованиях зимой 1965-1964 гг. (1964) *Архивное дело № 8871*, ГГИ, 81 с.

РД 52.08.730-2010 «Производство наблюдений над интенсивностью снеготаяния и водоотдачей из снежного покрова».

Тихонов, В.В., Соколова, Ю.В., Боярский, Д.А., Комарова, Н.Ю. (2021) О возможности восстановления снегозапаса снежного покрова по данным спутниковой микроволновой радиометрии, *Современные проблемы ДЗЗ* из

космоса, т. 18, № 5, с. 47-64.

Труды Государственного Гидрологического института (1969) *Исследования методов аппаратуры и точности определения запасов воды в снежном покрове*, Единая гидрометеорологическая служба Союза ССР, вып. 178, 173 с.

Хабилов, И.К., Мустафин, Р.Ф., Искандарова, А.М., Раянова, А.Р. (2017) Зависимость продуктивности лесов от запаса снежного покрова на лесных участках Уфимского района республики Башкортостан, *Пермский аграрный вестник*, № 3 (19), с. 155-159.

Энтин, А.Л., Сучилин, А.А., Владимирова, М.Р., Сократов, С.А., Комаров, А.Ю., Турчанинова, А.С., Селиверстов, Ю.Г. (2018) Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для построения модели высоты снежного покрова, *Национальная картографическая конференция-2018*, с. 295-296.

Фридман, Ш.Д., Коломейц, Е.В., Пегоев, А.Н., Оскомов, В.В., Абеленцев, В.В. (1990) *Мониторинг влагозапасов в снеге, почвах, ледниках по естественным проникающим излучениям*, Л., Гидрометеиздат, 262 с.

References

Vorob'ev, V.A. (1964) Struktura gamma-polya ploskogo izotropnogo istochnika Ss-137 [The structure of the gamma fieldofaplanar isotropic source Ss-137], *Atomic energy*, vol. 16, issue 1, pp. 69-71.

Vorob'ev, V.A., Fridman, Sh.D. (1971) O vozmozhnosti opredeleniya tolshchiny istochnikov gamma-izlucheniya i pogloshchayushchih sred po deformacii zhestkoj chasti energeticheskogo spektra [On the possibility of determining the thickness of gamma radiation sources and absorbing environment by deformation of the rigid part of the energy spectrum], *Atomic Energy*, no. 4, p. 385.

Vorob'ev, V.A., Kercman, V.M. (2020) Aerogamma-s"emke – 75 let [75th anniversary of Aerogamma-surveying], *Eurasian Scientific Association*, no. 5, pp. 582-583.

Dannye marshrutnyh.... 1966-2021 [Data of route snow surveys 1966-2021], available at: <http://meteo.ru/data/166-snow-surveys>.

Dmitriev, A.V., Dmitriev, V.V. (2014) Approksimacionnyj algoritm kartirovaniya snezhnogo pokrova po sputnikovym dannym [Approximation algorithm for mapping snow cover from satellite data], *Actual problems of modern science*, no. 36, pp. 40-51.

Dmitriev, A.V., Fridman, SH.D. (1979) *Osnovy distancionnyh metodov izmereniya vlagozapasov v snege i vlazhnosti pochv po gamma-izluchenyu Zemli* [Fundamentals of remote methods for measuring water reserves in snow and soil

moisture by gamma radiation of the Earth], Hydrometeoizdat, Leningrad, Russia, 304 p.

Doklad ob osobennostyah klimata na territorii Rossijskoj Federacii za 2021 god [Report on specific climate features on the territory of the Russian Federation for 2021] (2022) Moscow, Russia, 104 p.

Kogan, R.M., Nazarov, I.M., Fridman, Sh.D. (1976) *Osnovy gamma-spektrometrii prirodnyh sred* [Fundamentals of gamma-spectrometry of natural environment], Atomizdat, Moscow, Russia, 366 p.

Kogan, R.M., Nikiforov, M.V., Uryvaev, V.A., Friedman, Sh.D., Chirkov, V.P., Yakovlev, A.F (1964) *Avtorskoe svidetel'stvo № 160876 ot 28.11.1963g. Sposob opredeleniya vodnyh zapasov v verhnem sloe pochvy i na ee poverhnosti. «Byulleten' komiteta po delam izobretenij i otkrytij pri SM SSSR»* [Copyright certificate No. 160876 dated 11/28/1963 A method for determining water reserves in the upper layer of soil and on its surface "Bulletin of the Committee for Inventions and Discoveries under the USSR Council of Ministers"], no. 5, p. 11.

Lipka, O.N., Romanovskaya, A.A., Semenov, S.M. (2021) *Prikladnye aspekty adaptacii k izmeneniyam klimata v Rossii* [Applied of adaptatinion to climate change], *Fundamental and Applied Climatology*, no. 1, pp. 65-90, available at: <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2020-1-65-90>.

Nastavlenie po obrabotke i analizu aviacionnoj gamma-s'emki snezhnogo pokrova [Manual on processing and analysis of aviation gamma-ray survey of snow cover] (1982) Obninsk, Russia, 38 p.

Ob eksperimental'nyh aerosnegomernykh issledovaniyah zimoj 1965-1964 gg [About Experimental aero- snow measuring studies in the winter of 1965-1964], archive file no. 8871 of 1964, 81 p.

RD 52.08.730-2010 «Proizvodstvo nablyudenij nad intensivnost'yu snegotayaniya i vodootdachej iz snezhnogo pokrova [WD 52.08.730-2010 "Pproduction of observation on the intensity of snowmelt and water outpute from snow cover].

Tihonov, V.V., Sokolova, Yu.V., Boyarskij, D.A., Komarova, N.Yu. (2021) *O vozmozhnosti vosstanovleniya snegozapasa snezhnogo pokrova po dannym sputnikovoj mikrovolnovoj radiometrii* [About the possibility of restoring the snow reserve of the snow cover according to satellite microwave radiometry], *Modern problems of remote sounding from space*, vol. 18, no. 5, pp. 47-64.

Trudy Gosudarstvennogo Gidrologicheskogo institute [Proceedings of the State Hydrological Institute] (1969) *Issledovaniya metodov apparatury i tochnosti opredeleniya zapasov vody v snezhnom pokrove* [Research methods, equipment and accuracy of determining water reserves in the snow cover], *Edinaya gidrometeorologicheskaya sluzhba Soyuza SSR* [Unified Hydrometeorological Service of the USSR], Issue 178, 173 p.

Habirov, I.K., Mustafin, R.F., Iskandarova, A.M., Rayanova, A.R. (2017) Zavisimost' produktivnosti lesov ot zapasa snezhnogo pokrova na lesnyh uchastkah Ufimskogo rajona respubliki Bashkortostan [Dependence of forest productivity on the snow cover reserve in the forest areas of the Ufa district of the Republic of Bashkortostan, *Perm Agrarian Bulletin*, no. 3 (19), pp. 155-159.

Entin, A.L., Suchilin, A.A., Vladimirova, M.R., Sokratov, S.A., Komarov, A.Yu., Turchaninova, A.S., Seliverstov, Yu.G. (2018) *Ispol'zovanie bespilotnykh letatel'nykh apparatov (BPLA) dlya postroeniya modeli vysoty snezhnogo pokrova* [The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) to build a model of the height of the snow cover], National Cartographic Conference-2018, pp. 295-296.

Fridman, Sh.D., Kolomejc, E.V., Pegoev, A.N., Oskomov, V.V., Abelencev, V.V. (1990) *Monitoring vlagozapasov v snege, pochvah, lednikah po estestvennym pronikayushchim izlucheniyam* [Monitoring of moisture reserves in snow, soils, glaciers by natural penetrating radiation], Hydrometeoizdat, Leningrad, Russia, 262 p.

Статья поступила в редакцию (Received): 18.10.2022.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 19.10.2022.

Принята к публикации (Accepted): 20.10.2022.

Для цитирования / For citation

Воробьев, В.А., Банщикова, Л.С. (2022) О дистанционном мониторинге снежного покрова: к 60-летию разработки методов аэрогамма-съёмки в России, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 8, № 4, с. 413-423, doi:10.21513/2410-8758-2022-4-413-423.

Vorobyev, V.A., Bانشchikova, L.S. (2022) On remote monitoring of snow cover: to the 60th anniversary of the development of aerial gamma-shooting methodology in Russia, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 8, no. 4, pp. 413-423, doi:10.21513/2410-8758-2022-4-413-423.