

Развитие и модернизация технологии мониторинга влагозапаса в снежном покрове на территории Российской Федерации

В.А. Воробьев^{1)}, Ф.А. Андреев²⁾, Н.Н. Коршунова³⁾*

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

²⁾ НПО «Тайфун»,
Россия, 249038, Калужская обл., г. Обнинск, ул. Победы, д. 4

³⁾ Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации –
Мировой центр данных,
Россия, 249035, Калужская обл., г. Обнинск, ул. Королева, д. 6

*Адрес для переписки: vvorobiev@rambler.ru

Реферат. Приведены результаты исследований современных изменений запасов воды в снеге на территории Российской Федерации. Они основаны на данных системы мониторинга снежного покрова, функционирующей во Всероссийском научно-исследовательском институте гидрометеорологической информации – Мировом центре данных. Рассчитаны коэффициенты линейных трендов запасов воды в снеге для периода 1976-2022 гг. Рассмотрены дистанционные авиационные и беспилотные методы определения влагозапаса в снежном покрове с помощью гамма-съемки.

Ключевые слова. Снежный покров, содержание воды, мониторинг, наземные сети, дистанционные методики.

Development and modernization of technology for monitoring the water reserves in snow cover on the territory of the Russian Federation

V.A. Vorobyev^{1)}, F.A. Andreev²⁾, N.N. Korshunova³⁾*

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

²⁾ NPO "Typhoon",
4, Pobedy str., 249038, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation

³⁾ All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center,
6, Koroleva str., 249035, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation

*Correspondence address: vvorobiev@rambler.ru

Abstract. The results of studies of modern changes in water reserves in snow cover on the territory of the Russian Federation are presented. They are based on data of the snow cover monitoring system functioning in the All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center. The coefficients of linear trends of water reserves in snow cover for the 1976-2022 are calculated. Remote aerial and drone based methodologies for determining the water content in snow cover using gamma imaging are considered.

Keywords. Snow cover, water content, monitoring, ground-based networks, remote methodologies.

Введение

В связи с изменением климата важнейшим направлением в исследованиях становится разработка планов по адаптации для оценки степени опасности и ущерба от возможных опасных погодно-климатических явлений (Липка и др., 2021). В Сибири и Арктике одним из важнейших факторов климатических изменений является состояние и динамика снежного покрова, его размеры и влагообъем. Для разработки прогноза изменения климата и его опасных последствий необходимо иметь достаточно надежные данные об основных метеоданных, в частности, о динамике снежного покрова на больших территориях (Воробьев, Банщикова, 2022, Воробьев и др. 2023). Существующие методы можно подразделить на методы, полученные с помощью наземной съемки, на основе самолетного метода с помощью гамма-съемки, а также полученные в результате дистанционного зондирования Земли.

В работе представлен обзор исследований в области разработки и применения в Российской Федерации аппаратуры для мониторинга снежного покрова. Приведены сведения о развитии дистанционных авиационных и беспилотных систем мониторинга снежного покрова, а также наземных наблюдательных сетей, данные которых можно использовать для калибровки и валидации результатов дистанционных измерений.

По данным информационной базы ВНИИГМИ-МЦД получены аномалии максимального запаса воды в снеге зимой 2021-2022 гг. в лесу и поле, а также коэффициенты линейного тренда запаса воды в снеге за период 1976-2023 гг.

Наземный мониторинг снежного покрова

Регулярные наземные наблюдения за снежным покровом на метеостанциях в России начали проводиться с 1882 года. Согласно Наставлению гидрометеорологическим станциям и постам (Наставление..., 1985), ежедневные наблюдения за снежным покровом на метеорологических станциях включают измерения его высоты и определение степени покрытия снегом окрестности станции и характера залегания снежного покрова. Степень покрытия снегом окрестности станции и характер залегания снежного покрова определяются визуально в утренний срок наблюдений. Оценка степени покрытия снегом видимой окрестности станции производится по 10-бальной шкале. Кроме

ежедневных наблюдений, на метеостанциях проводятся маршрутные снегомерные съемки в лесу и поле, в отдельных случаях в балках. Во время снегомерных съемок определяются высота и плотность снежного покрова, толщина ледяной корки и слоя снега, насыщенного водой, а также определяется степень покрытия снегом и ледяной коркой маршрута и состояние поверхности почвы под снегом. Длина маршрута составляет 2000 и 1000 метров в поле и 500 метров в лесу. Высота снежного покрова измеряется через каждые 10 м на лесном маршруте и через каждые 20 м на полевом. Плотность снега на маршрутах длиной 1000 и 500 м измеряется через каждые 100 м, на маршрутах длиной 2000 м – каждые 200 м. Снегомерные съемки начинают проводить с момента, когда снегом покрыта половина и более площади видимой окрестности – 1 раз в десять дней (Наставления..., 1985).

Во ВНИИГМИ-МЦД создана подсистема мониторинга снежного покрова, которая является составной частью национальной системы мониторинга климата. Результаты мониторинга снежного покрова публикуются в ежегодном докладе Росгидромета.

Мониторинг снежного покрова на территории России проводится по данным 958 метеорологических станций. Все эти метеорологические станции отнесены к типу незащищенных. По данным ежедневных наблюдений по постоянным рейкам на станции, сформированы ряды данных о высоте снежного покрова и степени покрытия снегом окрестностей станции. По данным маршрутных снегомерных съемок, сформированы ряды данных о влагозапасе и плотности снежного покрова по лесному и полевому маршрутам. Из 958 станций на 665 проводятся наблюдения в поле, на 425 – в лесу (на 122 станциях осуществляются наблюдения и в поле, и в лесу).

Информационная база данных мониторинга состояния снежного покрова содержит исторические ряды, оперативные данные и нормативные характеристики. Исторические ряды характеристик снежного покрова сформированы в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» Росгидромета на основе данных Госфонда гидрометеорологической информации. Оперативные данные поступают по каналам связи в виде телеграмм «СИНОП» (Булыгина и др., 2017).

В качестве норм до 2022 года использовался период 1971-2000 гг. С 2022 года используются средние многолетние характеристики снежного покрова за период 1991-2020 гг., который рекомендован ВМО в качестве нового базового периода в климатических исследованиях (Семнадцатый..., 2015) В связи с тем, что методика наблюдений за характеристиками снежного покрова неоднократно изменялась (Шакирзянов, Разуваев, 2000), в информационную базу данных для мониторинга состояния снежного покрова включены данные за период с 1966 г. Состояние снежного покрова описывается за период с июля прошедшего года по июнь текущего.

В состав информационной базы также включены массивы временных рядов осредненных по всей территории России и по территории квази-однородных климатических регионов. Осреднение по площади выполнено как взвешенное осреднение станционных аномалий климатических переменных с весами, учитывающими плотность сети в окрестности станции.

Аномалии на метеостанциях арифметически осреднялись по квадратам сетки ($1^{\circ}\text{N} \times 2^{\circ}\text{E}$), а затем, применяя метод обратных квадратов расстояния, проводилось осреднение по регионам, показанным на рис. 1. Выбор 9 квази-однородных климатических регионов сделан на основании классификации Алисова (Алисов, 1956).

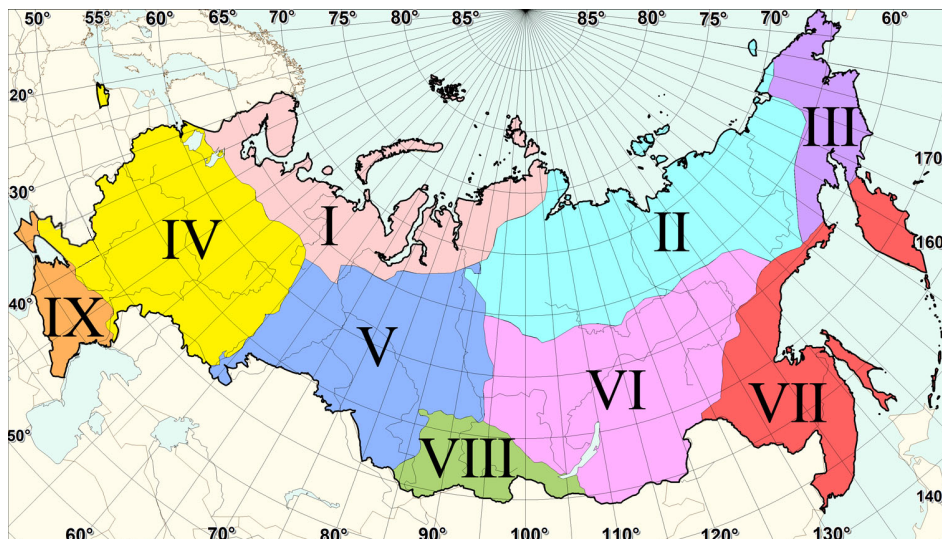


Рисунок 1. Квазиоднородные районы на территории России

I – Север европейской части России и Западной Сибири, II – Северная часть Восточной Сибири и Якутии, III – Чукотка и север Камчатки, IV – Центр Европейской части России, V – Центр и юг Западной Сибири, VI – Центр и юг Восточной Сибири, VII – Дальний Восток, VIII – Алтай и Саяны, IX – Юг Европейской части России

Figure 1. Quasi-homogeneous areas on the territory of Russia

I – The North of the European part of Russia and Western Siberia, II – the Northern part of Eastern Siberia and Yakutia, III – Chukotka and the north of Kamchatka, IV – The Center of the European part of Russia, V – the Center and South of Western Siberia, VI – the Center and South of Eastern Siberia, VII – the Far East, VIII – Altai and Sayan, IX – The South of the European part of Russia

На рис. 2 приведены примеры оценки состояния характеристик снежного покрова в зимний сезон 2021-2022 гг.

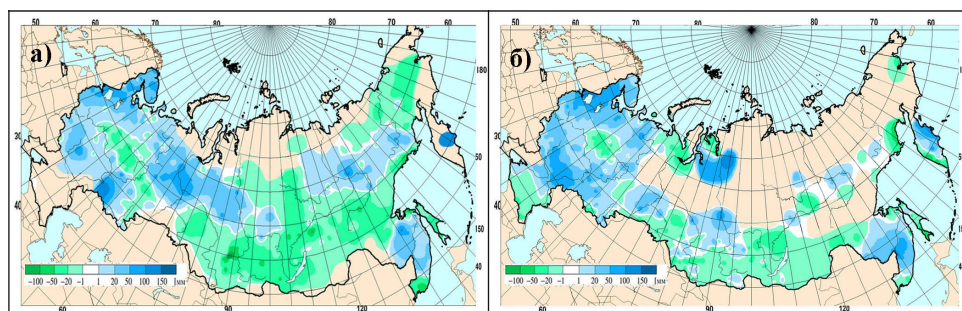


Рисунок 2. Аномалии максимального запаса воды в снеге (мм) зимой 2021-2022 гг. (от среднееголетних значений за период 1991-2020 гг.) в лесу (а) и поле (б)

Figure 2. Anomalies of maximum water content in snow (mm) in the winter of 2021-2022 (from the average annual values for 1991-2020) in the forest (a) and in the field (b)

Коэффициент линейного тренда характеризует среднюю скорость изменения на рассматриваемом интервале времени. 1976 год выбран условно в качестве начала современного потепления в соответствии с ходом глобальной температуры (Доклад..., 2023). Оценки линейного тренда, которые получены методом наименьших квадратов, показывают, что в лесу на территории России преобладают тенденции уменьшения максимального за зиму запаса воды в снеге, а в поле – увеличения (рис. 3).

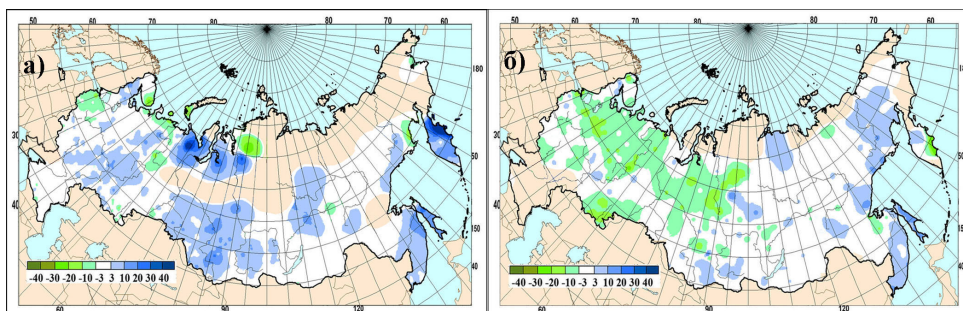


Рисунок 3. Коэффициенты линейного тренда (мм/10лет) в 1976-2022 гг. в рядах запаса воды в снеге за зимний период в поле (а) и в лесу (б)

Figure 3. Linear trend (mm/10 years) in 1976-2022 in the series of water content in snow cover over the winter period in the field (a) and in the forest (b)

Одним из простых, но наиболее наглядных показателей изменения климата является разность норм за два периода 1991-2020 гг. и 1971-2000 гг., которые использовались для мониторинга снежного покрова. Пространственное распределение разностей норм запаса воды в снеге, по данным маршрутных снегосъемок (рис. 4), согласуется с выявленными ранее тенденциями (Коршунова и др., 2021), но позволяет более детально определить некоторые региональные особенности.

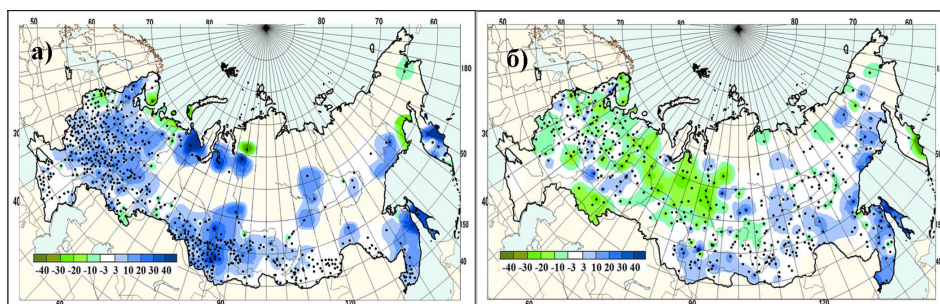


Рисунок 4. Разности средних значений запаса воды в снеге за периоды 1991-2020 гг. и 1971-2000 гг., по данным маршрутных снегосъемок (а) в поле и (б) в лесу

Figure 4. Differences in average watercontent in snow cover over 1991-2020 and 1971-2000 according to route snow surveys (a) in the field and (b) in the forest

В табл. 1 приведены, рассчитанные по ограниченному числу станций оценочные коэффициенты линейного тренда регионально осредненных характеристик запаса воды в снеге для северных регионов России за 1977-2023 гг.

Таблица 1. Оценки линейного тренда запаса воды в снежном покрове для северных регионов России в 1977-2023 гг.

Table 1. Estimates of the linear trend in water content in cover snow for the northern regions of Russia for 1977-2023

Регион	<i>лес</i>		<i>поле</i>	
	<i>среднее</i>	<i>b, мм/10лет</i>	<i>среднее</i>	<i>b, мм/10лет</i>
Север Европейской части России и Западной Сибири	147	-2.9	108	2.1
Север Восточной Сибири и Якутии	113	1.7	88	4.7
Чукотка и север Камчатки	137	3.8	135	-6.2

Примечание. Жирным курсивом выделен тренд, значимый на 5% уровне

Дистанционные методы определения запаса воды в снежном покрове и перспективы их развития

В начале 60-х годов прошлого столетия в Институте прикладной геофизики был разработан аэрогамма-метод определения запасов воды в снежном покрове. Метод основан на учете деформации снегом гамма-излучения естественных радиоактивных элементов почв и горных пород (Коган и др., 1963; Фридман и др., 1990). С 1962 года авиационная съемка снежного покрова начинает широко применяться как у нас в стране, так и за рубежом (Daxi, Odegaard, 1970; Peck, Bissell, 1973), охватывая миллионы квадратных километров. Результаты этих работ изложены в многочисленных статьях и наиболее полно обобщены в монографиях (Дмитриев и др. 1979), а международные достижения – в материалах Первого всемирного семинара, проведенного в 1980 г. в Норвегии, в работе которого приняли участие ученые СССР, США, Канады, Норвегии, Финляндии, Индии и Англии.

Начиная с зимы 1970-1971 г. метод авиационной гамма-съемки снежного покрова стал внедряться в практику работы Гидрометеослужбы (Строганов, 1986). Разработанная снегомерная сеть позволила получать карты запасов воды в снежном покрове по частным речным бассейнам на день съемки и эффективно их использовать для гидрологического прогнозирования накопления и стока паводковых вод. Производственные съемки проводились на территории Северо-Западного, Уральского, Западно-Сибирского и Красноярского УГМС с выдачей оперативных данных о запасах воды в снежном покрове. Общая площадь территории, охваченной авиационной гамма-съемкой снежного покрова в начале 1980-х годов составляла около 2.5 млн. км² (Строганов, 1986).

В 2010-2013 гг. в ФГБУ «НПО «Тайфун» Росгидромета в рамках проекта Единой государственной автоматизированной системы контроля радиационной обстановки (ЕГАСКРО) разработан авиационный комплекс радиационной разведки (зарегистрирован в Госреестре под № 66245-16 как МР-44). Он может быть использован как для радиационного обследования загрязненных территорий, так и для определения запаса воды в снежном

покрова и влагозапаса в пахотном слое, информация о которых необходима для гидрологов и агрометеорологов. Аппаратурный состав комплекса МР-44 полностью соответствует требованиям РД 52.33.179-89 «Методические указания. Запас воды в снежном покрове. Методика выполнения измерений авиационным гамма-методом». Таким образом, комплекс МР-44 способен обеспечивать как мониторинг радиационной обстановки (гамма-спектрометрическая и дозиметрическая съемка подстилающей поверхности), так и определение запаса воды в снежном покрове на гидрологической сети наблюдений.

С помощью комплекса МР-44, установленного на борту самолета Ан-2, ФГБУ НПО «Тайфун» с 2015 по 2020 гг. проводил авиационную гамма-съемку снежного покрова на территории Республики Башкортостан и сопредельных областей. Съемка выполнялась по инициативе Министерства природопользования и экологии Республики Башкортостан на конкурсной основе для прогноза стока в бассейнах рек Белая, Уфа и Урал. Основной задачей съемки было получение дополнительной информации о запасах воды в снежном покрове на водосборах самых крупных водохранилищ Башкортостана: Павловского, Юмагузинского и Нугушского.

Учитывая, что на сети станций и постов снегомерные маршруты имелись только до высот не более 300 м на р. Уфа и не более 500 м на р. Белая, производство дистанционной гамма-съемки позволило получить дополнительно информацию о запасах воды в снежном покрове в горной части на водосборах рек Уфа и Белая.

Авиационные снегосъемки выполнялись по заранее разработанной сети в 2 этапа: осенняя – для определения начальных уровней гамма-поля на снегомерной сети и весенняя – для определения влагозапаса снега в период максимального снегонакопления.

По результатам снегосъемок информация о влагозапасе снега в оперативном порядке передавалась в Минэкологии РБ и Башкирское УГМС по следующим параметрам:

- запас воды в снежном покрове по каждому снегомерному маршруту в целом и по ландшафтным составляющим (лес, кусты, поле, болото), в мм водного слоя;
- средний влагозапас снега по каждому водосбору, в мм водного слоя;
- суммарный запас воды в снежном покрове, интегрированный по частным водосборным площадям, в м³;
- карты пространственного распределения влагозапаса снега по частным водосборным площадям (рис. 5);
- карты с расчетом суммарного влагозапаса, построенные с помощью подсистемы анализа и представления пространственно распределенной информации DiGrid, входящей в состав программно-технического комплекса ФИАЦ Росгидромета, на основе данных авиационной гамма съемки (рис. 6).

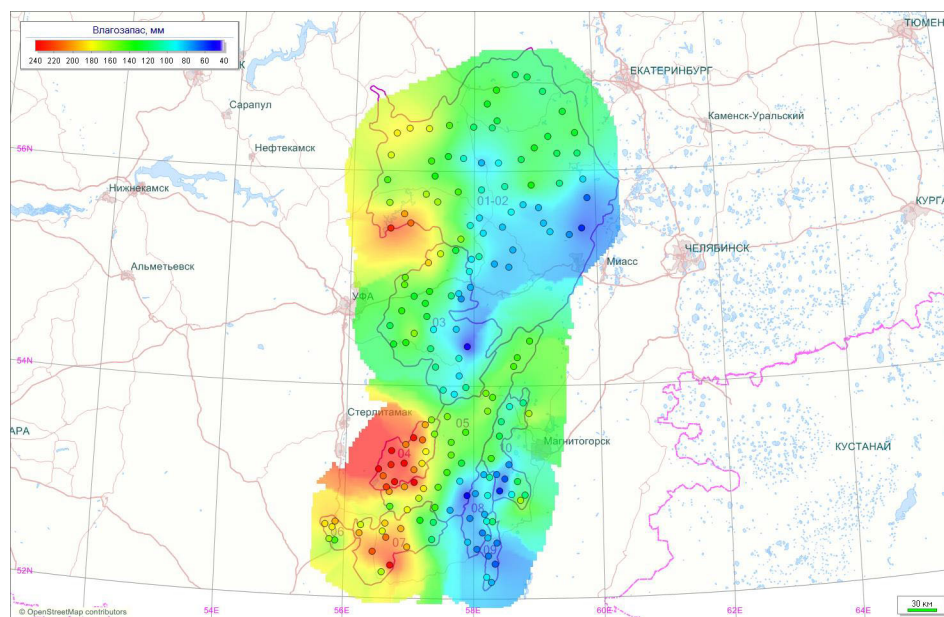


Рисунок 5. Карта распределения влагозапаса снега в бассейнах рек Белая и Урал, построенная по результатам авиационной гамма-съемки

Figure 5. Map of the distribution of snowmoisture reserve in the basins of the Belaya and Ural rivers based on the aerial gamma photo graphy

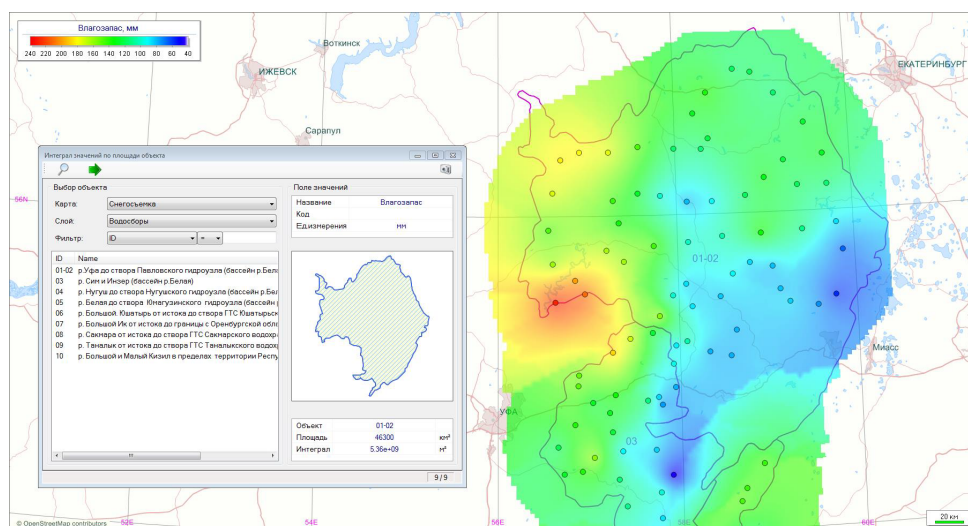


Рисунок 6. Результаты расчета суммарного запаса воды в снежном покрове, интегрированного по частной водосборной площади реки Уфа

Figure 6. Results of calculation of the total water reserve in the snow cover integrated over the private catchment area of the Ufa River

Как показала практика, дистанционная технология определения влагозапаса воды в снежном покрове авиационным гамма-методом с использованием современной гамма-спектрометрической и навигационной аппаратуры является технологичной и перспективной для использования на выбранной сети наблюдений, особенно в северных регионах с разреженной наблюдательной сетью. Использование снегомерной аппаратуры на базе современной цифровой технологии позволяет существенно повысить точность прохождения маршрутов, контроля стабильности энергетической шкалы, эффективности и спектральной чувствительности детектора. Главным недостатком авиационной гамма-съемки осталась ее затратная составляющая – арендная стоимость воздушного судна.

Как альтернатива пилотируемой авиационной снегосъемки и традиционному наземному способу, в НПО «Тайфун» прорабатывается технология определения влагозапаса снежного покрова с применением беспилотных авиационных систем (БАС) и стационарных снегомерных постов (ССП).

Последние два десятилетия технология удаленного автоматического слежения за влагозапасом в снежном покрове активно разрабатывается компанией Кэмпбелл Сайентифик в Канаде (Choquette et al., 2008). По сути, Кэмпбелл Сайентифик сейчас является единственной компанией в мире, которая занимается промышленным производством стационарных постов измерения SWE (snow water equivalent – водный эквивалент снежного покрова) на основании гамма-спектрометрического измерения ослабления естественного излучения земли снежным покровом. Стационарные посты используются прежде всего в Канаде Исследовательским Центром Юкона при изучении изменения климата Северной Канады.

В зимний сезон 2022/23 г. в инициативном порядке на территории полигона высотной метеорологической мачты (ВММ) были проведены измерения запаса воды в снежном покрове дистанционным методом с использованием разработанного макета стационарного снегомерного поста.

Цель работы – опытная отработка отечественной технологии определения водного эквивалента снежного покрова (ВЭСП) дистанционным методом. Рабочий вид макета ССП на полигоне высотной метеорологической мачты (ВММ) представлен на рис. 7.

Основной состав стационарного снегомерного поста: блок детектирования с кристаллом NaJ(Tl) объемом 63х63мм, датчики температуры и давления, коммутационное оборудование, конструкция для позиционирования блока детектирования с коллиматором над ровной естественной поверхностью земли на высоте 2.5-3.0 м.

Принцип работы ССП основан на зависимости ослабления естественного гамма-излучения почвы от количества воды в слое снега на ограниченной площади под детектором. Площадь сбора информации ограничена коллиматором детектора и составляет ~ 70-80 м² при расположении детектора на высоте 2.5-3.0 м от поверхности. Измерения выполняются в постоянном

режиме с заданной экспозицией осреднения по 6, 12, 24 часа. Расчет водного эквивалента снежного покрова (ВЭСП) выполнялся по трем независимым параметрам: интегральному счету гамма-излучения в диапазоне энергий 0.02-3.00 мэВ и по счету в пиках прямого излучения с энергий 1460 кэВ (K-40) и 2614кэВ (Tl-208), что обеспечивало контроль и надежность получаемой информации. Измерительный комплекс ССП включает блок детектирования с кристаллом NaJ(Tl) объемом Ø63х63мм, измерителями температуры и давления, системой обеспечения электропитания и передачи данных в режиме реального времени на удаленное автоматизированное рабочее место (АРМ) потребителя.



Рисунок 7. Рабочий вид макета ССП на полигоне ВММ

Figure 7. Working view of the SSP layout at the VMM test site

Далее представлены результаты экспериментальных измерений с помощью ССП и контрольных измерений с помощью весового снегомера ВС-43 в сезон 2022/23 г. На рисунках 8-10 представлены графики ВЭСП, рассчитанные по гамма-спектральным характеристикам в сравнении с ВЭСП, полученного с помощью контрольных ручных измерений.

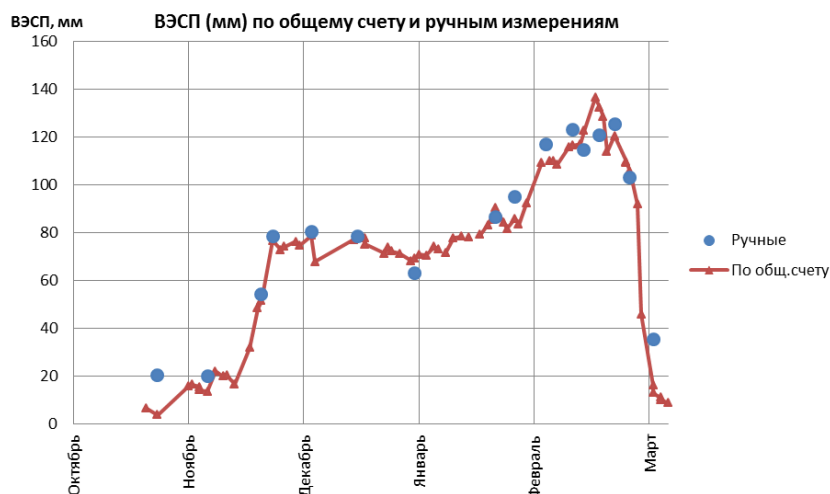


Рисунок 8. Значения водного эквивалента снега, полученные по значениям интегральной скорости счета гамма-излучения и контрольным измерениям за весь период наблюдений

Figure 8. Water equivalent values of snow obtained from the values of the integral velocity of gamma radiation counting and control measurements for the entire observation period

В табл. 2 представлены результаты измерения ВЭСП весовым и гамма-спектрометрическим методом по калию и по таллию.

Таблица 2. Обобщенные результаты измерения ВЭСП весовым и гамма-спектрометрическим методом по пику полного поглощения К-40 (1460 кэВ) и Тl-208 (2614 кэВ)

Table 2. Generalized results of measurement of water equivalent of snow using weight and gamma-ray spectrometric methods for the peak of total absorption of K-40 (1460 keV) and Tl-208 (2614 keV)

Дата	Контрольные измерения весовым методом, мм	Водный эквивалент снежного покрова, мм					
		К-40 (1460 кэВ) $A=0.00987$			Tl-208 (2614 кэВ) $a=0.00804$		
		ВЭСП, мм	Δ , мм	$\Delta\%$	ВЭСП, мм	Δ , мм	$\Delta\%$
01.12.2022	20.0	22.8	2.8	13.9	21.9	1.9	9.5
15.12.2022	54.2	54.9	0.7	1.3	51.6	-2.6	4.7
19.12.2022	78.7	78.7	0.0	0.0	86.1	7.5	9.5
29.12.2022	80.3	80.1	-0.3	0.3	80.1	-0.3	0.3
10.01.2023	78.5	79.0	0.4	0.6	84.0	5.4	6.9
26.01.2023	63.0	77.7	14.7	23.3	74.2	11.2	17.8
15.02.2023	86.5	85.5	-1.0	1.2	87.5	1.0	1.1
20.02.2023	95.3	99.1	3.9	4.1	98.8	3.5	3.7
28.02.2023	117.0	106.3	-10.7	9.1	101.7	-15.3	13.1
07.03.2023	123.3	113.8	-9.5	7.7	117.6	-5.8	4.7
10.03.2023	114.7	119.9	5.3	4.6	122.7	8.1	7.0
14.03.2023	120.7	128.0	7.3	6.1	125.1	4.4	3.6

17.03.2023	125.3	116.6	-8.7	6.9	112.5	-12.8	10.2
22.03.2023	103.0	106.6	3.6	3.5	105.0	2.0	1.9
27.03.2023	18.0	15.6	-2.4	6.9	19.8	1.8	9.7
Среднее				6.0			6.9

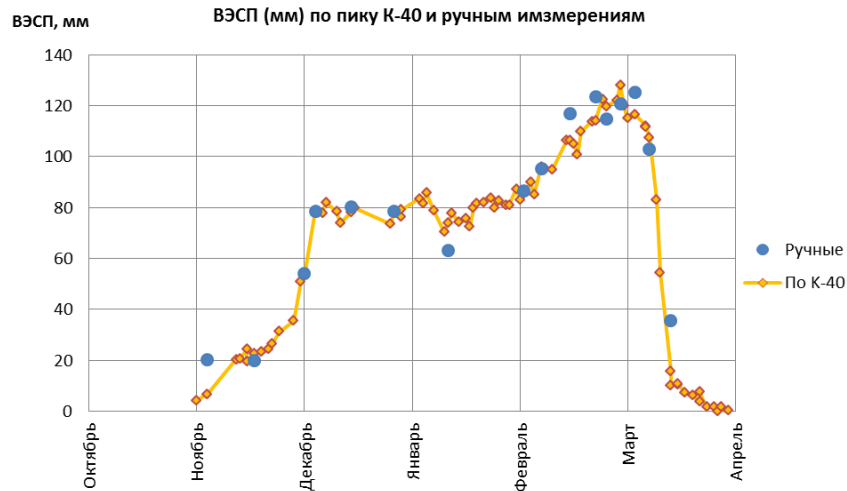


Рисунок 9. Значения водного эквивалента снега, полученные по значениям скорости счета гамма-излучения в окне пика полного поглощения К-40 (1460 кэВ) и по контрольным измерениям

Figure 9. Snow water equivalent values obtained from gammaradiation countingrates in the K-40 total absorption peak window (1460 keV) and from control measurements

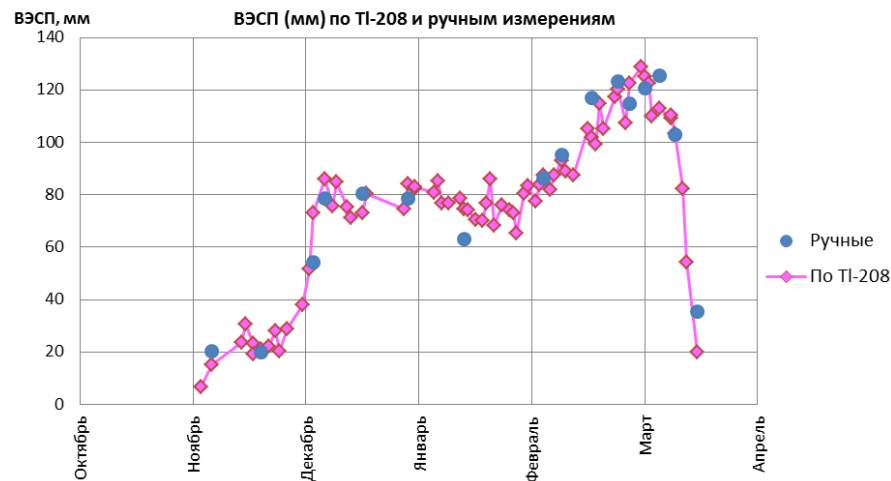


Рисунок 10. Значения водного эквивалента снега, полученные по значениям гамма- излучения в пике полного поглощения энергии Тl-208 (2614 кэВ) и по контрольным измерениям весовым методом (синяя линия)

Figure 10. Snow water equivalent values obtained from gamma radiation values at the peak of total energy absorption of Tl-208 (2614 keV) and from control measurements using weight method (blue line)

На рис. 11 представлены графики связи ручных измерений с измерениями, полученными с помощью ССП. Во всех трех случаях R^2 очень близко к 1, поэтому можно говорить о сильной линейной связи ВЭСП, вычисленного по гамма-измерениям, с ВЭСП по ручным измерениям.

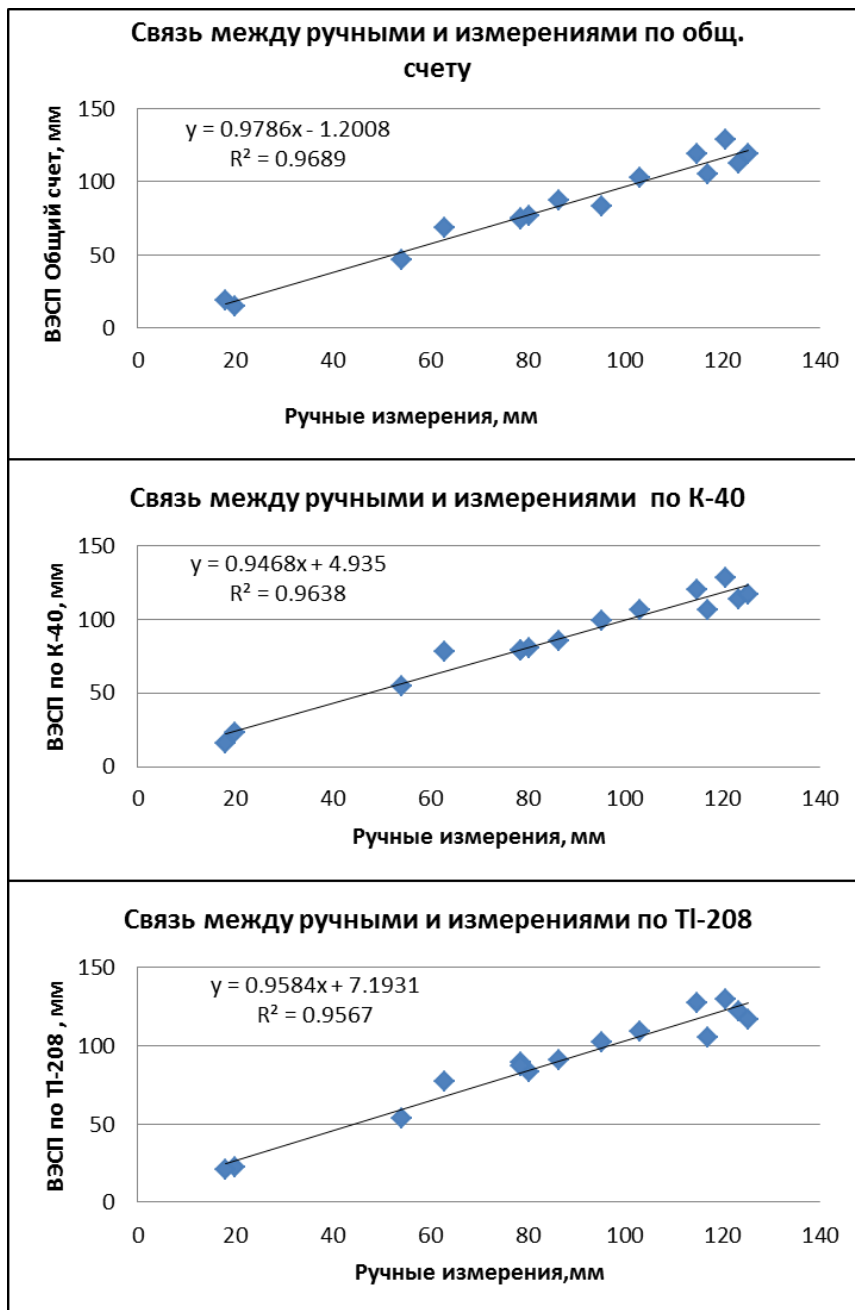


Рисунок 11. Сравнение результатов ручных измерений ВЭСП и измерений, полученных на ССП

Figure 11. Comparison of the results of manual measurements of water equivalent of snow cover and the measurements obtained at the Stationary Snow Measuring Station

Общие результаты сравнения вычисления ВЭСП по измерениям ССП и ручным измерениям представлены в табл.3.

Таблица 3. Сравнение результатов вычисления ВЭСП по измерениям ССП и ручным измерениям: коэффициенты уравнений регрессии, r – коэффициент корреляции с результатами ручных измерений и СКО – среднеквадратические отклонение

Table 3. A comparison of water equivalent of snow cover estimated using measurements at the Stationary Snow Measuring Station and from manual measurements: the regression coefficients, the coefficient r of correlation with manual measurements results, and the standard deviation

Вид гамма-измерений	Число наблюдений	Коэффициенты регрессии на ручные наблюдения		r	СКО, мм	$\Delta\%$
		Коэффициент регрессии	Свободный член			
Интегральный	15	0.979	-1.201	0.984	6.1	7.1
По К-40	15	0.947	4.935	0.982	6.4	6.0
По Тl-208	15	0.958	7.193	0.978	7.1	6.9

Параллельно с проработкой технологии определения ВЭСП на ССП в НПО «Тайфун» ведутся работы по подготовке к экспериментальным испытаниям беспилотного комплекса радиационной разведки на базе БАС самолетного типа с вертикальным взлетом и посадкой VolJetVT7 (рис.12) для гамма-съемки снежного покрова.

Аппаратно-программный комплекс (АПК) на базе БАС предназначен для мониторинга радиационной обстановки окружающей среды, а также определения влагозапаса снега методом гамма-съемки. В состав АПК входит блок детектирования с кристаллом NaJ(Tl) Ø63x160 мм, приемник спутниковой навигации, датчики температуры и давления, микропроцессор с ПО для регистрации, сбора, хранения и передачи результатов измерения, универсальная цифровая система передачи фото и видео подстилающей поверхности.

Продолжительность полета БАС типа VolJetVT7 составляет 3 часа с полезной нагрузкой до 5 кг в диапазоне скоростей 85-130 км/ч, что вполне достаточно на период апробации данной технологии. В перспективе для выполнения беспилотной гамма-съемки снежного покрова на сети наблюдений целесообразно использовать БАС самолетного типа среднего класса с вертикальным взлетом и посадкой типа VolJetVT20 или аналог с улучшенными тактико-техническими характеристиками: длительность полета до 8 часов с полезной нагрузкой до 15 кг в диапазоне скоростей 85-180 км/ч.

Использование БАС и ССП для определения влагозапаса в снежном покрове на сети наблюдений на первоначальном этапе может являться как дополнением к наземным съемкам с целью расширения обследуемых территорий с недостаточным количеством наблюдательных пунктов или их отсутствием и в то же время для проведения практического испытания данной технологии в различных климатических регионах. После сравнительного ана-

лиза и положительных заключений беспилотная технология может постепенно вытеснить трудоемкий ручной наземный метод.

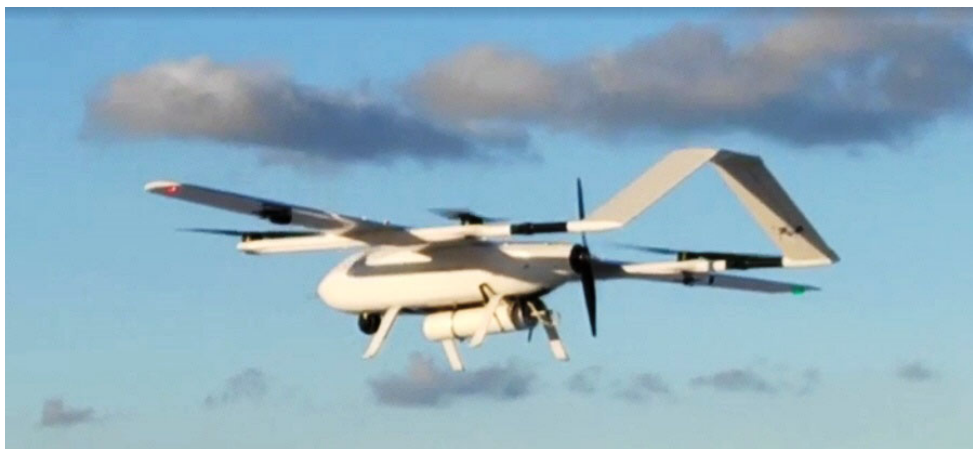


Рисунок 12. Беспилотный летательный аппарат самолетного типа VolJetVT7 с блоком детектирования на внешней подвеске (под фюзеляжем) во время испытательного полета

Figure 12. A test flight of VolJetVT7 aircraft-typedrone with a detection unit on the external sling (under the fuselage)

Возможная модернизация технологии мониторинга влагозапаса в снежном покрове

Современные аэрогамма-методы мониторинга влагозапаса снежного покрова требуют заранее выбранной сети наблюдений с определенными маршрутами и проведение на ней предварительной аэрогамма-съемки в летний период. Зимне-весенняя съемка должна проводиться тождественной аппаратурой. Необходимо строго выдерживать маршрут, выполнявшийся в летний период, и высоту полета, что накладывает серьезные требования на навигационную аппаратуру и программы обработки.

Важнейшим преимуществом однопролетных методов является их применимость для оперативного использования на произвольной территории. Именно это качество является необходимым в случае опасных природных явлений, когда требуется принятие срочных мер по предупреждению и оказанию помощи.

Для создания однопролетных методов измерения было предложено несколько вариантов:

1. Измерение интенсивности двух моноэнергетических гамма-линий одного радиоизотопа. Так как у них разный коэффициент поглощения, то по их соотношению можно определить влагозапас в снеге.
2. Одновременное измерение интенсивности гамма-излучения с помощью двух детекторов с разной диаграммой направленности.
3. Измерение интенсивности одной моноэнергетической гамма-линии и рассеянного излучения с энергией, близкой к первичной.

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. (Воробьев, Фридман, 1971). Указанные методы не требуют сведений о содержании радиоактивных элементов в почве и поэтому могут быть применены при однократном пролете над произвольной территорией, если только чувствительность детектора достаточна. К сожалению, энергетическое разрешение и чувствительность использовавшихся сцинтилляционных детекторов не позволили эффективно применить однопролетные способы измерения запасов воды в снеге с помощью самолетов.

Последние десятилетия за рубежом для разведки радиационной обстановки, а также в поисковой геофизике стали широко применяться беспилотные летательные аппараты БПЛА, оснащенные гамма-спектрометрами с детекторами на основе теллурида кадмия с размером $10 \times 10 \times 10$ мм и энергетическим разрешением 2% по линии 661 кэВ. В частности, они использовались в Японии при аварии на АЭС Фукусима. Недостаток эффективности регистрации кристаллов малого объема компенсировался малыми высотами полета БПЛА – до 1.5 м, малыми скоростями – до 3.5 км/ч и густой сетью опробования – до 1.5 м. между профилями. (Воробьев, Керцман., 2020). Возможно, их применение может оказаться особенно полезным для однопролетного контроля снежных заносов на автотрассах в условиях сильно пересеченной местности. В этом могут быть заинтересованы службы МЧС и Росгидромета. К сожалению, многое определяется доступностью приборной базы.

Использование аналогичных детекторов с большей эффективностью на современных БПЛА, позволит вести измерения при одноразовом пролете над произвольной территорией на трассе длиной до нескольких тысяч км, что особенно важно для Арктики и Сибири, в частности, для предсказания опасных природных явлений – наводнений. В этом могут быть заинтересованы Росгидромет и ВМО для более полного и точного глобального контроля динамики влагозапаса в снежном покрове и, соответственно, прогноза опасных явлений.

Также перспективны решения задач с помощью БПЛА в области гидрологии и сельскохозяйственной метеорологии:

- определение запаса воды в снежном покрове в бассейнах рек и на частных водосборах;
- определение относительной влажности почвы на с/х полях;
- визуальная оценка состояния водных акваторий рек и гидротехнических сооружений в период подготовки пропуска весеннего паводка;
- визуальная оценка состояния посевов сельскохозяйственных культур.

В связи с очень редкой сетью станций в Арктике и Сибири может оказаться полезным применение при выполнении осреднения данных по площади и метода Кригинга, показавшего свою эффективность при построении карт радиоактивного загрязнения.

Дистанционное зондирование из космоса

Характеристики снежного покрова также могут быть определены на основе данных, полученных с помощью дистанционного зондирования Земли с помощью ИСЗ. При этом несомненным преимуществом является возможность анализа значительных по площади территорий, которые позволяют оценить пространственные особенности и вклад различных факторов в формирование снежного покрова в целом и влагозапаса в частности. В настоящее время для измерения водного эквивалента снега SWE развиваются методы спутниковой микроволновой радиометрии, используя измерения радиояркостной температуры заснеженных территорий. К примеру, использование данных радиометров MODIS, МСУ-Э, ЕТМ+; LISS-III позволяет получать карты альбедо земной поверхности с пространственным разрешением от 20 до 1000 м в пикселе. Главный недостаток – это зависимость от облачности, т.е. при ее наличии метод не работает. Из-за относительно невысокой точности и надежности в настоящее время данные дистанционного зондирования Земли для определения SWE Росгидрометом в официальных Докладах не используются.

Заключение

Статья посвящена современному наземному и дистанционному мониторингу снежного покрова на территории Российской Федерации. Использование информационной базы ВНИИГМИ-МЦД позволяет получать исторические ряды, оперативные данные и нормативные характеристики влагозапаса в снеге на квазиоднородных территориях РФ, публикуемые в ежегодных докладах Росгидромета.

Работами НПО «Тайфун» доказана эффективность применения дистанционных методов мониторинга влагозапаса в снежном покрове с помощью стационарных снегомерных постов ССП и авиационного гамма-метода на выбранных маршрутах на территории Республики Башкорстан. Планируется применение для аэрогамма-съемки беспилотных летательных аппаратов. Привязанность современных методов аэрогамма-съемки к заранее выбранным постоянным маршрутам требует совершенствования существующих методов для создания и оперативного применения однопролетных дистанционных методов. В частности, это необходимо при возникновении опасных ситуаций, связанных с ранее непрогнозировавшимися наводнениями.

Исследование выполнено в инициативном порядке в рамках научной темы Росгидромета (ФГБУ «ИГКЭ») АААА-А29-120020590066-5 «Мониторинг глобального климата и климата Российской Федерации и ее регионов, включая Арктику. Развитие и модернизация технологий мониторинга».

Список литературы

Алисов, Б.П. (1956) *Климат СССР*, М., Московский университет, 127 с.

Булыгина, О.Н., Коршунова, Н.Н., Разуваев, В.Н. (2017) Мониторинг снежного покрова на территории Российской Федерации, *Труды Гидрометцентра России*, вып. 366, с. 87-96.

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*, т. 30, вып. 4, с. 385.

Воробьев, В.А., Керцман, В.М. (2020) Аэрогамма-съемке – 75 лет, *Евразийское научное объединение*, № 5, с. 63.

Воробьев, В.А., Банщикова, Л.С. (2022) О дистанционном мониторинге снежного покрова. К 60-летию разработки методов аэрогамма-съемки в России, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 8, № 4, с. 413-423.

Воробьев, В.А., Андреев, Ф.А., Коршунова, Н.Н. (2023) Мониторинг влагозапаса снежного покрова на территории Российской Федерации, *Третья всероссийская научная конференция ИГКЭ «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды: приземный климат, загрязняющие и климатически активные вещества»*, 15-17 ноября 2023 г.

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

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации в 2022 г. (2023) М., Росгидромет, 107 с.

Коган, Р.М., Никифоров, М.В., Урываев, В.А., Фридман, Ш.Д., Чирков, В.П., Яковлев, А.Ф. (1963). *Способ определения водных запасов в верхнем слое почвы и на ее поверхности*, Авторское свидетельство от 28.11.1963 г. № 1600876.

Коршунова, Н.Н., Давлетшин, С.Г., Аржанова, Н.М. (2021) Изменчивость характеристик снежного покрова на территории России, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 7, № 1, с. 80-100.

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.

Наставления гидрометеорологическим станциям и постам (1985) Выпуск 3, Часть 1, Л., Гидрометеиздат, 301 с.

Семнадцатый Всемирный метеорологический конгресс. Сокращенный окончательный отчет с резолюциями. Женева (2015), ВМО, № 1157.

Строганов, А.Н. (1986). Опыт внедрения авиационных гамма-съемок снежного покрова в восточных районах СССР, *Труды ВНИИСХМ*, вып. 17, Л., Гидрометеиздат.

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

Шакирзянов, Р.И., Разуваев, В.Н. (2000) Изменения в методиках наблюдения за состоянием снежного покрова на территории Российской Федерации, *Труды ВНИИГМИ-МЦД*, вып. 167, с. 41-51.

Choquette, Y., Lavigne, P., Nadeau, M., Ducharme, P., Martin, J.P., Houdayer, A., Rogoza, J. (2008): GMON, a new sensor for snow water equivalent via gamma monitoring, *International Snow Science Workshop*, 21-27, September 2008.

Daxi, J.B., Odegaard, H. (1970) Areal measurements of water equivalent of snow deposits by means of natural radioactivity in the ground, *Norwegian Nat. Comm. For Techn. Pap.*, no. 2, Oslo.

Peck E.L., Bissell, V.C. (1973) Areal measurements of water equivalent of snow deposits by terrestrial radiation survey, *Bull. Intern. Assoc. Hydro sci.*, vol. 18, no. 1.

References

Alisov, B.P. (1956) *Klimat SSSR* [Climate of the USSR], Moscow University, Moscow, Russia, 127 p.

Bulygina, O.N., Korshunova, N.N., Razuvaev, V.N. (2017) Monitoring snezhnogo pokrova na territorii Rossijskoj Federacii [Monitoring of snow cover on the territory of the Russian Federation], *Trudy of the Hydrometeorological Center of Russia*, issue 366, pp. 87-96.

Vorob'ev, V.A., Fridman, S.H.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 media by deformation of the hard part of the energy spectrum], *Atomic Energy*, vol. 30, issue 4, p. 385.

Vorob'ev, V.A., Kereman, V.M. (2020) Aerogamma-s"emke – 75 let [Aerogamma survey – 75 years], *Eurasian Scientific Association*, no. 5, 63 p.

Vorob'ev, V.A., Banshchikova, L.S. (2022) O distancionnom monitoringe snezhnogo pokrova. K 60-letiyu razrabotki metodov aerogamma-s"emki v Rossii [About remote monitoring of snow cover. To the 60th anniversary of the development of airborne gamma survey methods in Russia], *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 8, no. 4, pp. 413-423.

Vorob'ev, V.A., Andreev, F.A., Korshunova, N.N. (2023) Monitoring vlagozapasa snezhnogo pokrova na territorii Rossijskoj Federacii [Monitoring the moisture content of snow cover on the territory of the Russian Federation], *Tret'ya vserossiyskaya nauchnaya konferenciya ... IGKE. «Monitoring sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchej sredy: prizemnyj klimat, zagryaznyayushchie i klimaticheski aktivnye veshchestva», 15-17 noyabrya 2023* [Third All-Russian Scientific Conference IGKE. "Monitoring the state and pollution of the

environment: surface climate, pollutants and climate-active substances,” November 15-17, 2023].

Dmitriev, A.V., Fridman, SH.D. (1979) *Osnovy distancionnykh metodov izmereniya vlagozapasov v snege i vlazhnosti pochv po gamma-izlucheniyu zemli* [Fundamentals of Remote Methods for Measuring Moisture Reserves in Snow and Soil Moisture by Gamma Radiation of the Earth], Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia.

Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossijskoj Federacii v 2022 g. (2023) [Report on the peculiarities of the climate in the territory of the Russian Federation in 2022], Roshydromet, Moscow, Russia, 107 p.

Kogan, R.M., Nikiforov, M.V., Uryvaev, V.A., Fridman, SH.D., Chirkov, V.P., Yakovlev, A.F. (1963). *Sposob opredeleniya vodnykh zasobov v verhnem sloe pochvy i na ee poverhnosti*, Avtorskoe svidetel'stvo ot 28.11.1963 g. № 1600876 [A method for determining water reserves in the top layer of soil and on its surface], Author's Certificate, dated 28.11.1963 no. 1600876.

Korshunova, N.N., Davletshin, S.G., Arzhanova, N.M. (2021) *Izmenchivost' harakteristik snezhnogo pokrova na territorii Rossii* [Variability of snow cover characteristics in Russia (2021)], *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 7, no. 1, pp. 80-100.

Lipka, O.N., Romanovskaya, A.A., Semenov, S.M. (2021) *Prikladnye aspekty adaptatsii k izmeneniyam klimata v Rossii* (2021) [Applied Aspects of Climate Change Adaptation in Russia], *Fundamental and Applied Climatology*, no. 1, pp. 65-90.

Nastavleniya gidrometeorologicheskim stanciyam i postam. (1985) [Instructions for Hydrometeorological Stations and Posts], issue 3, part 1, Hydrometizdat. Leningrad., Russia, 301 p.

Shakirzyanov, R.I., Razuvaev, V.N. (2000) *Izmeneniya v metodikah nablyudeniya za sostoyaniem snezhnogo pokrova na territorii Rossijskoj Federacii* [Changes in the methods of monitoring the state of snowcover on the territory of the Russian Federation], *Trudy of VNIIGMI-WDC*, issue 167, pp. 41-51.

Semnadcatyj Vsemirnyj meteorologicheskij kongress: Sokrashchennyj okonchatel'nyj otchet s rezolyuciyami. ZHeneva. [Seventeenth World Meteorological Congress: Abridged Final Report with Resolutions], Geneva, (2015), WMO, no. 1157.

Stroganov, A.N. (1986) *Opyt vnedreniya aviacionnykh gamma-s"emok snezhnogo pokrova v vostochnykh rajonakh SSSR* [Experience in the Implementation of Aviation Gamma Surveys of Snow Cover in the Eastern Regions of the USSR], *Proceedings of VNIISHM*, issue 17, Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia.

Fridman, SH.D., Kolomeec, E.V., Pegoev, A.N., Oskomov, V.V., Abelencev, V.V. (1990) *Monitoring vlagozapasov v snege, pochvah, lednikah po estestvennym*

pronikayushchim izlucheniym [Monitoring of moisture reserves in snow, soils, glaciers by natural penetrating radiation], Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia.

Choquette, Y., Lavigne, P., Nadeau, M., Ducharme, P., Martin, J.P., Houdayer, A., and Rogoza J. (2008): GMON, a new sensor for snow water equivalent via gamma monitoring, *International Snow Science Workshop*, 21-27, September 2008.

Daxi, J.B., Odegaard, H. (1970) Areal measurements of water equivalent of snow deposits by means of natural radioactivity in the ground, *Norwegian Nat. Comm. For Techn. Pap.*, no. 2, Oslo.

Peck E.L., Bissell, V.C. (1973) Areal measurements of water equivalent of snow deposits by terrestrial radiation survey, *Bull. Intern. Assoc. Hydro sci.*, vol. 18, no. 1.

Статья поступила в редакцию (Received): 01.12.2023.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 07.01.2024.

Принята к публикации (Accepted): 20.01.2024.

Для цитирования / For citation

Воробьев, В.А., Андреев, Ф.А., Коршунова, Н.Н. (2024) Развитие и модернизация технологии мониторинга влагозапаса в снежном покрове на территории Российской Федерации, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 10, № 1, с. 109-129, doi:10.21513/2410-8758-2024-1-109-129.

Vorobyev, V.A., Andreev, F.A., Korshunova, N.N. (2024) Development and modernization of technology for monitoring the water reserves in snow cover on the territory of the Russian Federation, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 10, no. 1, pp. 109-129, doi:10.21513/2410-8758-2024-1-109-129.