

## Региональные особенности пространственно-временного распределения снежного покрова на территории Башкирии по данным дистанционного зондирования и станционных наблюдений

Д. Ю. Васильев<sup>1,3</sup>, В. А. Семенов<sup>2,4</sup>, Д. С. Кучерова<sup>1</sup>, О. И. Христуло<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Уфимский университет науки и технологий, Уфа, 450008, Россия  
E-mail: [vasilev.dyu@uust.ru](mailto:vasilev.dyu@uust.ru)

<sup>2</sup> Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва, 119017, Россия  
E-mail: [vasemenov@ifaran.ru](mailto:vasemenov@ifaran.ru)

<sup>3</sup> Институт степи УрО РАН, Оренбург, 460000, Россия

<sup>4</sup> Институт географии РАН, Москва, 119017, Россия

Исследуется пространственно-временная специфика высоты снежного покрова (ВСП) и запасов воды в снеге (ЗВС) на территории Башкирии на основе данных из архива GlobSnow и станционных наблюдений Росгидромета. Проведён корреляционный анализ характеристик снежного покрова по данным снегомерных измерений на метеорологических станциях и архива GlobSnow, найдена высокая степень связи этих данных в районах Предуралья и Зауралья. Установлен рост снегозапасов в Башкирии на всём доступном интервале наблюдений с наиболее выраженными максимумами в Предуралье. Определены районы с однородными по характеру колебаний ВСП и ЗВС. Для выявления периодичностей в данных ВСП и ЗВС проведён вейвлет-анализ с оценкой статистической значимости полученных результатов. Метод кросс-вейвлет-анализа использовался для установления связи между колебаниями ВСП и ЗВС с климатическими индексами, такими как Арктическое колебание, Североатлантическое колебание, Скандинавский индекс и Восточно-атлантический – Западно-российский индекс. Показано, что аномалии ВСП и ЗВС северных районов и горно-лесной зоны Башкирии связаны с усилением зонального переноса в высоких широтах, а аномалии ВСП и ЗВС южных районов Башкирии обусловлены усилением межширотного обмена.

**Ключевые слова:** высота снежного покрова, запас воды в снеге, инструментальные измерения, географическая привязка, пространственная интерполяция, линейный тренд, спектральный анализ

Одобрена к печати: 28.10.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-321-332

### Введение

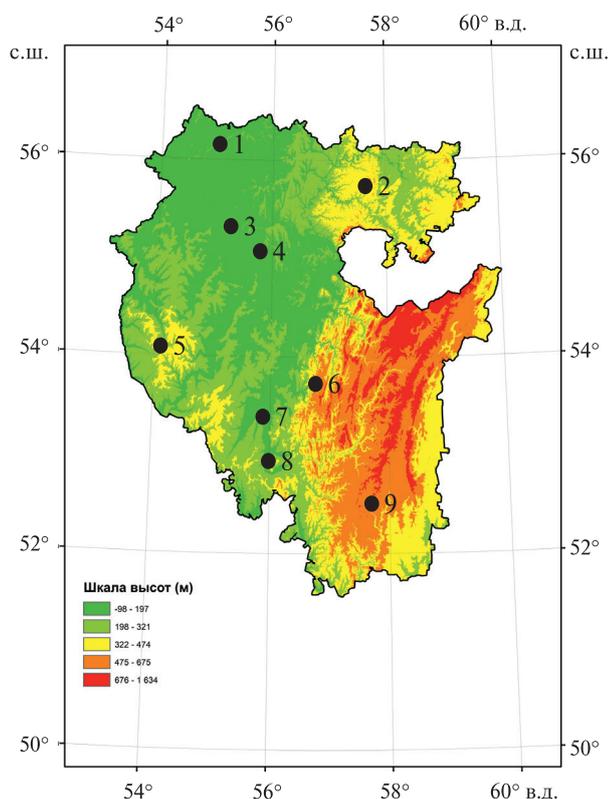
Влияние снежного покрова на природные процессы и хозяйственную деятельность очевидно (Мохов, Парфенова, 2021; Liu et al., 2023; Wu et al., 2023). В гидрометеорологической практике наиболее часто используемые среди параметров, определяющих свойство снежного покрова, — это его высота, плотность и запас воды в снеге (Сосновский и др., 2018; Шмакин, 2010; Guyennon et al., 2019). Все эти параметры влияют на химический состав и термический режим почв (Deng et al., 2023; Lindfors et al., 2025), определяют во многом весенний сток, влажность грунта (Кучмент и др., 2009; Vasil'ev et al., 2013, 2019; Zhao et al., 2022), также снежный покров является оптимальной депонирующей средой для получения информации о поступлении загрязняющих веществ из атмосферы (Чульдум, Чупикова, 2023; Nawrot et al., 2016).

Для определения параметров снежного покрова проводятся регулярные снегосъёмки, а также используют дистанционные измерения (Воробьев и др., 2024; Георгиевский и др., 2020; Дагуров и др., 2020). В инструментальных измерениях учитывают тип и свойства подстилающей поверхности, известно, например, что в лесу к началу снеготаяния запас воды в снеге скапливается больше, чем в поле (Голубев и др., 2009; Пахомов и др., 2004; Пигольцина,

Фасолько, 2022; Попова и др., 2015). Аккумуляция снега в лесу определяется метеорологическими условиями и таксационными характеристиками (порода деревьев, возраст, густота, ярусность и т. п.), так, наибольший снегозапас отмечен в лиственных взрослых лесах средней густоты, наименьшим снегозапасом характеризуются смешенные леса средней и редкой густоты (Кузьмин, 1961). Влияние метеорологических условий и глобального потепления на снежный покров хорошо изучено и параметры снежного покрова могут изменяться неоднозначно (Китаев и др., 2025; Попова, Полякова, 2013). В исследованиях (Brown, Robinson, 2011; Bulygina et al., 2011) отмечено, что сокращение площади снежного покрова на евразийском континенте наблюдается у западных и южных границ и сопровождается накоплением снега зимой в высоких широтах, в том числе и на Южном Урале. Цель данной работы — изучение региональных особенностей снежного покрова на территории Башкирии (Южный Урал) и их связь с фазами основных для данной территории циркуляционных мод на основе индексов циркуляции, данных наблюдений метеорологической сети и дистанционного зондирования.

### Данные и территория исследования

Базой для настоящего исследования послужили инструментальные измерения с девяти метеорологических станций наблюдательной сети ВНИИГМИ-МЦД Росгидромета (<https://www.meteo.ru>) на территории Республики Башкортостан (рис. 1) и данные дистанционного зондирования проекта GlobSnow (<https://www.globsnow.info>) (Булыгина и др., 2014; Шакирзянов, Разуваев, 2000; Zschenderlein et al., 2023). Архив данных проекта GlobSnow представлен на регулярной сетке с разрешением  $0,25 \times 0,25^\circ$  для северного полушария Земли в двух форматах: MAT и NetCDF. Первый удобен для обработки в программе MatLab (<https://www.mathworks.com>), второй — преимущественно в программе ArcGIS (<https://www.arcgis.com>). Продолжительность рядов средних суточных и средних месячных значений высоты снежного покрова (ВСП) и запаса воды в снеге (ЗВС) по данным наземных наблюдений составила 89 лет (с 1936 по 2024 г.), спутниковых измерений ВСП и водного эквивалента снега SWE (англ. Snow Water Equivalent) — 40 лет (с 1979 по 2018 г.).



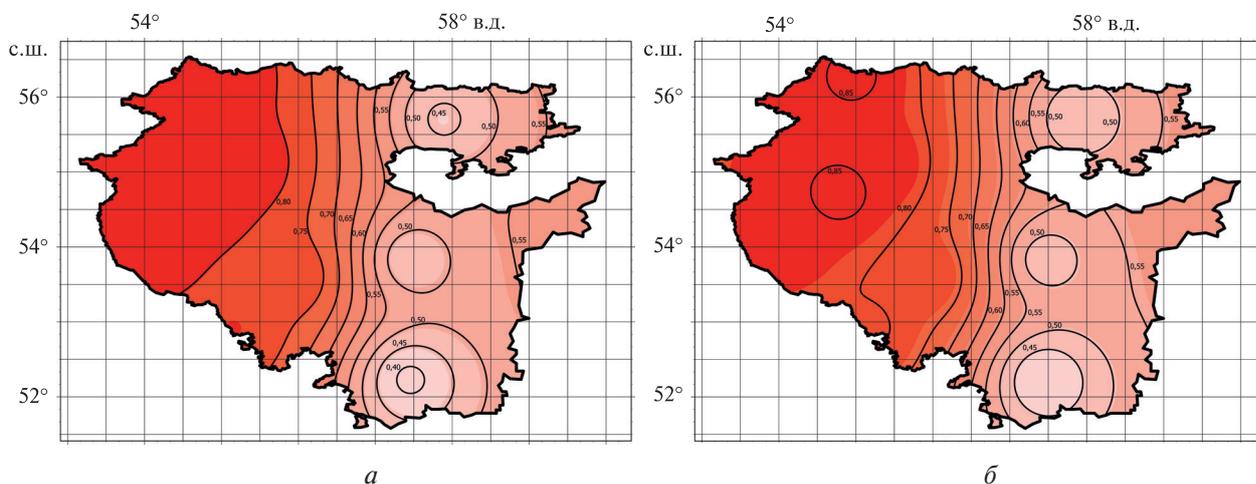
Также в работе были использованы данные по климатическим индексам, взятым с официального сайта NOAA (англ. National Oceanic and Atmospheric Administration) и находящимся в открытом доступе (<https://psl.noaa.gov/data/time-series>): Арктическое колебание (англ. Arctic Oscillation — AO), Североатлантическое колебание (англ. North Atlantic Oscillation — NAO), Восточно-атлантическое — Западно-русское колебание (англ. East Atlantic–Western Russia — EAWR), Скандинавский индекс (англ. Scandinavia Index — SCAND), подробное описание которых представлено в работе (Barnston, Livezey, 1987). Для всех индексов длина ряда составила 75 лет — с 1950 по 2024 г.

Рис. 1. Территория Башкирии, чёрными точками отмечены метеорологические станции наблюдательной сети Росгидромета: 1 — Янаул, 2 — Дуван, 3 — Кушнареново, 4 — Уфа, 5 — Аксаково, 6 — Тукан, 7 — Стерлитамак, 8 — Мелеуз, 9 — Зилаир

Большая часть Республики Башкортостан расположена на юго-востоке европейской территории России, площадь республики 143 600 км<sup>2</sup>, её протяжённость с севера на юг 550 км, с запада на восток 430 км. Территория Башкирии состоит из трёх частей: западная, самая большая по площади — равнинная (Предуралье), вторая — горно-лесная зона и третья, самая маленькая по площади — Зауралье. В пределах границ республики находятся два крупных бассейна рек Белой и Урал. Климат Башкирии континентальный, средняя годовая температура воздуха +1,9 °С, температура в январе около –15 °С, в июле +21 °С. Среднее годовое количество атмосферных осадков ~500 мм, преобладают ветра южного и юго-западного направления, снежный покров устанавливается в конце ноября и полностью сходит к концу апреля, среднее число дней в году со снежным покровом ~170.

## Результаты и обсуждение

Для определения тесноты связи станционных данных и дистанционного зондирования состояния снежного покрова был проведён корреляционный анализ, результаты которого представлены на *рис. 2*. Установлена высокая корреляционная связь станционных данных и архива GlobSnow в Предуралье и Зауралье, теснота связи анализируемых данных в горно-лесной зоне Башкирии оказалась слабой. Сопоставление данных ВСП и ЗВС метеорологических станций и архива GlobSnow выявило сильные отличия по отдельным станциям, прежде всего равнинной и горной областей исследуемого региона, а также занижение снегозапаса в данных дистанционного зондирования по сравнению с данными снегомерных съёмок. По всей видимости, такие результаты анализа связаны с ограниченным числом используемых метеорологических станций, погрешностью методов дистанционного зондирования и, как следствие, качеством пространственной интерполяции в проекте GlobSnow. Именно по этой причине последующий анализ проводился с данными метеорологических станций Росгидромета.



*Рис. 2.* Пространственное распределение коэффициента корреляции между станционными данными и архивом GlobSnow на территории Башкирии: *а* — ЗВС/SWE; *б* — ВСП

Предварительно анализируемые данные были осреднены по исследуемой площади с применением метода треугольника, с учётом весовых коэффициентов (Каган, 1979). Были использованы данные ВСП и ЗВС (SWE) по отдельным месяцам зимы (декабрь, январь, февраль) и за зимний период в целом. На *рис. 3* (см. с. 324) показана временная специфика запасов воды в снеге по территории Башкирии. Отметим, что образование устойчивого снежного покрова на территории Башкирии распространяется с северо-востока на юго-запад, его разрушение и сход в обратном направлении.

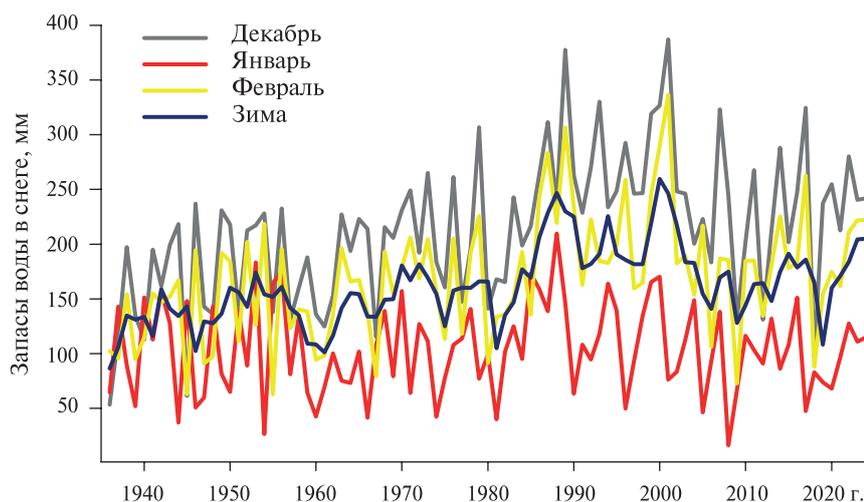


Рис. 3. Временная динамика запасов воды в снеге по данным станционных наблюдений для территории Башкирии за 1936–2024 гг.

Устойчивый снежный покров на большей части территории Башкирии образуется к концу ноября – началу декабря, его частичное разрушение начинается в марте, этим объясняется выбор анализируемых данных исследуемой территории. Средняя продолжительность залегания снежного покрова, его высота и запасы воды в снеге на территории Башкирии колеблются от 153 до 164 дней, 40–45 см и 37–50 мм в Предуралье, 172–177 дней, 105–123 см и 86–93 мм в горно-лесной зоне Башкирии и Зауралье. Такой разброс в сроках залегания снежного покрова, его высоте и значениях запасов воды в снеге обусловлен физико-географическими особенностями Башкирии, большой протяжённостью с севера на юг и барьерным эффектом Уральских гор.

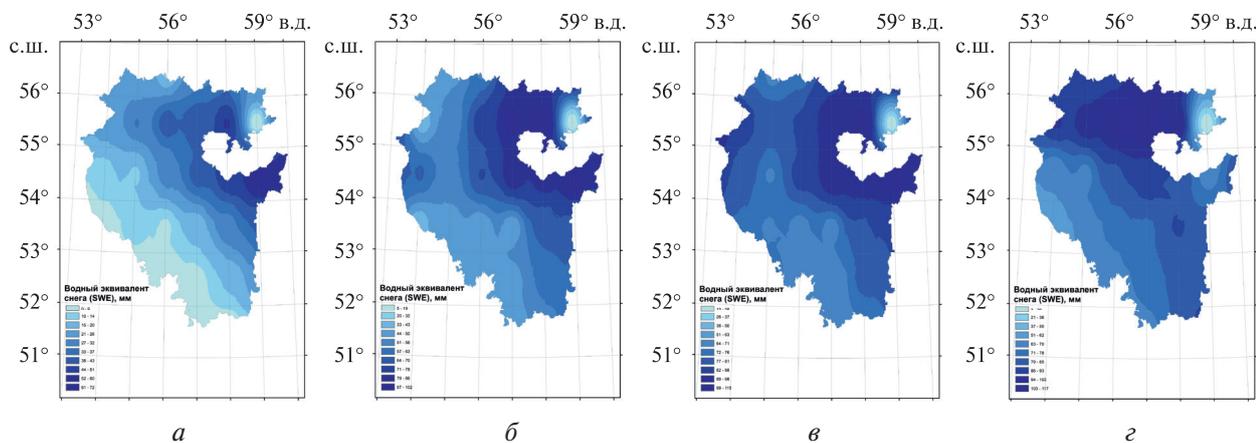


Рис. 4. Запасы воды в снеге (SWE) по территории Башкирии, среднее за 1936–2024 гг.: а — декабрь; б — январь; в — февраль; г — зимний сезон

По ежегодным данным для каждого месяца в отдельности и зимнего сезона в целом вычислено среднее многолетнее значение высоты снежного покрова и запасов воды в нём (рис. 4). Анализ относительной изменчивости характеристик снежного покрова осуществлялся вычислением коэффициента вариации, который варьировался для значений ВСП от 0,16 (в Предуралье) до 0,34 (в горно-лесной зоне Башкирии и Зауралье), для ЗВС от 0,14 (в Предуралье) до 0,31 (в горно-лесной зоне республики и Зауралье). Минимальные и максимальные значения ВСП и ЗВС отличаются от средних многолетних значений в 1,5–2 раза соответственно. Вычисления среднего квадратического отклонения ВСП и ЗВС показали,

что они варьируются от 13 см в Предуралье до 31 см в горно-лесной зоне Башкирии и от 16 до 55 мм для равнинной и горной областей Башкирии соответственно. При этом амплитуда колебаний ВСП и ЗВС в Предуралье минимальна, в горно-лесной зоне республики и Зауралье — максимальная.

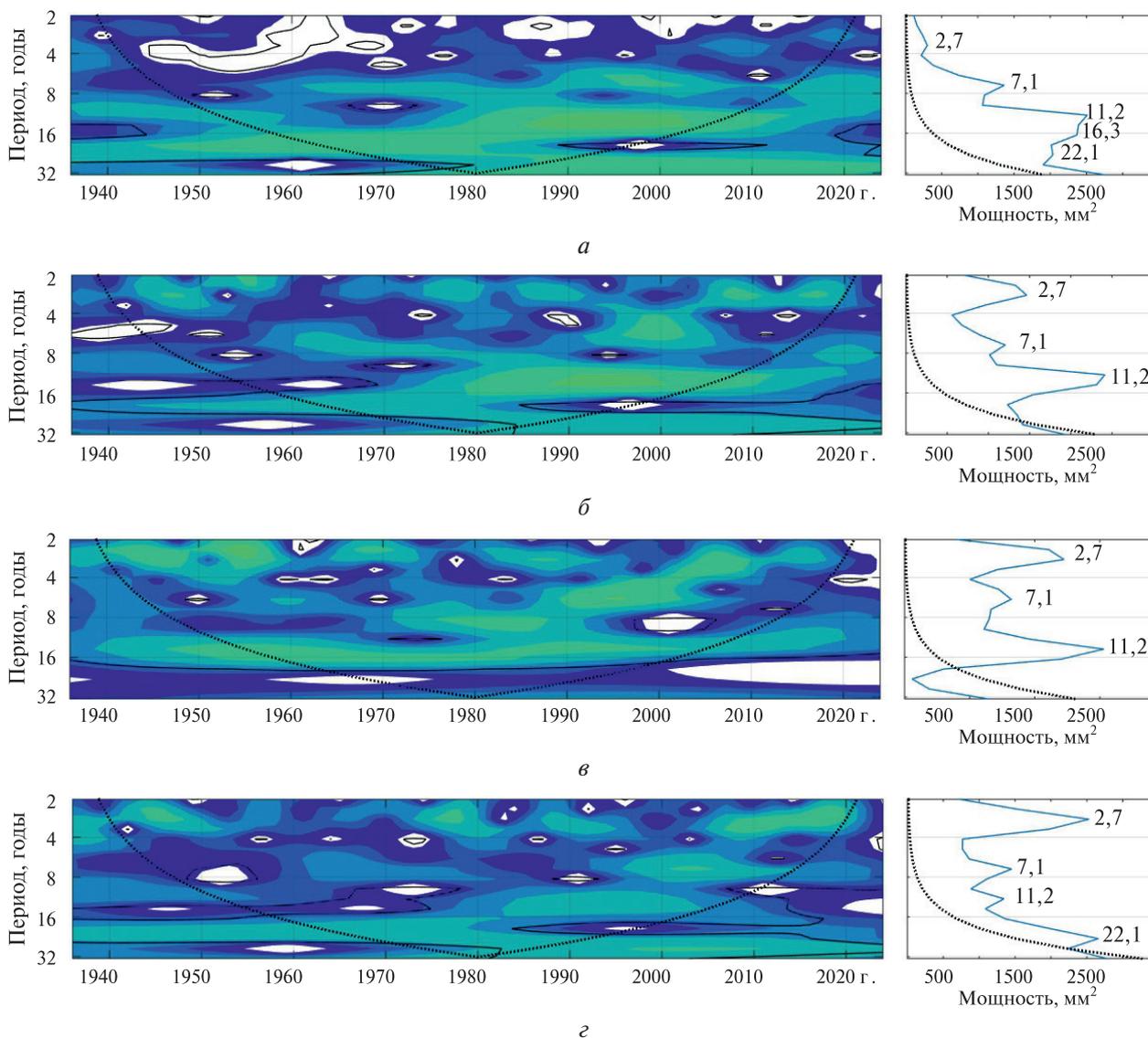
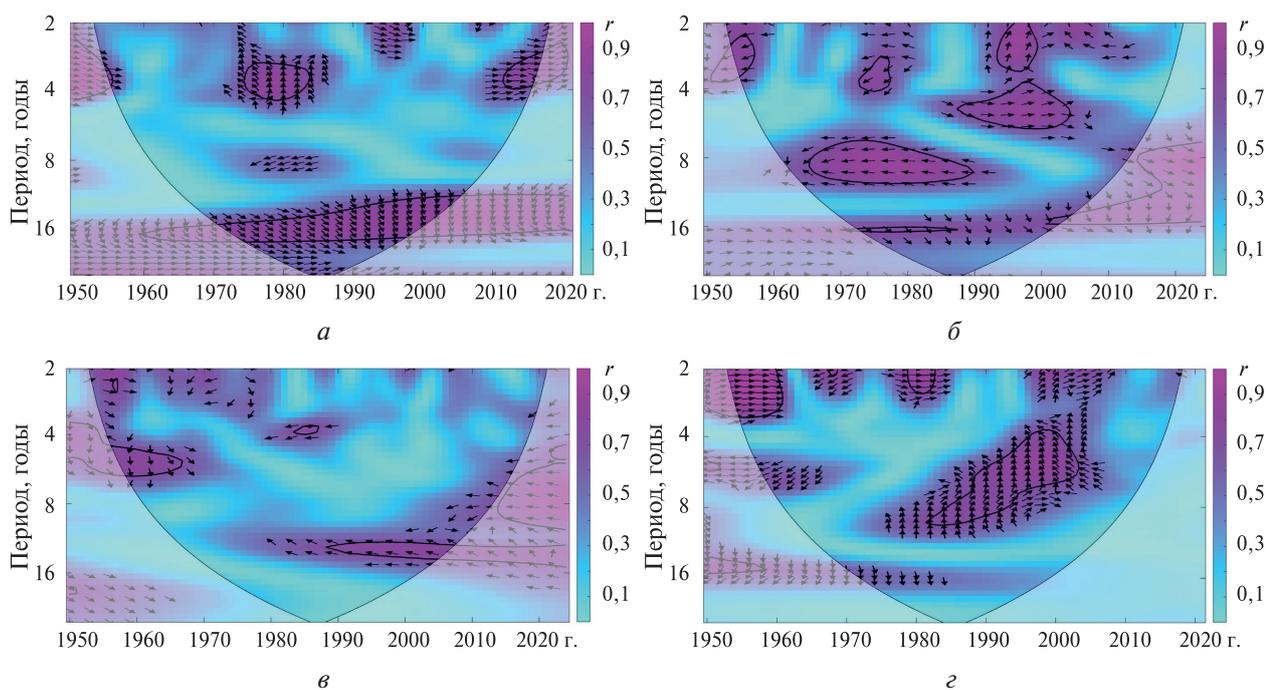


Рис. 5. Вейвлет-анализ данных запасов воды в снегу по станционным наблюдениям для территории Башкирии: а — зимний сезон; б — февраль; в — январь; г — декабрь

Для оценки климатических изменений и выявления специфики в колебаниях характеристик снежного покрова были вычислены линейные тренды и использован метод вейвлет-разложения, обстоятельное описание которого представлено в работах (Meysers et al., 1993; Torrence, Compo, 1998). Известно, что коэффициент угла наклона линейного тренда характеризует скорость изменения на анализируемом временном интервале, в нашем случае это 89 лет (1936–2024). Оценки линейного тренда, полученные методом наименьших квадратов, показывают увеличение ВСП и ЗВС по всем трём месяцам и за зимний сезон в целом, максимальная ВСП — +0,25 см/год (декабрь), минимальная — +0,05 см/год (январь), значения для ЗВС — +1,21 и +0,04 мм/год соответственно. Выявленные с использованием метода вейвлет-анализа циклы в колебаниях ВСП и ЗВС можно условно разделить на две группы: первая — высокочастотные с периодами от 2,7 до 7,1 года, вторая — низкочастотные с периодами

11,2–22,1 года. На *рис. 5* (см. с. 325) представлен результат вейвлет-разложения осреднённых по территории Башкирии значений ЗВС, слева — локальные вейвлет-спектры, справа — глобальные спектры (периодограммы). Первые показывают временную локализацию выявленных циклов в колебаниях характеристик снежного покрова, вторые отображают вклад обнаруженных гармоник в общую энергию сигнала. Все найденные периоды колебаний статистически значимые в пределах 90 % доверительной вероятности.

С целью установления возможной связи колебаний ВСП и ЗВС с индексами атмосферной циркуляции был проведён кросс-вейвлет-анализ анализируемых рядов данных. На этом этапе исследования была определена теснота связи и согласованность (когерентность) колебаний характеристик снежного покрова с климатическими индексами, подробное описание используемого метода представлено в работе (Maraun, Kurths, 2004). Следует отметить, что поскольку спектральный анализ ВСП и ЗВС и кросс-вейвлет-преобразование характеристик снежного покрова с климатическими индексами АО, NAO, SCAND и EAWR оказались практически идентичными, в настоящей работе приведены результаты только с данными ЗВС. На *рис. 6* представлен результат кросс-вейвлет-анализа ЗВС зимнего сезона с вышеперечисленными климатическими индексами. Направление стрелок на нём указывает на характер выявленных колебаний: вправо — синфазно, влево — противофазно, вверх или вниз — определяет запаздывание или опережение на  $\pi/2$  колебаний ЗВС по сравнению с колебаниями климатических индексов, также были вычислены корреляционные отношения для колебаний всех исследуемых характеристик.



*Рис. 6.* Кросс-вейвлет-анализ данных запасов воды в снеге зимнего сезона по стационарным наблюдениям для территории Башкирии и климатических индексов: *а* — АО; *б* — NAO; *в* — SCAND; *г* — EAWR. *r* — коэффициент корреляции Пирсона

Очевидно, пространственно-временные особенности распределения снежной аккумуляции на территории Башкирии тесно связаны с атмосферными процессами, которые определяют изменения температурного режима, атмосферных осадков в Северной Евразии, поэтому выбор климатических индексов АО, NAO, SCAND и EAWR был в этой связи абсолютно логичным (Попова, 2018; Titkova, Zolotokrylin, 2024; Vasil'ev, Velmovsky, 2024). Кросс-вейвлет-анализ ЗВС с индексом АО установил синфазный характер связи с опережением на  $\pi/2$  в области высоких частот, в области низких частот характер связи преимущественно с опе-

режением на  $\pi/2$  (см. *рис. 6а*). Кросс-вейвлет-преобразование ЗВС с индексом NAO выявило статистически значимую связь в низкочастотной области, тип когерентности противофазный, а в области высоких частот тип когерентности преимущественно синфазный и с запаздыванием на  $\pi/2$  (см. *рис. 6б*). Результаты кросс-вейвлет-анализа ЗВС с индексом SCAND (см. *рис. 6в*) показали статистически значимую связь в области высоких частот, тип когерентности с опережением на  $\pi/2$ , в области низких частот тип когерентности противофазный. Высокая теснота связи ЗВС установлена с индексом EAWR (см. *рис. 6г*), в области высоких частот тип когерентности преимущественно синфазный, в области низких частот с запаздыванием на  $\pi/2$ .

Изменение в тенденции приземной температуры воздуха на территории Башкирии наблюдается с 70-х гг. XX в. (Васильев, Ферапонтов, 2015), многие исследования объясняют это как следствие усиления межширотного обмена и ослабления зональной циркуляции (Попова и др., 2015; Cohen et al., 2010; Wang, Chen, 2010). Поэтому можно предположить, что тесная связь индексов NAO и АО так же определяет тенденции в изменении снежного покрова на территории Башкирии. Анализ временного хода индексов SCAND и EAWR констатирует увеличение повторяемости положительных аномалий SCAND и отрицательных аномалий индекса EAWR на определённых временных интервалах, что, исходя из их циркуляционных механизмов, приводит к усилению зонального переноса. Следовательно, главным фактором, определяющим аномалии ВСП и ЗВС на большей части территории Башкирии (в основном в северных районах республики и горно-лесной зоне), является зональный перенос, при усилении которого циклоны идут с северо-запада на юго-восток европейской территории России. Для южных районов Башкирии аномалии ВСП и ЗВС определяются главным образом межширотным обменом, когда циклоны проходят с юго-запада на северо-восток по европейской территории России.

## Заключение

На основе проведённого сравнительного анализа стационарных данных и архива GlobSnow была установлена высокая теснота связи этих рядов для территории Предуралья и Зауралья. Анализ характеристик снежного покрова на территории Башкирии позволил описать специфику их пространственно-временного распределения, определить тенденции изменения. Выявлено, что на всём доступном интервале анализируемых данных, как и в последние десятилетия, наблюдается рост снегозапаса в отдельные месяцы года (декабрь, январь, февраль) и в зимний сезон. Статистический анализ данных позволил определить относительную изменчивость характеристик снежного покрова на территории Башкирии.

Установлено, что наибольшая изменчивость снежного покрова отмечается в северных районах республики и горно-лесной зоне и обусловлена положительным трендом с начала 70-х гг. XX в., связанным с усилением зонального переноса и циклонической активности в Северной Евразии. Для южных районов режим снегонакопления зависит от межширотного обмена, поэтому наибольший интерес может вызывать соотношение границ этих субрегионов, которые, очевидно, должны учитываться при оценке вклада аккумуляции снега в колебания речного стока в половодье для бассейна реки Белая.

С помощью метода вейвлет-преобразования проведён анализ временных рядов ВСП и ЗВС по территории Башкирии. В результате было выявлено несколько циклов в колебаниях значений ВСП и ЗВС, различные по продолжительности и частоте. Проведённый кросс-вейвлет-анализ обнаруженных циклов в колебаниях ВСП, ЗВС и климатических индексов АО, NAO, SCAND и EAWR установил высокую степень связи на заданных временных интервалах, а также определил тип когерентности этих колебаний.

Работа выполнена в рамках госзадания № АААА-А21-121011190016-1, при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-17-00138.

## Литература

1. Булыгина О. Н., Коршунова Н. Н., Разуваев В. Н. Специализированные массивы данных для климатических исследований // Тр. ВНИИГМИ-МЦД. 2014. Вып. 177. С. 136–148.
2. Васильев Д. Ю., Феропонтов Ю. И. Тренды в колебаниях приземной температуры воздуха на примере Башкирии // Изв. РАН. Сер. геогр. 2015. № 1. С. 77–86.
3. Воробьев В. А., Андреев Ф. А., Коршунова Н. Н. Развитие и модернизация технологии мониторинга влагозапаса в снежном покрове на территории Российской Федерации // Фундам. и приклад. климатология. 2024. Т. 10. № 1. С. 109–129.
4. Георгиевский М. В., Романов С. В., Паршина Т. В., Трушевский В. Л. Микроволновые данные дистанционного зондирования влагозапасов в снежном покрове: сравнение с наземными наблюдениями и обратная зависимость с зимне-весенней температурой воздуха на примере Невско-Ладужского бассейна // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 2. С. 252–264. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-252-264.
5. Голубев В. Н., Петрушина М. Н., Фролов Д. М. Межгодовые вариации строения снежного покрова на территории России // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5. География. 2009. № 3. С. 16–25.
6. Дагуров П. Н., Дмитриев А. В., Добрынин С. И., Чимитдоржиев Т. Н. Оценка параметров снежного покрова на земной поверхности с равнинным и холмисто-гористым рельефом методом радарной интерферометрии // Вычисл. технологии. 2020. Т. 25. № 4. С. 58–68. DOI: 10.25743/IST.2020.25.4.006.
7. Каган Р. Л. Осреднение метеорологических полей. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 216 с.
8. Китаев Л. М., Титкова Т. Б., Алешина М. А. Современные тенденции изменчивости средних и экстремальных значений толщины снега Восточно-Европейской равнины // Криосфера Земли. 2025. Т. 29. № 2. С. 55–63. DOI: 10.15372/KZ20250205.
9. Кузьмин П. П. Процесс таяния снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 345 с.
10. Кучмент Л. С., Романов П. Ю., Гельфан А. Н., Демидов В. Н. Оценка характеристик снежного покрова путем совместного использования моделей и спутниковой информации // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 4. С. 47–56.
11. Мохов И. И., Парфенова М. Р. Изменения протяженности снежного покрова в Евразии по спутниковым данным в связи с полушарными и региональными температурными изменениями // Докл. Российской академ. наук. Науки о Земле. 2021. Т. 501. № 1. С. 78–85. DOI: 10.31857/S2686739721110104.
12. Пахомов Л. А., Феоктистов А. А., Данекин А. И., Мирошин А. А. Использование данных дистанционного зондирования в микроволновой области спектра в задаче восстановления водного эквивалента снега // Солнечно-земная физика. 2004. Вып. 5. С. 18–20.
13. Пигольцина Г. Б., Фасолько Д. В. Методика расчета пространственного распределения высоты снежного покрова в условиях сложного рельефа при недостаточной метеорологической информации (на примере Анюйского хребта) // Метеорология и гидрология. 2022. № 2. С. 45–52. DOI: 10.52002/0130-2906-2022-2-45-52.
14. Попова В. В. Современные изменения климата на севере Евразии как проявление вариаций крупномасштабной атмосферной циркуляции // Фундам. и приклад. климатология. 2018. Т. 1. С. 84–111. DOI: 10.21513/2410-8758-2018-1-84-111.
15. Попова В. В., Полякова И. А. Изменение сроков разрушения устойчивого снежного покрова на севере Евразии в 1936–2008 гг.: влияние глобального потепления и роль крупномасштабной атмосферной циркуляции // Лёд и Снег. 2013. Т. 53. № 2. С. 29–39. DOI: 10.15356/2076-6734-2013-2-29-39.
16. Попова В. В., Морозова П. А., Титкова Т. Б. и др. Региональные особенности современных изменений зимней аккумуляции снега на севере Евразии по данным наблюдений, реанализа и спутниковых измерений // Лёд и Снег. 2015. Т. 55. № 4. С. 73–86. DOI: 10.15356/2076-6734-2015-4-73-86.
17. Сосновский А. В., Осокин Н. И., Черняков Г. А. Динамика снегозапасов на равнинной территории России в лесу и в поле при климатических изменениях // Лёд и Снег. 2018. Т. 58. № 2. С. 183–190. DOI: 10.15356/2076-6734-2018-2-183-190.
18. Чульдун А. Ф., Чупикова С. А. Динамика показателей загрязненности снежного покрова в г. Кызыле в 2013–2021 гг. по данным дистанционного зондирования // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36. № 4. С. 299–303. DOI: 10.15372/AOO20230406.
19. Шакирзянов Р. И., Разуваев В. Н. Изменения в методиках наблюдения за состоянием снежного покрова на территории Российской Федерации // Тр. ВНИИГМИ-МЦД. 2000. Вып. 167. С. 41–51.
20. Шмакин А. Б. Климатические характеристики снежного покрова Северной Евразии и их изменения в последние десятилетия // Лёд и Снег. 2010. № 1. С. 43–57.

21. *Barnston A. G., Livezey R. E.* Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns // *Monthly Weather Review*. 1987. V. 115. P. 1083–1126. DOI: 10.1175/1520-0493(1987)115<1083:CSAPOL>2.0.CO;2.
22. *Brown R., Robinson D.* Northern Hemisphere spring snow cover variability and change over 1922–2010 including an assessment of uncertainty // *The Cryosphere*. 2011. No. 5. P. 219–229. DOI: 10.5194/tc-5-219-2011.
23. *Bulygina O. N., Groisman P. Ya., Razuvaev V. N., Korshunova N. N.* Changes in snow cover over Northern Eurasia since 1966 // *Environmental Research Letters*. 2011. V. 6. No. 4. Article 045204. DOI: 10.1088/1748-9326/6/4/045204.
24. *Cohen J., Foster J., Barlow M. et al.* Winter 2009–2010: A case study of an extreme Arctic Oscillation event // *Geophysical Research Letters*. 2010. V. 37. Article L17707. DOI: 10.1029/2010GL044256.
25. *Deng M., Li P., Liu W. et al.* Deepened snow cover increases grassland soil carbon stocks by incorporating carbon inputs into deep soil layers // *Global Change Biology*. 2023. V. 29. Iss. 16. P. 4686–4696. DOI: 10.1111/gcb.16798.
26. *Guyennon N., Valt M., Salerno F. et al.* Estimating the snow water equivalent from snow depth measurements in the Italian Alps // *Cold Regions Science and Technology*. 2019. V. 167. Article 102859. DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102859.
27. *Lindfors L., Ylilauri V., Xu J. et al.* Effect of snow cover and soil temperature on tree and forest floor processes: a case study in mature boreal forest // *J. Forestry Research*. 2025. V. 36. Article 85. DOI: 10.1007/s11676-025-01880-5.
28. *Liu H., Xiao P., Zhang X. et al.* Winter snow cover influences growing-season vegetation productivity non-uniformly in the Northern Hemisphere // *Communications Earth and Environment*. 2023. V. 4. Article 487. DOI: 10.1038/s43247-023-01167-9.
29. *Maraun D., Kurths J.* Cross wavelet analysis: significance testing and pitfalls // *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2004. V. 11. P. 505–514. DOI: 10.5194/npg-11-505-2004.
30. *Meyers S. D., Kelly B. G., O'Brien J. J.* An introduction to wavelet analysis in oceanography and meteorology: With application to the dispersion of Yanai waves // *Monthly Weather Review*. 1993. V. 121. P. 2858–2866. DOI: 10.1175/1520-0493(1993)121<2858:AITWAI>2.0.CO;2.
31. *Nawrot A. P., Migala K., Luks B. et al.* Chemistry of snow cover and acidic snowfall during a season with a high level of air pollution on the Hans Glacier, Spitsbergen // *Polar Science*. 2016. V. 10. Iss. 3. P. 249–261. DOI: 10.1016/j.polar.2016.06.003.
32. *Titkova T. B., Zolotokrylin A. N.* Influence of the summer changes in large-scale atmospheric circulation on the vertical fluxes of heat and moisture in Russian landscape zones // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2024. V. 49. No. 6. P. 482–493. DOI: 10.3103/S1068373924060025.
33. *Torrence C., Compo G. P.* A practical guide to wavelet analysis // *Bull. American Meteorological Soc.* 1998. V. 79. P. 61–78. DOI: 10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2.
34. *Vasil'ev D. Yu., Velmovsky P. V.* Analysis of surface air temperature characteristics over the territory of Russia for 1930–2021 // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2024. V. 37. Iss. Suppl. 1. P. S72–S77. DOI: 10.1134/S102485602470163X.
35. *Vasil'ev D. Yu., Gavra N. K., Kochetkova E. S., Ferapontov Yu. I.* Correlation between the total precipitation and the mean and maximum runoff during the snowmelt flood in the Belaya River basin // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2013. V. 38. No. 5. P. 351–358. DOI: 10.3103/S1068373913050087.
36. *Vasil'ev D. Yu., Vodopyanov V. V., Zayzeva G. S. et al.* A long-term forecast model of spring runoff: The case of the Belaya River // *Doklady Earth Sciences*. 2019. V. 486. Iss. 2. P. 724–727. DOI: 10.1134/S1028334X19060345.
37. *Wang L., Chen W.* Downward Arctic Oscillation signal associated with moderate weak stratospheric polar vortex and the cold December 2009 // *Geophysical Research Letters*. 2010. V. 37. Article L09707. DOI: 10.1029/2010GL042659.
38. *Wu Y., Xiao P., Zhang X. et al.* Effects of snow cover on spring vegetation phenology vary with temperature gradient across the Pan-Arctic // *J. Geophysical Research: Biogeosciences*. 2023. V. 128. Iss. 4. Article e2022JG007183. DOI: 10.1029/2022JG007183.
39. *Zhao Z., De Frenne P., Peñuelas J. et al.* Effects of snow cover-induced microclimate warming on soil physicochemical and biotic properties // *Geoderma*. 2022. V. 423. Article 115983. DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.115983.
40. *Zschenderlein L., Luojus K., Takala M. et al.* Evaluation of passive microwave dry snow detection algorithms and application to SWE retrieval during seasonal snow accumulation // *Remote Sensing of Environment*. 2023. V. 288. Article 113476. DOI: 10.1016/j.rse.2023.113476.

## Regional features of spatial-temporal distribution of snow cover in Bashkiria territory based on remote sensing data and station observations

D. Yu. Vasil'ev<sup>1,3</sup>, V. A. Semenov<sup>2,4</sup>, D. S. Kucherova<sup>1</sup>, O. I. Christodulo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ufa University of Science and Technology, Ufa 450008, Russia  
E-mail: vasilev.dyu@uust.ru

<sup>2</sup> A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow 119017, Russia  
E-mail: vasesmenov@ifaran.ru

<sup>3</sup> Institute of Steppe UrB RAS, Orenburg 460000, Russia

<sup>4</sup> Institute of Geography RAS, Moscow 119017, Russia

On the basis of data from the GlobSnow archive and station observations from Roshydromet, the spatio-temporal specificity of snow cover depth (SCD) and snow water equivalent (SWE) over the territory of Bashkiria was investigated. A correlation analysis of the characteristics of snow cover was carried out using snow measurement data from meteorological stations and the GlobSnow archive. High correlation between the data was established for the Pre-Urals and Trans-Urals areas. Over the entire observation period, snow reserves in Bashkiria were found to be increasing with the highest values in the Pre-Urals region. Areas with homogeneous fluctuations of SCD and SWE were identified. A wavelet analysis was applied to define periodicities in the SCD and SWE data, and an assessment of the statistical significance of the results was performed. The method of cross-wavelet analysis was used at the next step to establish a connection between the fluctuations in the values of SCD and SWE with climate indices such as the Arctic Oscillation, North Atlantic Oscillation, Scandinavian Index, and East Atlantic–West Russian Index. It was shown that the anomalies of SCD and SWE in the northern regions and the mountain-forest zone of Bashkiria were associated with the strengthening of zonal transport at high latitudes, whereas the anomalies of SCD and SWE in the southern regions were associated with the strengthening of meridional exchange.

**Keywords:** snow depth, snow water equivalent, instrumental measurements, geographic anchor, spatial interpolation, linear trend, spectral analysis

Accepted: 28.10.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-321-332

### References

1. Bulygina O. N., Korshunova N. N., Razuvaev V. N., Specialized datasets for climate research, *Trudy Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrometeorologicheskoi informatsii — Mirovogo tsentra dannikh*, 2014, Iss. 177, pp. 136–148 (in Russian).
2. Vasil'ev D. Yu., Ferapontov Yu. I., Trends in the fluctuations of near-surface temperature (a case study of Bashkiria), *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. geograficheskaya*, 2015, No. 1, pp. 77–86 (in Russian).
3. Vorobyev V. A., Andreev F. A., Korshunova N. N., Development and modernization of technology for monitoring the water reserves in snow cover on the territory of the Russian Federation, *Fundamental and Applied Climatology*, 2024, V. 10, No. 1, pp. 109–129 (in Russian).
4. Georgievsky M. V., Romanov S. V., Prshina T. V., Trushevsky V. L., Global microwave snow water equivalent data: comparison with ground observations and inverse correlation with winter-spring air temperature (case study: Neva-Ladoga basin), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli is kosmosa*, 2020, V. 17, No. 2, pp. 252–264 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-252-264.
5. Golubev V. N., Petrushina M. N., Frolov D. V., Inter-annual variations of the snow cover structure within the territory of Russia, *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5. Geografia*, 2009, No. 3, pp. 16–25 (in Russian).
6. Dagurov P. N., Dmitriev A. V., Dobrynin S. I., Chimitdorzhiev T. N., Estimation of snow cover parameters on the Earth's surface with flat and hilly-mountainous terrain using radar interferometry, *Computational Technologies*, 2020, V. 25, No. 4, pp. 58–68 (in Russian), DOI: 10.25743/ICT.2020.25.4.006.
7. Kagan R. L., *Osrednenie meteorologicheskikh polei* (Averaging of meteorological fields), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979, 216 p. (in Russian).

8. Kitaev L. M., Titkova T. B., Aleshina M. A., Modern trends in variability of average and extreme snow depth values on the East European Plan, *Earth's Cryosphere*, 2025, V. 29, No. 2, pp. 55–63 (in Russian), DOI: 10.15372/KZ20250205.
9. Kuzmin P. P., *Protsess tayaniya snezhnogo pokrova* (The process of snow melting), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1961, 345 p. (in Russian).
10. Kuchment L. S., Romanov P. Y., Gelfan A. N., Demodov V. N., Assessment of snow cover characteristics through the joint use of models and satellite information, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2009, No. 4, pp. 47–56 (in Russian).
11. Mokhov I. I., Parfenova M. R., Changes in the snow cover extent in Eurasia from satellite data in relation to hemispheric and regional temperature changes, *Doklady Earth Sciences*, 2021, V. 501, No. 1, pp. 963–968, DOI: 10.1134/S1028334X21110106.
12. Pakhomov L. A., Feoktistov A. A., Danekin A. I., Miroshin A. A., Use of remote sounding data in the microwave spectrum region in the problem of restoration of water equivalent of snow, *Solar-Terrestrial Physics*, 2004, Iss. 5, pp. 18–20 (in Russian).
13. Pigol'tsina G. B., Fasel'ko D. V., Methodology for calculating the spatial distribution of snow depth in complex terrain with insufficient meteorological information: A case study for Anyuy range, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2022, V. 47, No. 2, pp. 107–112, DOI: 10.3103/S1068373922020042.
14. Popova V. V., Present-day changes in climate in the north of Eurasia as a manifestation of variation of the large-scale atmospheric circulation, *Fundamental and Applied Climatology*, 2018, V. 1, pp. 84–111 (in Russian), DOI: 10.21513/2410-8758-2018-1-84-111.
15. Popova V. V., Polyakova I. A., Change of stable snow cover destruction dates in Northern Eurasia, 1936–2008: Impact of global warming and the role of large-scale atmospheric circulation, *Ice and Snow*, 2013, V. 53, No. 2, pp. 29–39 (in Russian), DOI: 10.15356/2076-6734-2013-2-29-39.
16. Popova V. V., Morozova P. A., Titkova T. B. et al., Regional features of present winter snow accumulation variability in the North Eurasia from data of observations, reanalysis and satellites, *Ice and Snow*, 2015, V. 55, No. 4, pp. 73–86 (in Russian), DOI: 10.15356/2076-6734-2015-4-73-86.
17. Sosnovsky A. V., Osokin N. I., Chernyakov G. A., Dynamics of snow storages in forests and fields of Russian plains under climate changes, *Ice and Snow*, 2018, V. 58, No. 2, pp. 183–190 (in Russian), DOI: 10.15356/2076-6734-2018-2-183-190.
18. Chuldum A. F., Chupikova S. A., Dynamics of indicators of snow cover contamination in the city of Kyzyl for 2013–2021 according to remote sensing data, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2023, V. 36, No. 4, pp. 299–303 (in Russian), DOI: 10.15372/AOO20230406.
19. Shakirzyanov R. I., Razuvaev V. N., Changes in the methods of monitoring the snow cover condition in the territory of the Russian Federation, *Trudy Vserossiiskogo naucno-issledovatel'skogo instituta gidrometeorologicheskoi informatsii — Mirovogo tsentra dannikh*, 2000, Iss. 167, pp. 41–51 (in Russian).
20. Smakin A. B., Climatic characteristics of snow cover of Northern Eurasia and their variation in the last decades, *Ice and Snow*, 2010, No. 1, pp. 43–57 (in Russian).
21. Barnston A. G., Livezey R. E., Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns, *Monthly Weather Review*, 1987, V. 115, pp. 1083–1126, DOI: 10.1175/1520-0493(1987)115<1083:CSAPOL>2.0.CO;2.
22. Brown R., Robinson D., Northern Hemisphere spring snow cover variability and change over 1922–2010 including an assessment of uncertainty, *The Cryosphere*, 2011, No. 5, pp. 219–229, DOI: 10.5194/tc-5-219-2011.
23. Bulygina O. N., Groisman P. Ya., Razuvaev V. N., Korshunova N. N., Changes in snow cover over Northern Eurasia since 1966, *Environmental Research Letters*, 2011, V. 6, No. 4, Article 045204, DOI: 10.1088/1748-9326/6/4/045204.
24. Cohen J., Foster J., Barlow M. et al., Winter 2009–2010: A case study of an extreme Arctic Oscillation event, *Geophysical Research Letters*, 2010, V. 37, Article L17707, DOI: 10.1029/2010GL044256.
25. Deng M., Li P., Liu W. et al., Deepened snow cover increases grassland soil carbon stocks by incorporating carbon inputs into deep soil layers, *Global Change Biology*, 2023, V. 29, Iss. 16, pp. 4686–4696, DOI: 10.1111/gcb.16798.
26. Guyennon N., Valt M., Salerno F. et al., Estimating the snow water equivalent from snow depth measurements in the Italian Alps, *Cold Regions Science and Technology*, 2019, V. 167, Article 102859, DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102859.
27. Lindfors L., Ylilauri V., Xu J. et al., Effect of snow cover and soil temperature on tree and forest floor processes: a case study in mature boreal forest, *J. Forestry Research*, 2025, V. 36, Article 85, DOI: 10.1007/s11676-025-01880-5.
28. Liu H., Xiao P., Zhang X. et al., Winter snow cover influences growing-season vegetation productivity non-uniformly in the Northern Hemisphere, *Communications Earth Environment*, 2023, V. 4, Article 487, <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01167-9>.

29. Maraun D., Kurths J., Cross wavelet analysis: significance testing and pitfalls, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2004, V. 11, pp. 505–514, DOI: 10.5194/npg-11-505-2004.
30. Meyers S. D., Kelly B. G., O'Brien J. J., An introduction to wavelet analysis in oceanography and meteorology: With application to the dispersion of Yanai waves, *Monthly Weather Review*, 1993, V. 121, pp. 2858–2866, DOI: 10.1175/1520-0493(1993)121<2858:AITWAI>2.0.CO;2.
31. Nawrot A. P., Migala K., Luks B. et al., Chemistry of snow cover and acidic snowfall during a season with a high level of air pollution on the Hans Glacier, Spitsbergen, *Polar Science*, 2016, V. 10, Iss. 3, pp. 249–261, DOI: 10.1016/j.polar.2016.06.003.
32. Titkova T. B., Zolotokrylin A. N., Influence of the summer changes in large-scale atmospheric circulation on the vertical fluxes of heat and moisture in Russian landscape zones, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2024, V. 49, No. 6, pp. 482–493, DOI: 10.3103/S1068373924060025.
33. Torrence C., Compo G. P., A practical guide to wavelet analysis, *Bull. American Meteorological Soc.*, 1998, V. 79, pp. 61–78, DOI: 10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2.
34. Vasil'ev D. Yu., Velmovsky P. V., Analysis of surface air temperature characteristics over the territory of Russia for 1930–2021, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2024, V. 37, Iss. Suppl. 1, pp. S72–S77, DOI: 10.1134/S102485602470163X.
35. Vasil'ev D. Yu., Gavra N. K., Kochetkova E. S., Ferapontov Yu. I., Correlation between the total precipitation and the mean and maximum runoff during the snowmelt flood in the Belaya River basin, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2013, V. 38, No. 5, pp. 351–358, DOI: 10.3103/S1068373913050087.
36. Vasil'ev D. Yu., Vodopyanov V. V., Zayzeva G. S. et al., A long-term forecast model of spring runoff: The case of the Belaya River, *Doklady Earth Sciences*, 2019, V. 486, Iss. 2, pp. 724–727, DOI: 10.1134/S1028334X19060345.
37. Wang L., Chen W., Downward Arctic Oscillation signal associated with moderate weak stratospheric polar vortex and the cold December 2009, *Geophysical Research Letters*, 2010, No. 37, Article L09707, DOI: 10.1029/2010GL042659.
38. Wu Y., Xiao P., Zhang X. et al., Effects of snow cover on spring vegetation phenology vary with temperature gradient across the Pan-Arctic, *J. Geophysical Research: Biogeosciences*, 2023, V. 128, Iss. 4, Article e2022JG007183, DOI: 10.1029/2022JG007183.
39. Zhao Z., De Frenne P., Peñuelas J. et al., Effects of snow cover-induced microclimate warming on soil physicochemical and biotic properties, *Geoderma*, 2022, V. 423, Article 115983, DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.115983.
40. Zschenderlein L., Luoju K., Takala M. et al., Evaluation of passive microwave dry snow detection algorithms and application to SWE retrieval during seasonal snow accumulation, *Remote Sensing of Environment*, 2023, V. 288, Article 113476, DOI: 10.1016/j.rse.2023.113476.