

## СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ КАМЧАТКИ: СОВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИЗМЕНЕНИЙ

Н.И. Тананаев<sup>1,2</sup>, М.А. Тимофеев<sup>2</sup>, М.И. Захаров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга, г.

Петропавловск-Камчатский

<sup>2</sup> Северо-Восточный федеральный университет, г. Якутск

**Аннотация.** Камчатка – самый многоснежный регион России. Снежный покров Камчатки – важная природно-климатическая переменная, определяющая условия существования современного оледенения, гидрологические особенности региона, потенциал ледово-снежного туризма. Данные метеонаблюдений указывают на уменьшение максимальной высоты снежного покрова в южной и юго-восточной части полуострова, в том числе – резкое снижение этого показателя в последние годы. Спутниковые данные подтверждаются данными метеонаблюдений для юга и юго-востока полуострова, но также указывают на уменьшение влагозапаса в снежном покрове в северной, материковой части Камчатского края. Климатическое моделирование на период 2021-2050 г. воспроизводит уменьшение майского влагозапаса воды в снеге на юго-западе полуострова, включая территорию г. Петропавловск-Камчатский, на величину от 90 до 110 мм, или от 30 до 40% по сравнению с базовым периодом 1981-2010 гг.

**Ключевые слова:** атмосферные осадки, высота снежного покрова, влагозапас в снеге, климатология, Камчатский край, сценарный прогноз, модели СМIP6

## SNOW COVER OF KAMCHATKA: ACTUAL FEATURES AND PROJECTIONS OF CHANGE

N.I. Tananaev<sup>1,2</sup>, M.A. Timofeev<sup>2</sup>, M.I. Zakharov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Vitus Bering Kamchatka State University, Petropavlovsk-Kamchatsky

<sup>2</sup> North-Eastern Federal University, Yakutsk

**Abstract.** Kamchatka is the most snow-abundant region of the Russian Federation. The snow cover of Kamchatka is an important natural and climatic variable that determines the conditions of existence of modern glaciation, hydrological features of the region, and the potential of ice and snow tourism. Meteorological observations indicate a decrease in the maximum snow cover height in the southern and south-eastern part of the peninsula, including a sharp decrease in recent years. Satellite data are confirmed by meteorological observations for the south and southeast of the peninsula, but also indicate a decrease in the moisture content of the snow cover in the northern, mainland part of the Kamchatka Peninsula. Climate modelling for the period 2021-2050 reproduces a decrease in May water content in snow in the southwest of the peninsula, including the territory of Petropavlovsk-Kamchatsky, by 90 to 110 mm, or 30 to 40% compared to the base period 1981-2010.

**Keywords:** precipitation, snow cover height, snow water equivalent, climatology, Kamchatsky Krai, scenario-based projections, CMIP6 models

**Введение.** Камчатский край – уникальный регион с пестрым разнообразием природно-климатических условий, которое определяется субмеридиональным простираем, контрастным рельефом с развитой высотной поясностью, влиянием морского климата и интенсивной циклонической активностью, особенно в зимний период [1]. Морской климат в совокупности с обилием циклонов, более половины из которых наблюдается в зимний период [2], делают Камчатку самым многоснежным регионом России, где максимальный влагозапас в снежном покрове достигает 1000 мм [3], и локально может превышать 3000 мм [4]. Как

следствие, значения годового слоя и модуля стока, особенно в юго-восточной части полуострова, также одни из самых высоких в России [5]. Обилие осадков в виде снега обеспечивает питание современных ледников Камчатки [6], высокую водность весенне-летнего половодья [7], привлекательность территории полуострова для ледово-снежного туризма [8]. Регулярные наблюдения за характеристиками снежного покрова проводятся на метеорологических станциях ФГБУ «Камчатское УГМС» Росгидромета; данные наблюдений позволяют характеризовать современные суммы осадков зимнего периода и их временные изменения. Средняя по территории Камчатки годовая сумма осадков остается неизменной на протяжении последних десятилетий, однако сумма предзимних и зимних осадков статистически значимо снижается в южной части полуострова (м/с Мыс Лопатка); уменьшение осадков зимнего сезона отмечается на большинстве метеостанций [9].

**Материалы и методы.** В данной работе использованы: (1) данные наблюдений за осадками на 20 метеорологических станциях Камчатского УГМС, находящиеся в открытом доступе на сайте ВНИИГМИ-МЦД ([www.meteo.ru](http://www.meteo.ru)); (2) спутниковый массив данных GlobSnow v. 3.0 [10]; (3) результаты глобального климатического моделирования для экспериментов ‘historical’ и ‘ScenarioMIP’, прогнозных сценариев ssp1-2.6, ssp2-4.5, ssp3-7.0 и ssp5-8.5, находящиеся в открытом доступе на серверах Earth Science Grid Federation (ESGF). Анализ данных выполнялся с помощью авторских скриптов для языка программирования R, разработанных в лаборатории по изучению климата и экосистем северных регионов СВФУ им. М.К. Аммосова и лаборатории экспериментальной климатологии КамГУ им. Витуса Беринга. Статистический анализ проводился с использованием стандартных подходов: значимость тренда определялась тестом Манна-Кендалла, интенсивность тренда – оценкой Тейла-Сена. В работе использованы данные моделей CMIP6 месячного разрешения, переменная ‘snw’ (влагозапас в снежном покрове), с пространственным разрешением 100 км (CNRM-CM6-1-HR – с пространственным разрешением 50 км). Все модельные данные приводились к единому пространственному разрешению 0.5° на 0.5° и единому экстенду в QGIS 3.28.4, картографическом ПО с открытым кодом.

**Результаты и обсуждение.** В работе исследуется современное состояние снежного покрова Камчатки, дана оценка наблюдаемых и прогнозируемых изменений влагозапаса воды в снежном покрове на территории Камчатского полуострова на период до 2050 г.

*Метеорологические наблюдения.* Анализ данных сетевых наблюдений Камчатского УГМС, выполненный нами по рядам данных до 2024 г., подтверждает основные тенденции изменения снежного покрова, ранее установленные по рядам меньшей продолжительности (до 2009 г. включительно). Наибольшая среднемаксимальная высота снежного покрова, около 200 см, в отдельные годы – свыше 250 см, наблюдается на м/с Начики, в долине р. Плотникова, левого притока р. Большая. Также в отдельные годы высота снежного покрова в интервале от 250 до 300 мм отмечается на м/с Петропавловск-Камчатский, при среднем значении в пределах 150-170 см. Наименьшая среднемаксимальная высота снежного покрова, в диапазоне от 40 до 60 см – на м/с Семячик, на южной границе Кроноцкого заповедника (восточное побережье Камчатки), на м/с Остров Беринга. В соответствии с установленной ранее тенденцией уменьшения слоя зимних осадков [9], в последние два десятилетия резко уменьшилась максимальная высота снежного покрова на м/с Мыс Лопатка: с 120-130 см до 50-60 см; также на м/с Петропавловский маяк: со 100-120 см до 40-60 см. На большинстве исследованных метеостанций отмечаются циклические колебания максимальной высоты снежного покрова без выраженного тренда. На *западном побережье* полуострова максимальная высота снежного покрова уменьшается в южной части (Усть-Большереецк), выросла в период с 1960 по 1990 г. и находится на высоких значениях (Ича, Усть-Хайрюзово, Усть-Воямполка), либо находится на возрастающей ветви долгопериодного цикла (Соболево), но в любом случае остается в пределах 100 см. Метеостанции *восточного побережья*, включая многоснежный юго-восток полуострова, фиксируют направленное снижение высоты снежного покрова (мыс Лопатка, Петропавловский маяк, Петропавловск-Камчатский). В *долине р. Камчатка*, в средней части полуострова, современное снижение высоты снежного покрова связано с нисходящей ветвью

долгопериодного цикла (Долиновка, Ключи). На севере полуострова и в материковой части Камчатского края значимых трендов в изменении максимальной высоты снежного покрова не отмечается, наблюдается ее незначительное увеличение после минимумов конца 1980-х гг. (Корф), начала 2000-х гг. (Апука), или 2010-х гг. (Каменское).

*Данные спутниковых наблюдений.* Спутниковое покрытие GlobSnow не покрывает отдельные районы Камчатки, однако его достаточно, чтобы выполнить осредненный анализ динамики влагозапаса в снежном покрове (ВСП) в разрезе муниципальных районов Камчатского края. Средний по территории полуострова ВСП оценивается по месяцам: февраль – 198 мм, март – 248 мм, апрель – 273 мм, май – 195 мм. Наибольший средний ВСП, от 350 до 400 мм – в средней части полуострова, в Быстринском, Елизовском и Мильковском районах, что соответствует литературным данным [4]. Максимальная пространственная изменчивость ВСП, оцененная по среднеквадратичному отклонению – вдоль западного побережья Камчатки, в Соболевском и Усть-Большерецком районах. По времени, наибольший влагозапас в снеге в большинстве районов отмечается в апреле, в некоторых районах (Карагинский, Тигильский) – в марте. На большей части территории Камчатского края статистически значимые тренды во временных рядах ВСП не наблюдаются, но для некоторых районов такие тренды установлены. Во все месяцы с февраля по май ВСП снижается: в Олюторском районе ( $p < 0.02$ ), с интенсивностью от -8.4 до -10.9 мм/10 лет; в Пенжинском районе ( $p < 0.06$ ), с интенсивностью от -7.9 до -14.5 мм/10 лет; в Усть-Большерецком районе ( $p < 0.10$ ), с интенсивностью от -4.3 до -11.1 мм/10 лет. Для Усть-Большерецкого района установленный тренд согласуется с данными сетевых наблюдений, которые описаны выше; для материковой части Камчатского края он не находит отражения в материалах наблюдений, кроме данных м/с Каменское в нижнем течении р. Пенжина. Можно предположить, что расположенные на побережье станции не отражают общих трендов изменения ВСП на расстоянии до 200-300 км от береговой черты.

*Климатическое моделирование.* Расчетный эксперимент ‘historical’ воспроизводит динамику климатической системы в период с 1850 по 2014 г., сценарные расчеты для различных траекторий социально-экономического развития (ssp) – в период с 2015 по 2100 г. Для данной работы выбраны результаты расчетов по 10 климатическим моделям со стандартной физикой и форсингом, что обычно обозначается как ‘ilplf1’ или, для ряда моделей, ‘ilplf2’, для которых в ESGF имеются данные всех перечисленных расчетных экспериментов. Выбранные модели: BCC-CSM2-MR (Китай), CESM2-WACCM (США), CNRM-CM6-1-HR (Франция), EC-Earth3 и EC-Earth3-Veg (EC), GFDL-ESM4 (США), MPI-ESM2-1-HR (Германия), MRI-ESM2-0 (Япония), NorESM2-MM (Норвегия), TaiESM1 (Тайвань). По этим данным собирались три ансамбля: AVG4, в который вошли только модели, включающие территорию Камчатского края полностью (GFDL-ESM4, MPI-ESM2-1-HR, NorESM2-MM, TaiESM1); AVG5 (те же модели плюс CNRM-CM6-1-HR, в которой для территории Камчатского края отсутствуют отдельные пиксели); AVG10 (все модели, с отсутствием модельных данных почти вдоль всего западного побережья полуострова).

Модельного пространственного разрешения 100 км недостаточно для точного и детального воспроизведения абсолютных значений ВСП, особенно в горных районах, в современные климатические периоды 1961-1990 и 1981-2010 гг. Тем не менее, все ансамбли близко к реальному (данные GlobSnow 3.0) воспроизводят поле ВСП во все выбранные месяцы (с марта по май). Ансамбли AVG5 и AVG10 дают более высокие значения ВСП, под влиянием высоко-разрешающей модели CNRM-CM6-1-HR, которая воспроизводит значения ВСП в диапазоне от 1200 до 1400 мм в районе Ключевской группы, от 900 до 1000 мм в юго-западной части полуострова от Авачинской бухты до мыса Лопатка. Ансамбль AVG4, не использующий данные этой модели, воспроизводит более низкие значения ВСП. Консенсусное (по ансамблям AVG4 и AVG5) изменение ВСП между периодами 1961-1990 и 1981-2010 гг., среднее для территории Камчатского края, составило  $+3 \pm 5$  мм (март),  $+3 \pm 7$  мм (апрель),  $-5 \pm 10$  мм (май), то есть оказалось статистически незначимо (абсолютная величина изменений меньше СКО). Средняя величина не отражает пространственной структуры изменений: во все месяцы модели

отмечают уменьшение ВСП по всему восточному побережью Камчатки от Оссоры до южной оконечности полуострова, и южную часть западного побережья до с. Усть-Большерецк. Оно особенно заметно в мае, когда оно отмечается на всем полуострове: от -20 до -40 мм между периодами на восточном побережье, от 10 до 20 мм в южной части западного побережья, и связано с общим потеплением и смещением границ естественных сезонов. Увеличение ВСП отмечается лишь в материковой части Камчатского края, в Пенжинском и Олюторском районах (от +10 до +15 мм между периодами).

Климатические проекции для периода 2021-2050 г. воспроизводят ближайшее к настоящему времени состояние климатической системы; результаты моделирования отражают наиболее общие закономерности пространственного распределения ожидаемых изменений.

В оптимистическом сценарии ssp1-2.6 уменьшение влагозапаса в снеге отмечается во все месяцы, но не всегда оно значимо:  $-1 \pm 12$  мм (март),  $-6 \pm 17$  мм (апрель),  $-21 \pm 19$  мм (май). Пространственное распределение ожидаемых изменений сохраняется: незначительное уменьшение ВСП воспроизводится по всему западному побережью, в районе перешейка и в материковой части, где местами сохраняется прирост ВСП. Значительное уменьшение ВСП – на участке восточного побережья от Кроноцкого полуострова до мыса Лопатка, где местами в мае оно составляет от -90 до -100 мм (от Шипунского п-ова до бухты Асача, включая территорию Петропавловска-Камчатского). На Срединном хребте и в долине р. Камчатка месячный влагозапас в снеге во все месяцы сохраняется неизменным либо увеличивается.

В остальных сценариях полученные для сценария ssp1-2.6 пространственные закономерности изменения влагозапаса в снеге в целом сохраняются. В сбалансированных сценариях ssp2-4.5 и ssp3-7.0 майский влагозапас в снеге уменьшается по всей территории Камчатского края, в среднем на  $-24 \pm 17$  мм (ssp2-4.5),  $-22 \pm 18$  мм (ssp3-7.0), с наибольшим уменьшением, от 90 до 100 мм, также от Кроноцкого полуострова до бухты Асача. В пессимистическом сценарии ssp5-8.5, который соответствует интенсивному использованию ископаемого топлива, упору на адаптационные мероприятия при минимальной значимости митигации, майский влагозапас в среднем по территории Камчатского края сокращается на  $-31 \pm 22$  мм, на юго-востоке, в выше указанных районах, в том числе на территории г. Петропавловск-Камчатский, снижение составляет от 100 до 110 мм.

Вклад в перспективу региональных изменений снежного покрова, воспроизводимую во всех климатических сценариях, различных природно-климатических факторов, на данном этапе установить затруднительно. Значительное уменьшение влагозапаса в снеге, приуроченное к юго-восточной оконечности полуострова, может быть проявлением: смещения к юго-востоку основных траекторий внетропических циклонов и тайфунов зимнего периода, ранее выходивших в данный район; изменения температуры поверхности океана в Северо-западной Пацифике и изменением локальных условий взаимодействия океана и атмосферы; влияния иных факторов, которые будут исследованы в наших дальнейших работах.

### **Выводы.**

Снежный покров Камчатки в настоящее время остается устойчивым на большей части полуострова, за исключением южного и юго-восточного побережья, где на двух метеостанциях отмечено резкое уменьшение максимальной высоты снежного покрова, следующее за отмеченным ранее в литературе уменьшением слоя осадков [9]. Спутниковые наблюдения находятся в соответствии с данными сетевых наблюдений и также указывают на уменьшение влагозапаса в снежном покрове на юге региона, в Усть-Большерецком районе, а также в материковой части Камчатского края. Климатические модели СМIP6 в общих чертах воспроизводят распределение снежного покрова по территории Камчатки и его изменение между климатическими периодами 1961-1990 и 1981-2010 гг., а также позволяют составить региональные сценарные проекции изменения влагозапаса в снеге. Согласно этим проекциям, на горизонте 2021-2050 гг. во всех климатических сценариях воспроизводится снижение влагозапаса в снеге в диапазоне от 90 до 110 мм, или от 30 до 40% по сравнению с периодом

1981-2010 гг., на юго-востоке полуострова, на участке от Кроноцкого полуострова до бухты Асача, включая территорию г. Петропавловск-Камчатский.

**Финансирование.** Исследование выполнено в рамках программы Министерства науки и высшего образования РФ «Приоритет-2030. Дальний Восток» (национальный проект «Наука и университеты»), реализуемой ФГБОУ ВО «Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга» (анализ данных глобальных климатических моделей), а также в рамках Программы развития СВФУ им. М.К. Аммосова на 2025 г. (анализ данных метеорологических наблюдений на метеостанциях).

## Литература

1. Кондратюк В.И. Климат Камчатки. М.: Гидрометеиздат, 1974. 204 с.
2. Кацыка А.П., Смирнов Л.В. Климат Петропавловска-Камчатского // В сб.: Вопросы географии Камчатки. Вып. 3. Петропавловск-Камчатский: Дальневосточное книжное изд-во, 1965. С. 11–15.
3. Национальный атлас России. Т. 2 «Природа. Экология». Раздел «Климат». Снежный покров. С. 176–177. URL: <https://nationalatlas.ru/tom2/176-177.html>.
4. Муравьев Я.Д. Снежный покров горных районов Камчатки // В сб.: Вопросы географии Камчатки. Вып. 9. Петропавловск-Камчатский: Камчатский отдел Географического общества СССР, 1985. С. 30–40.
5. Национальный атлас России. Т. 2 «Природа. Экология». Раздел «Воды суши». Речной сток. С. 192–193. URL: <https://nationalatlas.ru/tom2/192-193.html>.
6. Муравьев А.Я. Распространение и морфология современных ледников Камчатки // Лед и снег. 2020. Т. 60, №3. С. 325–342.
7. Фролова Н.Л., Становова А.В., Горин С.Л. Режим стока воды в нижнем течении реки Камчатки и его многолетняя изменчивость // В сб.: Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2014. Вып. 32. С. 73–78.
8. Будаева Д.Г., Еремко З.С., Андреева А.М., Дымбрылова С.Б. Ледово-снежный туризм: понятие, факторы развития и практические примеры // Общество: политика, экономика, право. 2024. №12. С. 110–118.
9. Шкаберда О.А., Василевская Л.Н. Многолетняя изменчивость температурно-влажностного режима на полуострове Камчатка // Известия ТИНРО. 2014. Т. 178. С. 217–233.
10. Luoju K., Pulliainen J., Takala M. et al. GlobSnow v3.0 Northern Hemisphere snow water equivalent dataset // Scientific Data. 2021. V. 8. 163. <https://doi.org/10.1038/s41597-021-00939-2>.