

## ВЫСОТА СНЕЖНОГО ПОКРОВА И ЕЁ ДИНАМИКА НА МАТЕРИКОВОЙ ЧАСТИ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТА

© 2024 г. А. В. Сосновский, Н. И. Осокин

*Институт географии РАН, Москва, Россия*

*e-mail: alexandr\_sosnovskiy@mail.ru*

Поступила 3 февраля 2024 г.

После доработки 14 марта 2024 г.

Принята к печати 10 апреля 2024 г.

По данным маршрутных снегосъёмов проведено сравнение средней многолетней максимальной высоты снежного покрова, а также высоты снежного покрова за отдельные месяцы и динамики снегонакопления на материковой части Российской Арктики за разные климатические периоды. Построены карты высоты снежного покрова и динамики снегонакопления. Дана оценка влияния климатических изменений на высоту снежного покрова и динамику снегонакопления.

**Ключевые слова:** Арктика, высота снежного покрова, динамика снегонакопления, климатические периоды

**DOI:** 10.31857/S2076673424020074

### ВВЕДЕНИЕ

Снежный покров – важный элемент криосферы. Он оказывает огромное влияние на климат, гидро-термический режим почв и грунтов, гидрологию рек и озёр, опасные стихийные явления, жизнь растений и животных и многие другие процессы и явления (Snow and Climate, 2008; Котляков, 2010). Одним из важных параметров снежного покрова является его высота, которая влияет на альбедо поверхности, проходимость снежной целины транспортом и животными, функционирование растений и животных, теплозащитные свойства снежного покрова.

Важное свойство снежного покрова – его низкое термическое сопротивление (Осокин и др., 2016), зависящее от высоты снега и его теплофизических характеристик. Оно влияет на термический режим почвогрунтов и многолетнемерзлых пород, условия их формирования и функционирования (Анисимов и др., 2000, 2006; Павлов, 2008). Так, в работе (Скачков, 2008) отмечается, что на юге Якутии сохранилась высокая термическая устойчивость многолетнемерзлых пород, несмотря на сильное потепление климата. Это объясняется большой изменчивостью толщины снега и его доминирующей ролью в формировании среднегодовых температур грунтов. Выяснено, что если на Восточно-Европейской равнине преобладающее влияние на температуру грунтов оказывает температура воздуха, то в Сибири – высота снежного покрова (Шерстюков, 2008).

В работе (Варламов и др., 2023) показано, что основным регулирующим фактором термического состояния верхних горизонтов криолитозоны Центральной Якутии являются короткопериодные колебания режима снегонакопления. Повышение температуры воздуха не всегда приводит к росту температуры грунта, так как часто компенсируется снижением термического сопротивления снежного покрова (Осокин, Сосновский, 2016). Термическое сопротивление снежного покрова зависит от его высоты и плотности. И если высота снежного покрова от года к году может изменяться в значительных пределах в одном и том же регионе, то плотность снега – более консервативный параметр. Её изменение обусловлено в основном межрегиональными физико-географическими условиями.

На теплофизическое состояние грунта влияет не только термическое сопротивление снежного покрова, но и динамика его высоты. Так, сравнительно тонкий снежный покров и низкие температуры воздуха в начале зимы способствуют быстрому промерзанию грунта (Павлов, 2008). В работе (Осокин, Сосновский, 2015) на основе модельных расчётов показано, что при разной динамике снегонакопления и температуры воздуха различие в глубине промерзания может превышать 50%. Поэтому скорость промерзания грунта существенно зависит от внутригодовой динамики метеопараметров, в частности, снегонакопления в первой половине холодного периода. Поэтому важной характеристикой служит высота снежного

покрова в первой половине холодного периода, когда в основном происходит промерзание сезонно-талого слоя, а также её соотношение с максимальной высотой снежного покрова.

Современные климатические изменения оказывают значительное влияние на параметры снежного покрова и, следовательно, на указанные процессы и явления (Осокин и др., 2006; Бульгина и др., 2011; Iranpezhad et al., 2022). В работе (Попова и др., 2018) отмечается, что в связи с глобальным потеплением климата прибилизительно с 2000 г. происходит запаздывание сроков установления снежного покрова, а сроки его разрушения переходят на более ранние в середине весны в соответствии с общей тенденцией потепления этого сезона с начала 1950-х годов.

Начало современного потепления к северу от 60° с. ш. приходится на 1990-е годы (Доклад, 2023). Зимой, после максимума 2016–2018 гг. наметилось понижение температуры, а летом – остановка её роста. В Арктике приземная температура воздуха повышалась как минимум вдвое быстрее, чем происходит глобальное потепление (Векруаев et al., 2010). В Российской Арктике из-за глобального потепления происходит таяние вечной мерзлоты, что приводит к разрушению объектов жилого фонда, хозяйственной инфраструктуры, магистральных трубопроводов и в целом к отрицательным экологическим последствиям (Катцов, Порфирьев, 2012; Анисимов, Стрелецкий, 2015). Таким образом, одним из важных факторов, влияющим на термический режим и устойчивость многолетнемерзлых пород (ММП), служит снежный покров (Осокин, Сосновский, 2016). Рассмотрим изменение максимальной высоты снежного покрова и динамики снегонакопления на материковой части Российской Арктики при современном климате.

Арктика – это область, лежащая к северу от Северного полярного круга (66°33'44" с. ш.). Однако в целях обеспечения национальных интересов Российской Федерации указом Президента Российской Федерации «О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации» от 02.05.2014 № 29 (<http://www.kremlin.ru>, 2023) определены сухопутные территории Арктической зоны Российской Федерации (далее – АЗРФ), куда вошли отдельные районы, расположенные южнее Северного полярного круга. Поэтому, чтобы охватить основные районы, отнесённые к АЗРФ, рассмотрим метеостанции со снегомерными съёмками севернее 64° с. ш. за разные периоды времени.

В климатологии используют базовые 30-летние средние значения температуры, суммы осадков и других показателей. Эти 30-летние исторические усреднённые значения – «климатические нормы», они могут быть подсчитаны на местном, национальном или мировом уровнях. Чтобы учесть быстрые темпы изменения климата, а также практические потребности в актуальной информации о климате Всемирная Метеорологическая Организация (далее – ВМО)

предложила обновлять климатологические базовые нормы для оперативных целей каждые 10 лет, и период 1991–2020 гг. стал новым текущим (современным) базовым периодом. Тем не менее период 1961–1990 гг. будет сохранён как исторический базовый для поддержания долгосрочной оценки изменения климата (Руководящие..., 2017). Для анализа влияния климатических изменений на снежный покров вместо периода 1961–1990 гг. взят период 1966–1990 гг., за который есть данные по снежному покрову.

В последние годы опубликован ряд работ, в которых дан анализ изменения снежного покрова севера Евразии. Так, в работе (Радионон и др., 2013) отмечается, что тенденция увеличения количества твёрдых осадков на фоне роста температуры привела лишь к незначительному увеличению толщины снега в арктической зоне к северу от 70° с. ш. В докладе об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 г. (Доклад, 2023) показано, что за период 1976–2022 гг. наблюдается увеличение максимальной за зиму высоты снежного покрова в северных районах Западной Сибири, тогда как уменьшение максимальной за зиму высоты снежного покрова приходится на северо-запад и отдельные станции на севере ЕТР и северо-западе Якутии.

Региональные особенности изменения зимней аккумуляции снега на севере Евразии по данным наблюдений, реанализа и спутниковых измерений рассмотрены в работе (Попова и др., 2015). При этом основное внимание уделено колебанию сроков установления снежного покрова на территории России в 1950–2008 гг. и их связи с изменением приземной температуры воздуха и циркуляционными индексами Scand, EA–WR, WP и NAO. В работе (Попова и др., 2018) отмечается, что в целом по северу Евразии (севернее 55° с. ш.) изменения снегонакопления в 1971–2013 гг. (по сравнению с 1951–1970 гг.) выражаются увеличением средней высоты снежного покрова (далее – ВСП) в конце зимы на 17% (7 см). Наибольшие изменения – около 26% (11 см) происходили в Сибири и на северо-востоке ЕТР. На северо-западе ЕТР и на Дальнем Востоке они менее заметны – 10% (5 см) и 7% (3 см). Эти региональные различия авторы связывают с особенностями крупномасштабной атмосферной циркуляции, в частности, с усилением зональной циркуляции, описываемым индексами Арктического колебания и Североатлантического колебания (NAO). С положительной фазой NAO связывается период интенсивного потепления 1971–1995 гг., вызванного усилением циклоничности на северо-западе Европы и в Сибири и проницанием атлантического воздуха на восток вплоть до Енисея. Таким образом, климатические изменения влияют на параметры снежного покрова.

Цель работы – оценить тенденции изменения средней многолетней максимальной высоты снежного покрова и её динамики на материковой части Российской Арктики при современном климате.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

ВСП измеряется на сети метеостанций Росгидромета. Так, наряду с ежедневным измерением ВСП на метеостанциях в стационарной точке, на 517 метеостанциях Росгидромета проводятся измерения высоты снежного покрова в ходе маршрутных снегомерных съёмок. Данные измерений ВСП по стационарной рейке и снегосъёмкам могут значительно отличаться (Сосновский и др., 2018а). Так, для метеостанции Мурманск (индекс ВМО 22113) отношение ВСП «рейка/снегосъёмка» составляет 0,54, а для метеостанции Канин Нос (22165) это отношение равно 2,11. Причём в районах западнее Енисея, за исключением бассейна р. Печоры, высота снежного покрова по рейке на 10–30% больше, чем по данным маршрутных снегосъёмок. Восточнее р. Енисей, за исключением отдельных южных районов Сибири, высота снежного покрова по рейке на 10–20% ниже, чем по снегосъёмке. Поэтому для анализа ВСП были выбраны данные по снегосъёмкам. Количество станций, где проводятся маршрутные снегосъёмки, в арктической зоне России значительно меньше, чем метеостанций с измерениями на стационарных точках. Севернее 66° с. ш. расположены 28 метеостанций со снегосъёмками, 10 метеостанций находятся между 65 и 66° с. ш. и 17 метеостанций — между 64 и 65° с. ш. Из указанных 55 метеостанций, принятых для анализа, 31 метеостанция расположена на европейской территории России (ЕТР).

Данные по снегосъёмкам, координаты и названия метеорологических станций России с 1966 г. по настоящее время приведены на сайте Всероссийского института гидрометеорологической информации ВНИИГМИ-МЦД (<http://meteo>, 2023). Это обусловлено тем, что после 1965 г. не было нарушений однородности, вызванных изменением процедуры наблюдений. Наблюдения за снежным покровом по регламенту маршрутных снегосъёмок выполняются каждые 10 дней в течение холодного периода и каждые 5 дней в период интенсивного снеготаяния. Измерения проводятся зимой три раза в месяц: 10-го, 20-го и в последний день каждого месяца. В осенний период для части метеостанций меньше всего

пропусков измерений высоты снежного покрова при снегосъёмках приходится на 20-е число каждого месяца. Поэтому принимались данные измерений высоты снежного покрова на 20-е число.

При анализе максимальной высоты снежного покрова (далее — МВСП) мы принимали её максимальное значение из замеров в ходе снегосъёмок в лесу и в поле. При этом надо иметь в виду, что в современный климатический период различие между значениями МВСП в лесу и в поле сокращается, что, возможно, обусловлено сменой ветрового режима (Сосновский и др. 2018; Журавлев и др., 2019; Доклад, 2023). Так, на севере ЕТР высота снежного покрова в лесу на 5–15% больше, чем в поле (Сосновский, Осокин, 2023а).

Анализ данных по метеостанциям со снегосъёмками показал, что из рассмотренных 55 метеостанций на 30 из них маршруты проложены только в лесу, на 18 станциях измерения выполняются только в поле и только на 7 станциях измерения проводятся как в лесу, так и в поле. Координаты метеостанций с данными по снегосъёмкам в поле приведены в табл. 1.

Количество метеостанций со снегосъёмками в лесу возрастает при движении на юг. Так, в поясе 66–72° с. ш. расположены 12 метеостанций со снегосъёмками в лесу, 13 — в поле и 3 метеостанции со снегосъёмками как в лесу, так и в поле; на 65–66° с. ш. — 5 станций со снегосъёмками в лесу, 3 — в поле и 2 — в лесу и в поле; на широте 64–65° с. ш. — на 13 станциях в лесу, на двух — в поле, на двух — в лесу и в поле.

В результате обработки данных по ВСП за период с 1966 по 2020 г. для каждой метеостанции получены средние многолетние значения ВСП за 25-летний (1966–1990 гг.) и 30-летние периоды 1981–2010 и 1991–2020 гг., а также за два десятилетия XXI века: 2001–2010 и 2011–2020 гг. и построены карты распределения ВСП за эти периоды. При этом надо иметь в виду, что карты характеризуют распределение ВСП и их изменение в районе расположения метеостанций. На значительном удалении от метеостанций и тем более в горных районах картина распределения ВСП может быть совершенно другой.

**Таблица 1.** Координаты метеостанций с данными со снегосъёмками в поле

| Индекс ВМО | Наименование станции       | Координаты станции |         | Высота метеоплощадки, м |
|------------|----------------------------|--------------------|---------|-------------------------|
|            |                            | широта             | долгота |                         |
| 23078      | Норильск (Таймырский ЦГМС) | 69°20'             | 88°18'  | 60                      |
| 22165      | Канин Нос                  | 68°39'             | 43°18'  | 48                      |
| 22271      | Шойна                      | 67°53'             | 44°08'  | 5                       |
| 22282      | Мыс Микулкин               | 67°48'             | 46°40'  | 6                       |
| 22292      | Инди́га                    | 67°41'             | 48°41'  | 3                       |

Окончание табл. 1

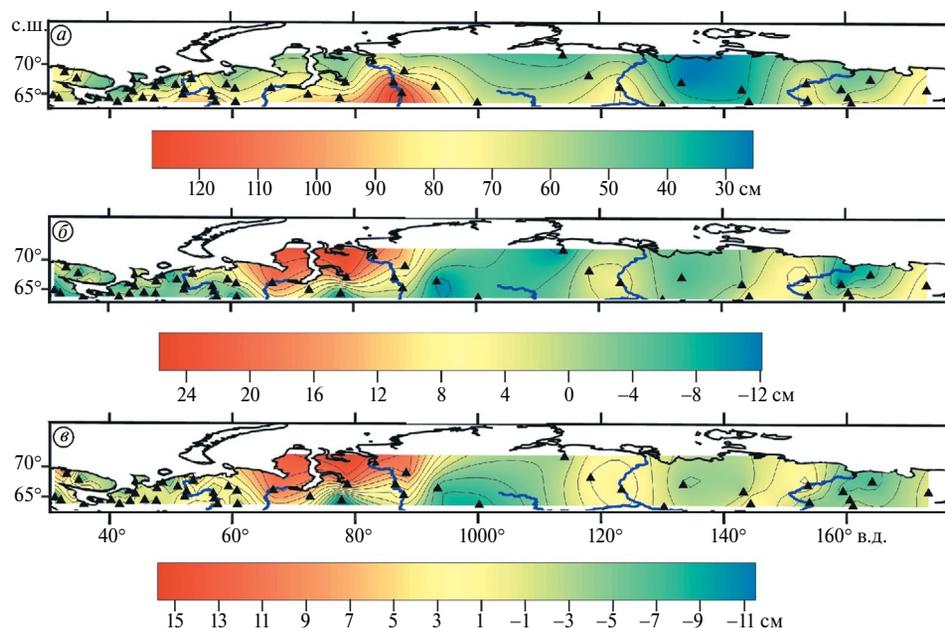
| Индекс<br>ВМО | Наименование станции | Координаты станции |         | Высота<br>метеоплощадки, м |
|---------------|----------------------|--------------------|---------|----------------------------|
|               |                      | широта             | долгота |                            |
| 23226         | Воркута, АМСГ        | 67°29'             | 63°58'  | 165                        |
| 23256         | Тазовск              | 67°28'             | 78°44'  | 26                         |
| 23219         | Хоседа-Хард          | 67°05'             | 59°23'  | 82                         |
| 23207         | Коткино              | 67°02'             | 51°08'  | 17                         |
| 22383         | Нижняя Пеша          | 66°45'             | 47°46'  | 12                         |
| 23330         | Салехард             | 66°32'             | 66°41'  | 15                         |
| 22365         | Абрамовский маяк     | 66°23'             | 43°13'  | 20                         |
| 23324         | Петрунь              | 66°26'             | 60°46'  | 61                         |
| 23412         | Усть-Уса             | 65°58'             | 56°55'  | 77                         |
| 22471         | Мезень               | 65°52'             | 44°13'  | 14                         |
| 22438         | Жижгин               | 65°12'             | 36°49'  | 26                         |
| 25563         | Анадырь              | 64°47'             | 177°34' | 64                         |
| 22559         | Холмогоры            | 64°13'             | 41°40'  | 10                         |

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Максимальная высота снежного покрова.** На рис. 1, а приведена МВСП на территории АЗРФ за период 2011–2020 гг. Диапазон изменений цветовой шкалы (минимальные и максимальные значения МВСП) составляет 26–127 см и в целом совпадает с диапазоном 27–128 см за период 1991–2020 гг., представленным в работе (Сосновский, Осокин, 2023). Средние значения МВСП за эти периоды составляют около 64 см (отличие на 0.1 см). Распределение МВСП за период 2011–2020 гг. в целом совпадает с периодом 1991–2020 гг. Большее отличие имеет аномалия МВСП (относительно 1966–1990 гг.) за период 2011–2020 гг. (см. рис. 1, б), для которого диапазон изменения цветовой шкалы изменяется от –13 до 24 см, и 1991–2020 гг. с диапазоном от –13 до 13 см (см. рис. 1, в). Средние значения аномалии МВСП за эти периоды отличаются незначительно и составляют –0.44 и –0.57 см.

За период 2011–2020 гг. наибольшая средняя многолетняя максимальная высота снежного покрова до 120 см отмечена в нижнем течении р. Енисей, наименьшая – 30 см в междуречье рек Лены и Индигирки. В европейской части Российской Арктики МВСП составляет в среднем 50–85 см (см. рис. 1, а). Сравнение с периодом 1966–1990 гг. показывает, что наибольший рост МВСП до 24 см (т. е. 40%) приходится на северные районы Ямало-Ненецкого автономного округа (см. рис. 1, б).

Изменение МВСП на  $\pm 4\%$  для разных метеостанций за период 1991–2020 гг. по сравнению с периодом 1966–1990 гг. отмечено в северных районах Якутии и в Чукотском автономном округе. В Арктической части ЕТР изменение МВСП составляет для разных метеостанций в основном  $\pm 5–10\%$ . Наибольшее изменение МВСП от 39 см за период 1966–1990 гг. до 82 см за близкий к современному периоду 1990–2020 гг. произошло на метеостанции Воркута (индекс ВМО станции 23226). Эта станция на карте не приведена из-за большого значения МВСП, которое повлияет на восприятие карты в целом, обусловленного сглаживанием цветовой гаммы. Динамика высоты снежного покрова для метеостанции Воркута рассмотрена отдельно. По сравнению с периодом 1966–1990 гг. отмечен рост МВСП на 10–15 см в арктической части Западной Сибири, небольшое снижение на 5–7 см произошло в арктической части Восточной Сибири и восточнее р. Индигирки, а также в отдельных районах северной части ЕТР. Причиной этого служит рост твёрдых осадков на 15% в районе Карского моря за период 1981–2010 гг., практически нулевой рост в районе моря Лаптевых и отрицательный тренд в районе Чукотского моря (Радионых и др., 2013). Кроме того, тенденция изменения режима осадков за период 1976–2022 гг. (Доклад, 2023) показала, что зимой происходит рост осадков в основном на севере ЕТР, севере Средней Сибири, и наоборот, осадки уменьшаются зимой на востоке Якутии. На высоту снежного покрова влияет и изменение плотности снега. Наибольшее снижение плотности снега



**Рис. 1.** Максимальная высота снежного покрова за период 2011–2020 гг. (а) и её аномалия за периоды 2011–2020 гг. (б) и 1991–2020 гг. (в) относительно 1966–1990 гг.

**Fig. 1.** The maximum of snow depth for 2011–2020: (а) and its anomaly for 2011–2020 (б) and 1991–2020 (в) to 1966–1990

отмечено на севере Якутии (что частично компенсирует снижение осадков), тогда как на остальной территории Арктики в целом произошёл небольшой рост плотности снега — до 6–8% на севере Западной Сибири и в отдельных районах севера ЕТР и Чукотки (Сосновский, Осокин, 2023).

На северо-западе ЕТР к этому прибавляется влияние оттепелей. Так, на самой северной метеостанции России, расположенной в пос. Баренцбург на Западном Шпицбергене (78°04'00" с. ш., 14°13'00" в. д.), рост числа оттепелей и их продолжительности увеличивает плотность снега. Это служит одной из причин уменьшения максимальной высоты снежного покрова на 7.7% в 2011–2020 гг. по сравнению с 2001–2010 гг.

Сравним МВСП за два первых десятилетия XXI в. (2001–2010 и 2011–2020 гг.), которые в значительной степени определяют распределение МВСП в следующий 30-летний климатический период 2001–2030 гг. В 2011–2020 гг. произошёл рост МВСП на 10–20 см относительно 2001–2010 гг. в северо-восточных районах ЕТР, в арктических регионах Западной Сибири и Дальнего Востока. Наибольший рост МВСП произошёл на метеостанции Воркута — с 79 см в 2001–2010 гг. до 98 см в 2011–2020 гг. Снижение МВСП на 4–8 см отмечено в отдельных районах Арктики, на западе ЕТР и в Восточной Сибири.

Рассмотрим теперь МВСП за разные временные периоды для регионов Российской Арктики. За период 2011–2020 гг. на ЕТР произошло небольшое снижение МВСП по сравнению с другими периодами и отмечен значительный рост МВСП в арктической

части Западной Сибири (Сосновский, Осокин, 2023). Небольшие изменения МВСП отмечены в арктической части Восточной Сибири. Отрицательные аномалии МВСП на Дальнем Востоке наблюдались в период 2001–2010 гг. В северо-западных и северо-восточных районах ЕТР тенденция изменения МВСП противоположна. Так, изменения МВСП в северо-восточной части ЕТР близки к тенденции роста МВСП в арктической части Западной Сибири — порядка 15–25%, а на большинстве метеостанций Арктики в центральной части на западе ЕТР произошло снижение МВСП. При этом число арктических метеостанций в западных и центральных районах ЕТР значительно больше, чем в восточных, что влияет на среднее значение МВСП на арктической части ЕТР. Аналогично в арктической части Восточной Сибири — северо-западный район намного более многоснежный (с метеостанциями Игарка и Туруханск с МВСП 115–125 см), чем центральный и северо-восточный (метеостанции Норильск и Тура с МВСП 60–65 см).

Цифры, приведённые в работе (Доклад, 2023), показывают снижение коэффициентов линейного тренда МВСП за период 1976–2022 гг. на западе и в центре арктической зоны ЕТР, севере Восточной Сибири и Чукотке (исключая её тихоокеанское побережье) на 1.5–2.0 см/10лет и рост линейного тренда МВСП на 1.5–2.0 см/10лет на Кольском полуострове, северо-востоке ЕТР и севере Западной Сибири.

Для ряда метеостанций АЗРФ на востоке ЕТР, севере Западной и Восточной Сибири, расположенных севернее 65-й широты, положительные тренды максимальной за март толщины снежного покрова

за период 1979–1995 гг., представленные на картах (Попова и др., 2018), сменились на отрицательные значения за период 1996–2013 гг. Для северо-запада ЕТР и районов Дальнего Востока изменения менее существенны. В какой-то степени это подтверждают оценки современных изменений снеготзапасов в бассейне Северной Двины за период 1980–2016 гг., представленные в работе (Попова и др., 2021). В ней отмечается, что до 2005 г. и данные наблюдений, и модельные расчёты указывают на рост снеготзапасов в бассейне Северной Двины, а с 2005 г. все рассмотренные источники данных указывают на продолжительный период дефицита снеготзапасов – 15–20%, с которым связан нисходящий тренд снеготзапасов в бассейне Северной Двины за рассматриваемый период в целом. Оценки параметров тренда находятся в широком диапазоне в зависимости от источника данных – в среднем по бассейну скорость уменьшения снеготзапасов может составлять от 4 мм по данным станционных измерений до 10 мм за 10 лет по данным расчётов на модели. При плотности снега 250 кг/м<sup>3</sup> (Сосновский, Осокин, 2023) это соответствует снижению ВСП на 1.6–4 см за 10 лет.

Наши данные показывают, что для метеостанций в северной части бассейна Северной Двины за период 2011–2020 гг. продолжается снижение МВСП по сравнению с 2001–2010 гг. Например, по данным метеостанции Пинега (индекс ВМО 22563) высота снега снизилась на 3.3 см в 2011–2020 гг. относительно 2001–2010 гг.

В табл. 2 приведена аномалия средней многолетней максимальной высоты снежного покрова в арктических регионах России относительно 1966–1990 гг. Видно, что в арктической части ЕТР происходит снижение МВСП особенно за период 2011–2020 гг. и значительный рост в арктической части Западной Сибири. Небольшие изменения МВСП отмечены в арктической части Восточной Сибири, и отрицательные аномалии наблюдались на Дальнем Востоке.

В табл. 3 приведены аномальные значения МВСП за период 1991–2020 гг. относительно периода 1966–1990 гг. для отдельных метеостанций разных регионов азиатской части Российской Федерации. Из неё видно, что положительные аномалии достигают 13 см, а отрицательные – 14 см; причём положительные и отрицательные аномалии есть в каждом регионе.

**Таблица 2.** Аномалии средней многолетней максимальной высоты снежного покрова (см) в арктических регионах России относительно 1966–1990 гг. за разные периоды

| Регион           | Период    |           |           |           |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                  | 1981–2010 | 1991–2020 | 2001–2010 | 2011–2020 |
| ЕТР              | 0.30      | –0.72     | –1.53     | –2.51     |
| Западная Сибирь  | 1.77      | 4.31      | 2.84      | 10.41     |
| Восточная Сибирь | 0.41      | 0,43      | 0,97      | 0.61      |
| Дальний восток   | –2.75     | –2.04     | –4.90     | –0.36     |

**Таблица 3.** Максимальные и минимальные аномалии максимальной высоты снежного покрова за период 1991–2020 гг. относительно 1966–1990 гг.

| Индекс ВМО       | Наименование станции       | Координаты станции |         | Высота метеоплощадки, м | Аномалии МВСП, см |
|------------------|----------------------------|--------------------|---------|-------------------------|-------------------|
|                  |                            | широта             | долгота |                         |                   |
| ЕТР              |                            |                    |         |                         |                   |
| 22113            | Мурманск                   | 68°58'             | 30°3'   | 57                      | 10.1              |
| 22365            | Абрамовский маяк           | 66°23'             | 43°13'  | 20                      | –10.6             |
| Западная Сибирь  |                            |                    |         |                         |                   |
| 23330            | Салехард                   | 66°32'             | 66°41'  | 15                      | 13.3              |
| 23552            | Тарко-Сале                 | 64°55'             | 77°49'  | 26                      | –13.5             |
| Восточная Сибирь |                            |                    |         |                         |                   |
| 23078            | Норильск (Таймырский ЦГМС) | 69°20'             | 88°18'  | 60                      | 11.5              |

Окончание табл. 3

| Индекс<br>ВМО  | Наименование станции | Координаты станции |         | Высота<br>метеоплощадки, м | Аномалии<br>МВСП, см |
|----------------|----------------------|--------------------|---------|----------------------------|----------------------|
|                |                      | широта             | долгота |                            |                      |
| 24507          | Тура                 | 64°16'             | 100°14' | 188                        | -8.8                 |
| Дальний Восток |                      |                    |         |                            |                      |
| 24343          | Жиганск              | 66°46'             | 123°24' | 88                         | 4.0                  |
| 25325          | Усть-Олой            | 66°33'             | 159°25' | 125                        | -70                  |

**Динамика снежного покрова на метеостанции Воркута.** Динамика снежного покрова на метеостанции Воркута за период с 1970 по 2020 г. представлена на рис. 2. Средняя максимальная высота снежного покрова за периоды 1970–1990 и 1991–2020 гг. составляла 39 и 82 см. Для определения статистической значимости различий средних величин за эти периоды используем  $t$ -критерий Стьюдента, рассчитанный по формуле:

$$t = \frac{\text{mean}_2 - \text{mean}_1}{\sqrt{\text{std}_2^2/n_2 + \text{std}_1^2/n_1}},$$

где  $\text{mean}$  — средние значения;  $n$  — длина ряда;  $\text{std}$  — стандартное отклонение; индекс — номер ряда.

Расчёты показали, что  $t = 8.27$ . Степень свободы составляет  $df = n_1 + n_2 - 2 = 21 + 30 - 2 = 49$ , для которой при значении  $p$ -уровня 0.001 получим критическое значение  $t$ -критерия Стьюдента 3.50. Таким образом, подтверждается значимость различий между средними величинами высоты снежного покрова за эти периоды.

При среднем значении высоты снежного покрова 82 см за период 1991–2020 гг. среднее квадратическое

отклонение составляет 22 см. Тренд высоты снежного покрова за период 1970–2020 гг. составляет  $y = 1.5633x - 3054.4$ ; где коэффициент достоверности  $R^2 = 0.6469$ . Статистическая значимость коэффициентов этих трендов подтверждается расчётом  $t$ -критерия Стьюдента при уровне значимости 0.05. Тренд за период 1991–2020 гг. практически совпадает с трендом за 1970–2020 гг. Тренд за период 1970–1990 гг. статистически незначим.

**Высота снежного покрова за отдельные месяцы и её изменчивость.** Климатические изменения приводят не только к изменению МВСП, но и ВСП за отдельные месяцы. На рис. 3 представлена ВСП за период 1991–2020 гг. и её изменчивость по отношению к периоду 1966–1990 гг. в октябре, ноябре, январе, марте и мае (отношение ВСП за отдельные месяцы 1991–2020 гг. к соответствующим значениям за 1966–1990 гг.).

В октябре средняя многолетняя ВСП в 1991–2020 гг. составила 2–8 см на западе и центре арктической части ЕТР, 10–16 см в арктической части востока ЕТР и северо-запада Западной Сибири, 15–25 см на севере Якутии (см. рис. 3, а). Сравнение ВСП

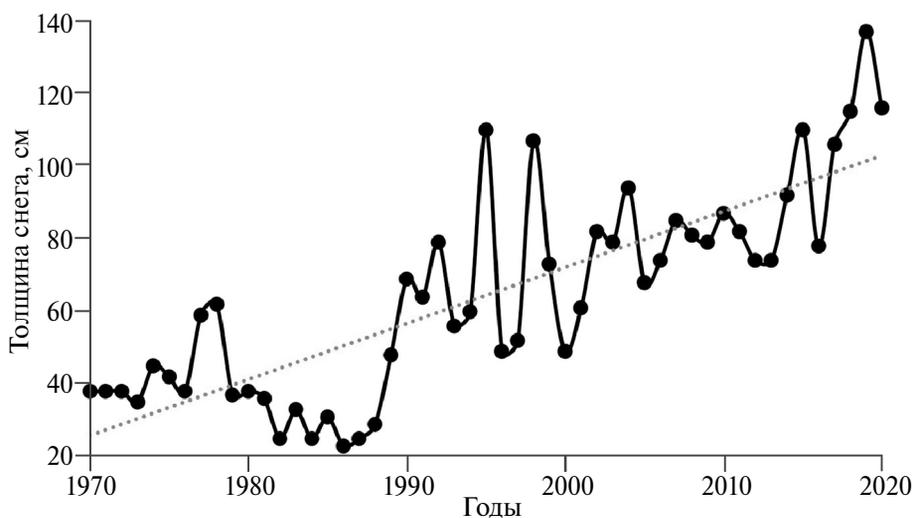
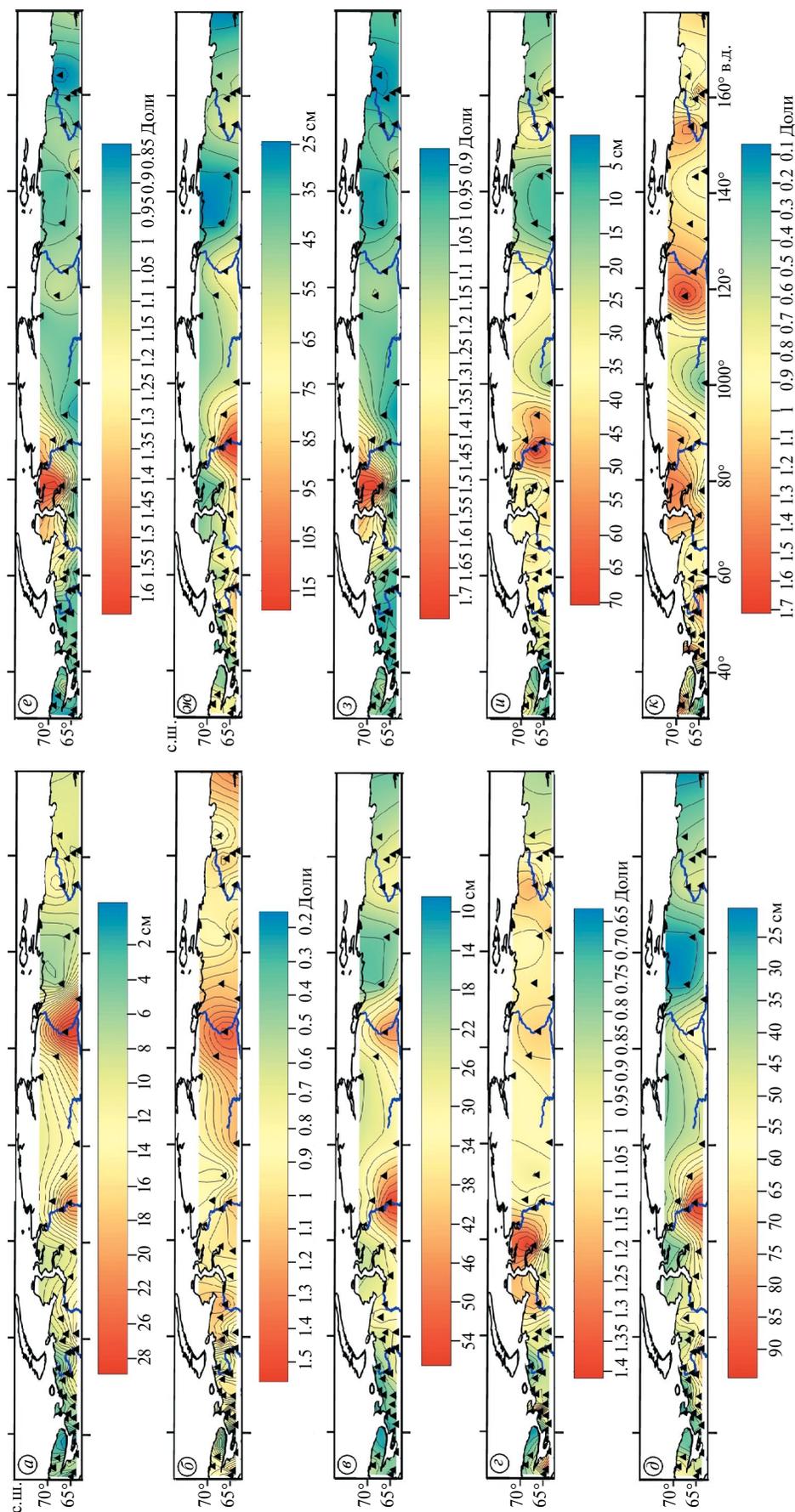


Рис. 2. Динамика высоты снежного покрова на метеостанции Воркута  
Fig. 2. Dynamics of snow depth at the Vorkuta weather station



**Рис. 3.** Высота снежного покрова в Арктике за период 1991–2020 гг. (а, в, д, ж, и) и её отношение к соответствующим значениям высоты за период 1966–1990 гг. (б, е, з, к) за месяцы: а, б – октябрь; в, е – ноябрь; д, е – январь; ж, з – март; и, к – май

**Fig. 3.** The snow depth in the Arctic for 1991–2020 (a, в, д, ж, и) and its ratio of the snow depth to 1966–1990 (б, е, з, к) for the months: а, б – October; в, е – November; д, е – January; ж, з – March; и, к – May

за период 1991–2020 гг. с периодом 1966–1990 гг. показало, что в октябре в результате потепления климата и более позднего установления снежного покрова (Попова и др., 2018) в арктической части европейской территории России высота снега уменьшилась в среднем на 22%, а в ряде районов снижение достигло 70%. В бассейне нижнего течения р. Лены рост ВСП составил 20–40% (см. рис. 3, б).

В ноябре 1991–2020 гг. ВСП составила 10–20 см на северо-западе и центре арктической части ЕТР, 25–35 см на северо-востоке ЕТР, до 50 см в низовье р. Енисей, 20–40 см на севере Якутии (см. рис. 3, в). Сравнение ВСП за периоды 1991–2020 и 1966–1990 гг. показало, что в результате потепления климата ВСП уменьшилась на ЕТР в ноябре в среднем на 8%, на ряде метеостанций севера ЕТР снижение составило 20%, на севере Западной Сибири произошёл рост ВСП в среднем на 11% (в ряде мест до 40%), на севере Якутии рост ВСП составил в среднем 3%, в низовье р. Лены – до 15% (см. рис. 3, г). Последнее объясняется ростом осенних осадков на 5% нормы за 10 лет (за 1976–2022 гг.) на северо-востоке Западной Сибири и на 10% – на севере Восточной Сибири и Якутии (Доклад, 2023).

В январе 1991–2020 гг. ВСП составила 40–60 см в арктической части ЕТР, Западной и Восточной Сибири (в низовье р. Енисей до 90 см), 25–45 см на севере Якутии (см. рис. 3, д). Сравнение ВСП за периоды 1991–2020 и 1966–1990 гг. показало, что ВСП уменьшилась в январе на арктической части ЕТР в среднем на 4%, на арктической части Западной Сибири произошёл рост ВСП в среднем на 20%. На севере Якутии изменения ВСП составили для разных метеостанций  $\pm 5\%$ , на Чукотке отмечается снижение ВСП на 5–10% (см. рис. 3, е). Эти результаты вызваны ростом зимних осадков на севере Западной Сибири и их снижением на Чукотке (Доклад, 2023).

В марте 1991–2020 гг. ВСП в арктической части ЕТР, Западной и Восточной Сибири составила 55–80 см (в низовье р. Енисей до 110 см), 25–55 см на севере Якутии (см. рис. 3, ж). Сравнение ВСП за периоды 1991–2020 и 1966–1990 гг. показало, что в результате потепления климата в арктической части Западной Сибири произошёл рост ВСП в среднем на 23%. Это обусловлено значительным ростом весенних осадков (местами более 10% нормы за 10 лет) в Западной Сибири (Доклад, 2023), в арктической части на ЕТР и севере Якутии изменения ВСП для разных метеостанций составили в среднем  $\pm 10\%$  (см. рис. 3, з).

Снегонакопление в мае (на 20-е число) в ряде регионов сменяется таянием снега, и высота снежного покрова снижается относительно МВСП. В мае 1991–2020 гг. ВСП составила 10–20 см на западе арктической части ЕТР и севере Якутии, 30–60 см в арктической части Западной и Восточной Сибири (см. рис. 3, и). Отношение ВСП за период 1991–2020 гг. к её значениям за 1966–1990 гг. показало, что в мае на

северо-западе ЕТР это отношение составило 0.5–1.1 (см. рис. 3, к), 0.8–1.6 – на востоке арктической части ЕТР и Западной Сибири.

**Динамика высоты снежного покрова за отдельные месяцы.** Важным параметром снежного покрова служит не только его высота, но и её динамика – отношение высоты снежного покрова за отдельный месяц к её максимальному значению – величина  $r_h$ . На рис. 4 представлена динамика снегонакопления ВСП за период 1991–2020 гг. и её изменчивость по отношению к 1966–1990 гг. в октябре, ноябре, январе, марте и мае.

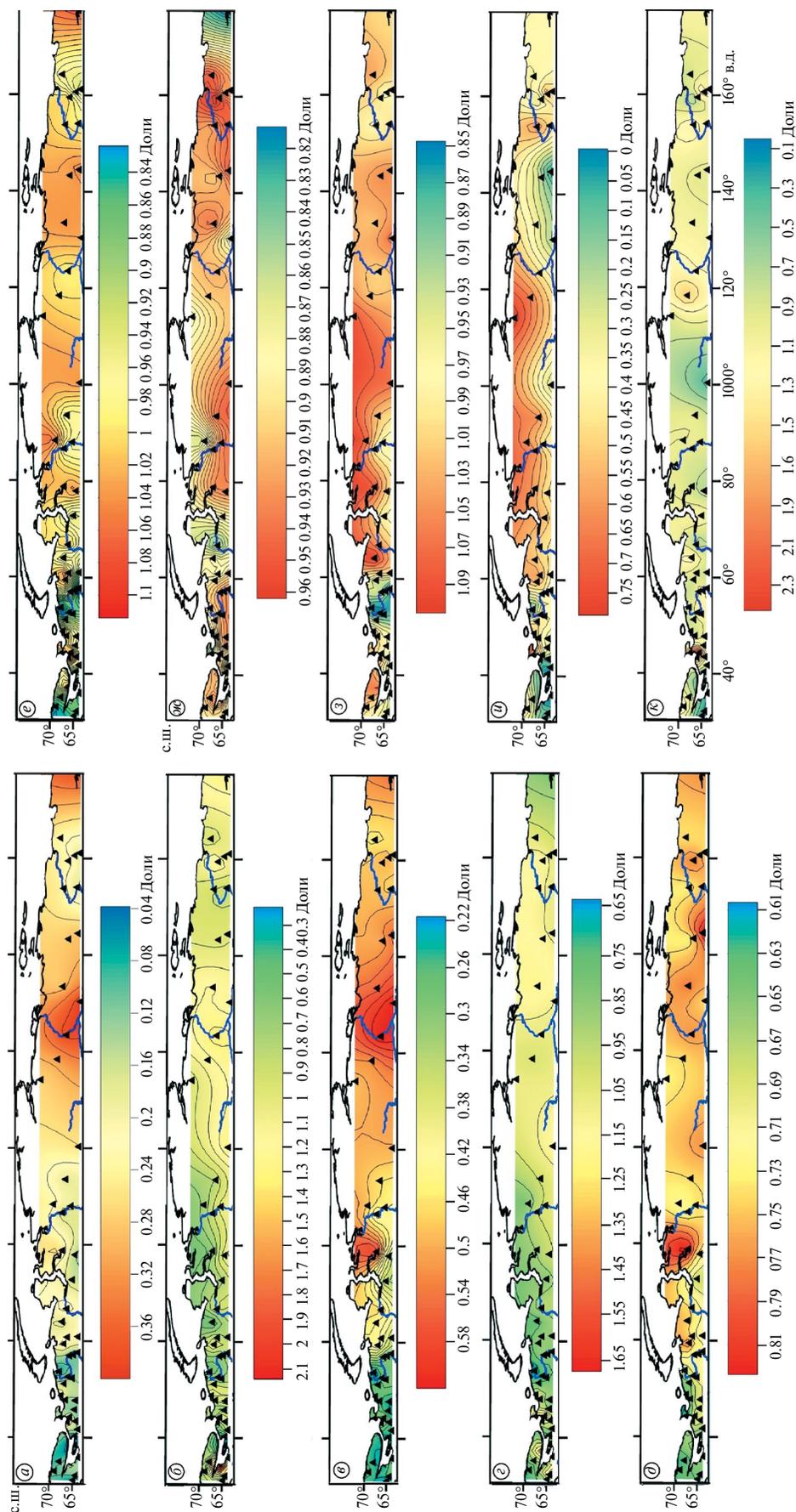
Величина  $r_h$  в октябре 1991–2020 гг. составила 5–15% на северо-западе и в центре арктической части ЕТР, 15–20% на востоке арктической части ЕТР и арктической части Западной Сибири, 25–35% на севере Якутии (см. рис. 4, а). Климатические изменения приводят к изменению динамики снегонакопления. В октябре 1991–2020 гг. величина  $r_h$  уменьшилась в ряде районов в арктической части ЕТР и Западной Сибири по сравнению с периодом 1966–1990 гг. на 20–60%, на севере Якутии на  $\pm 10\%$  (см. рис. 4, б).

В ноябре 1991–2020 гг. величина  $r_h$  составила 22–30% на северо-западе и центре арктической части ЕТР, 45–55% на востоке арктической части ЕТР, арктической части Западной Сибири и на севере Якутии (см. рис. 4, в). В 1991–2020 гг. величина  $r_h$  уменьшилась на 15–30% в арктической части ЕТР и Западной Сибири и увеличилась на 5–10% на севере Якутии по сравнению с периодом 1966–1990 гг. (см. рис. 4, г). Последнее вызвано ростом осенних осадков на севере Якутии (Доклад, 2023).

Динамика снегонакопления в январе 1991–2020 гг. – величина  $r_h$  составила 60–65% на западе арктической части ЕТР, 70–80% на остальной части Арктики (см. рис. 4, д). В 1991–2020 гг. величина  $r_h$  уменьшилась на 5–10% в отдельных районах северо-запада ЕТР и выросла до 10% на остальной части Арктики по сравнению с 1966–1990 гг. (см. рис. 4, е).

Величина  $r_h$  в марте 1991–2020 гг. составила в среднем 90–95% на всей территории Арктики, за исключением арктической части запада ЕТР и Дальнего Востока, где  $r_h = 85–90\%$  (см. рис. 4, ж). Изменение величины  $r_h$  по сравнению с 1966–1990 гг. составило 0.85–1.10 (см. рис. 4, з), причём наименьшие значения отмечены в бассейне р. Печоры.

Динамика снегонакопления (таяния) в мае (на 20-е число) 1991–2020 гг. – величина  $r_h$  составила в среднем 15–30% на западе арктической части ЕТР (из-за таяния снега), в арктической части Западной и Восточной Сибири  $r_h = 55–70\%$  (см. рис. 4, и). При этом в ряде районов северо-запада ЕТР снег полностью растаял. Климатические изменения приводят к изменению динамики снегонакопления в мае (в основном изменение в динамике таяния). В мае 1991–2020 гг. изменение величины  $r_h$  по отношению к периоду 1966–1990 гг. составило в основном  $\pm 30\%$



**Рис. 4.** Динамика снегонакопления в Арктике за период 1991–2020 гг. (а, в, д, ж, и) и её отношение к динамике снегонакопления (з) за период 1966–1990 гг. (б, г, е, з, к) за месяцы: а, б – октябрь; в, г – ноябрь; д, е – январь; ж, з – март; и, к – май  
**Fig. 4.** Dynamics of a snow depth in the Arctic for 1991–2020 (a, в, д, ж, и) and its ratio to the snow depth dynamics to 1966–1990 (б, г, е, з, к) for the months: а, б – October; в, г – November; д, е – January; ж, з – March; и, к – May

(см. рис. 4,  $\kappa$ ). В среднем на всей территории Арктики величина  $r_h$  уменьшилась по сравнению с периодом 1966–1990 гг. в октябре /ноябре на 13/4%, в январе /марте на 3/1%.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследований выяснена тенденция изменения максимальной высоты снежного покрова и высоты снежного покрова за отдельные месяцы для разных сезонов на материковой части Арктики за современный климатический период 1991–2020 гг. Сравнение с историческим периодом 1966–1990 гг. показало, что на арктической части европейской территории России изменения высоты снежного покрова незначимы – снижение порядка 1%, в арктической части Западной Сибири отмечен рост высоты снега на 16%. В то же время рост высоты снега за 2011–2020 гг. относительно 1966–1990 гг. составил 32%, а относительно 2001–2010 гг. – 15%. В арктической части Дальнего Востока произошло снижение высоты снега за современный климатический период относительно исторического периода на 4%. При небольшой вариации плотности снега эти изменения вызваны в основном динамикой твёрдых осадков. При этом влияние климатических изменений на динамику твёрдых осадков и высоту снежного покрова в каждом регионе требует дальнейшего изучения.

Проведённый анализ показал, что для ряда метеостанций одного региона динамика максимальной высоты снежного покрова может быть разнонаправлена. Причины таких изменений требуют дальнейших исследований. Это могут быть орографические и ландшафтные условия. Так, даже процесс накопления снега в лесу – сложная функция многих факторов, прежде всего его таксационных характеристик и особенностей ветрового режима.

Сравнение высоты снежного покрова в октябре за периоды 1991–2020 и 1966–1990 гг. показало, что в результате потепления климата и более позднего установления снежного покрова в арктической части европейской территории России высота снега в среднем снизилась на 22%, а в ряде районов снижение достигло 70%. Рост твёрдых осадков в октябре в бассейне нижнего течения р. Лены привёл к росту высоты снега на 20–40%.

Динамика высоты снежного покрова (отношение текущей высоты снежного покрова к её максимальному значению) на западе и в центре европейской части Арктики в первой половине холодного периода значительно отличается от территории восточнее 55–60° в. д. К концу осени высота снежного покрова в арктической части ЕТР достигает примерно 25–30% от максимального значения, тогда как в арктической части Сибири в основном превышает 50%. Это связано с региональными климатическими особенностями этих территорий. Полученные результаты

показывают тенденции изменения высоты снежного покрова и её динамики в разных регионах в условиях современного климата, они наиболее заметны в начальный период снегонакопления.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках темы государственного задания Института географии РАН № 1021051703465-1 (FMWS-2024-0004). Анализ архивных материалов по Шпицбергену проводился по программе № 1023032400458-8 (FMWS-2023-0001).

**Acknowledgments.** The paper includes the results obtained within the framework of the research project № 1021051703465-1 (FMWS-2024-0004) of the Research Plan of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences. The analysis of archival materials on Svalbard was carried out under the № 1023032400458-8 (FMWS-2023-0001) program.

### ЛИТЕРАТУРА

- Анисимов О. А., Стрелецкий Д. А. Геокриологические риски при таянии многолетнемерзлых грунтов // Арктика. XXI век. Естественные науки. 2015. № 2. С. 60–74.
- Бульгина О. Н., Разуваев В. Н., Коршунова Н. Н. Снежный покров на территории России и его пространственные и временные изменения за период 1966–2010 гг. // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2011. Т. 24. С. 211–227.
- Варламов С. П., Скачков Ю. Б., Скрябин П. Н., Балута В. И. Многолетняя изменчивость термического состояния верхних горизонтов криолитозоны Центральной Якутии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2023. Т. 28. № 3. С. 398–414. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-398-414>
- Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных // Электронный ресурс. <http://meteo.ru> Дата обращения: 15.05.2023.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. М.: Изд-во Росгидромета, 2023. 104 с.
- Журавлев Г. Г., Горбатенко В. П., Тунаев Е. Л. Метели на территории Томской области // Тр. Главной геофиз. обсерватории им. А. И. Воейкова. 2019. № 594. С. 137–151.
- Катцов В. М., Порфирьев Б. Н. Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики // Арктика: экология и экономика. 2012. Т. 6. № 2. С. 66–79.
- Котляков В. М. Криосфера и климат // Экология и жизнь. 2010. № 11. С. 51–59.
- Осокин Н. И., Самойлов Р. С., Сосновский А. В., Сократов С. А. О роли некоторых природных факторов

- в промерзании грунтов // *Материалы гляциологических исследований (МГИ)*. 2000. № 88. С. 41–45.
- Осокин Н. И., Самойлов Р. С., Сосновский А. В.* Оценка влияния толщины снежного покрова на деградацию мерзлоты при потеплении климата // *Изв. РАН. Сер. геогр.* 2006. № 4. С. 40–46.
- Осокин Н. И., Сосновский А. В.* Влияние динамики температуры воздуха и высоты снежного покрова на промерзание грунта // *Криосфера Земли*. 2015. Т. XIX. № 1. С. 99–105.
- Осокин Н. И., Сосновский А. В.* Влияние термического сопротивления снежного покрова на устойчивость многолетнемерзлых пород // *Криосфера Земли*. 2016. Т. XX. № 3. С. 105–112.
- Павлов А. В.* Мониторинг криолитозоны. Новосибирск: Академич. изд-во “Гео”, 2008. 230 с.
- Попова В. В., Морозова П. А., Титкова Т. Б., Семенов В. А., Черенкова Е. А., Ширяева А. В., Китаев Л. М.* Региональные особенности современных изменений зимней аккумуляции снега на севере Евразии по данным наблюдений, реанализа и спутниковых измерений // *Лёд и Снег*. 2015. № 4 (55). С. 73–86. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2015-4-73-86>
- Попова В. В., Ширяева А. В., Морозова П. А.* Изменения характеристик снежного покрова на территории России в 1950–2013 годах: региональные особенности и связь с глобальным потеплением // *Криосфера Земли*. 2018. Т. XXII. № 4. С. 65–75.
- Попова В. В., Турков Д. В., Насонова О. Н.* Оценки современных изменений снегозапасов в бассейне Северной Двины по данным наблюдений и моделирования // *Лёд и Снег*. 2021. Т. 61. № 2. С. 206–221. <https://doi.org/10.31857/S2076673421020082>
- Радионов В. Ф., Александров Е. И., Брызгин Н. Н., Дементьев А. А.* Изменения температуры, осадков и снежного покрова в районах арктических морей за 1981–2010 гг. // *Лёд и Снег*. 2013. № 1 (121). С. 61–68. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2013-1-61-68>
- Руководящие указания ВМО по расчёту климатических норм. Женева, ВМО. 2017. № 1203. 32 с.
- Скачков Ю. Б.* Термическая устойчивость верхних горизонтов криолитозоны Центральной Якутии при современном потеплении климата. Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук: Ин-т мерзлотоведения им. акад. П. И. Мельникова СО РАН Якутск, 2001. 25 с.
- 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.
- Сосновский А. В., Осокин Н. И., Черняков Г. А.* Влияние климатических изменений на высоту снежного покрова в лесу и поле в первой декаде XXI века // *Криосфера Земли*. 2018а. Т. XXII. № 2. С. 91–100. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-2\(91-100\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-2(91-100))
- Сосновский А. В., Осокин Н. И.* Динамика высоты и плотности снежного покрова в Арктике при современном климате / Сб. науч. материалов II Всерос. конфер. «Лавёровские чтения. Арктика: актуальные проблемы и вызовы». ФГБУ «Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаврова Уральского отделения Российской академии наук». Архангельск, 2023. С. 128–132.
- Сосновский А. В., Осокин Н. И.* Высота снежного покрова в лесу и поле на равнинной территории России при современном климате // *Лёд и Снег*. 2023а. Т. 63. № 4. С. 558–568. <https://doi.org/10.31857/S2076673423040166>
- Указ Президента Российской Федерации от 02.05.2014 № 296 «О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации» // *Электронный ресурс*. <http://www.kremlin.ru/acts/bank/38377> (Дата обращения: 15.05.2023).
- Шерстюков А. Б.* Корреляция температуры почвогрунтов с температурой воздуха и высотой снежного покрова на территории России // *Криосфера Земли*. 2008. Т. XII. № 1. С. 79–87.
- Bekryaev R., Polyakov I., Alexeev V.* Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern Arctic warming // *Journ. of Climate*. 2010. V. 23. P. 3888–3906.
- Irannezhad M., Ronkanen A. K., Malekian A.* Editorial: Climate impacts on snowpack dynamics. *Front. Earth Sci.* 2022, 10. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.970981>
- Snow and Climate: Physical Processes, Surface Energy Exchange and Modeling / Armstrong R. L., Brun E. (Eds.). Cambridge University Press, 2008. 256 p.*

Citation: Sosnovsky A.V., Osokin N.I. The snow depth and its dynamics on the continental part of the Russian Arctic under conditions of the present-day climate. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2024, 64 (2): 238–251. [In Russian]. doi 10.31857/S2076673424020074

## The snow depth and its dynamics on the continental part of the Russian Arctic under conditions of the present-day climate

A. V. Sosnovsky\*, N. I. Osokin

*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

\*e-mail: alexandr\_sosnovskiy@mail.ru

Received February 3, 2024 / Revised March 14, 2024 / Accepted April 10, 2024

Based on the data of route snow surveys for the period 1966–2020, the comparison of the average long-term maximum depths of snow cover, the depths of snow cover for individual months and the dynamics of snow accumulation (the ratio of the depths of snow cover to the maximum value) on the continental part of the Russian Arctic for two representative periods (1966–1990 and 1991–2020) was made. Maps of snow cover depths and snow accumulation dynamics have been constructed for both periods. These maps made possible to analyze influence of the climatic changes on the depths of snow cover and the dynamics of snow accumulation.

A comparison of these values for the first (1991–2020) period with the same of the second one showed that in October–November in the European part of the Russian Arctic, the snow depths decreased by an average of 22% (first period) and 8% (second period), and in some areas the decrease reached 70 and 20%. In the Arctic part of Western Siberia, these characteristics of snow cover increased. Growth of snow cover depths in November/January/March averaged as 11/20/23%, and in some areas it exceeded 40%. The dynamics of snow accumulation in the Arctic for the whole period 1991–2020 averages 18/37%, in October/November, and 71/91% in January/March. In the European part of the Arctic, these values are smaller: 13/29% and 68/90%, respectively. The dynamics of snow accumulation in the west and in the center of the European Arctic territory by the end of the autumn period does not reach 30%, while in the Arctic part of Siberia this mainly exceeds 50%. In October/November 1991–2020, the dynamics of snow accumulation decreased in several regions of the European Arctic and the Arctic part of Western Siberia as compared to 1966–1990. On average over the entire territory of the Arctic, the decrease in the dynamics of snow accumulation compared to 1966–1990 amounted to 13/4% in October/November, and 3/1% in January/March.

**Keywords:** Arctic, snow depths, snow accumulation dynamics, climatic periods

### REFERENCES

- Anisimov O. A., Streletsky D. A.* Geocryological risks in the melting of permafrost soils. *ARKTIKA. XXI vek. Estestvennyye nauki*. ARCTIC. XXI century. Natural sciences. 2015, 2: 60–74. [In Russian].
- Bulygina O. N., Razuvaev V. N., Korshunova N. N.* Snow cover over the Russian territory and its spatial and temporal changes in 1966–2010. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*. Problems of ecological monitoring and modeling of ecosystems. 2011, 24: 211–227. [In Russian].
- Varlamov S. P., Skachkov Yu. B., Skryabin P. N., Baluta V. I.* Long-term variability of the thermal state in the upper horizons of the cryolithozone in Central Yakutia. *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki*. Arctic and Subarctic Natural Resources. 2023, 28 (3): 398–414. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-398-414> [In Russian].
- Doklad ob osobennostyah klimata na territorii Rossijskoj Federacii za 2022 god. Report on the peculiarities of the climate in the territory of the Russian Federation for 2022. Moscow: Roshydromet, 2023: 104 p. [In Russian].
- Zhuravlev G. G., Gorbatenko V. P., Tunaev E. L.* Blizzards on the territory of Tomsk region. *Trudi Glavnoi geofizicheskoi observatorii im. A. I. Voeykova*. Proc. of the Main Geophysical Observatory named A. I. Voeykov. 2019. № 594: 137–151. [In Russian].
- Kattsov V. M., Porfiriev B. N.* Climatic changes in the Arctic: consequences for the environment and economy. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. Arctic: ecology and economics. 2012, 2 (6): 66–79. [In Russian].

- Kotlyakov V. M.* Cryosphere and climate. *Ekologiya i zhizn'*. Ecology and Life. 2010, 11: 51–59. [In Russian].
- Osokin N. I., Samoilov R. S., Sosnovsky A. V., Sokratov S. A.* On the role of some natural factors in soil freezing. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2000, 88: 41–45. [In Russian].
- Osokin N. I., Samoilov R. S., Sosnovsky A. V.* Assessment of the effect of snow cover thickness on permafrost degradation during climate warming. *Izvestiya RAN (Akad. Nauk SSSR). Seriya Geograficheskaya*. Proc. of the Russian Academy of Sciences. Geographical series. 2006, 4: 40–46. [In Russian].
- Osokin N. I., Sosnovskiy A. V.* Impact of dynamics of air temperature and snow cover thickness on the ground freezing. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2015, 1 (XIX): 99–105. [In Russian].
- Osokin N. I., Sosnovsky A. V.* Influence of snow cover thermal resistance on permafrost stability. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2016, 3 (XX): 105–112. [In Russian].
- Pavlov A. V.* Monitoring kriolitozony. Monitoring of Permafrost. Novosibirsk: Geo Publishers, 2008: 229 p. [In Russian].
- Popova V. V., Morozova P. A., Titkova T. B., Semenov V. A., Cherenkova E. A., Shiryaeva A. V., Kitaev L. M.* Regional features of present winter snow accumulation variability in the North Eurasia from data of observations, reanalysis and satellites. *Led I Sneg*. Ice and Snow. 2015, 4 (55): 73–86. [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2015-4-73-86>
- Popova V. V., Shiryaeva A. V., Morozova P. A.* Changes in the snow depth characteristics in the territory of Russia in 1950–2013: the regional features and connection with the global warming. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2018, 4 (XXII): 65–75. [In Russian].
- Popova V. V., Turkov D. V., Nasonova O. N.* Estimates of recent changes in snow storage in the river Northern Dvina basin from observations and modeling. *Led I Sneg*. Ice and Snow. 2021, 2 (61): 206–221. [In Russian]. <https://doi.org/10.31857/S2076673421020082>
- Radionov V. F., Aleksandrov E. I., Bryazgin N. N., Dementiev A. A.* Changes in temperature, precipitation and snow cover in the Arctic Sea region, 1981–2010. *Led I Sneg*. Ice and Snow. 2013, 1 (53): 61–68. [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2013-1-61-68>
- Rukovodyashchie ukazaniya VMO po raschetu klimaticheskikh norm. WMO guidelines for calculating climate normals. Geneva. WMO, 2017, 1203: 32 p. [In Russian].
- Skachkov Yu. B.* Thermal stability of the upper horizons of the cryolithozone of Central Yakutia under modern climate warming. PhD-tesis. Yakutsk: Institute of Permafrost Studies named P. I. Melnikov SB RAS, 2001: 25 p. [In Russian].
- Sosnovsky A. V., Osokin N. I., Chernyakov G. A.* Dynamics of snow storages in forests and fields of Russian plains under climate changes. *Led I Sneg*. Ice and Snow. 2018, 2 (58): 183–190. [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-2-183-190>
- Sosnovskiy A. V., Osokin N. I., Chernyakov G. A.* Impact of climate change on snow depth in forest and field areas in the first decade of the XXI century. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2018a, XXII (2): 91–100. [In Russian]. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-2\(91-100\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-2(91-100))
- Sosnovsky V. A., Osokin, N. I.* Dynamics of depth and density of snow cover in the Arctic under modern climate. *Sbornik nauchnykh materialov II Vserossiyskoj konferencii «Lavyorovskie chteniya. Arktika: aktual'nye problemy i vyzovy»*. Proceedings of scientific materials of the II All-Russian Conference. “Laverov readings. The Arctic: current problems and challenges”. Federal Research Center for the Integrated Study of the Arctic named after Academician N. P. Laverov, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, 2023: 128–132. [In Russian].
- Sosnovsky A. V., Osokin N. I.* The Snow Depth in Forests and Fields on Lowlands of Russia under the Current Climate Conditions. *Led I Sneg*. Ice and Snow. 2023a, 4 (63): 558–568. [In Russian]. <https://doi.org/10.31857/S2076673423040166>
- Sherstyukov A. B.* Correlation of soil temperature with air temperature and snow cover depth in Russia. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2008, 1 (XII): 79–87. [In Russian].
- Bekryaev R., Polyakov I., Alexeev V.* Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern Arctic warming. *Journ. of Climate*. 2010, 23: 3888–3906.
- Irannezhad M., Ronkanen A. K., Malekian A.* Editorial: Climate impacts on snowpack dynamics // *Front. Earth Sci.* 2022. V. 10. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.970981>
- Snow and Climate: Physical Processes, Surface Energy Exchange and Modeling / Armstrong R. L., Brun E. (Eds.). Cambridge University Press, 2008: 256 p.
- Decree of the President of the Russian Federation dated 02.05.2014 No. 296 “On the land territories of the Arctic zone of the Russian Federation”. Retrieved from: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/38377> (Last access: 15 May 2023) [In Russian].
- All-Russian Scientific Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center. Retrieved from: <http://meteo.ru> (Last access: 15 May 2023) [In Russian].