

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛЕДНИКИ

УДК 551.578.46
DOI: 10.15372/KZ20240604
EDN: RZFGXE

ПЛОТНОСТЬ СНЕГА И ЕЕ ДИНАМИКА НА МАТЕРИКОВОЙ ЧАСТИ
РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ ПРИ СОВРЕМЕННОМ КЛИМАТЕ

А.В. Сосновский*, Н.И. Осокин

Институт географии РАН,
119017, Москва, Старомонетный пер., 29, Россия

*Автор для контакта; e-mail: alexandr_sosnovskiy@mail.ru

По данным маршрутных снегосъемок определены средние многолетние значения плотности снега на момент максимальной высоты снежного покрова и плотность снега за отдельные месяцы для материковой части российской Арктики. Проведено сравнение плотности снега за климатические периоды 1966–1990, 1991–2020 и 2011–2020 гг. Сравнение с историческим климатическим периодом 1966–1990 гг. показало, что в среднем на территории российской Арктики изменения максимальной плотности снега незначимы – снижение около 1 %. Наибольшее снижение плотности снега отмечено на севере Якутии, а максимальный рост – на севере Западной Сибири. Анализ плотности снега за отдельные месяцы показал, что из-за более поздних сроков установления снежного покрова изменилась плотность снега в осенний период. В среднем в Арктике за период 1991–2020 гг. плотность снега уменьшилась по сравнению с 1966–1990 гг. в октябре и ноябре на 6 и 10 %, в январе и мае – на 2 и 5 % и увеличилась на 1 % в марте. Наряду с изменением плотности снега за отдельные месяцы изменилась динамика, т. е. отношение плотности снега за отдельные месяцы к максимальному значению. В ноябре 1991–2020 гг. это отношение уменьшилось по сравнению с периодом 1966–1990 гг. на 15–20 % в ряде арктических районов центра и северо-востока Европейской территории России и до 25 % на севере Якутии. Построены карты плотности снега и ее изменчивости.

Ключевые слова: Арктика, плотность снега, климатические периоды.

Ссылка для цитирования: Сосновский А.В., Осокин Н.И. Плотность снега и ее динамика на материковой части российской Арктики при современном климате // Криосфера Земли, 2024, т. XXVIII, № 6, с. 45–57. DOI: 10.15372/KZ20240604. EDN: RZFGXE.

SNOW DENSITY AND ITS VARIABILITY IN THE CONTINENTAL PART
OF THE RUSSIAN ARCTIC UNDER MODERN CLIMATIC CONDITIONS

A.V. Sosnovskiy*, N.I. Osokin

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences,
Staromonetnyi per. 29, Moscow, 119017 Russia

*Corresponding author; e-mail: alexandr_sosnovskiy@mail.ru

Based on data from route snow surveys, the average long-term values of snow density at the time of the maximum snow cover depth and for individual months were determined for the continental part of the Russian Arctic. A comparison of snow densities was made for the climatic periods of 1966–1990, 1991–2020, and 2011–2020; on average, they comprised 0.265, 0.264, and 0.267 g/cm³, respectively. A comparison with the historical climatic period of 1966–1990 indicates that current changes in the maximum snow density in the Russian Arctic are insignificant: a decrease by about 1%. The greatest decrease in snow density is noted in the north of Yakutia, and the most significant increase in snow density is observed in the north of Western Siberia. Snow density values for individual months indicate that, owing to the later dates of snow cover establishment, the most significant changes in snow density take place in the autumn period. On average, snow density in 1991–2020 compared to that in 1966–1990 decreased by 6% in October, 10% in November, 2% in January, and 5% in May. An increase by 1% took place in March. Along with the changes in snow density for individual months, a change in its dynamics – the ratio of snow density for individual months to its maximum value – was also observed. In November 1991–2020, this ratio decreased by 15–20% in a number of Arctic regions in the European territory of Russia and up to 25% in the north of Yakutia in comparison with that in November 1966–1990. Maps of snow density and its variability have been constructed.

Keywords: Arctic, snow density, climatic periods.

ВВЕДЕНИЕ

Снежный покров – важный элемент криосферы. Он оказывает огромное влияние на климат, гидрологический режим территорий, термический режим почв и многолетнемерзлых пород, хозяйственную деятельность, транспортные коммуникации, жизнедеятельность растений и животных, опасные стихийные процессы и явления и многое другое [Котляков, 2010; *Snow and Climate*, 2008].

Плотность снега считается одним из важных параметров снежного покрова. Она является ключевым фактором для привязки высоты снежного покрова к водному эквиваленту снега, что имеет решающее значение для оценки водных ресурсов и гидрологического моделирования [Zhong *et al.*, 2014]. Плотность снега в значительной мере определяет теплопроводность и прочность снега, является входным параметром в климатических моделях. Так, теплозащитная способность снежного покрова оценивается по его термическому сопротивлению, которое равно отношению высоты снежного покрова к коэффициенту теплопроводности снега [Осокин, Сосновский, 2016б]. Значение последнего чаще всего рассчитывается по плотности снега [Павлов, 2008; Осокин, Сосновский, 2014а]. При натурных измерениях можно определить значение коэффициента теплопроводности по твердости и плотности снега [Котляков и др., 2018]. Зависимость коэффициента теплопроводности снега от плотности лежит в основе одного из видов снежной мелиорации [Гляциологический словарь, 1984], целью которой является увеличение плотности снега для более быстрого и глубокого промерзания почвы. Это достигается в ходе рыхления снега и дальнейшего его уплотнения специальной техникой. Опыты, проведенные на Красноуфимской селекционной станции, показали, что в результате уплотнения снега температура почвы стала на 3.6–4.8 °С ниже, чем на контрольном участке. Выпревания не наблюдалось и урожай был на 0.55 т/га выше, чем на участке без уплотнения [Чирков, 1982].

Уплотнение снега позволяет избежать выпревания растений под снегом. Так, если температура почвы на глубине узла кущения не ниже –1 °С в течение полутора месяцев, то возникают условия для развития снежной плесени и гибели озимых зерновых культур [Перевертин и др., 2022].

Известно, что уплотнение снежного покрова способствует защите многолетнемерзлых пород от деградации. Одним из способов уплотнения снежного покрова является увеличение поголовья крупного рогатого скота [Beer *et al.*, 2020]. Как отмечается в последней работе, защита многолетнемерзлых почв от оттаивания путем увеличения количества травоядных животных будет способствовать снижению выбросов парниковых газов.

Так, в плейстоценовом парке в пос. Черский (Россия) плотность 114 травоядных особей на 1 км² привела к среднему уменьшению высоты снежного покрова на 50 %.

В работе [Осокин и др., 2013] отмечается, что рост плотности снега в 1.5 раза (с 200 до 300 кг/м³) снижает толщину снежного покрова в 1.5 раза и увеличивает коэффициент теплопроводности в 1.9 раза. В итоге термическое сопротивление снежного покрова снижается в 2.8 раза.

Актуальность исследований плотности снега и ее изменчивости обусловлена влиянием глобального потепления на ускорение таяния мерзлых пород, которое приводит к разрушению объектов жилого фонда, хозяйственной инфраструктуры, магистральных трубопроводов, отрицательным экологическим последствиям [Катцов, Порфирьев, 2012; Анисимов, Стрелецкий, 2015].

Другой целью увеличения плотности снега является повышение его прочности при подготовке снежной взлетно-посадочной полосы [Поляков и др., 2010; Russell-Head *et al.*, 1984]. При этом плотность снега после уплотнения может достигать 600 кг/м³. Уплотнение снега способствует снижению затрат на вывоз снега за пределы городов [Быков, 2010].

Естественное изменение плотности снега занимает определенное время и зависит от многих факторов, таких как температура воздуха, скорость ветра, высота снежного покрова [Wever *et al.*, 2023]. Плотность снега также возрастает за счет увеличения количества и продолжительности оттепелей и жидких осадков в зимний период. В работе [Сосновский, Осокин, 2019] на примере метеостанции Баренцбург (Западный Шпицберген) показано, что при оттепели в первой половине зимы возможен рост глубины промерзания пород из-за увеличения плотности снега и снижения термического сопротивления снежного покрова.

В настоящее время во многих работах изучается влияние климатических изменений на высоту снежного покрова (ВСП) и снегозапасы, но значительно меньше исследований по изменению плотности снега. В работе [Zhong *et al.*, 2014] дан анализ пространственно-временной изменчивости плотности снега на территории бывшего СССР с 1966 по 2008 г. Отмечается, что более высокие значения месячной плотности снега были на побережье Арктической России и п-ова Камчатка, в то время как более низкая плотность снега наблюдалась в Центральной Сибири. За период 1966–2008 гг. плотность снега имела значительную тенденцию к снижению, особенно в осенние месяцы. Максимальная среднемесячная плотность снега в июне составляла около 0.33 г/см³, а минимальная в октябре – 0.14 г/см³. В работе [Осокин, Сосновский, 2014б] показано, что рост макси-

мальной плотности снежного покрова на территории России в 2001–2010 гг. относительно 1966–2000 гг. не превышал 6 %.

Современные климатические условия влияют на плотность снега как за счет изменения высоты снежного покрова, инсоляции, количества выпадающих осадков, так и за счет температурного градиента в снеге, определяющего скорость его метаморфизма. Поэтому вариация высоты снежного покрова является одним из факторов, влияющих на плотность снега. В работе [Радионов и др., 2013] отмечается, что тенденция увеличения количества твердых осадков на фоне роста температуры привело 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 Европейской территории России (ЕТР) и северо-западе Якутии. В работе [Попова и др., 2018] установлено, что в целом по северу Евразии (севернее 55° с.ш.) изменения снегонакопления в 1971–2013 гг. (по сравнению с 1951–1970 гг.) выражаются в увеличении средней ВСП в конце зимы на 17 % (7 см). Наибольшие изменения – около 26 % (11 см) – происходили на севере Западной 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, описываемой 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 проникновением атлантического воздуха на восток вплоть до Енисея.

Начало современного потепления к северу от 60° с.ш. приходится на 1990-е годы [Доклад..., 2023]. В Арктике приземная температура воздуха повышалась как минимум вдвое быстрее, чем происходит глобальное потепление [Bekryaev et al., 2010]. Поэтому изменение параметров снежного покрова, влияющих на термический режим и устойчивость многолетнемерзлых пород, наиболее актуально в Арктике. Рассмотрим изменение плотности снега на материковой части российской Арктики при современном климате.

Арктика – область к северу от Северного полярного круга (66°33'44" с.ш.). Однако в целях

обеспечения национальных интересов Российской Федерации указом Президента РФ “О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации” от 02.05.2014 г. № 296 [<http://www.kremlin...>] определены сухопутные территории Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ), куда вошли отдельные районы, расположенные южнее Северного полярного круга. Поэтому, чтобы охватить основные районы, отнесенные к АЗРФ, будем рассматривать метеостанции со снегомерными съемками севернее 64° с.ш.

Рассмотрим изменения плотности снега за разные временные периоды. В климатологии используют базовые 30-летние средние значения температуры, суммы осадков и других показателей. Эти 30-летние исторические усредненные значения (“климатические нормы”) могут быть рассчитаны на местном, национальном или мировом уровнях. Чтобы учесть быстрые темпы изменения климата, а также практические потребности в актуальной информации о климате, Всемирная метеорологическая организация (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. был сохранен как исторический базовый период для поддержания долгосрочной оценки изменения климата [Руководящие указания..., 2017]. Для анализа влияния климатических изменений на снежный покров период 1961–1990 гг. заменен на период 1966–1990 гг., за который есть данные по снежному покрову на материковой части российской Арктики.

Цель настоящей работы – оценка тенденции изменения плотности снега и ее динамики на материковой части российской Арктики при современном климате.

МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Плотность снега (ПС) измеряется на 517 метеостанциях Росгидромета в ходе маршрутных снегомерных съемок. Количество станций, где проводятся маршрутные снегомерные съемки, в Арктической зоне России значительно меньше, чем метеостанций с измерениями на стационарных точках. Севернее 66° с.ш. расположены 28 метеостанций со снегомерными съемками, 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.

Данные по снегомерным съемкам, координаты и названия метеорологических станций России приведены на сайте Всероссийского института гидрометеорологической информации ВНИИГМИ-МЦД [<http://meteo.ru>] с 1966 г. по настоящее

время. Это обусловлено тем, что после 1965 г. не было нарушений однородности, вызванных изменением процедуры наблюдений. Наблюдения за снежным покровом по регламенту маршрутных снегосъемок осуществляются через 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 параметров снежного покрова при снегосъемках приходится на 20-е число каждого месяца. Поэтому принимались данные измерений плотности снега на 20-е число.

Плотность снега является производной многих факторов и определяется как температурными и ветровыми условиями в момент снегопада, так и процессами уплотнения и перекристаллизации снежной толщи. Плотность снега в процессе роста и метаморфизма снежного покрова меняется от $0.01\text{--}0.05\text{ г/см}^3$ для свежевыпавшего снега до $0.3\text{--}0.4\text{ г/см}^3$ в конце сезона снегонакопления. В процессе снеготаяния происходит дальнейший рост плотности снега. Будем принимать значения плотности снега на момент максимальной высоты снежного покрова. Это позволяет в дальнейшем оценить термическое сопротивление снежного покрова, определяющего теплозащитные свойства. Условно назовем эту плотность максимальной. Однако это не гарантирует максимальную плотность снега (МПС) до момента снеготаяния. Весенние снегопады могут приводить к росту высоты снежного покрова и снижению плотности снега за счет менее плотного свежевыпавшего снега. При таянии снега, в том числе в период оттепелей, плотность снега может значительно повышаться.

Анализ метеостанций со снегосъемками показал, что из рассмотренных 55 метеостанций на 30 из них есть маршруты только в лесу, на 18 станциях – только в поле и на 7 станциях как в лесу, так и в поле. Для последних метеостанций принимались значения плотности снега для леса.

В результате обработки данных по максимальной плотности снега за период с 1966 по 2020 г. для каждой метеостанции получены средние многолетние значения МПС за 25-летний (1966–1990 гг.) и 30-летние периоды (1981–2010 и 1991–2020 гг.), две декады XXI в. (2001–2010 и 2011–2020 гг.). Для этих периодов построены карты распределения МПС. При этом надо иметь в виду, что карты характеризуют распределение МПС и их изменение в районе расположения метеостанций. На значительном удалении от метеостанций и тем более в горных районах картина распределения МПС может быть иной. Поэтому на каждом рисунке приведены места расположения метеостанций.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА И ОБСУЖДЕНИЕ

Максимальная плотность снега

На рис. 1, а приведена максимальная плотность снега на территории АЗРФ за период 1991–2020 гг. Диапазон изменения цветовой шкалы (минимальные и максимальные значения МПС) составляет $0.18\text{--}0.38\text{ г/см}^3$ [Сосновский, Осокин, 2023]. Наибольшие значения плотности снега в АЗРФ до $0.32\text{--}0.39\text{ г/см}^3$ за период 1991–2020 гг. приходится на прибрежные арктические районы ЕТР и Западной Сибири (см. рис. 1, а). Наименьшие значения плотности снега $0.16\text{--}0.20\text{ г/см}^3$ при толщине снега около 30 см отмечены на севере Якутии.

При этом за период 1991–2020 гг. плотность снега изменилась приблизительно на $\pm 12\%$ по сравнению с периодом 1966–1990 гг. (см. рис. 1, б). Наибольшее снижение плотности снега произошло на севере Якутии, тогда как на остальной территории Арктики в целом отмечался рост плотности снега, наиболее значимый на севере Западной Сибири, что обусловлено в основном снижением высоты снежного покрова на севере Якутии и ее ростом на севере Западной Сибири.

На рис. 1, в приведена максимальная плотность снега на территории АЗРФ за период 2011–2020 гг. Диапазон изменения цветовой шкалы (минимальные и максимальные значения МПС) составляет $0.16\text{--}0.44\text{ г/см}^3$, что несколько больше по сравнению с диапазоном за период 1991–2020 гг. Средние значения МПС за эти периоды составляют 0.27 и 0.26 г/см^3 соответственно. В целом распределение МПС за период 2011–2020 гг. совпадает с периодом 1991–2020 гг. Большее отличие имеет отношение значений МПС за периоды 2011–2020 гг. (см. рис. 1, г) и 1991–2020 гг. к значениям МПС за 1966–1990 гг. В первом случае диапазон изменения цветовой шкалы составляет от 0.8 до 1.24 по сравнению с диапазоном от 0.88 до 1.08 (см. рис. 1, б) для второго периода.

За период 2011–2020 гг. наибольшая средняя многолетняя МПС до 0.44 г/см^3 отмечена на станции Мыс Микулкин (№ 22282, $67^\circ 48'$ с.ш., $46^\circ 40'$ в.д.), что на 0.17 г/см^3 больше, чем в среднем по Арктике, наименьшая – до 0.16 г/см^3 в междуречье Лены и Индигирки. На европейской части Арктики МПС составляет в среднем $0.24\text{--}0.32\text{ г/см}^3$ (см. рис. 1, а). Сравнение с периодом 1966–1990 гг. показало, что наибольший рост МПС до 0.12 г/см^3 приходится на метеостанцию Мыс Микулкин, а снижение на 0.04 г/см^3 – на арктические районы Восточной Сибири (см. рис. 1, б).

За период 1991–2020 гг. рост МПС отмечается в арктических районах Западной Сибири и северо-востока ЕТР, а снижение – в арктических районах Восточной Сибири. Это вызвано измене-

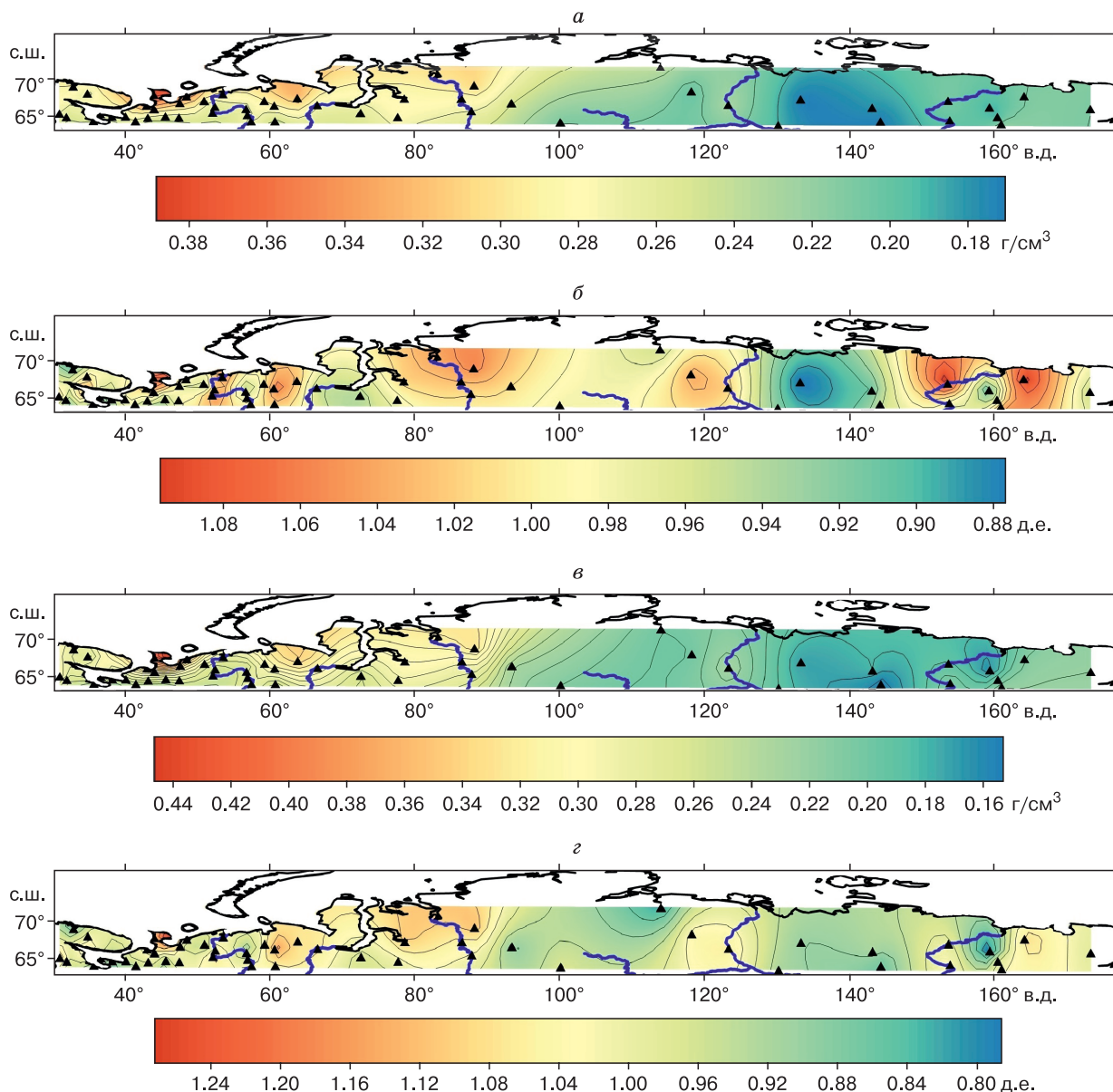


Рис. 1. Средняя многолетняя максимальная плотность снега за периоды 1991–2020 гг. (а) и 2011–2020 гг. (в) и их отношение к значениям плотности снега за период 1966–1990 гг. (б, г).

нием максимальной высоты снежного покрова в этих районах (плотность снега во многом зависит от высоты снежного покрова). Так, в работе [Радионов и др., 2013] отмечается рост твердых 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. Кроме того, анализ тенденции изменения режима осадков за период 1976–2022 гг. [Доклад..., 2023] показал, что зимой происходит рост осадков в основном на севере ЕТР, севере Средней Сибири (5...10 % нормы за 10 лет), уменьшаются осадки зимой на востоке Якутии (–5...–10 % нор-

мы за 10 лет). За “норму” принято среднее многолетнее количество осадков за базовый период 1991–2020 гг.

Одной из причин роста плотности снега является его оседание под действием собственного веса [Чернов, 2016]. Так, в нормативных документах по определению снеговых нагрузок на покрытия применяются разные зависимости плотности снега от его толщины [Основы..., 2017]. Этим частично объясняется рост плотности снега в районах с увеличением высоты снежного покрова. На северо-западе ЕТР к этому добавляется влияние оттепелей. Так, на самой северной российской метеостанции,

расположенной в пос. Баренцбург на Западном Шпицбергене (78°04'00" с.ш., 14°13'00" в.д.), за счет роста числа оттепелей и их продолжитель-

ности [Осокин, Сосновский, 2016а] увеличивается плотность снега [Сосновский, Осокин, 2019]. Снижение плотности снега на севере Якутии

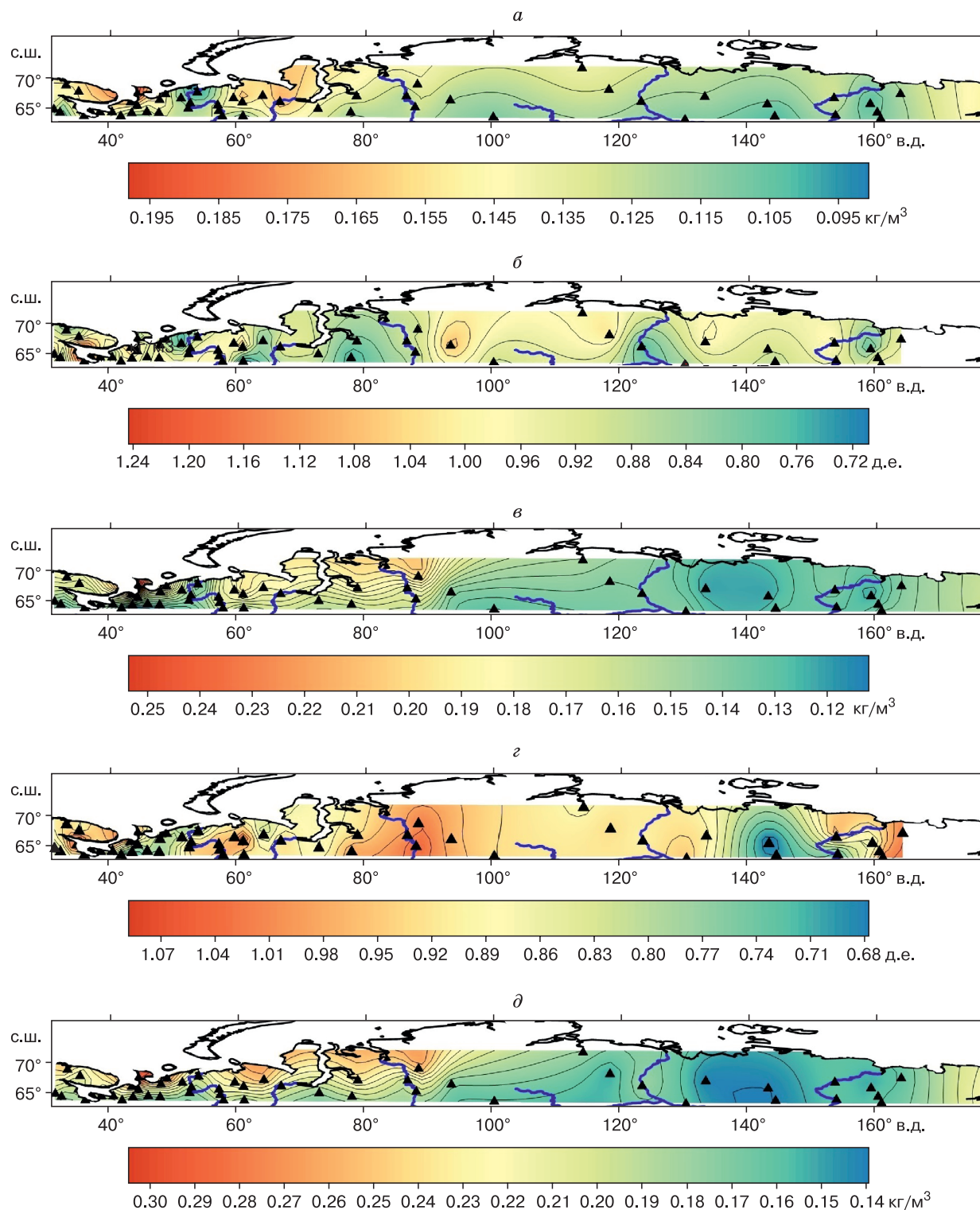


Рис. 2 (начало). Плотность снега за отдельные месяцы периода 1991–2020 гг. (а, в, д, ж, и) и их отношение к значениям плотности за эти месяцы периода 1966–1990 гг. (б, г, е, з, к).

а, б – октябрь; в, г – ноябрь; д, е – январь; ж, з – март; и, к – май.

(рис. 1, б), возможно, связано со снижением высоты снежного покрова [Сосновский, Осокин, 2023], при котором растет температурный градиент и происходит более интенсивное увеличение слоев глубинной изморози с небольшой плотностью.

Сравнение с историческим климатическим периодом 1966–1990 гг. показало, что в среднем на территории российской Арктики изменения максимальной плотности снега незначимы – снижение около 1 %. В среднем в Арктике за периоды

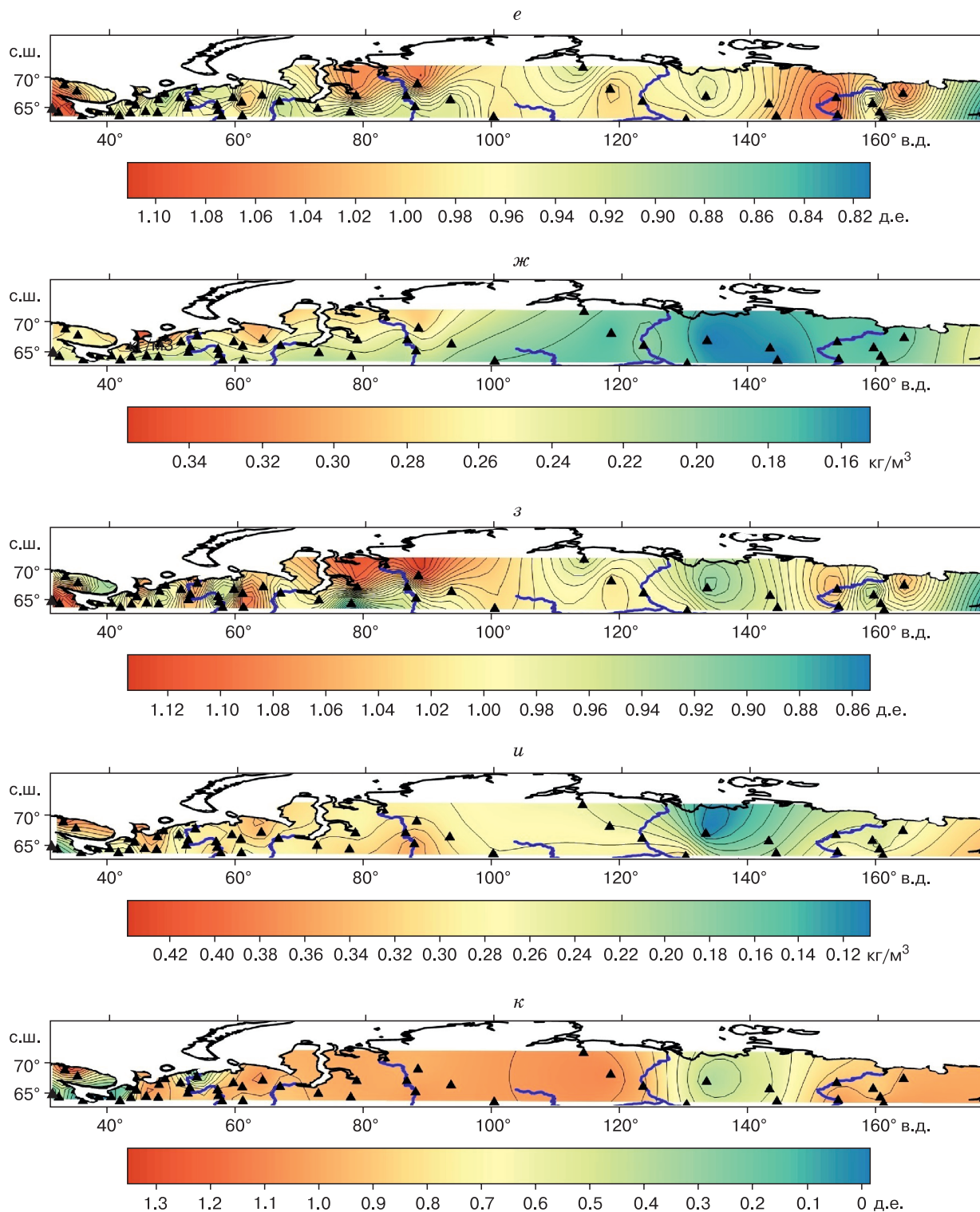


Рис. 2 (окончание).

1966–1990, 1991–2020 и 2011–2020 гг. плотность снега составила 0.265, 0.264 и 0.267 г/см³ соответственно.

Плотность снега за отдельные месяцы и ее изменчивость

Климатические изменения приводят к изменению не только максимальной плотности снега, но и плотности снега (ПС) за отдельные месяцы. На рис. 2 представлена ПС за отдельные месяцы периода 1991–2020 гг. и их отношение к значениям плотности за эти месяцы периода 1966–1990 гг. (октябрь, ноябрь, январь, март, май).

В октябре диапазон изменения ПС в АЗРФ в 1991–2020 гг. составил 0.09–0.20 г/см³. Средняя многолетняя ПС составила 0.14–0.17 г/см³ в арктической части ЕТР и Западной Сибири, за исключением низовья р. Печора, где средняя ПС равна 0.11 г/см³. В арктических районах восточнее р. Енисей плотность снега составляла 0.11–0.14 г/см³ (см. рис. 2, а). Сравнение ПС за период 1991–2020 гг. с периодом 1966–1990 гг. показало, что в октябре в среднем по Арктике плотность снега уменьшилась на 6 % (см. рис. 2, б). При этом в отдельных районах арктической части ЕТР и Западной Сибири изменения ПС могли превысить ± 20 %. Наибольшее снижение плотности произошло в нижнем течении р. Печора.

В ноябре в 1991–2020 гг. диапазон изменения ПС увеличился и составил 0.11–0.25 г/см³ (см. рис. 2, в). Наименьшие значения ПС, равные 0.12–0.15 г/см³, приурочены к низовьям рек Северная Двина, Печора и к арктическим районам Якутии. Сравнение ПС за ноябрь в период 1991–2020 гг. с периодом 1966–1990 гг. (см. рис. 2, г) показало, что в результате потепления климата ПС уменьшилась в арктической части ЕТР в ноябре в среднем на 10 %. Возможно, это объясняется более поздним установлением снежного покрова и, соответственно, сдвигом сроков метаморфизма снежного покрова. На ряде арктических метеостанций ЕТР и Якутии снижение ПС (с 17 до 13 г/см³) превысило 25 %, на севере Западной Сибири произошел рост ПС (с 19 до 20 г/см³) на 5 % (см. рис. 2, г).

В январе в 1991–2020 гг. диапазон изменения ПС составил 0.14–0.30 г/см³. Наименьшие значения ПС (0.14–0.17 г/см³) приходятся на арктические районы Якутии, а наибольшие (0.25–0.30 г/см³) – на арктические районы северо-востока ЕТР и севера Западной Сибири (см. рис. 2, д). По сравнению с январем 1966–1990 гг. плотность снега снизилась в среднем на 10 % на ряде арктических метеостанций северной части ЕТР и увеличилась на 5–10 % в арктических районах на западе ЕТР, Западной Сибири и северо-востоке Якутии (см. рис. 2, е). На западе ЕТР эти изменения, возможно, связаны с влиянием оттепелей.

В марте в 1991–2020 гг. ПС в ряде арктических районов ЕТР и Западной Сибири достигла значений 0.28–0.32 г/см³, в арктических районах Якутии ПС составила 0.16–0.18 г/см³ (см. рис. 2, ж). Сравнение ПС за период 1991–2020 гг. с 1966–1990 гг. показало, что диапазон изменения плотности составил ± 13 %. Причем рост плотности снега произошел в арктических районах северо-востока ЕТР и Западной Сибири (см. рис. 2, з) в основном за счет увеличения высоты снежного покрова.

Снегонакопление в мае (на 20-е число) в ряде регионов северо-запада ЕТР сменяется таянием снега и высота снежного покрова снижается относительно максимальных значений. В мае в 1991–2020 гг. ПС достигла 0.33–0.40 г/см³ в арктических районах ЕТР и Западной Сибири (см. рис. 2, и). Отношение ПС за период 1991–2020 гг. к ее значениям за 1966–1990 гг. показало, что в мае на северо-западе ЕТР это отношение составило 0.5–1.1 (см. рис. 2, к) и 0.8–1.2 на северо-востоке ЕТР и севере Западной Сибири. В отдельных районах северо-запада ЕТР снег к концу мая полностью растаял.

В среднем в Арктике за период 1991–2020 гг. ПС уменьшилась по сравнению с периодом 1966–1990 гг. в октябре и ноябре на 6 и 10 %, в январе и мае на 2 и 5 %, в марте ПС увеличилась на 1 %.

Динамика плотности снега за отдельные месяцы

Важным параметром снежного покрова является не только плотность снега, но и динамика плотности, характеризуемая отношением плотности снега за отдельный месяц к ее максимальному значению (r_d). Значимость динамики плотности снега обусловлена ее влиянием на скорость промерзания пород, которое подобно влиянию динамики высоты снежного покрова [Осокин, Сосновский, 2015]. На рис. 3 представлена величина r_d за период 1991–2020 гг. и ее изменчивость по отношению к 1966–1990 гг. в октябре, ноябре, январе, марте и мае.

В октябре во многих районах Арктики устанавливается снежный покров, поэтому плотность снега, как правило, небольшая. При этом если в арктических районах Якутии и Дальнего Востока величина r_d составляет 0.55–0.65 в период 1991–2020 гг., то в арктических районах ЕТР и Западной Сибири, за исключением Кольского полуострова и северо-востока ЕТР, r_d не превышает 0.5. Диапазон изменения величины r_d составляет 0.4–0.7 (см. рис. 3, а). По сравнению с периодом 1966–1990 гг. величина r_d изменилась в октябре в разных районах Арктики на ± 30 % (см. рис. 3, б). Снижение величины r_d отмечается в арктических районах северо-востока ЕТР и Западной Сибири, а ее рост приходится на север Якутии.

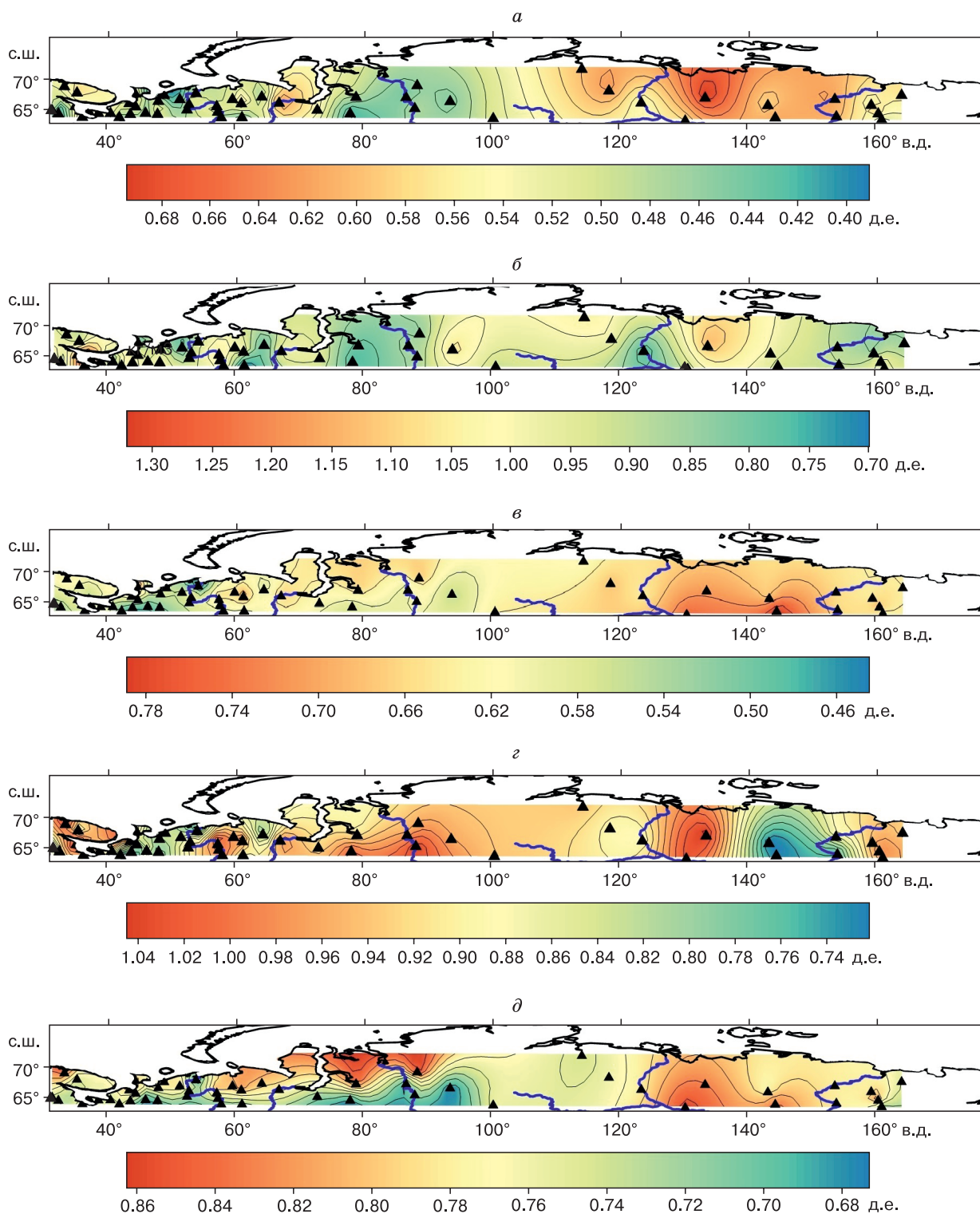


Рис. 3 (начало). Динамика плотности снега в Арктике за период 1991–2020 гг. (*а, в, д, ж, и*) и ее отношение к динамике плотности снега за период 1966–1990 гг. (*б, г, е, з, к*).

а, б – октябрь; *в, г* – ноябрь; *д, е* – январь; *ж, з* – март; *и, к* – май.

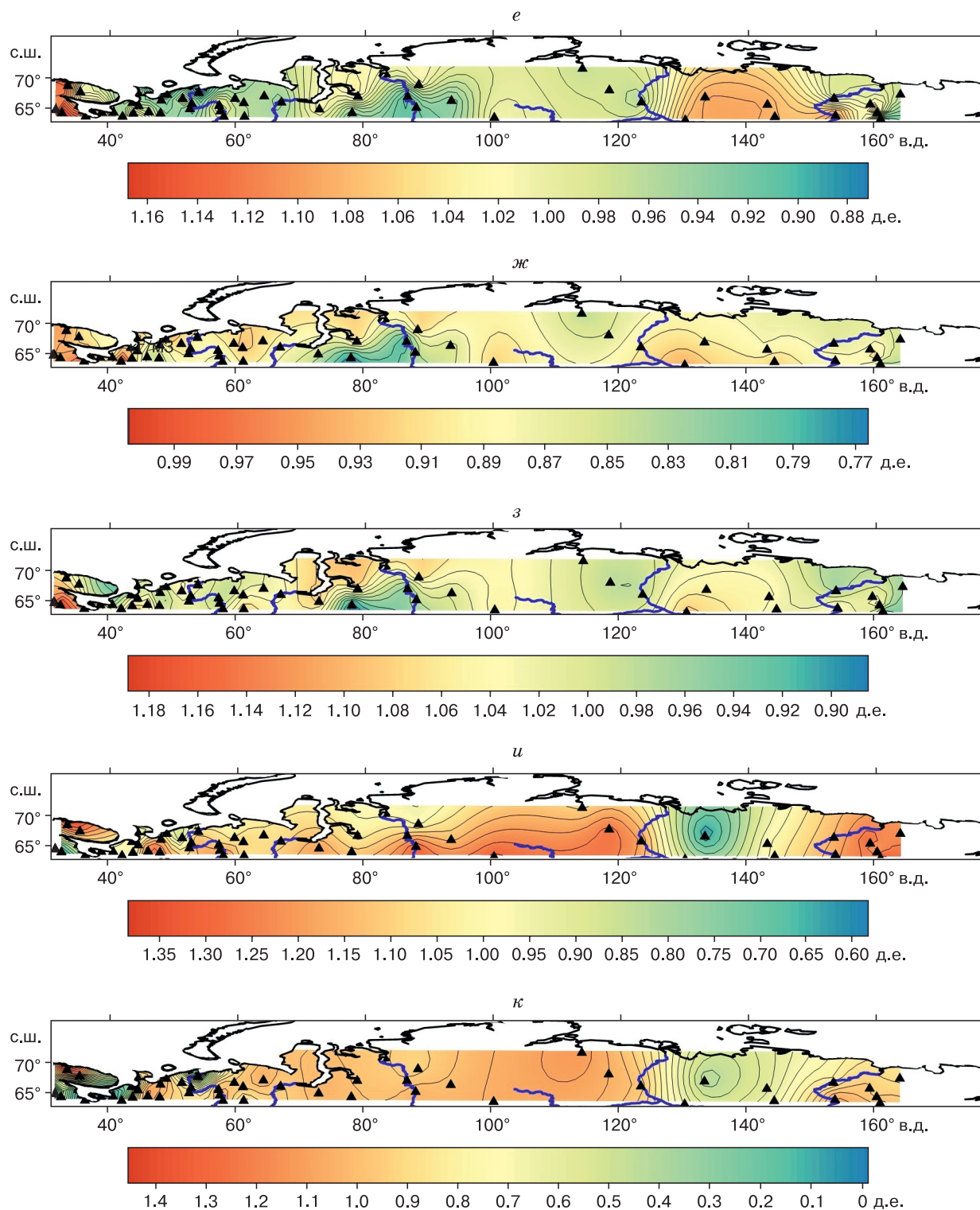


Рис. 3 (окончание).

Величина r_d в ноябре 1991–2020 гг. составила 0.50–0.55 на северо-западе и в центре арктической части ЕТР, 0.55–0.65 в арктических районах северо-востока ЕТР и севера Западной Сибири, около

0.75 на севере Якутии (см. рис. 3, *в*). В ноябре в 1991–2020 гг. величина r_d уменьшилась по сравнению с периодом 1966–1990 гг. на 15–20 % в ряде арктических районов в центре и на северо-востоке

ЕТР и до 25 % на севере Якутии. На отдельных метеостанциях Арктики в Западной Сибири, Якутии и на Кольском полуострове рост r_d составил 4 % (см. рис. 3, г).

В январе в 1991–2020 гг. величина r_d составила 0.80–0.85 в арктических районах Якутии, северо-востока ЕТР и Западной Сибири. В центре арктической части ЕТР и на отдельных метеостанциях Западной Сибири $r_d = 0.70–0.75$ (см. рис. 3, д). В 1991–2020 гг. величина r_d уменьшилась на 5–10 % в большинстве арктических районов ЕТР и Западной Сибири по сравнению с периодом 1966–1990 гг. и выросла на 5–10 % в ряде районов Арктики, на Кольском полуострове и в Якутии (см. рис. 3, е).

Величина r_d в марте в 1991–2020 гг. составила 0.90–0.95 на большей части территории Арктики, за исключением отдельных районов Западной Сибири, где $r_d = 0.80–0.90$ (см. рис. 3, ж). Рост величины r_d по сравнению с 1966–1990 гг. составил 5–10 % в большинстве арктических районов Западной Сибири, Якутии и на Кольском полуострове (см. рис. 3, з), снижение r_d отмечено в отдельных районах севера ЕТР, Западной Сибири и северо-востока Якутии.

В мае (на 20-е число) в 1991–2020 гг. величина r_d в среднем в Арктике составила 1.1, в отдельных районах на северо-западе ЕТР и Якутии $r_d = 0.7–0.8$ (см. рис. 3, и). Значение r_d больше единицы обусловлено ростом плотности снега на 20-е мая за счет оттепелей и таяния, при котором плотность снега больше, чем при максимальной высоте снега.

В мае в 1991–2020 гг. изменение величины r_d по отношению к периоду 1966–1990 гг. составило в основном ± 15 % (см. рис. 3, к). При этом в ряде районов северо-запада ЕТР снег полностью растаял. В среднем на всей территории Арктики величина r_d уменьшилась в 1991–2020 гг. по сравнению с периодом 1966–1990 гг. в октябре и ноябре на 6 и 9 %, в январе и мае на 1 и 5 % и увеличилась на 2 % в марте. При этом в мае не учитывались данные метеостанций, где снег полностью растаял.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследований получено распределение максимальной плотности снега (при максимальной высоте снежного покрова) и значения плотности за отдельные месяцы для разных регионов на материковой части Арктики за современный климатический период 1991–2020 гг. Сравнение плотности снега с историческим климатическим периодом 1966–1990 гг. показало, что в среднем на территории российской Арктики изменения максимальной плотности снега незначимы – снижение около 1 %. При этом наибольшее уменьшение плотности снега произошло на севере Якутии, а

наиболее значимый рост – на севере Западной Сибири, что обусловлено в основном понижением высоты снежного покрова на севере Якутии и ее ростом на севере Западной Сибири.

Анализ плотности снега за отдельные месяцы показал, что из-за смещения сроков установления снежного покрова изменилась плотность снега в осенний период. В среднем в Арктике за период 1991–2020 гг. плотность снега уменьшилась по сравнению с периодом 1966–1990 гг. в октябре и ноябре на 6 и 10 %, в январе и мае на 2 и 5 % и увеличилась на 1 % в марте. Наряду с изменением плотности снега за отдельные месяцы произошло изменение отношения плотности снега за отдельные месяцы к ее максимальному значению. В ноябре 1991–2020 гг. величина r_d уменьшилась по сравнению с периодом 1966–1990 гг. на 15–20 % в ряде арктических районов в центре и на северо-востоке ЕТР и до 25 % на севере Якутии. В среднем на всей территории Арктики величина r_d уменьшилась в 1991–2020 гг. по сравнению с периодом 1966–1990 гг. в октябре и ноябре на 6 и 9 %, в январе и мае на 1 и 5 % и увеличилась на 2 % в марте.

Полученные результаты показывают тенденции изменения плотности снега в разных регионах при современном климате, которые наиболее значимы 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 FMWS-2024-0013.

Литература

- Анисимов О.А., Стрелецкий Д.А. Геокриологические риски при таянии многолетнемерзлых грунтов // Арктика. XXI век. Естеств. науки, 2015, № 2, с. 60–74.
- Быков В.Ю. Исследование процесса прессования снега с учетом его вакуумирования // Вестн. Моск. автомоб.-дорож. гос. техн. ун-та, 2010, вып. 3 (22), с. 36–39.
- Гляциологический словарь / Под ред. В.М. Котлякова. Л., Гидрометеиздат, 1984, 564 с.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. М., Изд-во Росгидромета, 2023, 104 с.
- 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.
- Котляков В.М., Сосновский А.В., Осокин Н.И. Оценка коэффициента теплопроводности снега по его плотности и твердости на Западном Шпицбергене // Лед и снег, 2018, т. 58, № 3, с. 343–352.
- Основы проектирования строительных конструкций. Определение снеговых нагрузок на покрытия (ГОСТ Р ИСО 4355-2016). М., Стандартинформ, 2017, 37 с.

Осокин Н.И., Сосновский А.В. Экспериментальные исследования коэффициента эффективной теплопроводности снежного покрова на Западном Шпицбергене // *Лед и снег*, 2014а, т. 54, № 3, с. 50–58.

Осокин Н.И., Сосновский А.В. Пространственная и временная изменчивость толщины и плотности снежного покрова на архипелаге Шпицберген // *Лед и снег*, 2014б, т. 54, № 4, с. 72–80.

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. Динамика параметров снежного покрова, влияющих на устойчивость многолетней мерзлоты на архипелаге Шпицберген // *Лед и снег*, 2016а, № 2, с. 189–198.

Осокин Н.И., Сосновский А.В. Влияние термического сопротивления снежного покрова на устойчивость многолетнемерзлых пород // *Криосфера Земли*, 2016б, т. XX, № 3, с. 105–112.

Осокин Н.И., Сосновский А.В., Накалов П.Р., Ненашев С.В. Термическое сопротивление снежного покрова и его влияние на промерзание грунта // *Лед и снег*, 2013, т. 53, № 1, с. 93–103.

Павлов А.В. Мониторинг криолитозоны. Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2008, 230 с.

Перевертин К.А., Белолобцев А.И., Дронова Е.А. и др. Влияние режима снежного покрова на агрономические риски развития розовой снежной плесени // *Лед и снег*, 2022, т. 62, № 1, с. 75–80.

Поляков С.П., Иванов Б.В., Клепиков А.В. и др. Физико-механические свойства снежно-фирнового покрытия взлетно-посадочной полосы на станции Восток в Антарктиде // *Лед и снег*, 2010, т. 109, № 1, с. 119–122.

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.

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. // *Лед и снег*, 2013, т. 121, № 1, с. 61–68.

Руководящие указания ВМО по расчету климатических норм. Женева, ВМО, 2017, № 1203, 32 с.

Сосновский А.В., Осокин Н.И. Влияние оттепелей на снежный покров и промерзание грунта при современных изменениях климата // *Лед и снег*, 2019, т. 59, № 4, с. 475–482.

Сосновский А.В., Осокин Н.И. Динамика высоты и плотности снежного покрова в Арктике при современном климате // *Материалы II Всерос. конф. “Лаверовские чтения. Арктика: актуальные проблемы и вызовы”*: сб. Архангельск, ФГБУН ФИЦКИА УРО РАН, 2023, с. 128–132.

Чернов Р.А. Метаморфизм и термические свойства свежевыпавшего снега (по исследованиям в Подмоскowie) // *Лед и снег*, 2016, т. 56, № 2, с. 199–206.

Чирков Ю.И. Основы агрометеорологии. Л., Гидрометеиздат, 1982, 248 с.

Beer C., Zimov N., Olofsson J. et al. Protection of permafrost soils from thawing by increasing herbivore density // *Sci. Rep.*, 2020, No. 10, p. 4170.

Bekryaev R., Polyakov I., Alexeev V. Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern Arctic warming // *J. Climate*, 2010, vol. 23, p. 3888–3906.

Russell-Head D.S., Budd W.F., Moore P.J. Compacted snow as a pavement material for runway construction // *Cold Reg. Sci. Technol.*, 1984, vol. 9, iss. 3, p. 231–247.

Snow and Climate: Physical Processes, Surface Energy Exchange and Modeling / R.L. Armstrong, E. Brun (eds.). Cambridge, UK, Cambridge Univ. Press, 2008, 256 p.

Wever N., Keenan E., Amory C. et al. Observations and simulations of new snow density in the drifting snowdominated environment of Antarctica // *J. Glaciol.*, 2023, vol. 69 (276), p. 823–840.

Zhong X., Zhang T., Wang K. Snow density climatology across the former USSR // *Cryosphere*, 2014, No. 8, p. 785–799.

URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/38377> / Указ Президента Российской Федерации от 02.05.2014 г. № 296 “О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации” (дата обращения: 15.05.2023).

URL: <http://meteo.ru> (дата обращения: 16.05.2023).

References

Anisimov O.A., Streletsky D.A. Geocryological risks in the melting of permafrost soils. *Arktika. XXI vek. Estestvennye nauki* [Arctic. XXI century. Natural sciences], 2015, No. 2, p. 60–74 (in Russian).

Bykov V.Yu. Investigation of the snow pressing process taking into account its vacuuming. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Moscow Automobile and Road State Technical University], 2010, vol. 22, No. 3, p. 36–39.

Glyatsiologicheskii slovar' [Glaciological dictionary]. V.M. Kotlyakov (ed.). Leningrad, Gidrometeoizdat, 1984, 564 p. (in Russian).

Doklad ob osobennostyakh 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, Rosgidromet, 2023, 104 p. (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, No. 2 (6), p. 66–79.

Kotlyakov V.M. Cryosphere and climate. *Ekologiya i zhizn'* [Ecology and life], 2010, No. 11, p. 51–59.

Kotlyakov V.M., Sosnovskiy A.V., Osokin N.I. Estimation of thermal conductivity of snow by its density and hardness in Svalbard. *Led i Sneg* [Ice and Snow], 2018, No. 3 (58), p. 343–352. DOI: 10.15356/2076-6734-2018-3-343-352.

Osnovy proektirovaniya stroitelnykh konstruktov [Bases for design of structures. Determination of snow loads on roofs] (ISO 4355:2013, IDT). Moscow, Standartinform, 2017, 37 p. (in Russian).

Osokin N.I., Sosnovskiy A.V. Field investigation of efficient thermal conductivity of snow cover on Spitsbergen. *Led i Sneg* [Ice and Snow], 2014а, No. 3 (54), p. 50–58. – <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2014-3-50-58>

Osokin N.I., Sosnovskiy A.V. Spatial and temporal variability of depth and density of the snow cover in Russia. *Led i Sneg* [Ice and Snow], 2014b, No. 4 (54), p. 72–80. – <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2014-4-72-80>

Osokin N.I., Sosnovskiy A.V. Effect of air temperature and snow depth dynamics on frost depth. *Earth's Cryosphere*, 2015, vol. XIX, No. 1, p. 88–93.

Osokin N.I., Sosnovskiy A.V. Dynamics of snow cover characteristics exerting influence on stability of the Svalbard permafrost. *Led i Sneg* [Ice and Snow], 2016а, No. 2 (56), p. 189–198. – <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-2-189-198>

- Osokin N.I., Sosnovskiy A.V. Thermal resistance of snow as a control of permafrost stability. *Earth's Cryosphere*, 2016b, vol. XX, No. 3, p. 96–101.
- Osokin N.I., Sosnovskiy A.V., Nakalov P.R., Nenashev S.V. Thermal resistance of snow cover and its effect on the ground freezing. *Led i Sneg [Ice and Snow]*, 2013, No. 1 (53), p. 93–103 – <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2013-1-93-103>
- Pavlov A.V. Monitoring kriolitozony [Monitoring of Permafrost]. Novosibirsk, Acad. Publ. "Geo", 2008, 230 p. (in Russian).
- Perevertin K.A., Belolyubcev A.I., Dronova E.A., Asauliyak I.F., Kuznetsov I.A., Mazirov M.A., Vasiliev T.A. Impact of changes in snow cover regime on agronomic risks causing pink snow mold. *Led i Sneg [Ice and Snow]*, 2022, No. 1 (62), p. 75–80. – <https://doi.org/10.31857/S2076673422010117>
- Polyakov S.P., Ivanov B.V., Klepikov A.V. et al. Physico-mechanical properties of the snow-firn coating of the runway at Vostok station in Antarctica. *Led i Sneg [Ice and Snow]*, 2010, No. 1 (109), p. 119–122.
- Popova V.V., Shiryayeva 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. *Earth's Cryosphere*, 2018, vol. XXII, No. 4, p. 58–67.
- 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, No. 1 (53), p. 61–68. – <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2013-1-61-68>
- Rukovodyashchie ukazaniya VMO po raschetu klimaticheskikh norm [WMO guidelines for calculating climate normal]. Geneva. WMO, 2017, No. 1203, 32 p. (in Russian).
- Sosnovskiy A.V., Osokin N.I. Effect of thaws on snow cover and soil freezing under the contemporary climate change. *Led i Sneg [Ice and Snow]*, 2019, No. 4 (59), p. 475–482. – <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-4-433>
- Sosnovskiy V.A., Osokin N.I. Dynamics of depth and density of snow cover in the Arctic under modern climate. In: Proc. of Scientific Materials of the II All-Russian Conf. "Laverov readings. The Arctic: current problems and challenges". Arkhangelsk, Federal Research Center for the Integrated Study of the Arctic named after Academician N.P. Laverov, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 2023, p. 128–132 (in Russian).
- Chernov R.A. Metamorphism and thermal properties of fresh snow (study in the Moscow region). *Led i Sneg [Ice and Snow]*, 2016, No. 2 (56), p. 199–206. – <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-2-199-206>
- Chirkov Yu.I. Osnovy agrometeorologii [Fundamentals of agrometeorology]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1982, 248 p. (in Russian).
- Beer C., Zimov N., Olofsson J. et al. Protection of permafrost soils from thawing by increasing herbivore density. *Sci. Rep.*, 2020, No. 10, p. 4170. – <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60938-y>
- Bekryaev R., Polyakov I., Alexeev V. Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern Arctic warming. *J. Clim.*, 2010, vol. 23, p. 3888–3906.
- Russell-Head D.S., Budd W.F., Moore P.J. Compacted snow as a pavement material for runway construction. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 1984, vol. 9, iss. 3, p. 231–247.
- Snow and Climate: Physical Processes, Surface Energy Exchange and Modeling / R.L. Armstrong, E. Brun (eds.). Cambridge, UK, Cambridge Univ. Press, 2008, 256 p.
- Wever N., Keenan E., Amory C. et al. Observations and simulations of new snow density in the drifting snowdominated environment of Antarctica. *J. Glaciol.*, 2023, vol. 69 (276), p. 823–840. – <https://doi.org/10.1017/jog.2022.102>
- Zhong X., Zhang T., Wang K. Snow density climatology across the former USSR. *Cryosphere*, 2014, No. 8, p. 785–799. DOI: 10.5194/tc-8-785-2014. www.the-cryosphere.net/8/785/2014 URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/38377/> (last visited: 15.05.2023).
- URL: <http://meteo.ru> (last visited: 16.05.2023).

*Поступила в редакцию 9 июня 2024 г.,
после доработки – 18 июля 2024 г.,
принята к публикации 21 октября 2024 г.*