

VARIABILITY OF TEMPORAL CHARACTERISTICS OF SNOW COVER IN SIBERIA ON GROUND-BASED DATA

Martynova Yu.V.¹, Voropay N.N.^{2,3*}, Matyukhina A.A.^{2,4}

¹ Томский политехнический университет, Томск

² Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск

³ Институт географии имени В. Б. Сочавы СО РАН, Иркутск

⁴ Томский государственный университет, Томск

voropay_nn@mail.ru

Citation: Yu. V. Martynova, N. N. Voropay, A. A. Matyukhina. 2023. Variability of temporal characteristics of snow cover in Siberia on ground-based data. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 14(3): 181-197.

DOI: 10.18822/edgcc625771

На основе архива данных наземных наблюдений ВНИИГМИ-МЦД за состоянием снежного покрова для периода с 1970 по 2019 г. для Западной и Восточной Сибири получены оценки изменчивости сроков начала формирования и окончания схода снежного покрова, формирования и разрушения устойчивого снежного покрова, продолжительности этих периодов, количества интервалов с устойчивым снежным покровом в холодном сезоне, а также продолжительности периодов формирования и схода снежного покрова. Проанализированы различия в поведении характеристик в зависимости от географических особенностей территории. Наряду с общим периодом, 1970–2019 гг., рассмотрено поведение указанных характеристик для двух подпериодов 1977–2005 гг. и 2006–2019 гг., соответствующих зональной и меридиональной циркуляционным эпохам, выделенных Н. К. Кононовой с соавторами. Получен отклик снежного покрова на смену общего характера атмосферной циркуляции в регионе. При преобладающей меридиональной циркуляции, в сравнении с зональной, начало формирования снежного покрова происходит позже и в большей степени синхронно на большей части станций каждой из выделенных географических групп, а сход снежного покрова происходит раньше, но при этом существенно в большей степени неоднородно по времени (неодновременно). Показано также меньшее количество интервалов с устойчивым снежным покровом в холодном сезоне при меридиональной циркуляции, что означает более стабильное в течение холодного сезона его залегание. Получено увеличение продолжительности периодов формирования и схода снежного покрова для всех рассматриваемых географических групп станций, кроме низко расположенных, при переходе от зональной к меридиональной циркуляционной эпохе. Таким образом, для всех выделенных географических групп станций, кроме низко расположенных, в меридиональную циркуляционную эпоху происходит не только компенсация изменений, произошедших в зональную эпоху, но и внесение новых изменений в сроки формирования и схода снежного покрова в Сибири.

Ключевые слова: снежный покров, устойчивый снежный покров, формирование, сход, установление, разрушение, метеостанции, циркуляционные эпохи, Западная Сибирь, Восточная Сибирь

Summary. Estimates of the variability in the dates of the beginning snow cover formation and end of its descent, the establishing and destruction of stable snow cover, the duration these periods, the number of intervals with stable snow cover in the cold season, as well as the duration of the periods of formation and descent of snow cover were obtained in this paper. Differences in the behavior of these characteristics depending on the geographical features of the territory were analyzed. Four groups of stations were considered: low-lying (up to 50 m) stations, high-lying (from 700 m), stations in Western Siberia (60-90°E) and in Eastern Siberia (90-120°E). The snow cover ground-based observations data (RIHMI-WDC) for Western and Eastern Siberia over the time period from 1970 to 2019 was used. Along with the general period (1970–2019) the behavior of these characteristics for two subperiods of 1977–2005 and 2006–2019 corresponding to the zonal and meridional circulation epochs was considered. The response of the snow cover to the change in the atmospheric circulation has been obtained. With the prevailing meridional circulation, in comparison with the zonal circulation, the beginning of the snow cover formation occurs later and synchronously at most of the stations of each of the specified geographical groups, and the snow cover descends earlier, but at the same time is much more non-uniform in time (non-simultaneous) within a geographic group. A smaller number of intervals with a stable snow cover in cold season is also shown, which means more stable snow cover during the cold season in meridional circulation epoch then in zonal. An increase in the duration of the snow cover formation and descent time periods was obtained for all the considered geographical groups of stations. The exception is for low-lying station

group only. Thus, the conditions of the meridional circulation epoch not only compensate for the changes that occurred in the zonal epoch, but also bring new changes in the temporal characteristics of the Siberian snow cover.

Keywords: snow cover, stable snow cover, formation, descent, establishment, destruction, meteorological stations, circulation epochs, Western Siberia, Eastern Siberia

ВВЕДЕНИЕ

Снежный покров (СП) за счёт своих теплоизолирующих свойств и высокой отражающей способности оказывает существенное влияние на баланс энергии на поверхности [Groisman et al., 1994; Vavrus, 2007]. Появление или разрушение СП влечёт за собой изменение потоков тепла с поверхности почвы в атмосферу, оказывает прямое влияние на альбедо территории, приводящее к локальному изменению температуры воздуха [Henderson et al., 2013; Ye et al., 2015]. Вариации этих характеристик могут приводить к локальным возмущениям высоты геопотенциала, что в свою очередь вносит вклад в изменение величины бароклинности на границе СП и, как следствие, в вихревую активность синоптического масштаба [Walsh, Ross, 1988; Walland, Simmonds, 1996]. Последнее может оказывать влияние на метеоусловия как локально, так и в масштабах региона или даже всего Северного полушария [Martynova, Krupchatnikov, 2010; Peng et al., 2013].

Анализ современных климатических изменений показал для Северного полушария в целом наличие тенденции к более позднему формированию СП и к более раннему его сходу [Chen et al., 2016]. Для Западной и Восточной Сибири, в частности, также выявлено сокращение периода залегания СП, связываемое для Западной Сибири в большей степени с уменьшением количества снега (нежели с более ранним наступлением весны), а для Восточной Сибири – с весенним потеплением [Titkova, Vinogradova, 2017a; Titkova et al., 2017b; Voropay, Vlasov, 2017; Matyukhina, Voropay, 2020]. В течение периода 1966–2012 гг. на территории Российской Федерации наблюдается увеличение высоты СП [Bulygina et al., 2009; Bulygina et al., 2011; Kononova, 2012; Zhong et al., 2018]. При этом для первых двух десятилетий рассмотренного периода отмечается сокращение протяжённости СП, формирующегося за холодный сезон в целом¹ [Derksen, Brown, 2012]. Проявляется также сокращение протяжённости СП для отдельных месяцев конца весны, начала лета. Для осенних месяцев отмечается некоторая несогласованность в данных о протяжённости СП, полученных из разных источников (спутниковые и наземные наблюдения, данные реанализов) [Brown, Derksen, 2013]. В связи с чем необходимо с осторожностью относиться к получаемым для этого сезона результатам.

Рассматривается также скорость формирования СП. Для Западной и Восточной Сибири продемонстрирована существенная вариация скорости закрытия территории снегом в рамках осеннего сезона при переходе от года к году [Martynova, 2020; Martynova et al., 2021]. В отдельные годы рассматриваемая территория может быть почти полностью закрыта снегом всего за неделю, тогда как в другие годы этот процесс может быть равномерным в течение всего сезона.

В различных работах затрагивается вопрос связи вариации характеристик СП с аномалиями циркуляции атмосферы. В частности, выявлена устойчивая связь сроков формирования СП с индексами Северо-Атлантического колебания (NAO – North Atlantic Oscillation), Западно-Тихоокеанским (WP – West Pacific), Скандинавским (SCAND – Scandinavian index) и индексом Восточная Атлантика–Западная Россия (EA–WR – East Atlantic Russia) [Popova et al., 2014; Popova et al., 2015]. Связь же с индексом Арктического колебания (AO – Arctic Oscillation) носит неустойчивый характер: из всего рассмотренного периода (1950–2008 гг.) она статистически значима только для подпериода 1973–1994 гг. [Popova et al., 2014; Popova et al., 2015]. На основе широкого спектра данных показана общая нестационарность связи между протяжённостью осеннего СП и Арктическим колебанием [Peings, et al., 2013; Martynova, 2019]. Приводятся также доводы в пользу того, что осенние аномалии протяжённости СП являются в большей степени следствием, а не причиной аномалий глобальных циркуляционных процессов² [Peings et al., 2017; Yeo et al., 2017; Martynova et

¹ Chen X., Liang S., Cao Y. Satellite observed changes in the Northern Hemisphere snow cover phenology and the associated radiative forcing and feedback between 1982 and 2013 // Environ. Res. Lett. 2016. V. 11. 084002. – Цит. по [Chen et al., 2016].

² Martynova Yu.V., Matyukhina A.A., Voropay N.N., Krupchatnikov V.N. 2021. Osobennosti formirovaniya snezhnogo pokrova v Sibiri i ikh svyaz' s anomaliami dinamiki atmosfery Severnogo polushariya. Ekologiya.

al., 2022]. Для последних 10-15 лет в середине осени проявляется связь между сокращением протяжённости устойчивого снежного покрова (УСП) и запаздыванием сроков его установления, с одной стороны, и ростом температуры воздуха у поверхности на севере Евразии в этот же сезон, с другой стороны³ [Popova et al., 2018]. Для весеннего сезона также выявлено изменение сроков разрушения УСП. В частности, при исследовании для периода 1936–2008 гг. для севера Западной Сибири наблюдается смещение дат в сторону более поздних [Popova, Polyakova, 2013]. Важно отметить, что все отмеченные изменения характеристик СП распределены по исследуемым территориям неравномерно. Обнаружено существенное влияние Арктики на вариацию протяжённости, глубины и длительности залегания СП в Евразии в осенний, зимний и весенний сезоны [Wegmann et al., 2015; Kitaev, Titkova, 2018; Zhang et al., 2021].

Внимание исследователей, как правило, сосредоточено на особенностях УСП. Однако, не менее важно иметь информацию о периодах между первым появлением снега и окончательным установлением УСП (формирование СП), а также между началом его разрушения и последним появлением снега (сход СП). Данные о длительности этих периодов, о равномерности формирования и схода СП в течение осеннего и весеннего сезонов, соответственно, могут быть полезны для понимания переходных процессов, происходящих осенью и весной при сезонной смене метеорологических режимов, для оценки интенсивности этих перестроек, и как следствие, оценке вероятностей возникновения на их фоне экстремальных явлений погоды.

В настоящей работе мы сосредоточили внимание на территории Сибири, как на регионе с наибольшей в рамках Евразии протяжённостью СП, обладающего высокой изменчивостью характеристик во времени [Song, Wu, 2019]. Целью данной работы является получение оценки современных колебаний сроков и длительности периодов залегания, формирования и схода СП и УСП в Западной и Восточной Сибири. В отличие от большинства работ, посвященных анализу изменений характеристик СП, впервые тенденции рассматриваются не только за весь доступный инструментальный период измерений, но и в пределах отдельных циркуляционных эпох, что в свою очередь позволило корректно учесть один из факторов формирования СП. Кроме того, в работе впервые проанализирована длительность периодов формирования и схода СП.

Информация об особенностях поведения СП имеет научную и прикладную значимость. Во-первых, разработка климатических моделей постепенно выходит на уровень воспроизведения сложных процессов и взаимодействий, одним из которых является процесс формирования и разрушения СП. К настоящему моменту показано улучшение воспроизведения характеристик СП в моделях CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6), по сравнению с моделями CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) [Brutel-Vuilmet et al., 2013; Mudryk et al., 2017; Gastineau et al., 2017; Mudryk et al., 2020; Zhu et al., 2021; Zhong et al., 2022]. Достоверная информация о поведении СП, полученная на основе данных наблюдений, необходима для оценки и, при необходимости, дальнейшего улучшения качества воспроизведения связанных с СП процессов. Во-вторых, информация о характере и аномалиях поведения СП важна с точки зрения экономики, поскольку напрямую затрагивает сельское хозяйство, лесную промышленность, коммунальные службы населённых пунктов и т. п. В частности, показано существенное влияние максимальной высоты и времени схода СП на развитие лесной растительности в Центральной Якутии [Nikolaev, Skachkov, 2011], на термические условия многолетней мерзлоты [Jan, Painter, 2020] и на весеннее восстановление растительности в тундре [Heim et al., 2022].

Ekonomika. Informatika. Seriya: Sistemnyy analiz i modelirovanie ekonomicheskikh i ekologicheskikh system, 6: 118–123 (in Russian). [Мартынова Ю.В., Матюхина А.А. Воропай Н.Н., Крупчатников В.Н. 2021. Особенности формирования снежного покрова в Сибири и их связь с аномалиями динамики атмосферы Северного полушария // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. Том 6. С. 118–123]. – Цит. по [Martynova et al., 2021].

³ Popova V.V., Shiryayeva A.V., Morozova P.A. 2014. Sroki ustanovleniya snezhnogo pokrova na severe Evrazii: pryamye i obratnye svyazi s krupnomasshtabnoy atmosferno tsirkulyatsiey. *Led i sneg*, 3: 39-49 (in Russian). [Попова В.В., Ширяева А.В., Морозова П.А. 2014. Сроки установления снежного покрова на севере Евразии: прямые и обратные связи с крупномасштабной атмосферной циркуляцией // Лёд и снег. № 3. С. 39-49]. – Цит. по [Popova et al., 2014].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках исследования была рассмотрена территория Западной и Восточной Сибири: 50-70° с. ш. 60-120° в. д. Граница между указанными регионами была проложена по 90° в. д.

В работе были использованы данные о состоянии СП со 160 метеорологических станций за период 1970–2019 гг., располагающихся в пределах указанной территории (Рис. 1 а), предоставляемых Всероссийским научно-исследовательским институтом гидрометеорологической информации – Мировым центром данных (ВНИИГМИ-МЦД) [Bulygina et al., 2017]. Обязательными критериями при выборе станций для анализа были непрерывность их работы и отсутствие переносов на протяжении исследуемого периода времени.

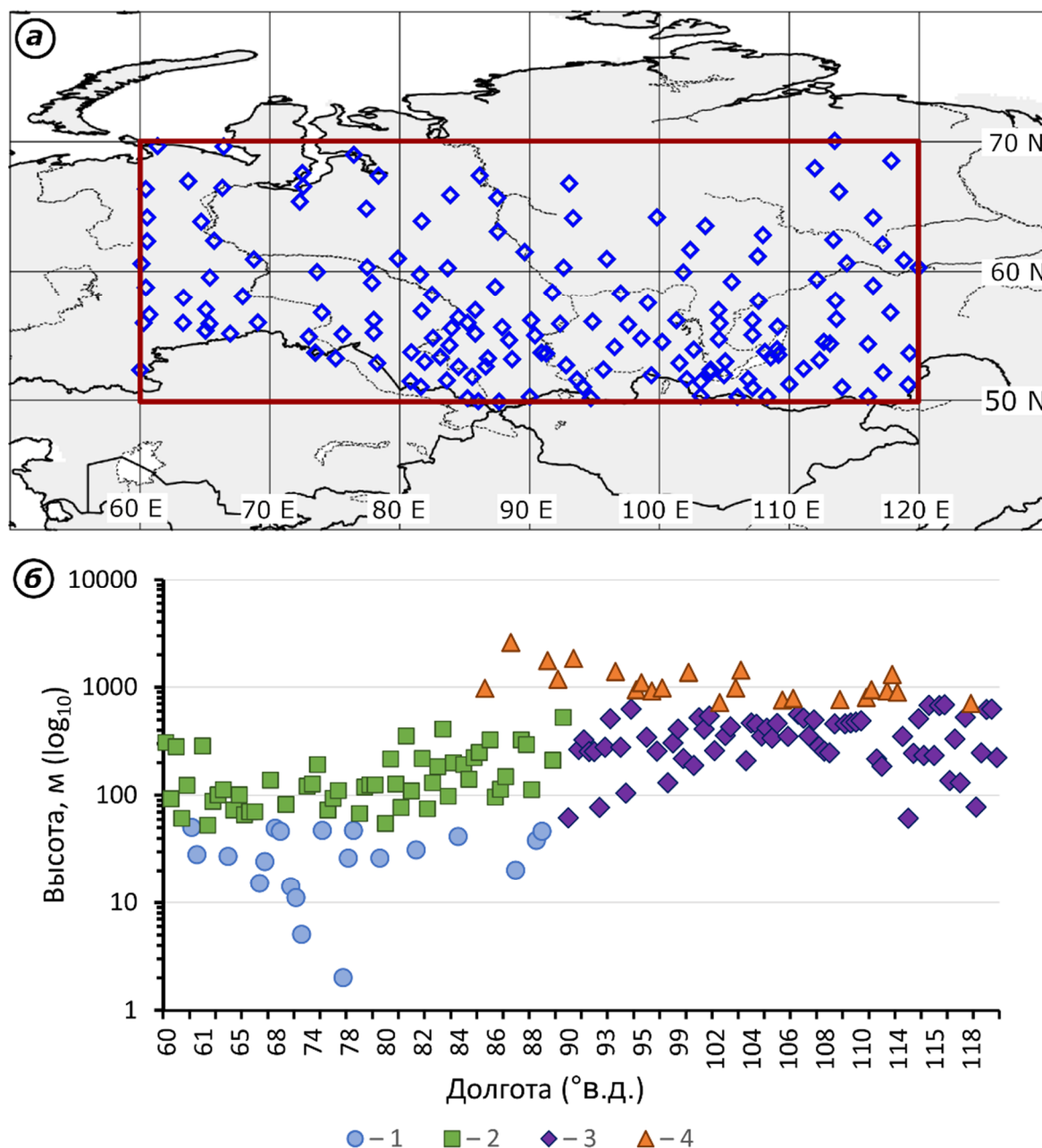


Рисунок 1. Расположение наземных метеостанций в Сибири (а), разбиение их на географические группы (б).

На а: прямоугольник – исследуемая территория Сибири 60-120° в. д. 50-70° с. ш. На б: 1 – низко расположенные (до 50 м) северные станции, 2 – станции Западной Сибири, 3 – станции Восточной Сибири, 4 – высоко расположенные (от 700 м) станции.

Рассмотрены ежедневные данные о степени покрытия окрестности станции снегом, выраженной в баллах от 0 до 10 (L). Здесь 0 означает абсолютное отсутствие снега на территории станции, один балл соответствует покрытию снегом одной десятой части видимой окрестности (эквивалентно 10 %), а 10 баллов – полному покрытию территории снегом. Если наблюдаются отдельные пятна снега, покрывающие менее 10 % видимой окрестности станции, то степень покрытия принимается равной 0 баллов [Bespalov, 1985].

Для анализа станции были разбиты на 4 непересекающиеся группы по признаку географического расположения. Выделены в отдельные группы станции с низким (на высоте равной и ниже 50 м над уровнем моря) и высоким (на высоте равной и выше 700 м над уровнем моря) расположением; остальные станции разбиты на две группы по принципу принадлежности к Западной (до 90° в. д.) и Восточной (после 90° в. д.) Сибири (Рис. 1 б). Таким образом, в группу низко расположенных станций вошло 20 станций, высоко расположенных – 23 станции, группа со станциями среднего высотного расположения в Западной Сибири включила в себя 53 станции, в Восточной Сибири – 64 станции. Все низко расположенные станции находятся на севере Западной Сибири; высоко расположенные станции локализуются преимущественно на юге Восточной Сибири и отдельные – на юге Западной Сибири.

Для каждой метеорологической станции для каждого холодного сезона были определены следующие характеристики СП (см. схему на рис. 2):

- даты установления и разрушения УСП ($D_{уст}^{УСП}$ и $D_{разр}^{УСП}$ на рис. 2, соответственно);
- продолжительность периода с УСП ($P^{УСП}$ на рис. 2);
- количество интервалов с УСП в сезоне ($N^{УСП}$ на рис. 2);
- даты начала формирования и окончания схода СП ($D_{форм}^{СП}$ и $D_{сход}^{СП}$ на рис. 2, соответственно);
- продолжительность периода с СП ($P^{СП}$ на рис. 2);
- продолжительность периодов формирования и схода СП ($P_{форм}^{СП}$ и $P_{сход}^{СП}$ на рис. 2, соответственно).

Рассматриваемый период с СП перекрывает период с УСП, начинаясь раньше и заканчиваясь позже него.

Даты, ограничивающие период залегания УСП ($D_{уст}^{УСП}$ и $D_{разр}^{УСП}$), а также количество таких периодов в сезоне ($N^{УСП}$) определялось в соответствии с Наставлениями Росгидромета [Bespalov, 1985]. Период с УСП располагается между датами, когда значение L превысило 5 баллов (дата установления $D_{уст}^{УСП}$) и когда значение L стало меньше 6 баллов (дата разрушения $D_{разр}^{УСП}$), при этом имеет продолжительность не менее 30 дней подряд с возможными случаями со значениями $L < 6$ баллов, но с их числом не превышающим 3 дней (подряд или по отдельности). Дополнительно, в начале зимы игнорируется перерыв в один день (один случай с $L < 6$ баллов), если ему предшествовали не менее 5 дней с СП ($L > 5$ баллов), и перерыв в 2–3 дня подряд, если ему предшествовали не менее 10 дней с СП ($L > 5$ баллов). В конце зимы игнорируются перерывы в один день или 2–3 дня подряд, если за ними наблюдался СП ($L > 5$ баллов) непрерывно не менее 5 или 10 дней, соответственно. Общая продолжительность периода с УСП ($P^{УСП}$) определялась как разница между датами его ограничивающими (т.е. $P^{УСП} = D_{разр}^{УСП} - D_{уст}^{УСП}$).

Даты начала формирования и окончания схода СП ($D_{форм}^{СП}$ и $D_{сход}^{СП}$, соответственно) определялись как даты с первым и последним за холодный сезон появлением значения $L > 5$ баллов без наложения дополнительных условий и ограничений в отличие от определения дат установления и разрушения УСП. Продолжительность периода с СП ($P^{СП}$) является разницей между этими датами (т.е. $P^{СП} = D_{сход}^{СП} - D_{форм}^{СП} + 1$).

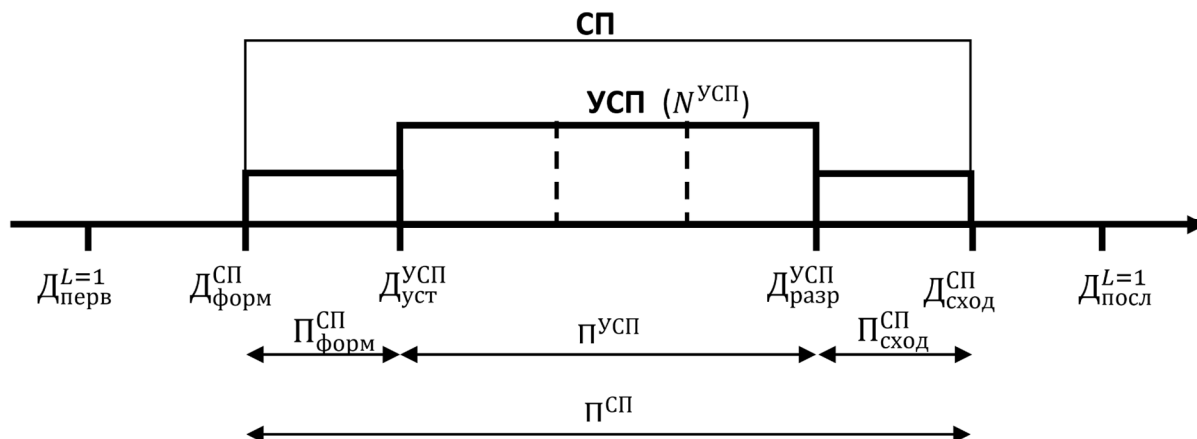


Рисунок 2. Схема расположения на временной оси дат (Д) и периодов (П), характеризующих снежный покров и устойчивый снежный покров. Вертикальные пунктирные линии означают, что периодов с устойчивым снежным покровом может быть несколько за сезон

В данной работе мы не анализировали периоды со значениями $L \leq 5$ баллов. В расчетах при определении периода с СП мы отталкивались исключительно от значений бальности СП (L) без дополнительной принудительной фиксации временных рамок холодного сезона. В ходе работы мы пробовали использовать $L \geq 1$ в качестве критерия границ периода с СП (попытка определить дату первого и последнего появления $L = 1$, $D_{\text{перв}}^{L=1}$ и $D_{\text{посл}}^{L=1}$ на схеме на рис. 2), однако столкнулись с высокой вероятностью неединичных проявлений значений $L \leq 5$ баллов в течение летнего сезона на северных (низко расположенных) станциях, что вносит значительные ошибки в определение периода с залеганием СП без дополнительной принудительной фиксации временных границ тёплого и холодного сезонов. Фиксация временных границ сезонов также оказалась неудачным решением вследствие высокой вариативности длительности и начала / окончания холодного сезона при переходе от станции к станции как между выделенными географическими группами, так и внутри групп. В результате, было решено использовать в качестве критического значения 5 баллов без принудительной фиксации границ холодного сезона. Как следствие, в терминах нашей работы начало формирования и окончание схода СП не совпадает с визуально наблюдаемым первым и последним появлением снега, а фиксируется, соответственно, позже и раньше по первому и последнему значению $L > 5$ баллов.

Продолжительность периода формирования $P_{\text{форм}}^{\text{СП}}$ (схода $P_{\text{сход}}^{\text{СП}}$) СП была вычислена как разница между датой установления УСП и датой начала формирования СП, т.е. $P_{\text{форм}}^{\text{СП}} = D_{\text{уст}}^{\text{УСП}} - D_{\text{форм}}^{\text{СП}}$ (датой окончания схода СП и датой разрушения УСП, т.е. $P_{\text{сход}}^{\text{СП}} = D_{\text{сход}}^{\text{СП}} - D_{\text{разр}}^{\text{УСП}} + 1$).

Для удобства расчётов даты были использованы в формате юлианских дней, а именно даты рассматривались не в привычном формате (например, ДД.ММ.ГГГГ), а в виде номера дня, отсчитываемого от начала года, на который приходится начало холодного сезона. Например, 1 сентября любого не високосного года имеет номер 244, а 15 февраля из этого же холодного сезона, т. е. из следующего календарного года, будет иметь номер 411.

Для каждого холодного сезона для каждой из четырёх выделенных групп станций были определены средние значения рассматриваемых характеристик СП и УСП, и среднеквадратические отклонения этих значений от средних в рамках группы. Также для каждой характеристики для каждой из групп были вычислены коэффициенты линейного тренда, характеризующие тенденции изменения этих величин во времени, и проведена оценка их статистической значимости с помощью t -критерия Стьюдента для уровня значимости $\alpha=0.05$. Вследствие высокого разброса значений относительно среднего для каждой выделенной группы станций, оценка межгодовой изменчивости и трендов проводилась по предварительно сглаженным с помощью скользящего среднего с 10-летним окном значениям.

Анализ проводился не только для всего выбранного периода 1970–2019 гг., в целом, но и для двух подпериодов: 1977–2005 гг. и 2006–2019 гг. Согласно работе Н. К. Кононовой с соавторами в 1977 г. и 2006 г. в Сибирском секторе происходит смена циркуляционных эпох с меридиональной на зональную и с зональной на меридиональную, соответственно [Kononova, 2015]. Разумеется, смена

эпохи не является мгновенной, но указанные годы были выделены, как пограничные. Таким образом, для периода 1977–2005 гг. характерно преобладание зональной циркуляции, а для 2006–2019 гг. – меридиональной. Формирование и сход СП напрямую связаны с осадками, характер которых, в свою очередь, определяется в том числе и глобальными циркуляционными особенностями. Это даёт основания полагать, что сроки формирования и схода СП в Сибири могут иметь существенные различия для разных циркуляционных эпох.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Период со снежным покровом

Анализ характеристик СП для всего периода 1970–2019 гг. в целом, показал явную зависимость сроков начала формирования и окончания схода СП ($D_{\text{форм}}^{\text{СП}}$ и $D_{\text{сход}}^{\text{СП}}$, соответственно) от географического расположения метеостанций. В среднем по территории самое раннее за холодный сезон начало формирования СП происходит на низко и высоко расположенных станциях, и на территории Восточной Сибири. В Западной Сибири СП начинает формироваться спустя 7–10 дней (табл. 1, рис. 3 а). Весной окончание схода СП происходит сначала на станциях Западной Сибири, через 6 и 9 дней в Восточной Сибири и на высоко расположенных станциях, соответственно, и только спустя ещё 15 дней на низко расположенных северных станциях. Таким образом, наиболее продолжительный период с СП ($P^{\text{СП}}$) получен для низко расположенных станций (север Западной Сибири), далее меньший на 13 и 19 дней – для высоко расположенных станций (юг Сибири) и станций Восточной Сибири средней высоты, соответственно, и самый короткий период, меньше ещё на 13 дней, получен для станций средней высоты, располагающихся в Западной Сибири.

Таблица 1. Даты начала формирования и окончания схода снежного покрова, и даты установления и разрушения устойчивого снежного покрова, выраженные в юлианских днях, и продолжительность этих периодов, выраженная в днях, в виде среднего по группе плюс/минус стандартное отклонение от среднего по группе

	СП			УСП		
	1970-2019	1977-2005	2006-2019	1970-2019	1977-2005	2006-2019
	<i>Даты начала формирования СП</i>			<i>Даты установления УСП</i>		
Низ. ст.	278 ± 9	277 ± 9	282 ± 9	285 ± 11	284 ± 11	290 ± 10
Выс. ст.	276 ± 20	276 ± 20	275 ± 20	298 ± 21	296 ± 22	301 ± 18
ЗС	286 ± 11	286 ± 11	289 ± 9	301 ± 13	299 ± 13	305 ± 11
ВС	279 ± 12	278 ± 12	279 ± 12	293 ± 16	291 ± 17	297 ± 15
	<i>Даты окончания схода СП</i>			<i>Даты разрушения УСП</i>		
Низ. ст.	508 ± 13	509 ± 13	505 ± 14	500 ± 17	500 ± 16	497 ± 17
Выс. ст.	493 ± 21	494 ± 20	493 ± 24	464 ± 28	466 ± 29	459 ± 26
ЗС	484 ± 17	485 ± 17	482 ± 17	470 ± 15	471 ± 16	467 ± 14
ВС	490 ± 16	491 ± 15	488 ± 16	473 ± 22	475 ± 22	469 ± 20
	<i>Продолжительность периода с СП</i>			<i>Продолжительность периода с УСП</i>		
Низ. ст.	230 ± 18	232 ± 18	223 ± 18	214 ± 24	216 ± 24	207 ± 23
Выс. ст.	217 ± 37	218 ± 35	218 ± 38	166 ± 45	169 ± 47	158 ± 42
ЗС	198 ± 23	200 ± 23	193 ± 23	169 ± 25	172 ± 25	162 ± 23
ВС	211 ± 24	213 ± 23	209 ± 24	180 ± 35	184 ± 36	172 ± 33

*Обозначения для групп станций в таблице: *Низ. ст.* – низко расположенные станции; *Выс. ст.* – высоко расположенные станции; *ЗС* – станции Западной Сибири средней высоты; *ВС* – станции Восточной Сибири средней высоты

Для каждой рассмотренной географической группы станций стоит отметить наличие существенного разброса дат начала формирования и окончания схода СП относительно среднего значения, и, как следствие, проявление ещё большего разброса, полученного для величины продолжительности периода с СП (см. табл. 1). Наименьшую вариативность показывают низко расположенные северные станции, что, скорее всего, обусловлено географической и климатической однородностью занимаемой ими территории. Полной противоположностью им являются высоко

расположенные станции. Демонстрируемый существенный разброс значений для них, вероятно, является следствием значительной неоднородности расположения станций по высоте (см. рис. 1 в). В данном исследовании внимание сосредоточено на общеклиматическом поведении рассматриваемых характеристик, а не на их экстремальном проявлении. Следовательно, несмотря на высокий разброс значений анализ поведения группы в целом, является правомочным. Станции средней высоты в Западной и Восточной Сибири демонстрируют схожий между собой разброс значений внутри группы с разницей в один день.

При сравнении циркуляционных эпох для меридиональной циркуляционной эпохи (2006–2019 гг.) относительно зональной (1977–2005 гг.) получено более позднее (на 1-5 дней позже) начало формирования СП и более раннее (на 3-4 дня раньше) окончание его схода (см. табл. 1 и рис. 3 б, в). Исключением является группа высоко расположенных станций, для которой начало формирования СП при меридиональной циркуляционной эпохе происходит на 1 день раньше, чем при зональной. При переходе от зональной к меридиональной циркуляционной эпохе разброс значений в рамках каждой группы для дат начала формирования СП остаётся прежним или уменьшается, а для дат окончания схода – остаётся прежним или увеличивается.

Межгодовой ход дат начала формирования СП для всех рассматриваемых групп станций, кроме высоко расположенных, проявляет резкую смену характера на границе циркуляционных эпох: происходит резкое смещение дат в сторону более поздних (см. рис. 4 а). Высоко расположенные станции демонстрируют схожий характер поведения для дат окончания схода СП (см. рис. 4 в). Для остальных групп получено плавное смещение дат окончания схода в сторону более ранних сроков. Межгодовой ход продолжительности периода с СП также демонстрирует изменение характера на границе циркуляционных эпох (см. рис. 4 д).

Анализ трендов изменения дат начала формирования и окончания схода СП для всего рассматриваемого периода (1970–2019 гг.) показал для низко расположенных северных станций и станций Западной Сибири средней высоты наличие тенденции к смещению дат начала формирования в сторону более поздних (см. рис. 4 б), а дат окончания схода – в сторону более ранних (см. рис. 4 г). Таким образом, получено сокращение продолжительности периода с СП на 3 и 2 дня каждые 10 лет, соответственно (см. рис. 4 е). Восточная Сибирь демонстрирует тенденцию только к более раннему окончанию схода СП (на 1 день за 10 лет), а группа высоко расположенных станций – только к более раннему началу формирования СП (на 1 день за 10 лет) (см. рис. 4 б, г). Тем самым продолжительность периода с СП для станций Восточной Сибири средней высоты имеет тенденцию к снижению (на 1 день за 10 лет), а для группы высоко расположенных станций – к увеличению (также на 1 день за 10 лет) (см. рис. 4 е).

Между периодами циркуляционных эпох наблюдаются существенные различия тенденций изменений сроков формирования и залегания СП. Почти во всех случаях получены существенные различия не только в значениях, но и в знаке трендов. Для дат начала формирования СП получены отрицательные тенденции для зональной эпохи и положительные – для меридиональной (см. рис. 4 б). Для дат окончания схода СП для зональной эпохи почти для всех географических групп тенденции изменения дат незначимы, а для меридиональной – почти все значимы и имеют отрицательный знак (см. рис. 4 г). Таким образом, продолжительность периода с СП в меридиональную циркуляционную эпоху имеет явные тенденции к снижению по сравнению с зональной (см. рис. 4 е). Исключение составляет группа высоко расположенных станций, которая демонстрирует тенденцию к увеличению продолжительности этого сезона в зональную циркуляционную эпоху и отсутствие значимых изменений в меридиональную.

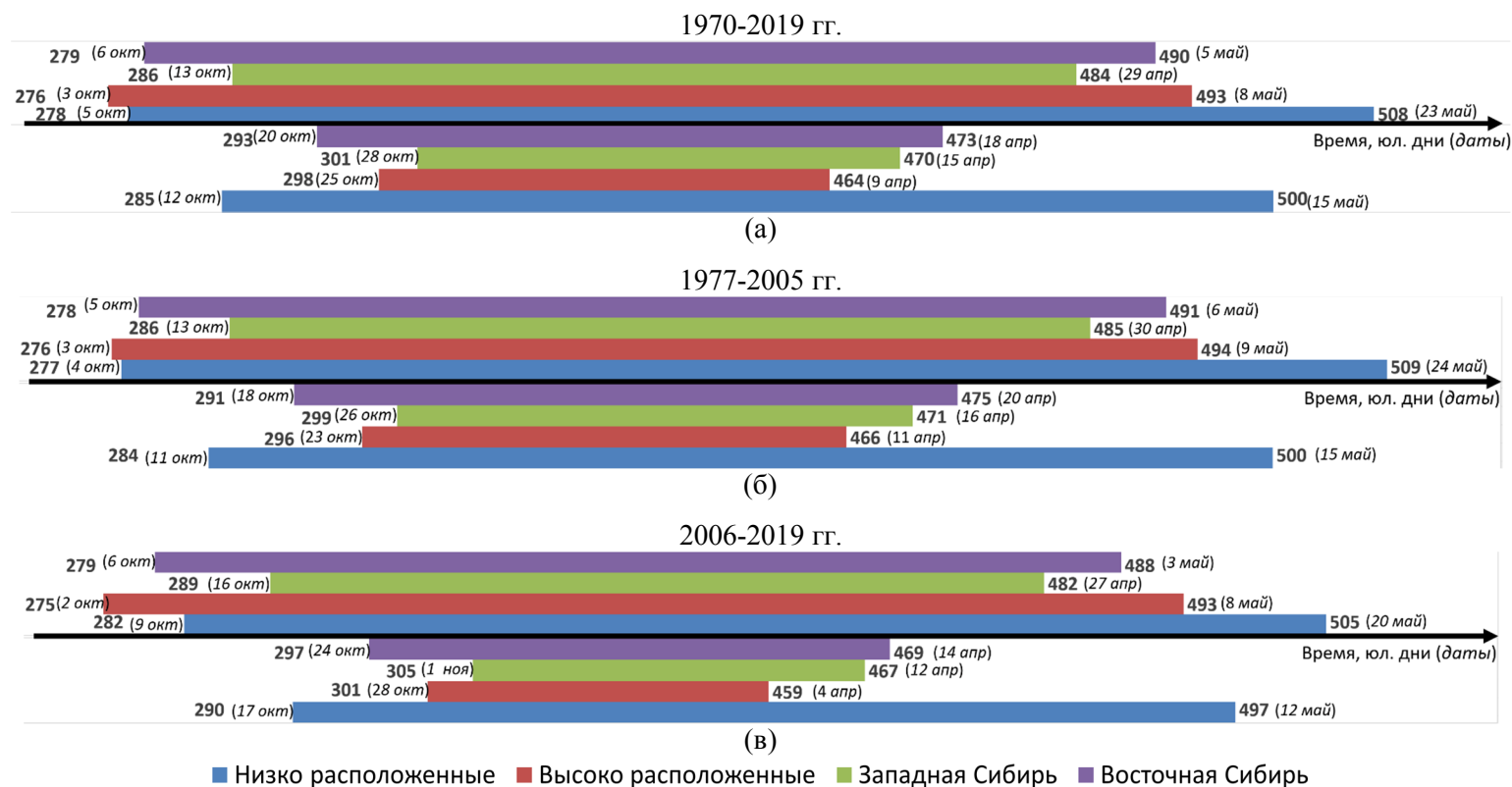


Рисунок 3. Схема расположения на временной оси периодов со снежным покровом (*над осью времени*) и с устойчивым снежным покровом (*под осью времени*), выраженные в юлианских днях. Линия времени обозначена жирной горизонтальной стрелкой. В скобках на схеме – соответствие указанного юлианского дня дате для не високосного года. Изображения имеют одинаковый масштаб по времени

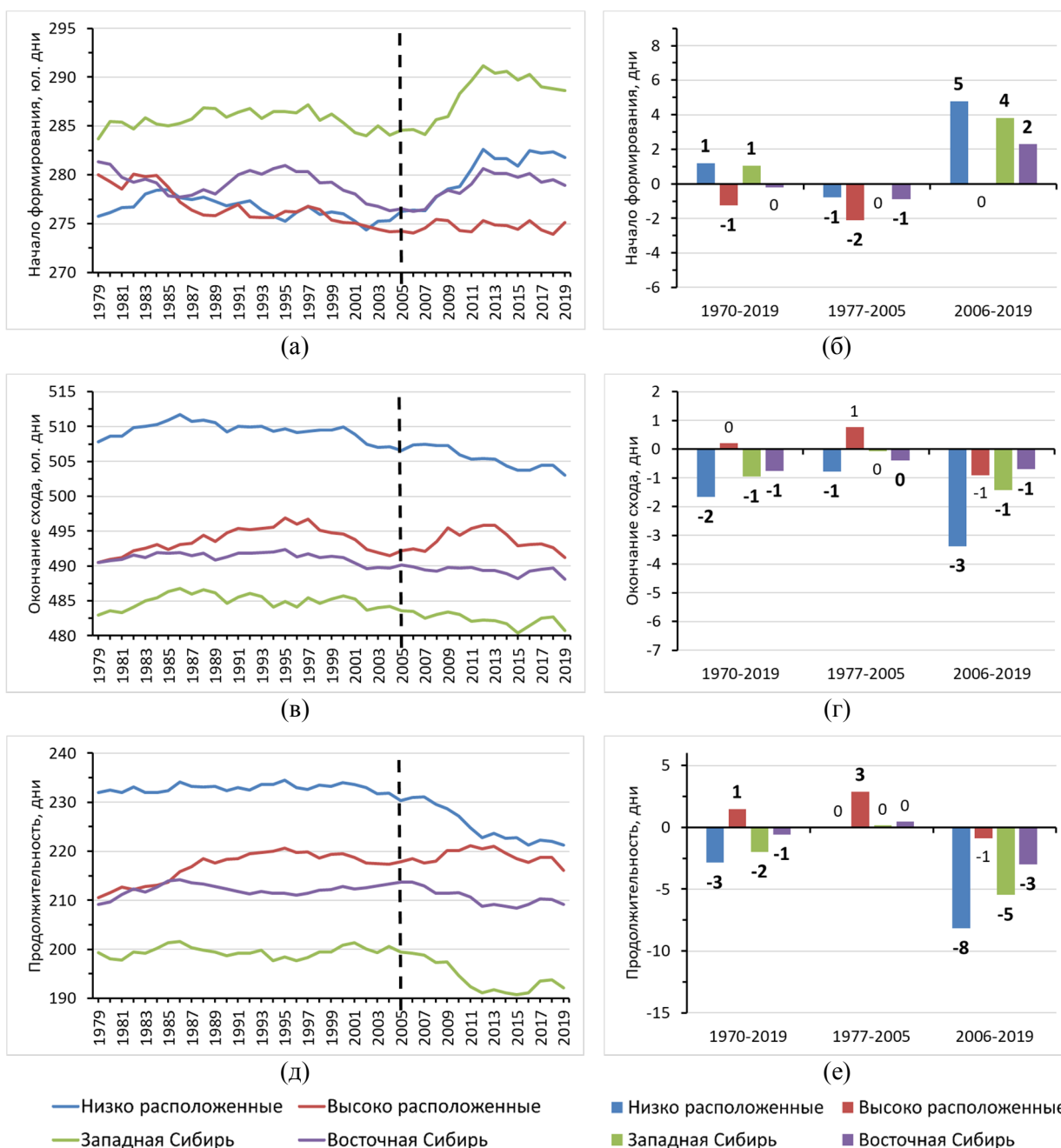


Рисунок 4. Межгодовая вариация (а, в, д) и тренд (б, г, е) средних по группе станций дат начала формирования (а, б) и окончания схода (в, г) снежного покрова, а также продолжительности этого периода (д, е) после применения скользящего среднего с 10-летним окном. Вертикальная пунктирная линия – граница между циркуляционными эпохами. Значения на диаграммах (справа) приведены с математическим округлением до целого дня, но высота столбца соответствует значению без округления. Выделение полужирным шрифтом (справа) – статистически значимые тренды для уровня значимости $\alpha=0.05$

Период с устойчивым снежным покровом

Между началом формирования и окончанием схода СП для рассматриваемых регионов происходит установление и разрушение УСП (см. схему на рис. 2). В общем случае, в рамках одного холодного сезона на станции может быть отмечено несколько последовательных интервалов времени с УСП. В настоящем исследовании внимание уделялось датам, ограничивающим весь период залегания УСП (с $D_{уст}^{УСП}$ по $D_{разр}^{УСП}$).

Наиболее раннее установление УСП для общего периода, 1970–2019 гг., получено для низко расположенных северных станций, далее, спустя 8 дней он устанавливается в Восточной Сибири, затем через 5 дней – на высоко расположенных станциях, и спустя ещё 3 дня – в Западной Сибири (см. табл. 1 и рис. 3 а). Разрушение УСП начинается с высоко расположенных станций, затем через 6 дней оно происходит в Западной Сибири, спустя 3 дня – в Восточной Сибири, и только ещё через 27 дней – на территории с низко расположенными северными станциями. Стоит отметить, что последовательность групп станций по установлению и разрушению УСП отличается от их последовательности по началу формирования и окончанию схода СП.

Для каждой географической группы станций присутствует существенный разброс дат установления и разрушения УСП относительно среднего значения, превышающий в большинстве своём разброс, полученный для дат СП (см. табл. 1). Минимальный разброс (11 дней) приходится на даты установления УСП для низко расположенных северных станций, а максимальный – на даты разрушения УСП для высоко расположенных станций. Разброс для дат установления УСП превышает разброс для дат начала формирования СП на 1–4 дня; разброс для дат разрушения УСП превышает разброс для дат окончания схода СП на 4–7 дней. Исключение составляет только разброс дат разрушения УСП в Западной Сибири, который, в отличие от остальных, ниже разброса дат окончания схода СП на 2 дня.

При переходе от зональной к меридиональной циркуляционной эпохе (от 1977–2005 гг. к 2006–2019 гг.) для всех выделенных географических групп станций происходит смещение дат установления УСП на более поздние сроки, а дат разрушения – на более ранние (см. табл. 1 и рис. 3 б, в). Таким образом, происходит сокращение общей продолжительности периода залегания УСП. Изменение характера межгодового хода на границе циркуляционных эпох для временных характеристик УСП для всех выделенных географических групп станций проявляется ещё более выражено, чем для СП (рис. 5).

При анализе на всем многолетнем периоде исследования, 1970–2019 гг., для каждой географической группы были выделены станции, имеющие в отдельные годы два или три последовательных интервала с УСП за один холодный сезон (табл. 2). Наименьшее количество случаев с двумя такими интервалами приходится на территории с низко расположенными северными станциями (0.5 % от суммарного количества холодных сезонов по всем станциям географической группы), а наибольшее – с высоко расположенными (4.1 %). Кроме того, для территории с высоко расположенными станциями возможны случаи трех за холодный сезон интервалов с УСП (0.5 %). На станциях Западной и Восточной Сибири отмечаются только случаи с двумя такими интервалами: 1.2 % и 1.5 %, соответственно.

Интересно отметить, что большая часть случаев с несколькими за холодный сезон интервалами с УСП приходится на период зональной циркуляционной эпохи, 1977–2005 гг., в сравнении с последующей меридиональной, 2006–2019 гг. (см. табл. 2). Такое проявление означает, в целом, более стабильное в течение холодного сезона залегание СП на всей территории Сибири в условиях преобладающей меридиональной циркуляции (2006–2019 гг.) в сравнении с зональной (1977–2005 гг.).

Таблица 2. Количество холодных сезонов с двумя (с тремя) периодами с УСП, выраженное в процентах (%) от общего (суммарного) количества холодных сезонов по всем станциям географической группы

Группа станций	1970–2019	1977–2005	2006–2019
Низко расположенные	0.5	0.9	0.0
Высоко расположенные	4.1 (0.5)	6.7 (0.8)	0.6 (0.3)
Западная Сибирь	1.2	1.7	0.5
Восточная Сибирь	1.5	2.4	0.4

Величины трендов дат установления и разрушения УСП на общем периоде 1970–2019 гг. близки к трендам, полученным для дат начала формирования и окончания схода СП. При этом УСП демонстрирует значимые тенденции изменения даты установления только для группы низко расположенных станций: смещение в сторону более поздних дат на 2 дня за 10 лет (рис. 5 б). Тенденции смещения дат разрушения УСП значимы для всех выделенных географических групп и соответствуют смещению дат в сторону более ранних со значениями в рамках одного дня за 10 лет

(рис. 5 г). Таким образом, продолжительность периода с УСП имеет значимую тенденцию к уменьшению на 3 дня за 10 лет для низко расположенных станций и на 1 день за 10 лет для станций Восточной Сибири средней высоты (рис. 5 е).

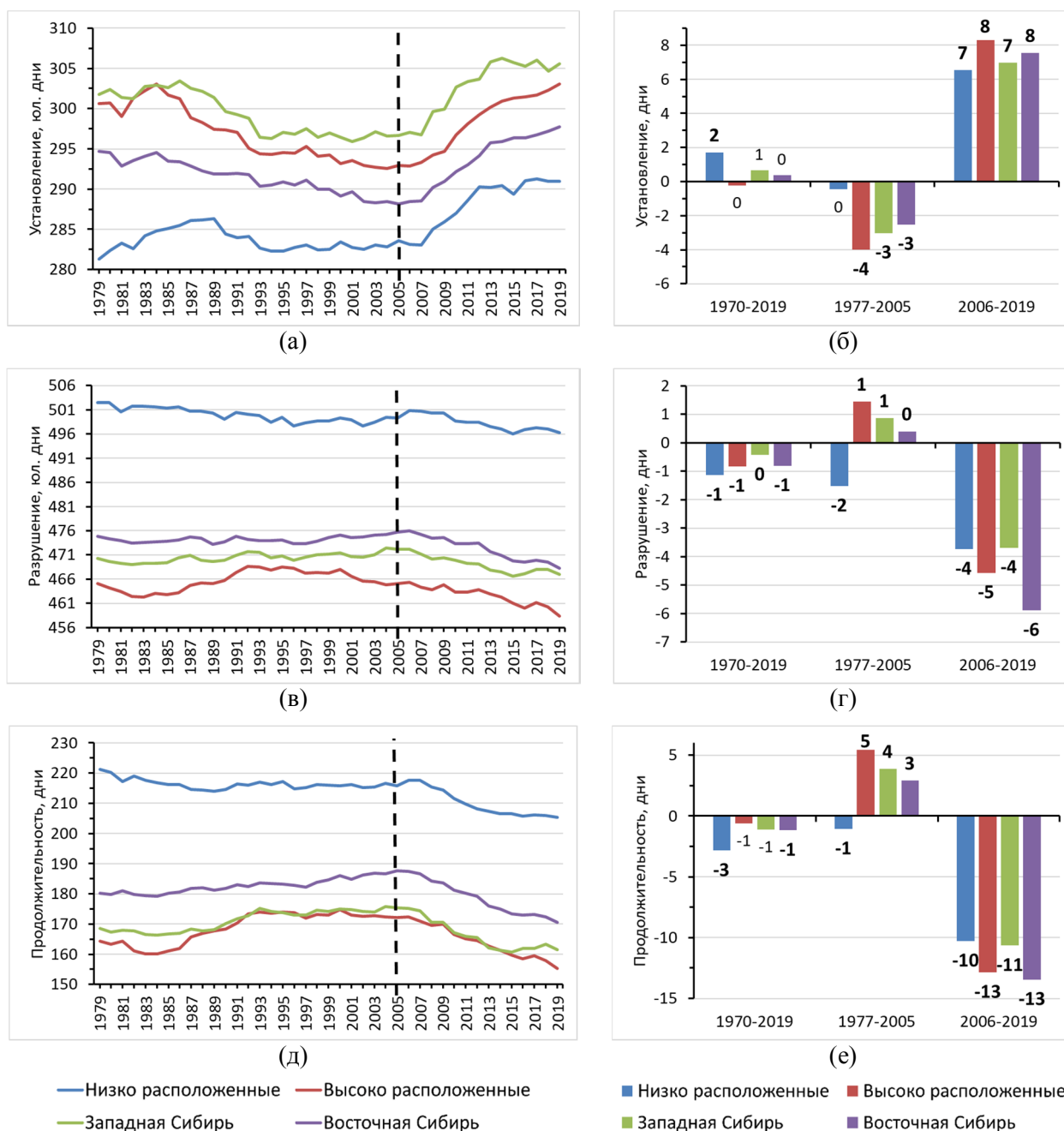


Рисунок 5. То же, что на рис. 4, но для дат установления (а, б) и разрушения (в, г) устойчивого снежного покрова и продолжительности этого периода (д, е)

Получены существенно более явные различия между циркуляционными эпохами для дат, ограничивающих период с УСП, в сравнении с приведенными ранее временными характеристиками СП. В зональную эпоху, 1977–2005 гг., все группы станций демонстрируют тенденцию к более раннему установлению УСП, а в меридиональную, 2006–2019 гг. – к более позднему (см. рис. 5 б). При этом абсолютные значения трендов для меридиональной эпохи в два раза превышают значения для зональной. Для сроков разрушения УСП получена противоположная картина: тенденция к более позднему разрушению в зональную эпоху и к более раннему – в меридиональную (см. рис. 5 г). Исключение составляет только группа низко расположенных северных станций, где для обеих эпох получена тенденция к более раннему установлению УСП. Абсолютные величины, как и для сроков

установления УСП, в меридиональную циркуляционную эпоху существенно превышают тенденции в зональную. Как результат, продолжительность залегания УСП имеет тенденцию к увеличению в зональную циркуляционную эпоху и к существенно большему сокращению – в меридиональную (см. рис. 5 е). Исключение составляют только низко расположенные северные станции, для которых продолжительность сокращалась для обеих эпох, но с разной интенсивностью: на 1 день за 10 лет в зональную и на 10 дней за 10 лет в меридиональную.

Может показаться, что такие существенные различия в абсолютных значениях получены вследствие заметной разницы в длине рядов данных для рассматриваемых циркуляционных эпох (27 холодных сезонов для зональной и 13 для меридиональной), однако проведённые дополнительные расчёты с усечёнными рядами для зональной циркуляционной эпохи, сопоставимыми по длине с рядом для меридиональной эпохи (в статье не приведены) не выявили значимых различий с представляемым результатом. Окончательно же убедиться в точности полученных оценок можно будет только по окончании длящейся в настоящее время меридиональной циркуляционной эпохи.

Периоды формирования и схода снежного покрова

При переходе от одной географической группы станций к другой в разной степени варьируются продолжительности не только периодов залегания СП и УСП, но и периодов формирования и схода СП ($P_{\text{форм}}^{\text{СП}}$ и $P_{\text{сход}}^{\text{СП}}$ на схеме на рис. 2). Для общего периода, 1970–2019 гг. для территории с низко расположенными северными станциями получена наименьшая продолжительность периодов формирования (7 дней) и схода СП (8 дней) (рис. 6 а, б), что говорит о наиболее быстром по сравнению с остальными группами закрытии территории плотным СП и освобождении её от СП. Противоположная картина получена для территории с высоко расположенными станциями. Здесь продолжительность периода формирования и схода СП составляет 22 и 29 дней, соответственно. Для Западной и Восточной Сибири продолжительность этих периодов получена в пределах двух / двух с половиной недель.

При переходе от зональной, 1977–2005 гг., к меридиональной, 2006–2019 гг., циркуляционной эпохе увеличивается продолжительность периодов формирования и схода СП для всех рассматриваемых географических групп станций, кроме низко расположенных северных (см. рис. 6 а-б). Для последних происходит увеличение только периода формирования СП, а период схода – сокращается.

Для всех выделенных групп станций для каждого из рассмотренных многолетних периодов разброс относительно среднего значения дат, ограничивающих залегание УСП, превышает разброс, полученный для дат начала формирования и окончания схода СП (на рисунках не показано).

Существенную смену характера межгодового хода на границе циркуляционных эпох проявляет только продолжительность периода схода СП (см. рис. 6 д). Для периода формирования СП смена характера если и происходит, то позже на 4–5 лет относительно границы между циркуляционными эпохами (см. рис. 6 в). Также для периода формирования СП отмечается явное изменение хода после первой трети зональной циркуляционной эпохи. Схожий характер изменений демонстрируют даты установления УСП (см. рис. 5 а).

Тренды длительности периодов формирования и схода СП являются отражением тенденций изменения дат, ограничивающих периоды залегания СП и УСП. Близкие по значению тренды для дат начала формирования СП и установления УСП (см. рис. 4 б и рис. 5 б, соответственно), а также для дат разрушения УСП и окончания схода СП (см. рис. 4 г и рис. 5 г, соответственно), на общем периоде (1970–2019 гг.) определяют аналогичные значения для трендов длительности периодов формирования и схода СП (см. рис. 6 г, е, соответственно). Таким образом, для периода формирования СП получена значимая тенденция к увеличению его продолжительности на 1 день за 10 лет для низко и высоко расположенных станций, для периода схода СП – тенденция к его увеличению на 1 день за 10 лет для высоко расположенных станций и уменьшению на 1 день за 10 лет для низко расположенных северных станций и станций Западной Сибири средней высоты. Для остальных групп станций тренды на общем периоде статистически незначимы.

Сравнение циркуляционных эпох, как и для дат, ограничивающих залегание СП и УСП, показало для всех групп станций существенные различия тенденций изменения продолжительности периодов формирования и схода СП как по абсолютному значению, так и по знаку тренда. Для обоих периодов при переходе от зональной (1977–2005 гг.) к меридиональной (2006–2019 гг.) циркуляционной эпохе происходит смена знака тренда с отрицательного на положительный и почти

для всех групп станций существенное увеличение его абсолютного значения (см. рис. 6 г, е). Таким образом, в зональную эпоху происходит уменьшение продолжительности периодов формирования и схода СП, а в меридиональную – существенно большее увеличение продолжительности этих периодов. Исключение составляет только группа низко расположенных северных станций, для которой периода формирования СП в зональную эпоху не имел вообще значимых трендов, период же схода СП в зональную эпоху имел тенденцию к увеличению на 1 день за 10 лет, а в меридиональную тенденций к изменению не демонстрировал.

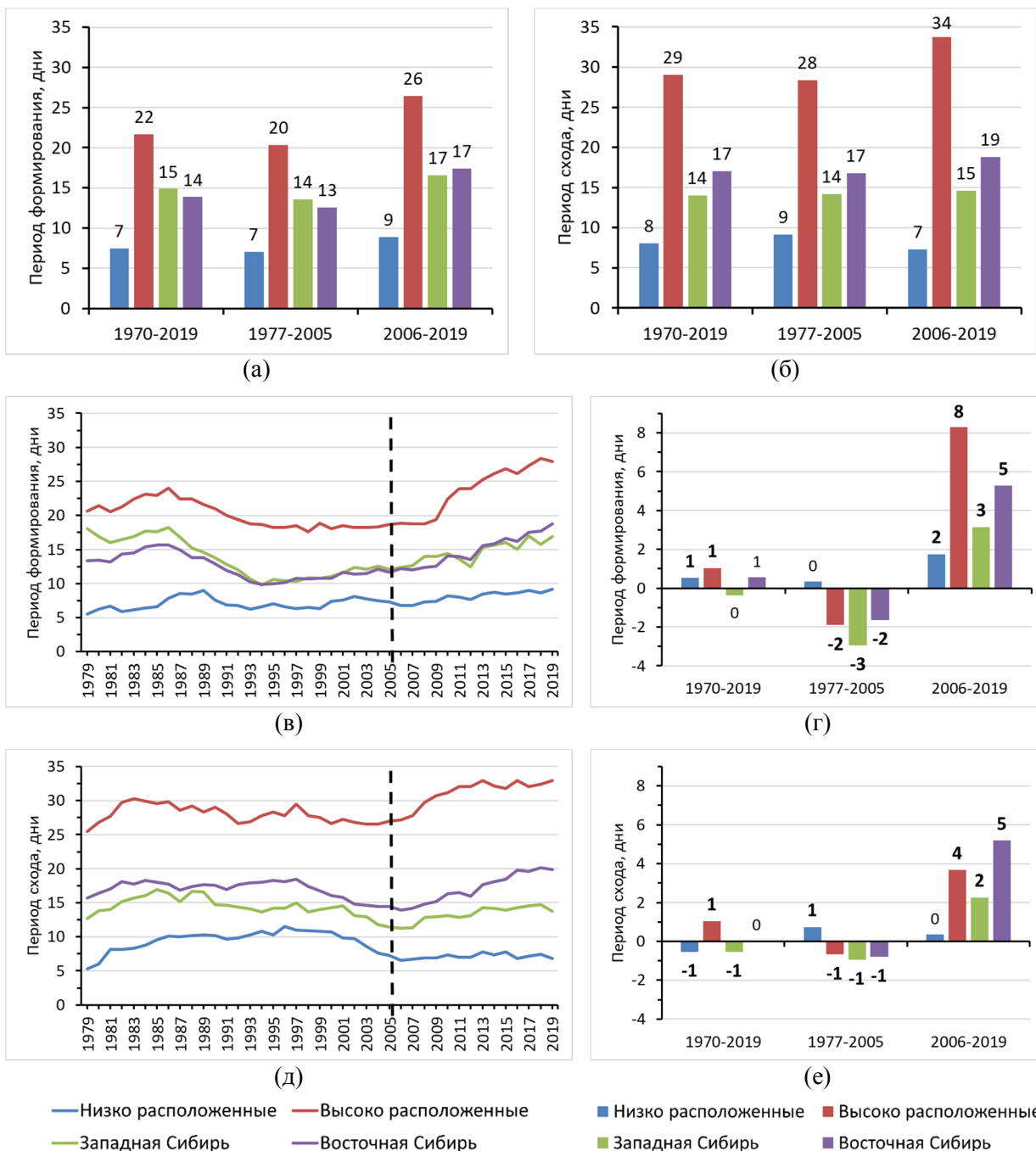


Рисунок 6. Осреднённые за временной период продолжительности периодов формирования (а) и схода (б) снежного покрова, их межгодовой ход (в, д), выраженные в днях, и тренды (г, е), выраженные в днях за 10 лет. Выделение полужирным шрифтом (г, е) – статистически значимые тренды для уровня значимости $\alpha=0.05$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе архива данных наземных наблюдений ВНИИГМИ-МЦД за состоянием снежного покрова для периода с 1970 по 2019 г. для Западной и Восточной Сибири получены количественные и качественные оценки современной изменчивости сроков начала формирования и окончания схода снежного покрова, формирования и разрушения устойчивого снежного покрова, продолжительности этих периодов, количества интервалов с устойчивым снежным покровом в холодном сезоне, а также продолжительности периодов формирования и схода снежного покрова. Основные выводы, касающиеся этого периода, совпадают с работами других авторов [Катцова, 2022]. Наряду с общим периодом (1970–2019 гг.) проанализировано поведение указанных характеристик для двух подпериодов 1977–2005 гг. и 2006–2019 гг., соответствующих согласно Н. К. Кононовой зональной и меридиональной циркуляционным эпохам [Конопова, 2015]. Проанализированы также различия в поведении характеристик в зависимости от географических особенностей территории.

Получен отклик снежного покрова на смену общего характера атмосферной циркуляции в регионе. При преобладающей меридиональной циркуляции в сравнении с зональной начало формирования снежного покрова происходит позже и в большей степени синхронно на большей части станций каждой из выделенных географических групп, а сход снежного покрова происходит раньше, но при этом существенно в большей степени неоднородно по времени (неодновременно). Для условий преобладающей меридиональной циркуляции, 2006–2019 гг., в сравнении с зональной, 1977–2005 гг., показано меньшее количество интервалов с устойчивым снежным покровом в одном сезоне, что означает более стабильное в течение холодного сезона его залегание.

При переходе от зональной к меридиональной циркуляционной эпохе получено увеличение продолжительности периодов формирования и схода снежного покрова для всех рассматриваемых географических групп станций, кроме низко расположенных северных. Для последних происходит увеличение только периода формирования снежного покрова, а период схода сокращается. Таким образом, для всех выделенных географических групп станций, кроме низко расположенных, в меридиональную циркуляционную эпоху (2006–2019 гг.) происходит не только компенсация изменений, произошедших в зональную эпоху (1977–2005 гг.), но и внесение новых изменения в сроки формирования и схода снежного покрова в Сибири.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы ИМКЭС СО РАН № 121031300158-9 за исключением анализа трендов временных характеристик СП для Восточной Сибири, который был выполнен в рамках проекта АААА-А21-121012190059-5.

Acknowledgments. The research was carried out according to State project No.121031300158-9 with the exception of the analysis of trends in the temporal characteristics of snow cover for Eastern Siberia, which was carried out within the framework of the АААА-А21-121012190059-5 project.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Groisman P.Y., Karl T.R., Knight R.W., Stenchikov G.L. 1994. Changes of snow cover, temperature, and radiative heat balance over the Northern Hemisphere. *Journal of Climate*, 7(11): 1633–1656.
- Vavrus S. 2007. The role of terrestrial snow cover in the climate system. *Climate Dynamics*, 29(1): 73–88.
- Henderson G.R., Leathers D.J., Hanson B. 2013. Circulation response to Eurasian versus North American anomalous snow scenarios in the Northern Hemisphere with an AGCM coupled to a slab ocean model. *Journal of Climate*, 26(5): 1502–1515.
- Ye K., Wu R., Liu Y. 2015. Interdecadal change of Eurasian snow, surface temperature, and atmospheric circulation in the late 1980s. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(7): 2738–2753.
- Walsh J.E., Ross B. 1988. Sensitivity of 30-day dynamical forecasts to continental snow cover. *Journal of Climate*, 1(7): 739–754.
- Walland D.J., Simmonds I. 1996. Modelled atmospheric response to changes in Northern Hemisphere snow cover. *Climate Dynamics*, 13(1): 25–34.
- Peng S., Piao S., Ciais P., Friedlingstein P., Zhou L., Wang T. 2013. Change in snow phenology and its potential feedback to temperature in the Northern Hemisphere over the last three decades. *Environ. Res. Lett.*, 8: 014008.
- Martynova Yu.V., Krupchatnikov V.N. 2010. Issledovanie chuvstvitel'nosti prizemnoy temperatury Evrazii v zimniy period k anomal'iyam snezhnogo pokrova. Rol' stratosfery. *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 46(6): 818–830 (in Russian). [Мартынова Ю.В., Крупчатников В.Н. 2010. Исследование чувствительности приземной температуры Евразии в зимний период к аномалиям снежного покрова. Роль стратосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 46. № 6. С. 818–830].
- Chen X., Liang S., Cao Y. 2016. Satellite observed changes in the Northern Hemisphere snow cover phenology and the associated radiative forcing and feedback between 1982 and 2013. *Environ. Res. Lett.*, 11: 084002.

- Titkova T.B., Vinogradova V.V. 2017a. Sroki zaleganiya snezhnogo pokrova na territorii Rossii v nachale XXI V. po sputnikovym dannym. *Led i Sneg*, 57(1): 25-33. (in Russian). [Титкова Т.Б., Виноградова В.В. 2017. Сроки залегания снежного покрова на территории России в начале XXI в. по спутниковым данным // Лёд и Снег. Т. 57. № 1. С. 25-33].
- Titkova T.B., Kitaev L.M., Vinogradova V.V. 2017b. Korotkoperiodnaya izmenchivost' srokov zaleganiya snezhnogo pokrova po dannym MODIS na severe Evrazii v usloviyakh sovremennogo klimata. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 14(5): 223-238 (in Russian). [Титкова Т.Б., Китаев Л.М., Виноградова В.В. 2017. Короткопериодная изменчивость сроков залегания снежного покрова по данным MODIS на севере Евразии в условиях современного климата // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 14. № 5. С. 223-238].
- Voropay N.N., Vlasov V.K. 2017. Osobennosti raspredeleniya snezhnogo pokrova na poberezh'e ozera Baykal. *Led i sneg*, 57(3): 355-364. (in Russian). [Воропай Н.Н., Власов В.К. 2017. Особенности распределения снежного покрова на побережье озера Байкал // Лёд и снег. Т. 57. №3. С. 355-364.]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-3-355-364>
- Matyukhina A.A., Voropay N.N. 2020. Long-term dynamics of snow cover in the Baikal region. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 611: 012007. doi:10.1088/1755-1315/611/1/012007.
- Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Korshunova N.N. 2009. Changes in snow cover over Northern Eurasia in the last few decades. *Environ. Res. Lett.*, 4: 045026.
- Bulygina O.N., Groisman P.Ya., Razuvaev V.N., Korshunova N.N. 2011. Changes in snow cover characteristics over Northern Eurasia since 1966. *Environ. Res. Lett.*, 6: 045204.
- Zhong X., Zhang X., Kang S., Wang K., Zheng L., Hu Y., Wang H. 2018. Spatiotemporal variability of snow depth across the Eurasian continent from 1966 to 2012. *The Cryosphere*, 12: 227-245.
- Kononova N.K. 2012. Vliyanie tsirkulyatsii atmosfery na formirovaniye snezhnogo pokrova na severo-vostoke Sibiri. *Led i sneg*, 52(1): 38-53 (in Russian). [Кононова Н.К. 2012. Влияние циркуляции атмосферы на формирование снежного покрова на северо-востоке Сибири // Лёд и снег. Т. 52. № 1. С. 38-53].
- Derksen C., Brown R. 2012. Spring snow cover extent reductions in the 2008-2012 period exceeding climate model projections. *Geophysical research letters*, 39: L19504.
- Brown R.D., Derksen C. 2013. Is Eurasian October snow cover extent increasing?. *Environ. Res. Lett.*, 8: 024006.
- Martynova Yu.V. 2020. Special aspects of snow cover formation in Western and Eastern Siberia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 611: 012006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/611/1/012006>
- Martynova Yu.V., Matyukhina A.A., Voropay N.N., Krupchatnikov V.N. 2021. Osobennosti formirovaniya snezhnogo pokrova v Sibiri i ikh svyaz' s anomal'iyami dinamiki atmosfery Severnogo polushariya. *Ekologiya. Ekonomika. Informatika. Seriya: Sistemyy analiz i modelirovaniye ekonomicheskikh i ekologicheskikh system*, 6: 118-123 (in Russian). [Мартынова Ю.В., Матюхина А.А. Воропай Н.Н., Крупчатников В.Н. 2021. Особенности формирования снежного покрова в Сибири и их связь с аномалиями динамики атмосферы Северного полушария // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. Том 6. С. 118-123].
- Popova V.V., Shiryayeva A.V., Morozova P.A. 2014. Sroki ustanovleniya snezhnogo pokrova na severe Evrazii: pryamye i obratnye svyazi s krupnomasshtabnoy atmosfernoy tsirkulyatsiyey. *Led i sneg*, 3: 39-49 (in Russian). [Попова В.В., Ширяева А.В., Морозова П.А. 2014. Сроки установления снежного покрова на севере Евразии: прямые и обратные связи с крупномасштабной атмосферной циркуляцией // Лёд и снег. № 3. С. 39-49].
- Popova V.V., Morozova P.A., Titkova T.B., Semenov V.A., Cherenkova E.A., Shiryayeva A.V., Kitaev L.M. 2015. Regional'nye osobennosti sovremennykh izmeneniy zimney akkumulyatsii snega na severe Evrazii po dannym nablyudeniyy, reanaliza i sputnikovym izmereniy. *Led i Sneg*, 55(4): 73-86 (in Russian). [Попова В.В., Морозова П.А., Титкова Т.Б., Семенов В.А., Черенкова Е.А., Ширяева А.В., Китаев Л.М. 2015. Региональные особенности современных изменений зимней аккумуляции снега на севере Евразии по данным наблюдений, реанализа и спутниковых измерений // Лёд и Снег. Т. 55. № 4. С. 73-86].
- Peings Y., Brun E., Mauvais V., Douville H. 2013. How stationary is the relationship between Siberian snow and Arctic Oscillation over the 20th century? *Geophysical Research Letters*, 40(1): 183-188.
- Martynova Yu.V. 2019. October snow cover and winter atmospheric conditions in Siberia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 386: 012001.
- Peings Y., Douville H., Colin J., Martin D.S., Magnusdottir G. 2017. Snow-(N) AO teleconnection and its modulation by the Quasi-Biennial Oscillation. *Journal of Climate*, 30: 10211-10235.
- Yeo S.R., Kim W., Kim K.Y. 2017. Eurasian snow cover variability in relation to warming trend and Arctic Oscillation. *Climate Dynamics*, 48: 499-511.
- Martynova Yu.V., Krupchatnikov V.N., Gochakov A.V., Antokhina O.Yu. 2022. Vzaimosvyaz' anomal'iy intensivnosti formirovaniya snezhnogo pokrova v Zapadnoy Sibiri s dinamicheskimi sostoyaniyem atmosfery v Severnom polusharii v osenne-zimniy period. *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 58(1): 109-124 (in Russian). [Мартынова Ю.В., Крупчатников В.Н., Гочаков А.В., Антохина О.Ю. 2022. Взаимосвязь аномалий интенсивности формирования снежного покрова в Западной Сибири с динамическим состоянием атмосферы в Северном полушарии в осенне-зимний период // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 58. № 1. С. 109-124].
- Popova V.V., Shiryayeva A.V., Morozova P.A. 2018. Izmeneniya kharakteristik snezhnogo pokrova na territorii Rossii v 1950-2013 godakh: regional'nye osobennosti i svyaz' s global'nym potepleniem. *Kriosfera Zemli*, XXII(4): 65-75 (in Russian). [Попова В.В., Ширяева А.В., Морозова П.А. 2018. Изменения характеристик снежного покрова на территории России в 1950-2013 годах: региональные особенности и связь с глобальным потеплением // Криосфера Земли. Т. XXII. № 4. С. 65-75].
- Popova V.V., Polyakova I.A. 2013. Izmeneniye srokov razrusheniya ustoychivogo snezhnogo pokrova na severe Evrazii v 1936-2008 gg.: vliyanie global'nogo potepleniya i rol' krupnomasshtabnoy atmosfernoy tsirkulyatsii. *Led i sneg*, 53(2): 29-39 (in Russian). [Попова В.В., Полякова И.А. 2013. Изменение сроков разрушения устойчивого снежного покрова на севере Евразии в 1936-2008 гг.: влияние глобального потепления и роль крупномасштабной атмосферной циркуляции // Лёд и снег. Т. 53. № 2. С. 29-39].
- Wegmann M., Orsolini Y., Vázquez M., Gimeno L., Nieto R., Bulygina O., Jaiser R., Handorf D., Rinke A., Dethloff K. 2015. Arctic moisture source for Eurasian snow cover variations in autumn. *Environ. Res. Lett.*, 10: 054015.

- Kitaev L.M., Titkova T.B. 2018. Sravnenie izmeneniy splochnosti morskogo l'da Arktiki i prodolzhitel'nosti snezhnogo perioda Severnoy Evrazii v usloviyakh sovremennogo klimata (po sputnikovym dannym). *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2: 13–20 (in Russian). [Китаев Л.М., Титкова Т.Б. 2018. Сравнение изменений сплочности морского льда Арктики и продолжительности снежного периода Северной Евразии в условиях современного климата (по спутниковым данным) // Исследование Земли из космоса. № 2. С. 13–20].
- Zhang T., Wang T., Zhao Y., Xu C., Feng Y., Liu D. 2021. Drivers of Eurasian Spring Snow-Cover Variability. *Journal of Climate*, 34: 2037–2052.
- Song L., Wu R. 2019. Intraseasonal snow cover variations over western Siberia and associated atmospheric processes. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 124: 8994–9010.
- Brutel-Vuilmet C., Ménégoz M., Krinner G. 2013. An analysis of present and future seasonal Northern Hemisphere land snow cover simulated by CMIP5 coupled climate models. *The Cryosphere*, 7: 67–80.
- Mudryk L.R., Kushner P.J., Derksen C., Thackeray C. 2017. Snow cover response to temperature in observational and climate model ensembles. *Geophys. Res. Lett.*, 44(2): 919–926.
- Mudryk L., Santolaria-Otín M., Krinner G., Ménégoz M., Derksen C., Brutel-Vuilmet C., Brady M., Essery R. 2020. Historical Northern Hemisphere snow cover trends and projected changes in the CMIP6 multi-model ensemble. *The Cryosphere*, 14: 2495–2514.
- Zhu X., Lee S.Y., Wen X., Wei Z., Ji Z., Zheng Z., Dong W. 2021. Historical evolution and future trend of Northern Hemisphere snow cover in CMIP5 and CMIP6 models. *Environ. Res. Lett.*, 16: 065013.
- Zhong X., Zhang T., Kang S., Wang J. 2022. Snow depth trends from CMIP6 models conflict with observational evidence. *Journal of Climate*, 35(4): 1293–1307.
- Gastineau G., García-Serrano J., Frankignoul C. 2017. The Influence of Autumnal Eurasian Snow Cover on Climate and Its Link with Arctic Sea Ice Cover. *Journal of Climate*, 30(19): 7599–7619.
- Nikolaev A.N., Skachkov Yu.B. 2011. Vliyanie dinamiki snezhnogo pokrova na rost i razvitie lesov v Tsentral'noy Yakutii. *Kriosfera Zemli*, XV(3): 71–80 (in Russian). [Николаев А.Н., Скачков Ю.Б. 2011. Влияние динамики снежного покрова на рост и развитие лесов в Центральной Якутии // Кriosфера Земли. Т. XV. № 3. С. 71–80].
- Jan A., Painter S.L. 2020. Permafrost thermal conditions are sensitive to shifts in snow timing. *Environ. Res. Lett.*, 15: 084026.
- Heim B., Lisovski S., Wiczorek M., Morgenstern A., Juhls B., Shevtsova I., Kruse S., Boike J., Fedorova I., Herzschuh U. 2022. Spring snow cover duration and tundra greenness in the Lena Delta, Siberia: two decades of MODIS satellite time series (2001–2021). *Environ. Res. Lett.*, 17: 085005.
- Bulygina O.N., Korshunova N.N., Razuvaev V.N. 2017. Monitoring snezhnogo pokrova na territorii Rossiyskoy Federatsii. *Trudy Gidromettsentra Rossii*, 366: 87–96 (in Russian). [Булыгина О.Н., Коршунова Н.Н., Разуваев В.Н. 2017. Мониторинг снежного покрова на территории Российской Федерации // Труды Гидрометцентра России. Вып. 366. С. 87–96].
- Bespalov D.P. 1985. *Nastavlenie gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam*. Meteorologicheskie nablyudeniya na stantsiyakh: Iss. 3. L: Gidrometeoizdat. 92 pp. (in Russian). [Беспалов Д.П. 1985. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Метеорологические наблюдения на станциях: Вып. 3. Л: Гидрометеоиздат, 1985. 92 с].
- Kattsova V.M. (ed.). 2022. Third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. Rosgidromet. High Tech Publishing House, Saint Petersburg, 676 pp. (in Russian). [Катцова В.М. (ред.). 2022. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Росгидромет. Санкт-Петербург: Научно-технические технологии, 676 с.]
- Kononova N.K. 2015. Tsirkulyatsionnye epokhi v sektorakh Severnogo polushariya v 1899–2014 gg. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov*, 1(2): 56–66 (in Russian). [Кононова Н.К. 2015. Циркуляционные эпохи в секторах Северного полушария в 1899–2014 гг. // Геополитика и экогеодинамика регионов. Т. 1. № 11. вып. 2. С. 56–66].

Поступила в редакцию: 10.12.23
Переработанный вариант: 27.12.2023