

ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В 1950–2013 ГОДАХ: РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И СВЯЗЬ С ГЛОБАЛЬНЫМ ПОТЕПЛЕНИЕМ

В.В. Попова, А.В. Ширяева, П.А. Морозова

Институт географии РАН, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29, Россия; valeria_popova@mail.ru

Выявлены существенные различия в изменении характеристик снежного покрова на территории России. На фоне общего увеличения толщины снежного покрова в разных регионах на него влияет как рост числа оттепелей, так и изменение крупномасштабной атмосферной циркуляции. В период с 1979 по 1995 г. на западе европейской части России максимальная за март толщина снежного покрова уменьшалась, а на северо-востоке этой территории и на севере Сибири увеличивалась. С середины 1990-х гг. тенденции изменения толщины снежного покрова в этих районах сменились на обратные. Сдвиг сроков разрушения снежного покрова на более ранние и сокращение площади снежного покрова в середине весны соответствуют общей тенденции потепления этого сезона с начала 1950-х гг. Заметное сокращение площади снежного покрова в середине осени, как и запаздывание сроков его установления, отмечается только в последние 10–15 лет. Эти явления коррелируют с общим повышением приземной температуры воздуха на севере Евразии, а также с ослаблением зонального переноса воздушных масс с середины 1990-х гг.

Толщина снежного покрова, сроки установления и разрушения снежного покрова, температура приземного воздуха

CHANGES IN THE SNOW DEPTH CHARACTERISTICS IN THE TERRITORY OF RUSSIA IN 1950–2013: THE REGIONAL FEATURES AND CONNECTION WITH THE GLOBAL WARMING

V.V. Popova, A.V. Shiryayeva, P.A. Morozova

Institute of Geography, RAS, 29, Staromonetny per., Moscow, 119017, Russia; valeria_popova@mail.ru

Essential differences in the changes of the snow cover characteristics have been revealed for the territory of Russia. Although the snow cover depth has increased in the entire territory, in certain regions it is influenced both by the increase of the number of thaws and by the changes in the large-scale atmospheric circulation. In 1979–1995, the maximum March snow cover depth decreased in the western regions of European Russia, increasing in the northeastern parts of European Russia and in the north of Siberia. In the mid-1990s, the trends of the snow depth change in these regions reversed. The shortening of the snow cover onset dates in the spring, as well as the reduction in the snow cover area in the middle of spring agrees with the general trend of warming of this season observed since the beginning of the 1950s. Essential reduction in the snow cover area in the middle of autumn, as well as the delayed snow cover onset, have been observed only over the recent 10–15 years. These phenomena correlate with the total rise of the surface air temperature in northern Eurasia and the attenuation in the zonal transport of air masses observed since the mid-1990s.

Snow cover depth, onset and offset dates of snow cover, surface air temperature

ВВЕДЕНИЕ

Чувствительность снежного покрова Северной Евразии к процессу глобального потепления достаточно хорошо изучена [Кутаев и др., 2001; Brown, Mote, 2009; Brown, Robinson, 2011; Brown, Derksen, 2013]. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что разные характеристики снежного покрова могут демонстрировать разнонаправленные изменения. Так, сокращение площади снежного покрова на континенте [Brown, Robinson, 2011; Brown, Derksen, 2013], которое наблюдается у западных и южных границ его распространения [Попова, Полякова, 2013], сопровождается увеличением зимней аккумуляции снега в высоких широтах на значительной территории [Кутаев и др., 2001; Шмакин, 2010; Попова, 2007; Bulygina et al., 2011].

Основные этапы потепления климата на севере Евразии с начала XX в. совпадают с ходом средней температуры приземного воздуха по полушарию (рис. 1). Согласно данным Второго оценочного доклада Росгидромета [2014], постепенное потепление на территории России зафиксировано уже с конца XIX в. В 1910-е гг. тенденция изменилась, но к началу 1920-х рост температуры продолжился, последовала эпоха так называемого потепления Арктики – период 1930–1940-х гг., когда повышение температуры было особенно заметно в северных широтах и достигало 0.8 °С. Некоторое снижение температуры (около 0.3 °С) в 1950–1960-х гг. иногда выделяется как период похолодания [Груза, Ранькова, 2003], с 1970–1980-х гг. средняя температура воздуха зимой в России ус-

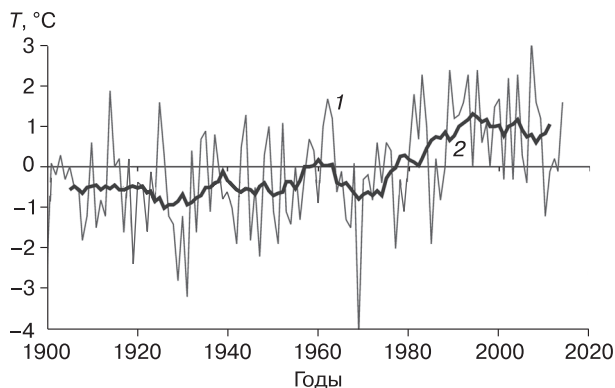


Рис. 1. Изменение температуры приземного слоя воздуха на севере Евразии в среднем за декабрь–март (по данным CRUTEM4.6.0.0).

Годовые (1) и 11-летние скользящие средние значения (2).

тойчиво повышается вплоть до середины 1990-х. Ее рост в этот период соответствует современному глобальному потеплению и в среднем по территории России составляет примерно 1°C .

С середины 1990-х в течение почти 20 лет, согласно данным инструментальных наблюдений, на севере Евразии увеличилась повторяемость аномально холодных зим, что привело к замедлению темпов роста приземной температуры в Северном полушарии [Второй... доклад..., 2014; IPCC, 2013] и позволило говорить о замедлении темпов потепления. Причины этого явления, получившего название паузы в потеплении (перевод с англ. “global warming hiatus” [IPCC, 2013; England et al., 2014; Wikipedia, 2018]), связывают как с сокращением площади арктических морских льдов и повышением температуры поверхности океана на севере Атлантики [Семенов, 2015; Petoukhov, Semenov, 2010; Cohen et al., 2012; Semenov, Latif, 2015], так и с аномалиями в распределении теплосодержания верхних слоев Тихого океана [Trenberth, Fasullo, 2013; England et al., 2014]. Непосредственной причиной холодных зим на территории России с середины 1990-х гг. стали изменения атмосферной циркуляции: рост повторяемости арктических вторжений воздушных масс, связанный с ослаблением зональной циркуляции и усилением межширотного обмена. Эти изменения отражаются в многолетнем ходе индекса Североатлантического колебания (North Atlantic Oscillation – NAO), с положительными аномалиями которого связано усиление западного переноса в атмосфере внетропической зоны Северного полушария, сопровождающееся теплыми и снежными зимами в высоких широтах Европейской территории России (ЕТР) и Сибири с начала 1970-х до середины 1990-х гг. Выраженное в нисходящем тренде индекса NAO ослабление зонального переноса воздушных масс со вто-

рой половины 1990-х гг. [Попова и др., 2018] указывает на изменение режима крупномасштабной циркуляции, следствием которого и стало снижение фоновых значений зимней температуры на севере Евразии. Поскольку тесная связь снегонакопления с крупномасштабной атмосферной циркуляцией отмечалась ранее [Порова, 2007], изучение региональных особенностей снегонакопления в указанные периоды представляет интерес с точки зрения выявления пространственных и временных масштабов возможных его изменений.

Выполненный ранее анализ трендов в целом за 1966–2010 гг. [Bulygina et al., 2011] показывает, что максимальная толщина снежного покрова увеличивалась со скоростью около 4 % за десятилетие на большей части территории России, но эти результаты дают сглаженные оценки трендов, поскольку не учитывают смену климатических тенденций в середине 1990-х гг. Для понимания механизмов формирования аномалий характеристик снежного покрова важно оценить их отклик на глобальные климатические изменения, выявить региональные особенности реакции зимней аккумуляции снега и его распространения по территории в период установления и разрушения устойчивого снежного покрова.

Цель настоящей работы состоит в выявлении закономерностей регионального распределения тенденций снегонакопления, а также площади распространения снежного покрова в переходные сезоны и сроков его установления и разрушения на территории России в условиях современных глобальных климатических изменений, включая период резкого роста температуры 1970–1990-х гг. и последующую паузу в потеплении. Решение этой задачи предполагает учет пространственно-временных закономерностей колебаний снежной аккумуляции и получение сравнительных оценок региональных трендов толщины снежного покрова, сроков его установления и разрушения, а также площадей его распространения в переходные сезоны на фоне изменений температурного режима на севере Евразии.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

В работе использовались данные из архива ВНИИГМИ–МЦД [2016] о толщине снежного покрова, полученные по наблюдениям на 600 метеостанциях на территории России за 1950–2013 гг. Данные о толщине снежного покрова анализировались в основном для конца марта, поскольку исследование многолетних средних этого параметра показывает, что рост снежной аккумуляции в этом месяце достигает максимума на значительной части территории России, при этом разрушение снежного покрова наблюдается только южнее 50° с.ш. [Попова, Полякова, 2013]. Суще-

ственной проблемой, возникающей при анализе данных, в частности характеристик снежного покрова, являющиеся пропуски в рядах наблюдений, а также закрытие ряда метеостанций в 1980–1990-е гг. При проведении анализа эмпирических ортогональных функций (ЭОФ) и последующих расчетов средних многолетних рядов толщины снежного покрова для выделенных квазиоднородных (по характеру колебаний снегонакопления) районов (или секторов) станционные данные были интерполированы в регулярную сетку $5^\circ \times 5^\circ$ методом Kriging в программе Surfer [Goldensoftware, 2017]. Указанное разрешение соответствует среднему расстоянию между метеостанциями и позволяет проследить региональные закономерности изменений снежной аккумуляции в масштабе протяженной территории Северной Евразии, а также избежать погрешностей, связанных с пропусками в рядах наблюдений. Предварительно путем анализа рядов наблюдений на каждой станции и пространственных полей толщины снежного покрова для каждого года был осуществлен контроль качества данных станционных наблюдений.

При анализе и сравнении пространственного распределения трендов снегонакопления для двух периодов (1979–1995 и 1996–2013 гг.) неравномерность рядов станционных наблюдений имеет особое значение. Поэтому количество пропусков оценивалось для каждого периода и данные метеостанций, на которых пропуски превышали 10 %, отбраковывались. В результате количество станций, по которым проводился анализ трендов снегонакопления для 1979–1995 гг. сократилось до 478, а для 1996–2013 гг. – до 454. Учитывая эту разницу, а также возникшее различие в распределении станций для более объективного представления результатов расчета трендов они не подвергались интерполяции и были представлены не в изолиниях, а значками, соответствующими распределению станций (рис. 2).

Сроки установления и разрушения снежного покрова (СП) определялись по данным о степени покрытия территории вокруг станции. В качестве

порогового значения выбрано 50 % покрытия. Это позволило с одинаковой точностью рассчитать дату схода для всего рассматриваемого периода, поскольку до 1960 г. визуальная оценка покрытия снегом велась с точностью до 50 % [Наставление..., 1985]. Дата, когда степень покрытия снежным покровом становилась больше/меньше 50 %, считалась датой установления/разрушения устойчивого СП. Учитывались также климатические особенности залегания СП на юге России, в странах Балтии и на западе Украины, для которых характерны оттепели с последующим установлением СП. Если период оттепели был продолжительнее последующего периода со снежным покровом (при более чем 50%-м покрытии видимой площади), то дата наступления оттепели считалась датой разрушения устойчивого СП (в противном случае временное разрушение СП в результате оттепели не учитывалось). При формировании многолетних рядов сроков установления снежного покрова был принят следующий критерий: продолжительность его непрерывного залегания должна составлять не менее 10 дней (возможное разрушение СП в течение зимы в учет не принималось). Этот критерий отличается от принятого в практике метеорологических наблюдений [Наставление..., 1985], но представляется разумным с точки зрения возможного воздействия аномалий СП в период его установления/разрушения на тепло- и влагообмен между подстилающей поверхностью и атмосферой.

На основе рядов сроков установления СП были получены многолетние ряды площадей СП на периоды его установления и разрушения – 1-я, 2-я и 3-я декады октября и апреля соответственно. Для этого данные по срокам установления/разрушения снежного покрова были интерполированы в регулярную сетку градусов (по территории исследования) с шагом 5° , затем рассчитывалась доля ячеек со снежным покровом в разные декады октября. Ряды площадей распространения СП (в %) были рассчитаны как для территории России в целом, так и для крупных регионов – ЕТР ($30\text{--}60^\circ$ в.д.), Западная Сибирь ($60\text{--}100^\circ$ в.д.),

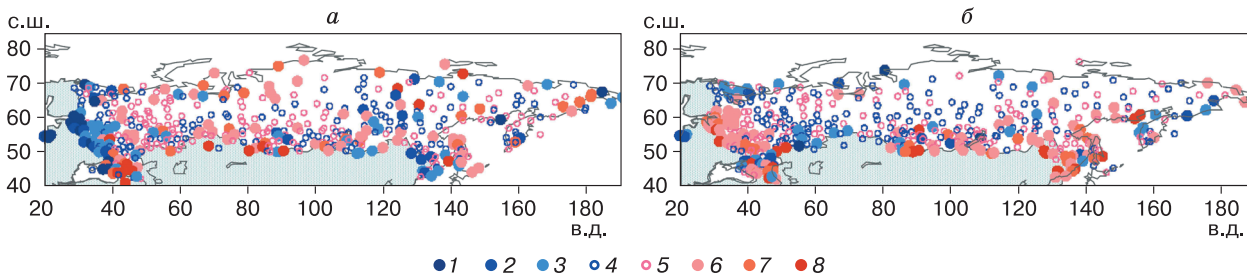


Рис. 2. Тренды максимальной за март толщины снежного покрова (% за 10 лет) в 1979–1995 гг. (а) и 1996–2013 гг. (б) по данным наблюдений на метеостанциях.

1 – менее –60 %; 2 – от –60 до –40 %; 3 – от –40 до –20 %; 4 – от –20 до 0 %; 5 – от 0 до 20 %; 6 – от 20 до 40 %; 7 – от 40 до 60 %; 8 – более 60 %.

Восточная Сибирь и Дальний Восток (100–180° в.д.). При изучении многолетних тенденций сроков установления/разрушения СП и их связи с современным глобальным потеплением определялось их изменение в последние десятилетия по сравнению со средними значениями за 1950–1980 гг.

Для выявления региональной структуры аккумуляции снега данные о максимальной толщине СП анализировались путем разложения на ЭОФ, которое проводилось с применением пакета программ STATISTICA, version 6 [Statsoft, 2017]. На основе анализа ЭОФ1 и ЭОФ2 выделены районы, однородные по характеру колебаний исследуемого параметра. Затем для изучения вариаций

многолетнего хода снежной аккумуляции и получения оценок их связи с современным глобальным потеплением рассчитывался средний многолетний ход толщины снега в выделенных районах и выполнялся корреляционный анализ с использованием пошаговой множественной регрессии. Многолетние изменения средней для севера Евразии температуры зимы, а также середины осени и начала весны рассчитывались по данным средних месячных значений температуры приземного воздуха из архива CRUTEM 4 [CRUTEM, 2018] для территории 40–75° с.ш., 20–180° в.д. за 1950–2013 гг.

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ЗИМНЕЙ АККУМУЛЯЦИИ СНЕГА И ИХ СВЯЗЬ С ИЗМЕНЕНИЯМИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИЗЕМНОГО ВОЗДУХА НА СЕВЕРЕ ЕВРАЗИИ

Основные закономерности региональной и частотно-временной структуры толщины СП иллюстрирует положение очагов ЭОФ1 и ЭОФ2 (см. рис. 2, а), внутри которых многолетние колебания толщины снега достаточно тесно связаны (минимальный коэффициент корреляции –0.5 наблюдается между точками на границе в центре очага). Доля изменчивости, описываемой соответствующими модами (или главными компонентами ГК1 и ГК2), в сумме составляет 30 % (ЭОФ1 характеризует 19 % общей дисперсии, ЭОФ2 – 11 %), которая на первый взгляд кажется невысокой, соответствует доле площадей основных очагов, где изменчивость толщины снега описывается этими модами более чем на 50 %. Соответственно, ГК1 и ГК2 объясняют около 80 и 10 % изменчивости средней толщины СП по исследуемой территории. Таким образом, основная доля изменчивости толщины снега на данной территории связана с областью, соответствующей ЭОФ1 (рис. 3, а).

Согласно распределению очагов ЭОФ1 и ЭОФ2, территория севернее 55° с.ш. может быть разделена на три сектора: центральный (50–120° в.д.), восточный (120–180° в.д.) и западный (30–50° в.д.). Западный сектор недостаточно четко выявляется анализом ЭОФ в масштабе территории России, что связано с его ограниченностью с запада, но его выделение обосновано в работе [Ророга, 2007], где подобный анализ включал территории стран Балтии, а также Белоруссии и Украины. Выделение трех указанных районов на основе анализа ЭОФ предполагает, что в пределах выделенных районов-секторов колебания высоты СП имеют достаточно однородный характер. Это позволяет получить характерный многолетний ход этого параметра за 1950–2013 гг. для каждого из районов путем осреднения рядов в узлах сетки, попадающих в выделенные секторы (см. рис. 3, б). В свою очередь, это позволяет выявить основные тенденции высоты снега к концу зимы для исследуемого периода.

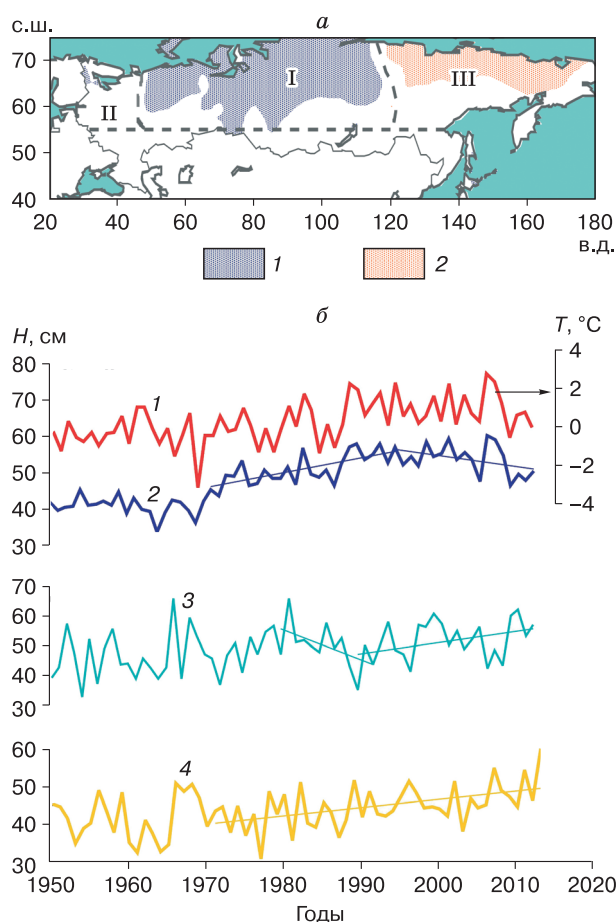


Рис. 3. Региональная структура колебаний толщины снежного покрова H (а) и его многолетние изменения на территории России в 1950–2013 гг. (б).

а: I–III – районы, однородные по характеру колебаний максимальной за март толщины снежного покрова; 1, 2 – распределение очагов ЭОФ1 и ЭОФ2 соответственно; показаны области корреляции ≥ 0.5 между толщиной снежного покрова и ГК1, ГК2; б: 1 – температура приземного воздуха (T , °C) в среднем по территории Северной Евразии (40–75° с.ш., 20–180° в.д.) за декабрь–март; 2–4 – толщина снежного покрова (H , см) в марте севернее 55° с.ш. в среднем по секторам 45–120° в.д. (2), 30–45° в.д. (3), 120–180° в.д. (4).

дуемой территории и их связи с современными изменениями климата, в частности, с ходом зимней температуры на севере Евразии. Отметим, что корреляция между рядами толщины снежного покрова, осредненными по указанным секторам, отсутствует. В то же время связанность колебаний этого параметра внутри каждого сектора выражается статистически значимой (на уровне $p \leq 0.05$) корреляцией между центральными областями и окраинами ($r \approx 0.3-0.4$).

Рассмотрим региональные изменения толщины СП, основываясь на осредненных многолетних рядах для выделенных районов (см. рис. 3, б). Центральный сектор, объединяющий Сибирь и северо-восток ЕТР, отличается наиболее существенным трендом с начала современного потепления – 10 %/10 лет, относительно среднего за 1950–1970 гг. (и 50%-м вкладом в общую дисперсию за 1971–1995 гг.), а также тесной связью со средней по Северной Евразии зимней (декабрь–март) температурой воздуха. Отметим, что до 1970-х гг. связь с температурой отсутствует, а в 1971–2013 гг. она достигает 0.82. На рис. 3, б видно, что в данный период изменения температуры и толщины СП в этом обширном регионе практически синхронны в отношении как межгодовых, высокочастотных, колебаний, так и низкочастотных, т. е. тренда. Отметим, что с середины 1990-х гг. рост толщины снега (как и температуры) сменяется противоположной тенденцией, т. е. его уменьшением со скоростью около 7 %/10 лет.

На большей части северной половины ЕТР, в западном секторе, зафиксирован рост толщины СП до начала 1980-х гг. и затем, до середины 1990-х, его резкое снижение со скоростью 22 %/10 лет. Высокий (29 %) вклад линейного уменьшения толщины снега (тренда) в общую изменчивость свидетельствует о его значимости, несмотря на существенные межгодовые колебания. С середины 1990-х гг. тенденция меняется, хотя скорость роста толщины снега невелика – 8 %/10 лет. В среднем за 1994–2013 гг. толщина СП близка к среднему за весь период с начала современного потепления (1971–2013 гг.). На фоне общего роста снегонакопления на северо-западе ЕТР его межгодовые вариации находятся в противофазе с колебаниями в центральном секторе, а также с температурой. С середины 1980-х гг. корреляция колебаний толщины снега в этом регионе со средней температурой воздуха на севере Евразии в зимний период (декабрь–март), а также с колебаниями толщины снега в центральном секторе составляет -0.58 (в предшествующие 35 лет связь отсутствует).

В восточном секторе, объединяющем север Якутии и Чукотку, тренд толщины СП около 5 %/10 лет на фоне существенной межгодовой изменчивости наблюдается с середины 1980-х гг.

Корреляция со средней температурой воздуха на севере Евразии в зимний период (декабрь–март), так же как с колебаниями толщины снега в других секторах, за длительные периоды отсутствует, но, несмотря на удаленность от ЕТР, отмечается чередование периодов синхронной и асинхронной связи между снегонакоплением на западе ЕТР и северо-востоке. По-видимому, эти особенности изменений толщины СП в выделенных районах и их реакция на потепление связаны с определенными механизмами крупномасштабной циркуляции и отражают распределение планетарных волн в циркуляции атмосферы внетропической зоны Северного полушария.

В целом по северу Евразии (севернее 55° с.ш.) изменения снегонакопления в 1971–2013 гг. (по сравнению с 1951–1970 гг.) выражаются увеличением средней толщины СП в конце зимы на 17 % (7 см). Наибольшие изменения около 26 % (11 см) происходили в Сибири и на северо-востоке ЕТР, на северо-западе ЕТР и на Дальнем Востоке они менее заметны – 10 % (5 см) и 7 % (3 см). Отмеченные региональные различия, очевидно, связаны с особенностями крупномасштабной атмосферной циркуляции, в частности, с усилением зональной циркуляции, описываемым индексами Арктического колебания и Североатлантического колебания (NAO). С положительной фазой NAO связывается период интенсивного потепления 1971–1995 гг., вызванного усилением циклоничности на северо-западе Европы и в Сибири и проникновением атлантического воздуха на восток вплоть до Енисея [Бардин и др., 2015; Clark et al., 1999]. На северо-западе ЕТР эти процессы приводят к частым оттепелям и снеготаянию, в то время как на северо-востоке ЕТР и в Сибири сохраняется фон отрицательных температур, способствующий непрерывному снегонакоплению. В Якутии и на Чукотке формирование СП связано с Северо-тихоокеанскими центрами действия атмосферы, Алеутской депрессией и Гонолульским антициклоном. Их положительные аномалии, вызванные усилением зонального переноса в масштабе полушария, сопровождаются выносом арктического воздуха и сокращением снежной аккумуляции на северо-востоке Евразии. Поэтому рост толщины снежного покрова в восточном секторе главным образом происходит с середины 1990-х гг., в период ослабления зональной циркуляции во внетропической зоне Северного полушария и связанной с ним паузы в потеплении.

Рассмотрим, как отмеченные изменения крупномасштабной циркуляции атмосферы проявляются в изменениях толщины снега по территории России. Чтобы выявить эти тенденции, сравним пространственное распределение трендов толщины СП на территории России в период резкого потепления в 1979–1995 гг. и в период 1996–

2013 гг., когда в ходе температуры приземного воздуха в среднем по Северной Евразии (за декабрь–март) наметился слабый отрицательный тренд (см. рис. 2, б). Наиболее четко смена тенденций проявляется на западе и юго-западе ЕТР в широтной зоне 45–60° с.ш. – сокращение толщины снега в диапазоне 20–180 %/10 лет до середины 1990-х гг. сменяется таким же ростом в 1996–2013 гг. Заметное изменение тенденций на рубеже середины 1990-х гг., но противоположного знака, также выявляется в Сибири и на северо-востоке ЕТР. Наиболее выражен (20–80 %/10 лет) тренд толщины СП в 1979–1995 гг. на севере и юге Сибири, а также на северо-востоке ЕТР (см. рис. 2).

Хотя уменьшение толщины снега в 1996–2013 гг. (на рис. 2, б оно выражается в явном преимуществе синих значков над розовыми) не столь существенное по сравнению с его ростом в предшествующие 17 лет и в большей степени проявляется вдоль арктического побережья и на юге Западной Сибири, в целом территориальное распределение показанных на рис. 2 тенденций соответствует той структуре, которая была установлена для периода 1950–2001 гг. [Попова, 2007], а также для периода 1950–2013 гг. (см. рис. 1, а).

В ряде регионов восточнее 120° в.д. также наблюдается смена знака трендов толщины СП на рубеже середины 1990-х гг. Наиболее четко она проявляется в Хабаровском крае и на юге Приморья, а также на Чукотке. В первом случае изменения соответствуют тому, что наблюдается на западе ЕТР: сокращение СП в 1979–1995 гг. и рост в 1996–2013 гг. Такие же изменения можно отметить на восточном окончании Чукотки и менее выраженные – в среднем по югу Якутии. На юго-востоке Чукотки, на Тихоокеанском побережье, направленность трендов и их смена соответствуют изменениям на севере Сибири, т. е. росту аккумуляции снега в 1979–1995 гг. и уменьшению в 1996–2013 гг.

ИЗМЕНЕНИЯ СРОКОВ УСТАНОВЛЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ СНЕЖНОГО ПОКРОВА И ПЛОЩАДИ ЕГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В ПЕРЕХОДНЫЕ СЕЗОНЫ

Установление СП, так же как и его разрушение, тесно связано с температурой воздуха в переходные сезоны [Brown, Mote, 2009; Ye, Lau, 2016], поэтому распределение средних многолетних сроков этих явлений по территории имеет зональный характер [Климат..., 2001], который несколько нарушается под влиянием таких факторов, как близость к Атлантике, орография и региональные особенности распределения осадков. Разница в средних сроках установления/разрушения СП на территории России более 3 месяцев – от середины

февраля на юге до середины мая на Крайнем Севере. Величина стандартного отклонения в среднем по территории составляет около 10 и 15 дней для сроков установления и разрушения СП соответственно. Более существенная изменчивость, что характерно для обоих параметров, наблюдается на ЕТР, вдоль Тихоокеанского побережья и вблизи южных границ России [Попова, Полякова, 2013; Попова и др., 2014].

Анализ многолетних колебаний сроков установления СП не выявляет периодов продолжительных направленных тенденций, которые могут быть связаны с современным потеплением климата с начала 1970-х гг., за исключением последних 10–15 лет. В многолетних изменениях площадей распространения СП в середине октября в крупных регионах России (рис. 4, а) тренды не выявляются ни в рассматриваемый период в целом, ни с начала современного глобального потепления (с 1970-х гг.). Это объясняется тем, что рост температуры воздуха на севере Евразии в осенний сезон начался только в конце 1990-х гг. (см. рис. 4, в). В 1950–1980-х гг. в середине осени (конец 2-й декады октября) наблюдалась тенденция к похолоданию, а в 1990–2013 гг. рост температуры со скоростью 1.4 °С/10 лет. Очевидно, что эти периоды отражаются в изменениях площадей распространения СП в середине осени, корреляция между этим параметром для территории России в целом и средней температурой на севере Евразии в октябре – около –0.6.

На рис. 4, а видно, что с начала 1950-х до конца 1970-х гг. на ЕТР, в Западной Сибири, а также в среднем по России наблюдался устойчивый тренд к увеличению площади СП – около 4 %/10 лет, составляющий 25 % от общей дисперсии. Вторая половина 1970-х гг. в этих регионах стала периодом с максимальными значениями площади распространения СП в середине осени (50–70 % территории России). К началу 1980-х гг. после резкого уменьшения на ЕТР и в Западной Сибири выявляется наиболее стабильный 15-летний период с колебаниями площадей СП около многолетнего среднего значения.

Существенные аномалии наблюдались также в начале 1990-х и 2000-х гг. на ЕТР и в конце 1990-х – начале 2000-х в Западной Сибири, после чего во всех регионах происходит сокращение площади СП. В целом по России скорость этих изменений достигает –6 %/10 лет при 32%-м вкладе в общую дисперсию. Следует отметить, что связанность многолетних колебаний площадей СП убывает с запада на восток, если между ЕТР и Западной Сибирью корреляция этих параметров составляет 0.44, то для Восточной Сибири и Дальнего Востока связь с Западной Сибирью составляет 0.31.

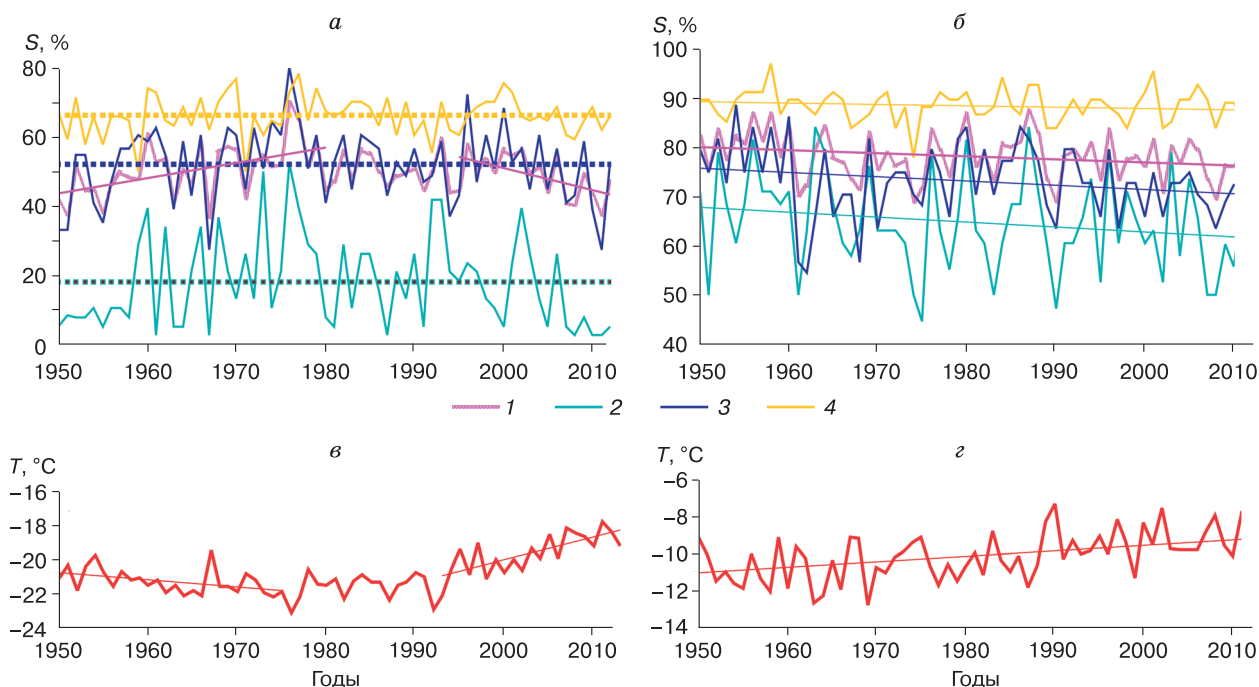


Рис. 4. Изменение площади снежного покрова S (а, б) и температуры воздуха T на севере Евразии (в, г) в середине осеннего и весеннего сезонов.

Площадь снежного покрова к концу 2-й декады октября (а) и 1-й декады апреля (б) на территории России в целом (1), на ЕТР (2), в Западной Сибири (3), в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке (4). Температура приземного воздуха в среднем по территории Северной Евразии (40–75° с.ш., 20–180° в.д.) в октябре (в) и марте (г).

Поле распределения аномалий сроков установления СП (см. рис. 4, а) в 2000–2013 гг. (по сравнению с 1950–1970 гг.) показывает, что сдвиги сроков установления на более поздние охватывают практически всю территорию, но существенные изменения, сопоставимые с величиной стандартного отклонения, наблюдаются в основном на ЕТР и в Западной Сибири с максимальными значениями более 10 дней в районе Южного Урала и средней Волги. На остальной территории близкие по величине сдвиги проявляются достаточно локально, например, на Крайнем Севере и Камчатке. Незначительные изменения в сторону более ран-

него установления СП отмечаются на восточной половине территории, наиболее протяженная область таких изменений охватывает Приморье и Хабаровский край.

Наиболее заметные сдвиги сроков разрушения снежного покрова зафиксированы в самом теплом за период инструментальных наблюдений двадцатилетии (1989–2008 гг.) по сравнению со средними за сравнительно стабильный период 1951–1970 гг. (рис. 5, б). Сокращение сроков разрушения СП затрагивает юго-западную половину Европейской территории, а также большую часть Восточной Сибири и Дальнего Востока, но суще-

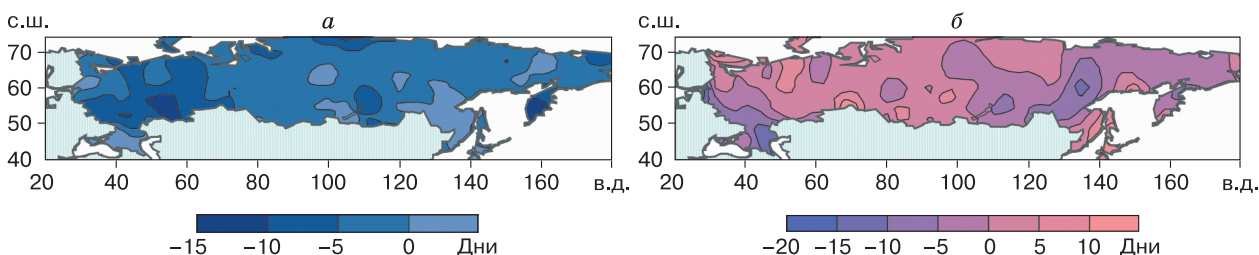


Рис. 5. Изменение сроков установления (а) и разрушения (б) устойчивого снежного покрова в период современного потепления.

Разница в сроках, дни от начала года, в среднем за 2001–2013 гг. по сравнению со средними за 1950–1970 гг. (а) и в 1989–2008 гг. по сравнению со средними за 1951–1970 гг. (б).

ственные (статистически значимые на уровне 5 %) сдвиги 5–10 дней отмечаются по западной границе ЕТР, в Центральной Черноземье, в Прикаспии, Забайкалье, Хабаровском крае и на востоке Якутии. Наблюдается и противоположная тенденция, запаздывание сроков разрушения СП распространяется на большую часть Западной Сибири и северо-восток ЕТР, Западную и Центральную Сибирь, хотя лишь местами, на юге Западной Сибири и северо-востоке ЕТР, сдвиги превышают 5 дней. Существенный (более 10 дней) сдвиг сроков разрушения СП на более поздние отмечается в Приморье и на Сахалине.

Сокращение площади СП в начале апреля наблюдается с 1960-х гг. во всех регионах (см. рис. 4, б). Происходит оно на фоне высокой межгодовой изменчивости, отсюда незначительный вклад этих тенденций в общую изменчивость – от 6 % в целом для России до 2 % в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке. Наиболее заметное уменьшение площади снега в середине весны (6 % в 1950–2013 гг.) характерно для ЕТР и Западной Сибири – 7 и 6 % соответственно, в целом по России – 4 %, в восточных регионах – всего 2 %. Очевидно, что эта тенденция обусловлена существенным потеплением в начале весеннего сезона – тренд температуры на севере Евразии в марте за 1950–2013 гг. достигает 2.2 °С (см. рис. 4, з). В то же время связь между изменениями температуры (без тренда) в целом по России ниже по сравнению с этим показателем для середины осени – около –0.5. В основном это связано с противоположной тенденцией, т. е. с ростом площади снега в Западной Сибири с конца 1960-х до конца 1980-х гг. По-видимому, это может объясняться интенсивным ростом аккумуляции снега в этот период (см. рис. 3, б) и, соответственно, более медленным его разрушением в условиях, когда изменения температуры в марте еще не были столь значительными, как в 1990–2000-х гг. Отметим достаточно высокую связь изменений площади снега между ЕТР и Западной Сибирью (коэффициент корреляции 0.5) и достаточно низкую, как и в период установления СП, между Западной Сибирью и восточными регионами (0.34).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По данным наблюдений на 600 метеостанциях, расположенных на территории России (1950–2013 гг.), проведен анализ тенденций основных параметров снежного покрова в условиях современных глобальных изменений климата, включая период резкого потепления 1970–1990-х гг. и паузу в потеплении с середины 1990-х до 2013 г. Анализ трендов толщины и площади распространения СП в середине осени и весны, а также аномалий сроков его установления/разрушения позволяет

выявить основные закономерности регионального распределения тенденций этих параметров и их связь с температурой воздуха на севере Евразии.

Районирование изменений максимальной толщины СП в марте, выполненное посредством анализа эмпирических ортогональных функций на основе пространственных структур ЭОФ1 и ЭОФ2 позволило установить районы, однородные по характеру колебаний этого параметра, и выявить особенности многолетнего хода зимней аккумуляции снега на территории России в период современного потепления. В пределах рассматриваемой территории севернее 55° с.ш. выделены три района-сектора: 30–45° в.д., 45–120° в.д. и 120–180° в.д. Средний многолетний ход максимальной толщины СП в марте, рассчитанный для каждого из выделенных районов, позволяет говорить о типичных тенденциях этого параметра для соответствующих регионов России и его связи с современным глобальным потеплением. Центральный сектор (45–120° в.д.) отличается наибольшими величинами тренда в 1971–1995 гг. (10 %/10 лет) и изменениями толщины снега (26 %) к началу весны в 1971–2013 гг. по сравнению с 1951–1970 гг. Отличительной особенностью колебаний толщины СП в этом регионе является тесная корреляция с температурой приземного воздуха в среднем по Северной Евразии в декабре–марте (0.82) в 1971–2013 гг. Пауза в глобальном потеплении здесь сопровождается сокращением аккумуляции в 1995–2013 гг., хотя и менее существенным по сравнению с ее ростом в 1951–1970 гг. Отсюда увеличение толщины снега в Сибири и на северо-востоке ЕТР в среднем за 1971–2013 гг. относительно 1951–1970 гг. достигает 26 %.

На северо-западе ЕТР и на Дальнем Востоке зимняя аккумуляция снега в период современного глобального потепления также растет, но менее заметно – 10 и 7 %. При этом с середины 1980-х гг. на северо-западе ЕТР наблюдается отрицательная связь с температурой приземного воздуха в среднем по Северной Евразии в декабре–марте (–0.58). В восточном секторе, объединяющем север Якутии и Чукотку, с середины 1980-х гг. выявляется рост толщины СП (около 5 %/10 лет), особенно заметный с середины 1990-х гг. Связь с температурой, так же как и с колебаниями толщины снега в других секторах, за длительные периоды в этом регионе отсутствует.

Обобщая результаты анализа изменений снегонакопления на севере Евразии (севернее 55° с.ш.) и их связи с современным потеплением, отметим, что повышение зимней температуры в среднем в масштабе субконтинента на 1 °С в 1971–2013 гг. по сравнению с 1951–1970 гг. сопровождается увеличением средней толщины СП в конце зимы на 17 % (7 см). По территории этот параметр распределен неравномерно – наибольшие измене-

ния около 26 % (11 см) происходили в Сибири и на северо-востоке ЕТР, на северо-западе ЕТР и на Дальнем Востоке они менее заметны – 10 % (5 см) и 7 % (3 см). Такие региональные различия закономерны, если их рассматривать с точки зрения циркуляционных механизмов современного потепления на севере Евразии. В первую очередь это усиление зональной циркуляции внетропической зоны Северного полушария, описываемое индексами Арктического колебания и Североатлантического колебания, с положительной фазой которого связывается и период интенсивного потепления 1971–1995 гг., вызванного усилением циклоничности на северо-западе Европы [Henderson, Leathers, 2010] и в Сибири и проникновением атлантического воздуха на восток вплоть до Енисея [Бардин и др., 2015]. Но если на северо-западе ЕТР эти процессы приводят к частым оттепелям и снеготаянию, то на северо-востоке ЕТР и в Сибири смягчение зим проходит в основном на фоне отрицательных температур и непрерывного снегонакопления.

Смена тенденций зимней аккумуляции снега на рубеже середины 1990-х гг. (в период резкого потепления 1979–1995 гг. и в период слабого отрицательного тренда зимней температуры 1996–2013 гг.) достаточно четко проявляется в распределении толщины СП по территории России. Рост максимальной за март толщины снега на севере Сибири и северо-востоке ЕТР до 40–80 %/10 лет за 1979–1995 гг. и ее уменьшение на западе ЕТР (местами до 180 %) сменяются противоположными тенденциями с середины 1990-х гг. Оценки изменений толщины СП на территории России в 2001–2010 гг. по сравнению с 1966–2000 гг. [Осокин, Сосновский, 2014] подтверждают заключение о смене знака тенденций. Это не противоречит полученным ранее выводам о трендах характеристик СП в 1966–2010 гг. [Bulygina et al., 2011], но показывает, что сглаженные по времени и по территории оценки могут не учитывать изменение тенденций, способное влиять на водные ресурсы целых регионов.

Установленная связь снегонакопления с температурой позволяет сделать вывод, что уменьшение снегонакопления на северо-востоке ЕТР и севере Сибири в 1996–2013 гг. связано с теми же факторами, что и ослабление зональной циркуляции и рост повторяемости холодных зим. Одна из возможных причин формирования этих аномалий – сокращение площади арктического льда [Семенов, 2015; Petoukhov, Semenov, 2010]. В этом случае полученные результаты не подтверждают выводы об увеличении толщины СП на севере Сибири в результате сокращения площади ледяного покрова в Арктике, сделанные на основе модельных расчетов [Ghatak et al., 2012].

В многолетних колебаниях площади распространения снежного покрова в середине весны не выявляется трендов, связанных с паузой в потеплении или совпадающих с этим периодом, но тенденция к сокращению этой характеристики, связанная с потеплением, сохраняется на протяжении всего рассматриваемого периода на большей части территории России. Очевидно, что это результат существенного потепления в начале весеннего сезона: рост температуры на севере Евразии в марте за 1950–2013 гг. достигает 2.2 °С, хотя в целом за 1950–2013 гг. произошедшие изменения невелики – 2 % в Восточной Сибири и Дальнем Востоке, около 7 и 6 % на ЕТР и в Западной Сибири. Общие оценки сокращения площади СП, полученные для Северной Евразии в период снеготаяния 1970–1980-х гг. [Brown, Mote, 2009; Peng, 2013], несколько выше, что объясняется большей чувствительностью к потеплению североатлантического побережья и территорий вдоль южной границы СП.

Сокращение сроков разрушения снежного покрова в последние десятилетия охватывает юго-западную половину Европейской территории и большую часть Восточной Сибири, хотя заметные сдвиги (до 15 дней) отмечаются в основном по западной границе ЕТР, в Центральном Черноземье, Прикаспии, а также в Хабаровском крае и Примурье. Наблюдается и противоположная тенденция, запаздывание сроков разрушения СП, которое затрагивает часть Западной Сибири и северо-восток ЕТР, Западную и Центральную Сибирь. Существенные (более 10 дней) сдвиги сроков разрушения СП на более поздние отмечаются в Приморье и на Сахалине.

По сравнению с потеплением в начале весны рост температуры на севере Евразии в середине осени запаздывает примерно на три десятилетия. Отсюда в изменениях площади распространения СП в период его установления (в середине осени), так же как и сроков установления, не выявляется продолжительных устойчивых трендов. В 1970–1980-х гг., когда глобальное потепление уже набирало темпы, в середине осени на севере Евразии наблюдалась тенденция к похолоданию, которая отразилась в росте площади СП в 1950–1980 гг. Тенденция к сдвигу сроков установления СП на более поздние в середине осени выявляется только в последние 10–15 лет, когда осенняя температура демонстрировала непрерывный рост. Сдвиги сроков установления СП на более поздние в 2000–2013 гг. (по сравнению с 1950–1970 гг.) охватывают практически всю территорию, хотя заметные изменения наблюдаются в основном на ЕТР и в Западной Сибири, а локальные – на Крайнем Севере и Камчатке.

ВЫВОДЫ

Особенности современного потепления, в частности, резкий рост зимней температуры в 1970–1995 гг. и последующая пауза в потеплении, проявляются в многолетних изменениях снежного накопления. На фоне общего роста зимней аккумуляции снега на территории России в региональных тенденциях выявляются существенные различия, обусловленные как географическим положением, с которым в условиях наблюдаемого глобального потепления связан переход средних зимних температур к режиму частых оттепелей, так и крупномасштабной атмосферной циркуляцией. Рост максимальной за март толщины снега на севере Сибири и северо-востоке ЕТР до 70–80 % в 1979–1995 гг. и ее уменьшение на западе ЕТР, местами до 180 %, сменяются противоположными тенденциями с середины 1990-х гг. Корреляция толщины снежного покрова с температурой свидетельствует о том, что ее уменьшение на северо-востоке ЕТР и севере Сибири и рост на западе ЕТР в 1996–2013 гг. связаны с теми же циркуляционными факторами, что рост повторяемости холодных зим, т. е. с ослаблением зонального переноса. Сдвиг даты разрушения снежного покрова весной на более ранние сроки и соответствующее сокращение площади снежного покрова в середине весны на территории России совпадает с общей тенденцией глобального потепления, хотя масштабы изменений этих характеристик к началу 2000-х гг. не столь существенны по сравнению с темпами роста зимней аккумуляции снега. Заметное сокращение площади снежного покрова в середине осени, как и запаздывание сроков установления снежного покрова, соответствует росту температуры на севере Евразии в этот сезон и отмечается только в последние 10–15 лет.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-05-00555).

Литература

- Бардин М.Ю., Платова Т.В., Самохина О.Ф.** Особенности изменчивости циклонической активности умеренных широт Северного полушария, связанные с ведущими модами атмосферной циркуляции в Атлантико-Европейском секторе // *Фундам. и прикл. климатология*, 2015, т. 2, с. 14–40.
- Bardin, M.Y., Platova, T.Y., Samokhina, O.F., 2015. Variations in the cyclonic activity in the temperate latitudes of the Northern Hemisphere related to the major modes of atmospheric circulation in the Atlantic-European sector. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Klimatologiya* 2, 14–40.
- ВНИИГМИ–МЦД** [сайт]. – URL: <http://www.meteo.ru> (дата обращения: 21.03.2016).
- RIHMI – WDC, 2016. – URL: <http://www.meteo.ru> (submital date: 21.03.2016).
- Второй** оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М., ФГБУ НИЦ “Планета”, 2014, 58 с.
- The second Roshydromet assessment report on climate change and its consequences in the Russian Federation, 2014. General overview. FGBU NITs Planeta, Moscow, 58 pp. (in Russian)
- Груза Г.В., Ранькова Э.Я.** Колебания и изменения климата на территории России // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*, 2003, т. 39, № 2, с. 66–185.
- Gruza, G.V., Rankova, E.Y., 2003. Fluctuations and variations of climate over the territory of Russia, *RAS Bulletin. Fizika Atmosfery i Okeana* 39 (2), 66–185.
- Китаев Л.М., Разуваев В.Н., Мартуганов Р.А.** Пространственные особенности межгодовых изменений взаимодействия полей параметров климата и снежного покрова севера Евразии // *Криосфера Земли*, 2001, т. V, № 4, с. 84–91.
- Kitaev, L.M., Razuvaev, V.N., Martuganov, R.A., 2001. Spatial regularities of annual changes in the interaction between climate parameter fields and the snow cover of northern Eurasia. *Earth's Cryosphere* V (4), 84–91.
- Климат России** / Под ред. Н.В. Кобышевой. СПб., Гидрометеоздат, 2001, 655 с.
- Kobysheva, N.V. (Ed.), 2001. *The Climate of Russia*. Gidrometeoizdat, St. Petersburg, 655 pp. (in Russian)
- Мохов И.И., Семенов В.А., Хон В.Ч., Погарский Ф.А.** Изменения распространения морских льдов в Арктике и связанные с ними климатические эффекты: диагностика и моделирование // *Лед и снег*, 2013, т. 53, № 2, с. 53–62.
- Mokhov, I.I., Semenov, V.A., Khon, V.Ch., Pogarsky, F.A., 2013. Change of sea ice content in the Arctic and the associated climatic effects: detection and simulation. *Led i Sneg* 53 (2), 53–62.
- Наставление** гидрометеорологическим станциям и постам. Часть 1. Метеорологические наблюдения на станциях. Л., Гидрометеоздат, 1985, вып. 3, 92 с.
- Instruction for Personnel of Hydrometeorological Stations and Observation Points, 1985. Part 1. Meteorological Observations at Stations. Issue 3. Gidrometeoizdat, Leningrad, 92 pp. (in Russian)
- Осокин Н.И., Сосновский А.В.** Пространственная и временная изменчивость толщины и плотности снежного покрова на территории России // *Лед и снег*, 2014, т. 54, № 4, с. 72–80, DOI: 10.15356/2076-6734-2014-4-72-80.
- Osokin, N.I., Sosnovsky, A.V., 2014. Spatial and temporal variability of depth and density of the snow cover in Russia. *Led i Sneg* 54 (4), 72–80, DOI: 10.15356/2076-6734-2014-4-72-80.
- Попова В.В., Мацковский В.В., Михайлов А.Ю.** Современные изменения климата суши внетропической зоны Северного полушария // *Вестн. МГУ. Сер. 5. География*, 2018, № 1, с. 3–13.
- Popova, V.V., Matskovsky, V.V., Mikhailov, A.Y., 2018. Current changes in the climate of the land of the off-tropical zone of the Northern Hemisphere. *Bulletin of Moscow University, series 5, geography*, No. 1, 3–13.
- Попова В.В., Полякова И.А.** Изменение сроков разрушения устойчивого снежного покрова на севере Евразии в 1936–2008 гг.: влияние глобального потепления и роль крупномасштабной атмосферной циркуляции // *Лед и снег*, 2013, т. 53, № 2, с. 29–40.
- Popova, V.V., Polyakova, I.A., 2013. Change of stable snow cover destruction dates in Northern Eurasia, 1936–2008: impact of global warming and the role of large-scale atmospheric circulation. *Led i Sneg* 53 (2), 29–40.
- Попова В.В., Ширяева А.В., Морозова П.А.** Сроки установления снежного покрова на севере Евразии: прямые и обратные связи с крупномасштабной атмосферной циркуляцией // *Лед и снег*, 2014, т. 54, № 3, с. 39–49.
- Popova, V.V., Shiryayeva, A.V., Morozova, P.A., 2014. Snow cover setting-up dates in the north of Eurasia: relations and feedback to the macro-scale atmospheric circulation. *Led i Sneg* 54 (3), 39–49.

- Семенов В.А.** Колебания современного климата, вызванные обратными связями в системе атмосфера–полярные льды–океан // *Фундам. и прикл. климатология*, 2015, № 1, с. 232–248.
- Seменов, V.A., 2015. Fluctuations of the modern climate caused by feedbacks in the atmosphere–polar ice–ocean. *Fundamental and Applied Climatology*, No. 1, 232–248.
- Шмакин А.Б.** Климатические характеристики снежного покрова Северной Евразии и их изменения в последние десятилетия // *Лед и снег*, 2010, т. 50, № 1, с. 43–58.
- Shmakin, A.B., 2010. The climatic characteristics of the snow cover of Northern Eurasia and their changes over the recent decades. *Led i Sneg* 50 (1), 43–58.
- Brown, R.D., Derksen, C.** Is Eurasian October snow cover extent increasing? // *Environ. Res. Lett.*, 2013, No. 8, DOI: 10.1088/1748-9326/8/2/024006.
- Brown, R.D., Mote, P.W.** The response of Northern Hemisphere snow cover to a changing climate // *J. Climate*, 2009, vol. 22, No. 8, p. 2124–2145.
- Brown, R.D., Robinson, D.A.** Northern Hemisphere spring snow cover variability and change over 1922–2010 including an assessment of uncertainty // *The Cryosphere*, 2011, vol. 5, p. 219–229, DOI: 10.5194/tc-5-219-2011.
- Bulygina, O., Groisman, P., Razuvaev, V., Korshunova, N.** Changes in snow cover over Northern Eurasia since 1966 // *Environ. Res. Lett.*, 2011, No. 6, p. 1–10, DOI: 10.1088/1748-9326/6/4/045204.
- Clark, M.P., Serreze, M.C., Robinson, D.A.** Atmospheric controls on Eurasian snow extent // *Intern. J. Climatol.*, 1999, No. 19, p. 27–40.
- Cohen, J.L., Furtado, J.C., Barlow, M.A., Alexeev, V.A., Cherry, J.E.** Arctic warming, increasing snow cover and widespread boreal winter cooling // *Environ. Res. Lett.*, 2012, vol. 7, 014007, DOI: 10.1088/1748-9326/7/1/014007.
- CRUTEM** [сайт]. – URL: www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature (дата обращения: 20.03.2018).
- England, M.H., McGregor, S., Spencer, P., et al.** Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus // *Nature Climate Change*, 2014, vol. 4, March. – URL: www.nature.com/natureclimatechange.
- IPCC.** Climate change 2013: The Physical Science basis // Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.). Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, U.K. New York, Cambridge Univ. Press, 2013, 1535 p.
- Goldensoftware** [сайт]. – URL: www.goldensoftware.com/newsletter/issue71-surfer-gridding-methods-part1 (дата обращения: 20.02.2017).
- Ghatak, D., Deser, C., Frei, A., Gong, G., Phillips, A., Robinson, D.A., Stroeve, J.** Simulated Siberian snow cover response to observed Arctic sea ice loss, 1979–2008 // *J. Geophys. Res.*, 2012, No. 117, D23108, DOI: 10.1029/2012JD018047.
- Henderson, G., Leathers, D.** European snow cover extent variability and associations with atmospheric forcings // *Intern. J. Climatol.*, 2010, vol. 30, p. 1440–1451, DOI: 10.1002/joc.1990.
- Peng, S., Piao, S., Ciais, P., Friedlingstein, P., Zhou, L., Wang, T.** Change in snow phenology and its potential feedback to temperature in the Northern Hemisphere over the last three decades *Environ. Res. Letters*, 2013, No. 8, DOI: 10.1088/1748-9326/8/1/014008.
- Petoukhov, V., Semenov, V.A.** A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents // *J. Geophys. Res. – Atmospheres*, 2010, vol. 115, D21111, DOI: 10.1029/2009JD013568.
- Popova, V.** Winter snow depth variability over northern Eurasia in relation to recent atmospheric circulation changes // *Intern. J. Climatol.*, 2007, vol. 27, p. 1721–1733.
- Semenov, V., Latif, M.** Nonlinear winter atmospheric circulation response to Arctic sea ice concentration anomalies for different periods during 1966–2012 // *Environ. Res. Lett.*, 2015, vol. 10, 054020, DOI: 10.1088/1748-9326/10/5/054020.
- Statsoft** [сайт]. – URL: https://www.statsoft.ru/resources/statistica_text_book.php (дата обращения: 12.03.2017).
- Trenberth, K.E., Fasullo, J.T.** An apparent hiatus in global warming? // *Earth's Future*, 2013, vol. 1, p. 9–32, DOI: 10.1002/2013EF000165.
- Wikipedia** [сайт]. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Global_warming_hiatus (дата обращения: 13.04.2018).
- Ye, K., Lau, N.C.** Influences of surface air temperature and atmospheric circulation on winter snow cover variability over Europe // *Intern. J. Climatol.*, 2016, vol. 10, DOI: 10.1002/joc.4868.

Поступила в редакцию
28 марта 2017 г.